



Sistemas de mantenimiento Planeación y control

**Duffuaa
Raouf
Dixon**

 **LIMUSA WILEY** 

SISTEMAS DE MANTENIMIENTO

Planeación y control

SALIH O. DUFFUAA

Department of Systems Engineering

King Fahd University of Petroleum and Minerals

A. RAOUF

GIK Institute of Engineering Sciences and Technology

JOHN DIXON CAMPBELL

International Center of Excellence—Maintenance Management

Coopers & Lybrand

 **LIMUSA WILEY** 

VERSIÓN AUTORIZADA EN ESPAÑOL DE LA OBRA
PUBLICADA EN INGLÉS CON EL TÍTULO:
**PLANNING AND CONTROL OF
MAINTENANCE SYSTEMS:**
MODELING AND ANALYSIS.

© JOHN WILEY & SONS, INC., NEW YORK, CHICHESTER,
BRISBANE, SINGAPORE, TORONTO AND WEINHEIM.

COLABORADOR EN LA TRADUCCIÓN:
FERNANDO ROBERTO PÉREZ VÁZQUEZ
INGENIERO MECÁNICO POR LA ESCUELA SUPERIOR
DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA DEL INSTITUTO
POLITÉCNICO NACIONAL. PROFESOR DE INGENIERÍA IN-
DUSTRIAL Y TECNOLOGÍA INFORMÁTICA EN UPIICSA.
PROFESOR DE LA MAESTRÍA EN CALIDAD EN LA UNIVER-
SIDAD LA SALLE, MÉXICO.

LA PRESENTACIÓN Y DISPOSICIÓN EN CONJUNTO DE

SISTEMAS DE MANTENIMIENTO
PLANEACIÓN Y CONTROL

SON PROPIEDAD DEL EDITOR. NINGUNA PARTE DE ESTA
OBRA PUEDE SER REPRODUCIDA O TRANSMITIDA, ME-
DIANTE NINGÚN SISTEMA O MÉTODO, ELECTRÓNICO O
MECÁNICO (INCLUYENDO EL FOTOCOPIADO, LA GRABACIÓN
O CUALQUIER SISTEMA DE RECUPERACIÓN Y ALMACENA-
MIENTO DE INFORMACIÓN), SIN CONSENTIMIENTO POR
ESCRITO DE JOHN WILEY & SONS, INC.

DERECHOS RESERVADOS:

© 2000, EDITORIAL LIMUSA, S.A. DE C.V.
GRUPO NORIEGA EDITORES
BALDERAS 95, México, D.F.
C.P. 06040

☎ (5)521-21-05

01(800) 7-06-91-00

☎ (5)512-29-03

✉ limusa@noriega.com.mx
www.noriega.com.mx

CANIEM Núm. 121

PRIMERA EDICIÓN

HECHO EN MÉXICO
ISBN 968-18-5918-9



A mi esposa Samia, mi hija Sarah y mis hijos Mohammed y Omar—S. O. Duffuaa

A mi esposa Razia—A. Raouf

A mi madre Mary, mi esposa Beverly y mi hija Natalie—J. D. Campbell

CONTENIDO

Prefacio	19
Reconocimientos	23
Acerca de los autores	25
Abreviaturas y acrónimos	27
1 Sistemas de mantenimiento	29
1.1. Introducción	29
1.2 Actividades de planeación	32
1.2.1 Filosofía del mantenimiento	32
1.2.2 Pronóstico de la carga de mantenimiento	34
1.2.3 Planeación de la capacidad de mantenimiento	35
1.2.4 Organización del mantenimiento	36
1.2.5 Programación del mantenimiento	36
1.3 Actividades de organización	37
1.3.1 Diseño del trabajo	38
1.3.2 Estándares de tiempo	38
1.3.3 Administración de proyectos	38
1.4 Actividades de control	39
1.4.1 Control de trabajos	39
1.4.2 Control de inventarios	39
1.4.3 Control de costos	40
1.4.4 Control de calidad	40
1.5 Administración orientada a la calidad y capacitación	40
1.6 Comportamiento humano	41
1.7 Terminología del mantenimiento	41

Resumen	44
Ejercicios	44
Bibliografía seleccionada	44
2 Operaciones y control del mantenimiento	47
2.1 Introducción	47
2.2 Ciclo de control del mantenimiento	48
2.3 Sistema de órdenes de trabajo de mantenimiento	50
2.3.1 Diseño de la orden de trabajo	51
2.3.2 Flujo del sistema de órdenes de trabajo	53
2.4 Conservación de registros	54
2.4.1 Tarjeta de trabajo (reporte)	54
2.4.2 Registro de la historia del equipo	56
2.5 Estructura del control de mantenimiento	57
2.5.1 Coordinación y planeación de las órdenes de trabajo	59
2.6 Procesamiento de órdenes de trabajo	61
2.7 Retroalimentación de información y acción correctiva	62
2.7.1 Control del trabajo	63
2.7.2 Control de costos	66
2.7.3 Control de calidad	67
2.7.4 Control de la condición de la planta	67
2.8 Diseño eficaz de un programa de mantenimiento	68
2.8.1 Mantenimiento planeado	68
2.8.2 Mantenimiento de emergencia	69
2.8.3 Mejora de la confiabilidad	69
2.8.4 Programa de administración del equipo	70
2.8.5 Reducción de costos	70
2.8.6 Capacitación y motivación de los empleados	71
Resumen	71
Ejercicios	72
Bibliografía seleccionada	73
3 Mantenimiento preventivo, conceptos, modelos y análisis	75
3.1 Introducción	75
3.2 Mantenimiento preventivo	77

3.3	Tecnologías de diagnóstico	82
3.3.1	Análisis de vibraciones	82
3.3.2	Análisis de lubricantes	83
3.3.3	Termografía	83
3.3.4	Ultrasonido	84
3.3.5	Monitoreo de efectos eléctricos	84
3.3.6	Penetrantes	84
3.4	Modelos para decisiones de reemplazo	84
3.5	Elementos del mantenimiento planeado	87
3.5.1	Administración del plan	88
3.5.2	Inventario de las instalaciones	88
3.5.3	Identificación del equipo	88
3.5.4	Registro de las instalaciones	88
3.5.5	Programa específico de mantenimiento	89
3.5.6	Especificación del trabajo	89
3.5.7	Programa de mantenimiento	89
3.5.8	Control del programa	89
3.6	Modelos matemáticos para políticas óptimas de mantenimiento preventivo	90
3.6.1	Reemplazo preventivo óptimo basado en la edad (política tipo I)	91
3.6.2	Método de la sección dorada	93
3.6.3	Reemplazo preventivo óptimo a intervalos constantes (política tipo II)	97
3.6.4	Extensiones de las políticas I y II	100
3.7	Modelos de inspección	101
3.7.1	Programa óptimo de inspección que minimiza el costo esperado para una sola máquina	102
3.7.2	Modelo de maximización de utilidades para la inspección de una sola máquina	104
3.7.3	Modelo de inspección para minimizar el costo esperado con reparaciones mínimas	105
3.7.4	Modelo para coordinar la inspección de un grupo de máquinas	107
3.8	Mantenimiento preventivo imperfecto	109
3.8.1	Suposiciones y notación de los modelos	110
3.8.2	Modelo del enfoque 1	111
3.8.3	Modelo del enfoque 2	113
3.8.4	Modelo del enfoque 3	114
3.9	Modelo de tiempo de demora	115
	Resumen	118

Ejercicios	118
Referencias	120
4 Medición del trabajo de mantenimiento	123
4.1 Introducción	123
4.2 Técnicas de la medición del trabajo	124
4.2.1 Estudio de tiempos	125
4.2.2 Procedimientos del estudio de tiempos	125
4.3 Muestreo de trabajo	130
4.3.1 Número de observaciones requeridas para un estudio de muestreo de trabajo	131
4.3.2 Planeación de un estudio de muestreo de trabajo	132
4.4 Gráficas de control	135
4.4.1 Introducción	135
4.4.2 Construcción de las gráficas de control	135
4.5 Sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos	136
4.5.1 Sistema MTM-2	137
4.5.2 Procedimientos para el establecimiento de un estándar predeterminado	138
4.6 Datos estándar	138
4.6.1 Introducción	138
4.6.2 Pasos para el desarrollo de datos estándar	139
4.7 Estimación	139
4.7.1 Introducción	140
4.7.2 Estimación comparativa (inserción)	141
4.7.3 Aplicación de la estimación comparativa	141
Resumen	143
Ejercicios	144
Bibliografía seleccionada	145
5 Pronósticos y planeación de la capacidad de mantenimiento	147
5.1 Introducción	147
5.2 Aspectos preliminares para los pronósticos	148
5.3 Técnicas para pronósticos cualitativos	149
5.4 Técnicas de pronósticos cuantitativos	151
5.4.1 Promedio móvil simple	151

5.4.2	Promedio móvil ponderado	152
5.4.3	Análisis de regresión	153
5.4.4	Suavización exponencial	156
5.4.5	Pronósticos estacionales	160
5.5	Análisis de errores	163
5.6	Pronósticos del trabajo de mantenimiento	164
5.7	Planeación de la capacidad de mantenimiento	166
5.8	Enfoques determinísticos para la planeación de la capacidad	167
5.8.1	Método del <i>tableau</i> heurístico	167
5.8.2	Programación lineal y entera para la planeación de la capacidad de mantenimiento	173
5.9	Técnicas estocásticas para la planeación de la capacidad	178
5.9.1	Modelos de líneas de espera	179
5.9.2	Simulación estocástica	182
5.10	Mantenimiento por contrato	186
	Resumen	187
	Ejercicios	187
	Referencias	190
6	Planeación y programación del mantenimiento	191
6.1	Introducción	191
6.2	Planeación	193
6.3	Programación	197
6.3.1	Elementos de una programación acertada	198
6.4	Sistema de prioridades para los trabajos de mantenimiento	199
6.5	Técnicas de programación	200
6.5.1	Enfoques de programación matemática para la programación del mantenimiento	202
6.5.2	Método de la ruta crítica	204
6.5.3	Técnica de revisión y evaluación de programas (PERT)	212
6.5.4	Enfoques de la programación entera y estocástica para la programación del mantenimiento	213

6.6	Mantenimiento con paro de la planta	222
6.6.1	Planeación del mantenimiento con paro de la planta	223
6.6.2	Programa del mantenimiento con paro de la planta	226
6.6.3	Informe del mantenimiento con paro de la planta	227
	Resumen	227
	Apéndice	228
	Ejercicios	229
	Referencias	230
7	Control de los materiales del mantenimiento	233
7.1	Introducción	233
7.2	Componentes del almacén de mantenimiento	234
7.2.1	Refacciones	234
7.2.2	Existencias del mantenimiento normal	234
7.2.3	Herramientas	235
7.3	Costos de los materiales de mantenimiento	235
7.3.1	Costo del artículo	235
7.3.2	Costo de tener en inventario el artículo	235
7.3.3	Costo del artículo en el momento de su salida	235
7.4	Procedimiento para el control del almacén de mantenimiento	237
7.4.1	Requisición	237
7.4.2	Control de inventarios	237
7.4.3	Artículos para almacenar	238
7.4.4	Análisis ABC	238
7.5	Sistemas de inventarios	239
7.5.1	Tamaño de lote económico	240
7.5.2	Nivel de reorden	243
7.5.3	Existencias de seguridad	244
7.5.4	Política eficaz para hacer pedidos	245
7.6	Políticas de ordenamiento para reparaciones	246
7.6.1	Vínculo de la demanda y la tasa de fallas	247
7.6.2	Estimación de las unidades de refacciones necesarias para el reemplazo en caso de fallas	247

7.7	Clasificación de las refacciones	250
7.7.1	Estrategias de pedidos de refacciones con base en su clasificación	250
7.7.2	Agrupamiento de refacciones de acuerdo con su grado crítico y costo	250
	Resumen	251
	Ejercicios	251
	Referencias	252
8	Control de la calidad del mantenimiento	253
8.1	Introducción	253
8.2	Responsabilidades de control de calidad	255
8.3	Programas de inspección y verificación	256
8.4	Control estadístico de procesos en el mantenimiento	257
8.4.1	Recopilación de datos	258
8.4.2	Lista de verificación	258
8.4.3	Histograma	260
8.4.4	Diagrama de causa y efecto (espina de pescado)	264
8.4.5	Gráfica de Pareto (análisis ABC)	267
8.4.6	Gráficas de control	268
8.4.7	Diagrama de dispersión	269
8.4.8	Análisis del modo de fallas y efectos	270
8.5	Control de calidad de los trabajos de mantenimiento	270
8.5.1	Factores relacionados con los procedimientos y las normas	274
8.5.2	Factores relacionados con el personal	275
8.5.3	Factores relacionados con los materiales	275
8.5.4	Factores relacionados con las herramientas y el equipo	275
8.6	Círculos de calidad	276
8.7	Vínculo del mantenimiento con la calidad	277
	Resumen	280
	Ejercicios	280
	Referencias	281

9	Productividad de los sistemas de mantenimiento	283
9.1	Introducción	283
9.2	Medidas de entrada	283
9.3	Medidas de salida	285
9.4	Medidas dentro del sistema	290
9.5	Índices de mantenimiento	291
9.5.1	Administración del mantenimiento	291
9.5.2	Eficacia del mantenimiento	293
9.5.3	Costos de mantenimiento	295
9.6	Comparaciones de medidas	297
9.7	Análisis de tendencias	298
	Resumen	298
	Ejercicios	298
	Referencias	299
10	Sistemas computarizados para la administración del mantenimiento	301
10.1	Introducción	301
10.2	Panorama de los sistemas computarizados para la administración del mantenimiento	302
10.3	Módulos del SCAM	304
10.3.1	Módulo para la administración del equipo	305
10.3.2	Módulo de control de órdenes de trabajo	306
10.3.3	Módulo de administración de las especialidades de mantenimiento	309
10.3.4	Módulo de suministro y control de materiales	309
10.3.5	Módulo de informes de desempeño	311
10.3.6	Informes de mantenimiento	314
10.4	Evaluación de los sistemas computarizados para la administración del mantenimiento	316
10.5	Evolución de los SCAM para un mantenimiento eficaz	319
	Resumen	324
	Ejercicios	324
	Referencias	325

11	Capacitación en mantenimiento	327
11.1	Introducción	327
11.2	Destreza	328
11.2.1	Niveles de destrezas	328
11.3	Actividades de la capacitación en mantenimiento	329
11.3.1	Política de capacitación	329
11.3.2	Evaluación de la situación actual	330
11.3.3	Análisis de necesidades	332
11.3.4	Diseño de un programa de capacitación	333
11.3.5	Implantación del programa de capacitación	334
11.3.6	Evaluación de la eficacia	335
	Resumen	336
	Ejercicios	336
	Bibliografía seleccionada	337
12	Auditoría del mantenimiento y mejora continua de los sistemas de mantenimiento	339
12.1	Introducción	339
12.2	Factores en el esquema de calificaciones de auditoría	340
12.2.1	Organización y personal	340
12.2.2	Productividad de la mano de obra	342
12.2.3	Capacitación gerencial	342
12.2.4	Capacitación del planificador	342
12.2.5	Capacitación de los técnicos	342
12.2.6	Motivación	342
12.2.7	Administración y control del presupuesto	343
12.2.8	Planeación y programación de las órdenes de trabajo	343
12.2.9	Instalaciones	343
12.2.10	Control de almacenes, materiales y herramientas	343
12.2.11	Mantenimiento preventivo e historia del equipo	343
12.2.12	Ingeniería y monitoreo de las condiciones	344
12.2.13	Medición del trabajo e incentivos	344
12.2.14	Sistema de información	344
12.3	Proceso jerárquico analítico para determinar el peso de los factores	345
12.4	Análisis ABC (gráfica de Pareto)	347

12.5	Análisis de causas fundamentales y acción correctiva posible	348
12.5.1	Organización y personal	349
12.5.2	Productividad de la mano de obra	349
12.5.3	Capacitación gerencial	349
12.5.4	Capacitación del planificador	350
12.5.5	Capacitación de los técnicos	350
12.5.6	Motivación	350
12.5.7	Administración y control del presupuesto	350
12.5.8	Planeación y programación de las órdenes de trabajo	351
12.5.9	Instalaciones	351
12.5.10	Control de almacenes, materiales y herramientas	351
12.5.11	Mantenimiento preventivo e historia del equipo	352
12.5.12	Ingeniería y monitoreo de las condiciones	352
12.5.13	Medición del trabajo e incentivos	352
12.5.14	Sistema de información	353
12.6	Estudio de caso para la mejora de la productividad del mantenimiento	353
	Resumen	355
	Ejercicios	355
	Referencias	355
13	Avances en los conceptos del mantenimiento	357
13.1	Introducción	357
13.2	Diseño de la factibilidad del mantenimiento	358
13.3	Mantenimiento centrado en la confiabilidad	360
13.4	Mantenimiento productivo total	363
13.4.1	Otorgamiento de facultades a los empleados	364
13.4.2	Administración del equipo	364
13.4.3	Implantación del MPT	367
13.5	<i>Benchmarking</i> y mantenimiento de clase mundial	368
13.6	Reingeniería de procesos en mantenimiento	370
13.6.1	Análisis de procesos	370
13.6.2	Costeo basado en las actividades	372
13.6.3	<i>Benchmarking</i> competitivo	372

Resumen	374
Ejercicios	374
Referencias	375
Apéndice A Repaso estadístico	377
Apéndice B Confiabilidad y análisis de fallas	407
Apéndice C Métodos de optimización	411
Índice	415

PREFACIO

Recientemente, las organizaciones manufactureras y de servicios se han visto sometidas a una enorme presión para ser competitivas y ofrecer una entrega oportuna de productos de calidad. Este nuevo entorno ha obligado a los gerentes y a los ingenieros a optimizar todos los sistemas que intervienen en sus organizaciones. El mantenimiento, como sistema, tiene una función clave en el logro de las metas y objetivos de la empresa. Contribuye a reducir los costos, minimizar el tiempo muerto de los equipos, mejorar la calidad, incrementar la productividad y contar con equipo confiable que sea seguro y esté bien configurado para lograr la entrega oportuna de las órdenes a los clientes. Además, un sistema de mantenimiento juega un papel importante en minimizar el costo del ciclo de vida de los equipos. Para alcanzar la tasa de rendimiento sobre la inversión que se ha fijado como meta, se deben maximizar la disponibilidad de la planta y la eficacia de los equipos.

Ya en el pasado se había tomado en cuenta el papel del mantenimiento en la rentabilidad a largo plazo de una organización; sin embargo, hasta hace poco se había dado muy poca atención a los modelos analíticos de los sistemas de mantenimiento. Aun cuando se reconoce la importancia del mantenimiento, no se ha desarrollado ni integrado en los programas de estudio de ingeniería y administración, como ha sido el caso de las materias de administración de proyectos y sistemas de producción. Los sistemas de producción y la administración de proyectos han sido estudiados extensamente, y la aplicación de las técnicas estadísticas y de optimización en estas áreas ha madurado a un mayor grado que en el campo del mantenimiento, posiblemente por las siguientes razones: 1) el mantenimiento ha sido considerado tradicionalmente como un mal necesario y, en el mejor de los casos, como un sistema impulsado por la producción; 2) el mantenimiento en una organización tiene relaciones complejas con otras funciones; y 3) el producto del mantenimiento es difícil de medir y cuantificar. Esta situación ha estado cambiando, y la última década ha sido testigo de un interés sin

precedentes en la investigación sobre el mantenimiento. El mantenimiento actualmente es considerado como un sistema integrado que puede ofrecer una ventaja considerable en la capacidad de una organización para ser competitiva y proporcionar productos o servicios de calidad.

El objetivo de este libro es presentar al mantenimiento como un sistema integrado que requiere planeación, diseño, ingeniería y control mediante el empleo de técnicas estadísticas y de optimización. Se hace énfasis en el empleo de técnicas cuantitativas para la operación, control y mejora de sistemas de mantenimiento. Esperamos que este esfuerzo ayude a que los sistemas de mantenimiento maduren como una disciplina que debe ser enseñada, investigada y practicada dentro de la industria, al igual que los demás campos de la ingeniería y la administración industrial. A continuación se presenta una breve descripción del contenido de los capítulos de este libro.

El capítulo 1 presenta al mantenimiento como un sistema. Se proporciona una breve descripción de las actividades de planeación, organización y control para dicho sistema. Se describen los elementos de cada actividad. Se describe brevemente el papel del comportamiento humano en un sistema de mantenimiento. Las observaciones finales indican la necesidad de emplear técnicas cuantitativas y modelos en el estudio de los sistemas de mantenimiento.

El capítulo 2 describe los sistemas de operación y control del mantenimiento. Se presenta en detalle la función del sistema de órdenes de trabajo. Se proporcionan guías para el diseño de una orden de trabajo eficaz. Se esbozan los componentes de un sistema de control de mantenimiento y la estructura en la que se basa. También se presentan la coordinación de las órdenes de trabajo, el control de la unidad de mantenimiento y una breve descripción de los informes y la retroalimentación necesarios.

El capítulo 3 presenta los conceptos del mantenimiento preventivo y la reparación de las descomposturas. Se explica el empleo de una tecnología de diagnóstico para reducir las reparaciones por descomposturas vigilando el rendimiento del equipo a una frecuencia óptima y modificando el programa de mantenimiento preventivo. Se presentan modelos matemáticos para determinar las políticas óptimas de mantenimiento preventivo y las frecuencias de inspección. Se explica el concepto del mantenimiento imperfecto y se proporcionan enfoques para desarrollar los modelos de sus efectos. Finalmente se ofrece una breve descripción de los modelos de tiempo de demora para determinar el mantenimiento preventivo.

El capítulo 4 muestra la necesidad de estándares de tiempo para los trabajos de mantenimiento, e incluye algunas de las técnicas que pueden aplicarse para el desarrollo de dichos estándares. Dichas técnicas incluyen la medición del trabajo, el muestreo del trabajo, los datos estándar y la estimación comparativa.

El capítulo 5 trata acerca del pronóstico de la carga de mantenimiento y la planeación de la capacidad. Se proporcionan las técnicas de pronósticos que son útiles para el pronóstico de la carga de mantenimiento. Se presentan enfoques heurísticos y modelos matemáticos para la planeación de la capacidad de mantenimiento y se demuestran mediante ejemplos tomados del mantenimiento.

El capítulo 6 presenta la planeación y la programación del mantenimiento. Se describen los elementos del proceso de planeación, así como la programación del mantenimiento. Se presentan algunas técnicas importantes de programación. Se incluye un caso de estudio que involucra un mantenimiento con paro de la planta.

El capítulo 7 describe el control de los materiales requeridos en el mantenimiento. Examina los componentes del almacén de mantenimiento y los procedimientos para el control del almacén. Se esboza una metodología para la estimación de los costos de los materiales y las refacciones. Se describen políticas eficaces para las órdenes de trabajo y el tamaño de lote económico. Se esbozan las políticas de las órdenes de trabajo para reparaciones y las estrategias de las órdenes de refacciones en donde se considera el costo de las mismas y qué tan críticas son para el sistema.

El capítulo 8 describe el control de calidad en el mantenimiento. Se detallan la organización, la responsabilidad y las funciones de calidad en un marco de trabajo de mantenimiento. Se presentan técnicas estadísticas para el control de procesos y para su mejora, y se demuestra su empleo en el mantenimiento.

El capítulo 9 presenta la productividad del sistema de mantenimiento. Ésta incluye una descripción de índices importantes sobre la eficacia del mantenimiento y un análisis de costos del mantenimiento. También se estudian los métodos para la evaluación de la productividad de un sistema de mantenimiento y su mejora continua.

El capítulo 10 considera las técnicas de sistemas computarizados para la administración del mantenimiento. Se presentan los requisitos de un sistema de información típico para la administración del mantenimiento, junto con los detalles necesarios para el diseño de dicho sistema. También se presenta una metodología que puede emplearse para evaluar diversos sistemas de información para la administración del mantenimiento.

El capítulo 11 describe la capacitación en el mantenimiento. Presenta un marco de trabajo para diseñar un programa de capacitación en mantenimiento. Se esbozan brevemente los medios para la evaluación de la eficacia de los programas de capacitación junto con una mejora continua de su eficacia.

El capítulo 12 estudia las auditorías de mantenimiento y la mejora continua de los sistemas de mantenimiento. Se describen los factores importantes en el mantenimiento que son necesarios para realizar un programa de

auditoría en mantenimiento. Se presenta un plan de mejora continua para el sistema de mantenimiento y se demuestra mediante un caso de estudio.

El capítulo 13 presenta diversos avances recientes en los conceptos de mantenimiento. Se incluyen el diseño para mantenibilidad, mantenimiento centrado en la confiabilidad, mantenimiento productivo total, *benchmarking* y reingeniería de los procesos de mantenimiento.

Cada capítulo incluye varios ejercicios, los cuales son de dos tipos. Las respuestas al primer tipo de ejercicios pueden encontrarse dentro del texto. Las respuestas al segundo tipo de ejercicios requieren cierta investigación.

Los autores han hecho todo lo posible para que este libro sea completo e independiente. Las técnicas y los modelos que se emplean en el texto se explican dentro del mismo; sin embargo, para quienes no hayan tomado un curso básico en probabilidad y estadística, se incluye un apéndice para cubrir este punto. El libro tiene un nivel matemático modesto. Los estudiantes de ingeniería y administración, los ingenieros y los administradores que ya están laborando profesionalmente y han concluido un curso introductorio en estadística no tendrán dificultad para entender casi todo su contenido. Nuestra intención es que los lectores entiendan la metodología relevante y cómo aplicarla; en ningún caso se pretende proporcionar un tratado completo de la teoría matemática.

Este libro es adecuado como texto o como referencia para los profesionales y los practicantes. Puede ser utilizado como texto en el nivel de licenciatura o en el primer año en los cursos de postgrado en mantenimiento. Será de gran interés para los estudiantes de ingeniería industrial, ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica y administración industrial. También puede emplearse como texto para cursos breves sobre mantenimiento en la industria.

RECONOCIMIENTOS

Quisiéramos expresar nuestro profundo agradecimiento a las organizaciones e individuos que contribuyeron para la realización de este libro. Un reconocimiento a la Universidad de Petróleo y Minerales del Rey Fahd, el Instituto GIK de Tecnología y Ciencias de la Ingeniería y a Coopers & Lybrand Consulting por permitirnos la utilización de sus instalaciones para poder terminar este proyecto.

El primer autor desea expresar su reconocimiento al generoso apoyo proporcionado por la Universidad de Petróleo y Minerales del Rey Fahd, en Dhahran, Arabia Saudita, bajo el proyecto SE/MNTMGT/188. Sin este apoyo no hubiera sido posible la terminación a tiempo de este proyecto.

Deseamos expresar nuestro aprecio a los esfuerzos de muchos colegas que leyeron los capítulos de este libro y ofrecieron valiosas sugerencias y comentarios, incluyendo a los doctores en ciencias M. Bendaya, S. Selim, M. Al-Haboubi, E. Boukas y S. A. M. Saeed. Apreciamos la asistencia editorial del Dr. B. Bremberg y del señor M. D. Aliyu, y agradecemos a S. M. Adil y M. Abdul Majid por la transcripción a máquina del manuscrito.

Finalmente, pero no menos importante, quisiéramos expresar nuestra gratitud a nuestras familias por su paciente apoyo, por todos los fines de semana que perdieron durante la preparación de este libro, incluyendo a la familia de Duffuaa, su esposa Samia y sus hijos Sarah, Mohammed y Omar; a la esposa de Raouf, y a la familia de Campbell, su madre Mary, su esposa Beverly y su hija Natalie.

SALIH O. DUFFUAA
ABDUL RAOUF
JOHN D. CAMPBELL

ACERCA DE LOS AUTORES

El Dr. S. O. Duffuaa es profesor de Investigación de Operaciones en el Departamento de Ingeniería de Sistemas, en la Universidad de Petróleo y Minerales del Rey Fahd, en Dhahran, Arabia Saudita. Obtuvo su licenciatura en ciencias (con honores) en Matemáticas y un diploma en Estadística en la Universidad de Kartum, en Sudán. Se doctoró en 1982 en Investigación de Operaciones en la Universidad de Texas, en Austin. Sus intereses actuales en investigación están en modelos matemáticos, programación de redes, optimización de sistemas de mantenimiento y control de calidad. Ha presentado muchos trabajos en estas áreas. Sus publicaciones han aparecido en *Journal of Optimization Theory and Applications*, *European Journal of Operational Research*, *Journal of the Operational Research Society*, *International Journal of Production Research*, *Applied Mathematical Modeling* y otras. Perteneció al consejo editorial del *International Journal of Industrial Engineering* y es editor del *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. Ha trabajado como consultor industrial en muchos proyectos relacionados con el mantenimiento y la calidad.

El Dr. Abdul Raouf es profesor y rector del Instituto GIK de Ciencias de Ingeniería y Tecnología en Topi, Paquistán. Entre 1984 y 1994 fue profesor de Ingeniería Industrial en el Departamento de Ingeniería de Sistemas en la Universidad de Petróleo y Minerales del Rey Fahd. De 1974 a 1983 fue miembro del cuerpo docente y presidente del Departamento de Ingeniería Industrial en la Universidad de Windsor, en Windsor, Ontario. Cuenta con registro profesional de ingeniero en la Provincia de Ontario. Participa activamente en la docencia, consultoría e investigación. Es miembro de los consejos editoriales de varias revistas internacionales líderes en su campo y es editor en jefe de la revista *Quality in Maintenance Engineering*. Ha sido consultor de muchas organizaciones internacionales en temas relacionados con ingeniería de mantenimiento e incremento de la productividad.

John D. Campbell es socio a cargo del Centro Internacional de Excelencia para la Administración del Mantenimiento en Coopers & Lybrand,

ubicado en Toronto. Obtuvo su grado en Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales en la Universidad de Toronto y, antes de trabajar para Coopers & Lybrand, ocupó varios puestos en las áreas de ingeniería de planta y administración en la industria de procesos y manufactura. Con frecuencia da conferencias sobre temas de administración del mantenimiento y ha sido consultor en diversos escenarios internacionales.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AMEF	Análisis de modo y efecto de fallas
CC	Control de calidad
CCR	Control de clasificación de las refacciones
CCTC	Control de calidad en toda la compañía
CEP	Control estadístico de procesos
CET	Capacitación en el trabajo
CPI	Índice de productividad compuesta
CPM	Método de la ruta crítica
DCE	Diagrama de causa y efecto
EGE	Eficacia global del equipo
EMV	Estimación de máxima verosimilitud
EOQ	Cantidad económica del pedido
FMECA	Modo de falla, efecto y grado crítico
FTA	Análisis de fallas mediante diagrama de árbol
IAM	Índice de auditoría de mantenimiento
IOC	Índice de comparación
JIT	Justo a tiempo
MBC	Mantenimiento basado en las condiciones
MCC	Mantenimiento centrado en la confiabilidad
MP	Mantenimiento preventivo
MPT	Mantenimiento productivo total
MTBF	Tiempo medio entre fallas
MTM	Medición del tiempo de los métodos
MTTR	Tiempo medio para la reparación
OEE	Eficacia global del equipo
PCM	Planeación de la capacidad de mantenimiento
PERT	Técnica de evaluación y revisión de programas

PJA	Proceso jerárquico analítico
PLC	Controladores lógicos programables
PM	Mantenimiento preventivo
PR	Tasa del proceso
QR	Tasa de calidad
RC	Razón de consistencia
SAD	Sistema de apoyo a las decisiones
SCADA	Sistemas de control supervisor y adquisición de datos
SCAM	Sistema computarizado para la administración del mantenimiento
SE	Sistema experto
STPM	Sistema de tiempos predeterminados de los movimientos
TMEF	Tiempo medio entre fallas
TMU	Unidades de medición del tiempo

1

SISTEMAS DE MANTENIMIENTO

1.1 INTRODUCCIÓN

La creciente competencia y la demanda por parte de los clientes de una entrega oportuna de productos de alta calidad han obligado a los fabricantes a adoptar la “automatización”. Esto ha dado lugar a inversiones muy grandes en equipo. Para alcanzar las tasas de rendimiento de la inversión fijadas, el equipo tiene que ser confiable y capaz de mantenerse en ese estado sin que se den paros de trabajo y reparaciones costosas. Muchas compañías manufactureras han implantado “programas justo a tiempo” (JIT), y están operando con inventarios de trabajo en proceso tan bajos que no existe reserva de inventario que pueda utilizarse en caso de que ocurra una descompostura que dure mucho tiempo. Estas dos tendencias han llevado al primer plano la función del mantenimiento como una actividad clave en las empresas manufactureras.

El mantenimiento se define como la combinación de actividades mediante las cuales un equipo o un sistema se mantiene en, o se restablece a, un estado en el que puede realizar las funciones designadas. Es un factor importante en la calidad de los productos y puede utilizarse como una estrategia para una competencia exitosa. Las inconsistencias en la operación del equipo de producción dan por resultado una variabilidad excesiva en el producto y, en consecuencia, ocasionan una producción defectuosa. Para producir con un alto nivel de calidad, el equipo de producción debe operar dentro de las especificaciones, las cuales pueden alcanzarse mediante acciones oportunas de mantenimiento.

Un sistema es un conjunto de componentes que trabajan de manera combinada hacia un objetivo común. El mantenimiento puede ser considerado como un sistema con un conjunto de actividades que se realizan en

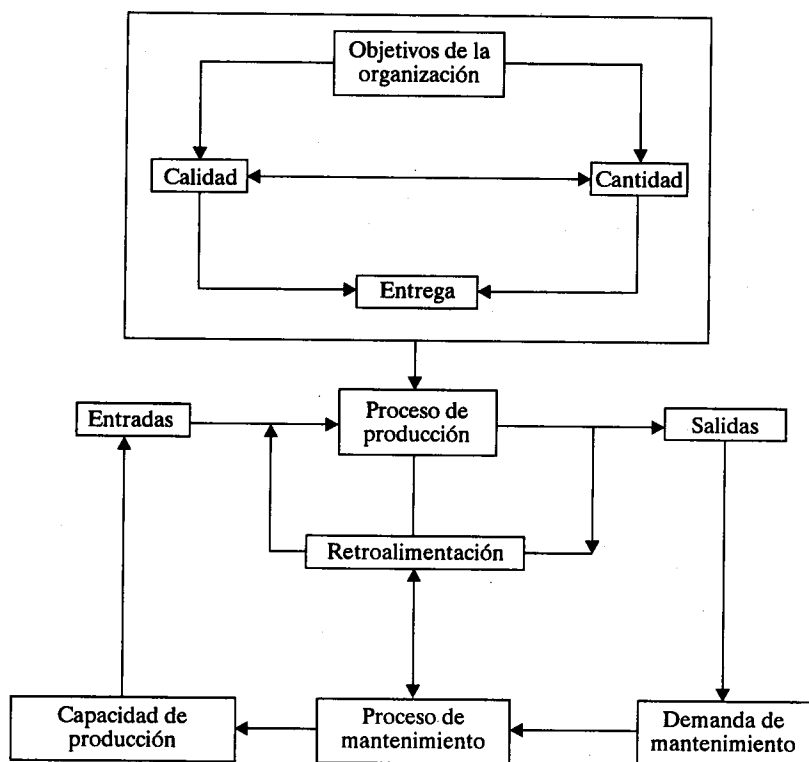


Figura 1.1. Relación entre los objetivos de la organización, el proceso de producción y el mantenimiento.

paralelo con los sistemas de producción. En la figura 1.1 se muestra un diagrama de las relaciones entre los objetivos de la organización, el proceso de producción y el mantenimiento. Los sistemas de producción generalmente se ocupan de convertir entradas o insumos, como materias primas, mano de obra y procesos, en productos que satisfacen las necesidades de los clientes. La principal salida de un sistema de producción son los productos terminados; una salida secundaria es la falla de un equipo. Esta salida secundaria genera una demanda de mantenimiento. El sistema de mantenimiento toma esto como una entrada y le agrega conocimiento experto, mano de obra y refacciones, y produce un equipo en buenas condiciones que ofrece una capacidad de producción.

La principal meta general de un sistema de producción es elevar al máximo las utilidades a partir de las oportunidades disponibles en el mercado, y la meta secundaria tiene que ver con los aspectos económicos y técnicos del proceso de conversión. Los sistemas de mantenimiento también contribuyen al logro de estas metas al incrementar las utilidades y la satisfacción del

cliente. Éstas se logran reduciendo al mínimo el tiempo muerto de la planta, mejorando la calidad, incrementando la productividad y entregando oportunamente los pedidos a los clientes. Los sistemas de producción han sido optimizados como un sistema integral y son estudiados de manera extensa en comparación con los sistemas de mantenimiento. Obviamente es necesario adoptar esta tendencia en el mantenimiento.

Desde hace mucho tiempo se ha tomado en cuenta el papel de los sistemas de mantenimiento en las empresas manufactureras; sin embargo, es claro que las funciones del mantenimiento también son esenciales en las empresas de servicios como hospitales, bancos, instituciones educativas y tiendas de departamentos. En organizaciones como los hospitales, por ejemplo, las máquinas de rayos X y de exploración del cerebro deben mantenerse funcionando todo el tiempo debido a que son equipos fundamentales para la vida humana. Los conceptos, modelos y técnicas que se presentan en este libro para la planeación, diseño, organización y control de los sistemas de mantenimiento son aplicables a todas las organizaciones que realizan una función de negocios. Por lo tanto, el lector deberá estar consciente de que existe un amplio espectro para el empleo del material de este libro.

Un sistema de mantenimiento puede verse como un modelo sencillo de entrada-salida. Las entradas de dicho modelo son mano de obra, adminis-

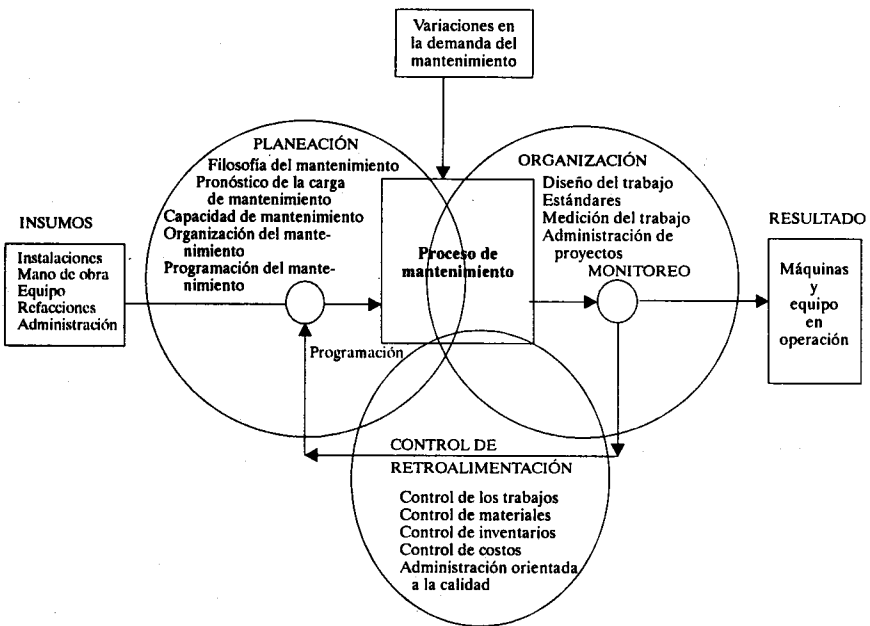


Figura 1.2 Sistema típico de mantenimiento.

tración, herramientas, refacciones, equipo, etc., y la salida es equipo funcionando, confiable y bien configurado para lograr la operación planeada de la planta. Esto nos permite optimizar los recursos para aumentar al máximo las salidas de un sistema de mantenimiento. En la figura 1.2 se muestra un sistema típico de mantenimiento. En esta figura se muestran las actividades necesarias para hacer que este sistema sea funcional, a saber, planeación, organización y control. Este capítulo presenta los componentes de un sistema de mantenimiento que necesitan planearse, organizarse y optimizarse a fin de incrementar sus salidas y lograr la mejor utilización de los recursos.

1.2 ACTIVIDADES DE PLANEACIÓN

Las actividades de planeación generalmente incluyen las siguientes:

1. Filosofía del mantenimiento.
2. Pronóstico de la carga de mantenimiento.
3. Capacidad de mantenimiento.
4. Organización del mantenimiento.
5. Programación del mantenimiento.

En las siguientes secciones se hace una descripción de cada una de estas actividades.

1.2.1 Filosofía del mantenimiento

La filosofía del mantenimiento de una planta es básicamente la de tener un nivel mínimo de personal de mantenimiento que sea consistente con la optimización de la producción y la disponibilidad de la planta sin que se comprometa la seguridad. Para lograr esta filosofía, las siguientes estrategias pueden desempeñar un papel eficaz si se aplican en la combinación y forma correctas:

1. Mantenimiento correctivo o por fallas.
2. Mantenimiento preventivo.
 - a. Mantenimiento preventivo con base en el tiempo o en el uso.
 - b. Mantenimiento preventivo con base en las condiciones.
3. Mantenimiento de oportunidad.
4. Detección de fallas.
5. Modificación del diseño.
6. Reparación general.
7. Reemplazo.

1.2.1.1 Mantenimiento correctivo Este tipo de mantenimiento sólo se realiza cuando el equipo es incapaz de seguir operando. No hay elemento de planeación para este tipo de mantenimiento. Éste es el caso que se presenta cuando el costo adicional de otros tipos de mantenimiento no puede justificarse. Este tipo de estrategia a veces se conoce como estrategia de operación-hasta-que-falle. Se aplica principalmente en los componentes electrónicos.

1.2.1.2 Mantenimiento preventivo con base en el tiempo o en el uso El mantenimiento preventivo es cualquier mantenimiento planeado que se lleva a cabo para hacer frente a fallas potenciales. Puede realizarse con base en el uso o las condiciones del equipo. El mantenimiento preventivo con base en el uso o en el tiempo se lleva a cabo de acuerdo con las horas de funcionamiento o un calendario establecido. Requiere un alto nivel de planeación. Las rutinas específicas que se realizan son conocidas, así como sus frecuencias. En la determinación de la frecuencia generalmente se necesitan conocimientos acerca de la distribución de las fallas o la confiabilidad del equipo.

1.2.1.3 Mantenimiento preventivo con base en las condiciones Este mantenimiento preventivo se lleva a cabo con base en las condiciones conocidas del equipo. La condición del equipo se determina vigilando los parámetros clave del equipo cuyos valores se ven afectados por la condición de éste. A esta estrategia también se le conoce como mantenimiento predictivo.

1.2.1.4 Mantenimiento de oportunidad Este tipo de mantenimiento, como su nombre lo indica, se lleva a cabo cuando surge la oportunidad. Tales oportunidades pueden presentarse durante los períodos de paros generales programados de un sistema en particular, y puede utilizarse para efectuar tareas conocidas de mantenimiento.

1.2.1.5 Detección de fallas La detección de fallas es un acto o inspección que se lleva a cabo para evaluar el nivel de presencia inicial de fallas. Un ejemplo de detección de fallas es el de la verificación de la llanta de refacción de un automóvil antes de emprender un viaje largo.

1.2.1.6 Modificación del diseño La modificación del diseño se lleva a cabo para hacer que un equipo alcance una condición que sea aceptable en ese momento. Esta estrategia implica mejoras y, ocasionalmente, expansión de fabricación y capacidad. La modificación del diseño por lo general requiere una coordinación con la función de ingeniería y otros departamentos dentro de la organización.

1.2.1.7 Reparación general La reparación general es un examen completo y el restablecimiento de un equipo o sus componentes principales a una condición aceptable. Ésta es generalmente una tarea de gran envergadura.

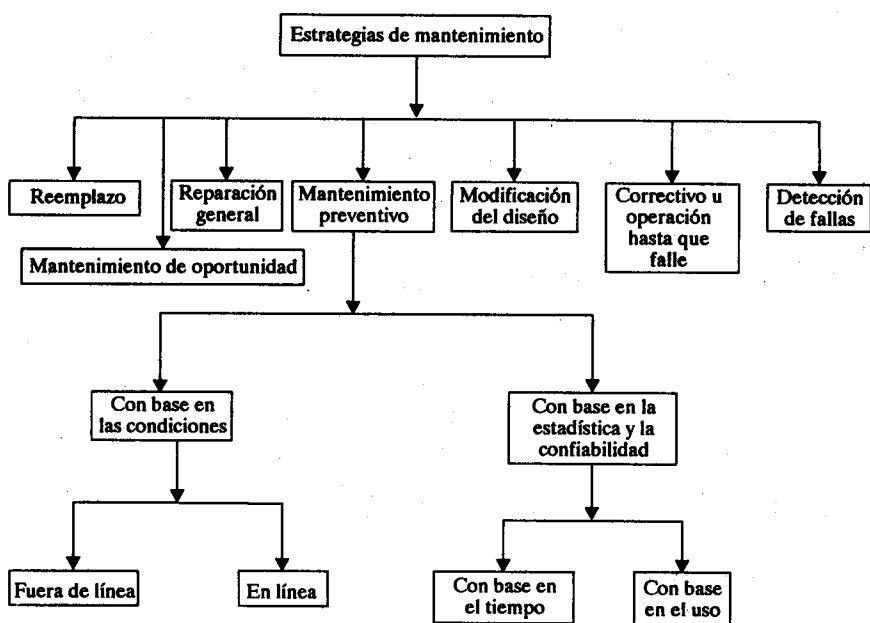


Figura 1.3 Estrategias de mantenimiento.

1.2.1.8 Reemplazo Esta estrategia implica reemplazar el equipo en lugar de darle mantenimiento. Puede ser un reemplazo planeado o un reemplazo ante una falla.

Cada una de estas estrategias de mantenimiento tiene una función en la operación de la planta. Es la mezcla óptima de estas estrategias la que da por resultado la filosofía de mantenimiento más eficaz. El tamaño de la planta y su nivel de operación planeado, junto con la estrategia de mantenimiento aplicable, pueden ayudar a estimar la carga de mantenimiento o las salidas deseadas del sistema de mantenimiento. La figura 1.3 resume las estrategias de mantenimiento.

1.2.2 Pronóstico de la carga de mantenimiento

Este pronóstico es el proceso mediante el cual se predice la carga de mantenimiento. La carga de mantenimiento en una planta dada varía aleatoriamente y, entre otros factores, puede ser una función de la edad del equipo, el nivel de su uso, la calidad del mantenimiento, factores climáticos y las destrezas de los trabajadores de mantenimiento. El pronóstico de la carga de mantenimiento es esencial para alcanzar un nivel deseado de eficacia y

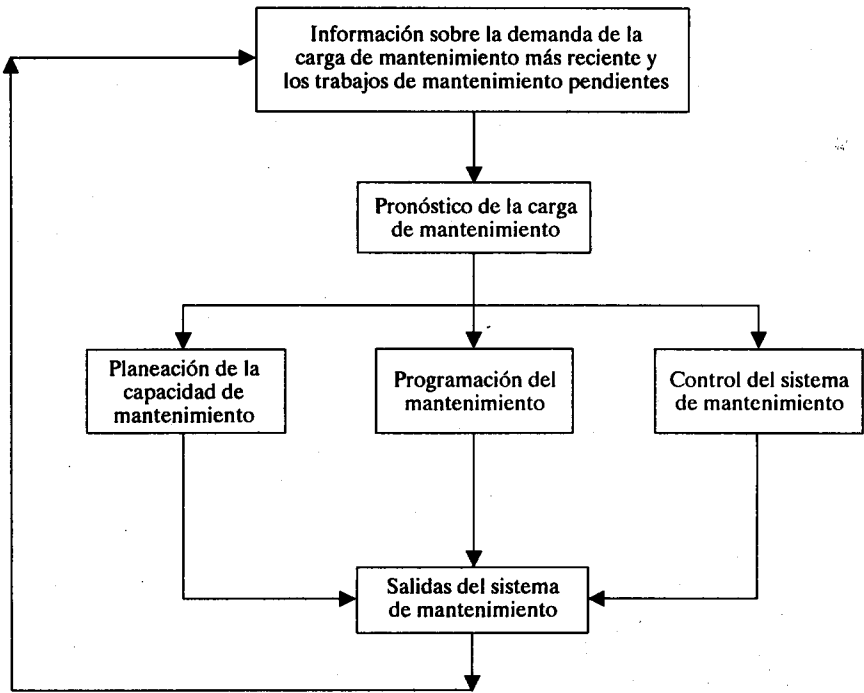


Figura 1.4 Función del pronóstico de la carga de mantenimiento en un sistema de mantenimiento.

utilización de los recursos, y sin éste, muchas de las funciones de mantenimiento no pueden realizarse bien. En la figura 1.4 se muestra el papel que desempeña este tipo de pronóstico en un sistema de mantenimiento.

1.2.3 Planeación de la capacidad de mantenimiento

La planeación de la capacidad de mantenimiento determina los recursos necesarios para satisfacer la demanda de trabajos de mantenimiento. Estos recursos incluyen: la mano de obra, materiales, refacciones, equipo y herramientas. Entre los aspectos fundamentales de la capacidad de mantenimiento se incluyen la cantidad de trabajadores de mantenimiento y sus habilidades, las herramientas requeridas para el mantenimiento, etc. Debido a que la carga de mantenimiento es una variable aleatoria, no se puede determinar el número exacto de los diversos tipos de técnicos. Por lo tanto, sin pronósticos razonablemente exactos de la demanda futura de trabajos de mantenimiento, no sería posible realizar una planeación adecuada de la capacidad a largo plazo. Para utilizar mejor sus recursos de mano de obra,

las organizaciones tienden a emplear una menor cantidad de técnicos de la que han anticipado, lo cual probablemente dará por resultado una acumulación de trabajos de mantenimiento pendientes. Éstos pueden completarse haciendo que los trabajadores existentes laboren tiempo extra o buscando ayuda exterior de contratistas. Los trabajos pendientes también pueden desahogarse cuando la carga de mantenimiento es menor que la capacidad. Ésta es realmente la principal razón de mantener una reserva de trabajos pendientes. La estimación a largo plazo es una de las áreas críticas de la planeación de la capacidad de mantenimiento, pero que aún no ha sido bien desarrollada. En el capítulo 5 se presentan técnicas para el pronóstico del mantenimiento y la planeación de la capacidad.

1.2.4 Organización del mantenimiento

Dependiendo de la carga de mantenimiento, el tamaño de la planta, las destrezas de los trabajadores, etc., el mantenimiento se puede organizar por departamentos, por área o en forma centralizada. Cada tipo de organización tiene sus pros y sus contras. En las organizaciones grandes, la descentralización de la función de mantenimiento puede producir un tiempo de respuesta más rápido y lograr que los trabajadores se familiaricen más con los problemas de una sección particular de la planta. Sin embargo, la creación de un número de pequeñas unidades tiende a reducir la flexibilidad del sistema de mantenimiento como un todo. La gama de habilidades disponibles se reduce y la utilización de la mano de obra es generalmente menor que en una unidad de mantenimiento centralizada. En algunos casos, puede implantarse una solución de compromiso, denominada *sistema en cascada*. Este sistema permite que las unidades de mantenimiento del área de producción se enlacen con la unidad de mantenimiento central. En la figura 1.5 se muestra un sistema de este tipo.

1.2.5 Programación del mantenimiento

La programación del mantenimiento es el proceso de asignación de recursos y personal para los trabajos que tienen que realizarse en ciertos momentos. Es necesario asegurar que los trabajadores, las piezas y los materiales requeridos estén disponibles antes de poder programar una tarea de mantenimiento. El equipo crítico de una planta se refiere al equipo cuya falla detendrá el proceso de producción o pondrá en riesgo vidas humanas y la seguridad. El trabajo de mantenimiento para estos equipos se maneja bajo prioridades y es atendido antes de emprender cualquier otro trabajo. La ocurrencia de tales trabajos no puede predecirse con certeza, de modo que los programas para el mantenimiento planeado en estos casos tienen que ser revisados. En la eficacia de un sistema de mantenimiento influye mucho

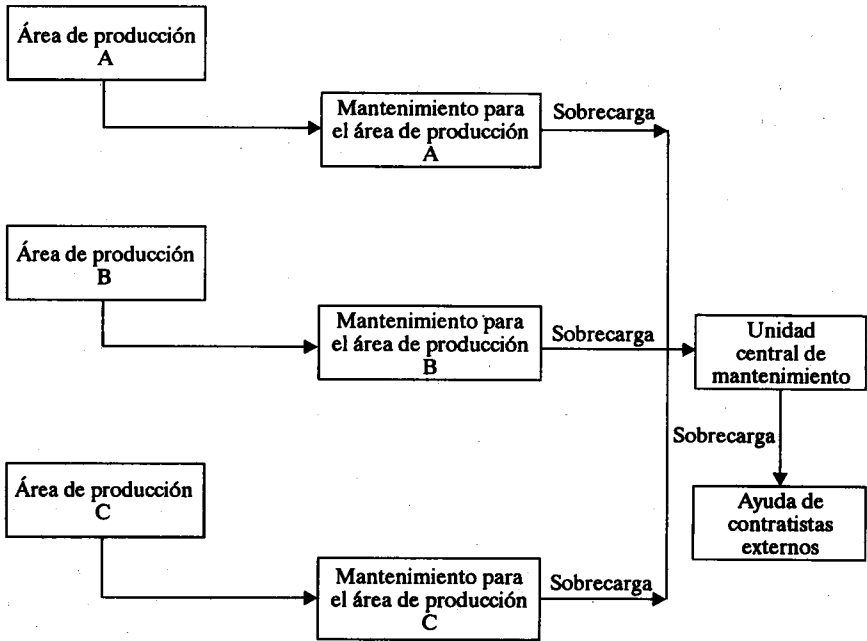


Figura 1.5 Sistema en cascada.

el programa de mantenimiento que se haya desarrollado y su capacidad para adaptarse a los cambios. Un alto nivel de eficacia en el programa de mantenimiento es señal de un alto nivel de eficacia en el propio mantenimiento. El capítulo 6 cubre las herramientas necesarias para una planeación y programación eficaces.

1.3 ACTIVIDADES DE ORGANIZACIÓN

La organización de un sistema de mantenimiento incluye lo siguiente:

1. Diseño del trabajo.
2. Estándares de tiempo.
3. Administración de proyectos.

Se sabe que los sistemas de mantenimiento se ponen en movimiento por las órdenes de trabajo, que generalmente son emitidas por los departamentos de producción. Estas órdenes de trabajo describen el trabajo, su ubicación, las habilidades requeridas y la prioridad del trabajo.

1.3.1 Diseño del trabajo

El diseño del trabajo, en lo que se refiere al mantenimiento, comprende el contenido de trabajo de cada tarea y determina el método que se va a utilizar, las herramientas especiales necesarias y los trabajadores calificados requeridos.

1.3.2 Estándares de tiempo

Una vez que la tarea de mantenimiento ha pasado por la etapa de diseño, es básico estimar el tiempo necesario para completar el trabajo. Los estándares de tiempo realistas representan un elemento muy valioso para vigilar e incrementar la eficacia de los trabajadores y, de esta forma, reducir al mínimo el tiempo muerto de la planta. No es esencial tener estándares para todos los trabajos de mantenimiento. Por ejemplo, puede observarse que el 20% de los trabajos de mantenimiento consumen aproximadamente el 80% del tiempo disponible para las operaciones de mantenimiento. Deben hacerse los esfuerzos necesarios para desarrollar estándares de tiempo para estos trabajos que consumen mucho tiempo. Es obvio que se requieren estándares de tiempo de los trabajos para pronosticar y desarrollar programas de mantenimiento. En el capítulo 4 se presentan varias técnicas, como la medición del trabajo, el muestreo del trabajo y la estimación comparativa, para el desarrollo de estándares de tiempo.

1.3.3 Administración de proyectos

En el caso de las plantas grandes, las reparaciones generales de gran envergadura o el mantenimiento preventivo que se han planeado se llevan a cabo en forma periódica. Durante estos trabajos, toda la planta o parte de ésta se para. Teniendo en mente la minimización del tiempo muerto, conviene planear y graficar el trabajo para hacer el mejor uso de los recursos. La administración de proyectos implica el desarrollo de redes de actividades y luego el empleo de técnicas como el método de la ruta crítica (CPM) o la técnica de evaluación y revisión de programas (PERT). Una vez que se ha desarrollado la red, que incluye una descomposición de trabajos, secuencia de los mismos, estimaciones de tiempo para cada actividad, etc., puede utilizarse software de computadora para programar las actividades y determinar la mejor utilización de los recursos. La fase de control de un proyecto tal incluye medir el avance en forma regular, compararlo con el programa y analizar la varianza como un porcentaje del trabajo total. Pueden tomarse acciones correctivas para eliminar las deficiencias. En el capítulo 6 se explican algunas técnicas para la administración de proyectos.

1.4 ACTIVIDADES DE CONTROL

El control es una parte esencial de la administración científica. El control, tal como se aplica a un sistema de mantenimiento, incluye lo siguiente:

1. Control de trabajos.
2. Control de inventarios.
3. Control de costos.
4. Control de calidad.

1.4.1 Control de trabajos

El sistema de mantenimiento se pone en movimiento por la demanda de trabajos de mantenimiento. En la carga de trabajo de este tipo, influye sobre todo la filosofía del mantenimiento. La administración y el control del trabajo de mantenimiento son esenciales para lograr los planes establecidos. El sistema de órdenes de trabajo es la herramienta que se utiliza para controlar el trabajo de mantenimiento. Una orden de trabajo bien diseñada con un adecuado sistema de informes es el corazón del sistema de mantenimiento. En el capítulo 2 se estudian las herramientas esenciales para un control eficaz del trabajo de mantenimiento, incluyendo el diseño de una orden de trabajo.

1.4.2 Control de inventarios

Con anterioridad se afirmó que para la programación del trabajo de mantenimiento es esencial asegurar que se cuente con las refacciones y los materiales requeridos. Es físicamente imposible y económicamente impráctico que cada refacción llegue de manera exacta cuando se necesita y donde se necesita. Por estas razones se mantienen inventarios. El control de inventarios es la técnica de mantener refacciones y materiales en los niveles deseados. Es esencial mantener un nivel óptimo de refacciones que disminuya el costo de tener el artículo en existencia y el costo en que se incurre si las refacciones no están disponibles. También proporciona la información necesaria para cerciorarse de la disponibilidad de las refacciones requeridas para el trabajo de mantenimiento. Si no están disponibles las refacciones, se deben tomar las medidas para lograr su abastecimiento e informar al departamento de programación acerca de cuándo estarán disponibles las refacciones. En el capítulo 7 se describen las técnicas para el control de inventarios.

1.4.3 Control de costos

El costo del mantenimiento tiene muchos componentes, incluyendo el mantenimiento directo, la producción perdida, la degradación del equipo, los respaldos y los costos de un mantenimiento excesivo. El control de los costos de mantenimiento es una función de la filosofía del mantenimiento, el patrón de operación, el tipo de sistema y los procedimientos y las normas adoptadas por la organización. Es un componente importante en el ciclo de vida de los equipos.

El control del costo de mantenimiento optimiza todos los costos del mantenimiento, logrando al mismo tiempo los objetivos que se ha fijado la organización, como disponibilidad, "porcentaje de calidad" y otras medidas de eficiencia y eficacia. La reducción y el control de costos se utiliza como una ventaja competitiva en el suministro de productos y servicios. Los aspectos relacionados con el costo y su control se presentan en los capítulos 2 y 10.

1.4.4 Control de calidad

En un proceso de producción, la calidad de las salidas puede ser considerada como "aptitud para su uso" y "hacerlo bien desde la primera vez". El control de calidad se ejerce midiendo los atributos del producto o servicio y comparando éstos con las especificaciones del producto o el servicio, respectivamente. El mantenimiento también puede verse como un proceso y la calidad de sus salidas debe ser controlada.

En el caso del trabajo de mantenimiento, es esencial "hacerlo bien la primera vez". La calidad puede evaluarse como el porcentaje de trabajos de mantenimiento aceptados de acuerdo a la norma adoptada por la organización. Una alta calidad se asegura verificando los trabajos de mantenimiento críticos o mediante la supervisión del mantenimiento. En el capítulo 8 se presentan los detalles del control de calidad en el mantenimiento.

1.5 ADMINISTRACIÓN ORIENTADA A LA CALIDAD Y CAPACITACIÓN

La administración orientada a la calidad es una responsabilidad gerencial. Los gerentes/ingenieros de mantenimiento por lo común no están totalmente conscientes de la importancia de mejorar la calidad de la producción del mantenimiento. La clave para una administración orientada a la calidad se encuentra, en primer lugar, en la conciencia de la necesidad de mejorar y, en segundo lugar, en seleccionar las técnicas apropiadas para la mejora. El capítulo 12 se concentra en los aspectos de la mejora continua.

Deberá identificarse a los trabajadores que realizan un trabajo de mantenimiento por debajo de la norma. Esto puede lograrse dando seguimiento a los trabajos repetidos de cada uno de los trabajadores. Se puede realizar un análisis adicional para localizar la o las causas de trabajos por debajo de la norma. Las causas probables son la falta de disponibilidad de herramientas especiales, trabajadores que carecen del nivel necesario de destreza, una supervisión deficiente, etc. La erradicación de estas causas y la vigilancia del trabajo de mantenimiento concluido puede dar por resultado una mejor calidad en la producción del mantenimiento.

Debe realizarse un pronóstico de las nuevas tecnologías/procesos que serán adquiridos por la compañía, y debe capacitarse a los trabajadores antes de la llegada del equipo en cuestión. En el capítulo 11 se tratan los aspectos de la capacitación.

1.6 COMPORTAMIENTO HUMANO

En el desarrollo de las funciones de planeación, organización y control, los gerentes de mantenimiento deben considerar la forma en que sus acciones afectan el comportamiento humano. Deberán entender de qué manera el comportamiento de los subordinados puede afectar las acciones de planeación, organización y control de la gerencia. En la toma de decisiones sobre el mantenimiento, el comportamiento de los subordinados debe ser de interés de la gerencia. Deberá asegurarse que se logre y mantenga el nivel deseado de satisfacción del personal.

1.7 TERMINOLOGÍA DEL MANTENIMIENTO

A continuación se definen algunos de los términos que se emplean comúnmente en la administración del mantenimiento. Estas definiciones se basan, en gran medida, en la Norma Británica BS3811.

Descompostura. Falla que da por resultado la falta de disponibilidad del equipo.

Desperfecto. Una desviación inesperada con respecto a los requerimientos y que justifica una acción correctiva.

Disponibilidad. La capacidad del equipo para llevar a cabo con éxito la función requerida en un momento específico o durante un período de tiempo específico.

Especificación del trabajo. Un documento que describe la forma en que se debe realizar el trabajo. Puede definir materiales, herramientas, estándares de tiempo y procedimientos.

Existencia de refacciones. Piezas que están disponibles con fines de mantenimiento o para el reemplazo de piezas defectuosas.

Factibilidad del mantenimiento. La capacidad del equipo, bajo condiciones establecidas de uso, para conservarse o ser reparado y que quede en un estado en el que pueda realizar la función requerida, cuando el mantenimiento se realiza bajo condiciones establecidas y empleando procedimientos y recursos prescritos.

Falla. La terminación de la capacidad del equipo para realizar la función requerida.

Historia del mantenimiento. Un registro histórico que muestra la reparación, refacciones, etc., que se emplea para ayudar a la planeación del mantenimiento.

Inspección. El proceso de medir, examinar, probar, calibrar o detectar de alguna otra forma cualquier desviación con respecto a las especificaciones.

Interrupción forzada. Interrupción debida al paro no programado de un equipo.

Mantenimiento. La combinación de todas las acciones técnicas y acciones asociadas mediante las cuales un equipo o un sistema se conserva o repara para que pueda realizar sus funciones específicas.

Mantenimiento basado en las condiciones. El mantenimiento preventivo que se inicia como resultado del conocimiento de la condición del equipo observada mediante el monitoreo de rutina o continuo.

Mantenimiento correctivo. El mantenimiento que se lleva a cabo después de que ocurre una falla y que pretende restablecer el equipo a un estado en el que pueda realizar la función requerida.

Mantenimiento de emergencia. El mantenimiento requerido para evitar consecuencias serias, como pérdida del tiempo de producción y condiciones inseguras.

Mantenimiento en operación. Mantenimiento que puede realizarse mientras el equipo está en servicio.

Mantenimiento en paro. Mantenimiento que sólo puede realizarse cuando el equipo está fuera de servicio.

Mantenimiento planeado. El mantenimiento organizado y realizado con premeditación, control y el uso de registros para cumplir con un plan predeterminado.

Mantenimiento preventivo. El mantenimiento realizado a intervalos predeterminados o con la intención de minimizar la probabilidad de falla o la degradación del funcionamiento del equipo.

Mantenimiento programado. El mantenimiento preventivo realizado a un intervalo de tiempo predeterminado o después de cierto número de operaciones, kilometraje, etc.

Monitoreo de las condiciones. La medición continua o periódica y la interpretación de los datos para inferir la condición del equipo a fin de determinar si necesita mantenimiento.

Orden de trabajo. Una instrucción por escrito que especifica el trabajo que debe realizarse, incluyendo detalles sobre refacciones, requerimientos de personal, etc.

Programa de mantenimiento. Una lista completa de piezas (equipo) y las tareas de mantenimiento requeridas, incluyendo los intervalos con que debe realizarse el mantenimiento.

Renovación. Trabajo extenso con la intención de que el equipo alcance condiciones funcionales aceptables, que frecuentemente implica mejoras.

Reparación. El restablecimiento de un equipo a una condición aceptable mediante la renovación, reemplazo o reparación general de piezas dañadas o desgastadas.

Reparación general. Un examen completo y restablecimiento del equipo, o una parte importante del mismo, a una condición aceptable.

Requisición de trabajo. Un documento en el que se solicita la realización de un trabajo.

Restablecimiento. Acciones de mantenimiento con la intención de regresar al equipo a sus condiciones originales.

Retroalimentación. Un informe del éxito o fracaso de una acción para alcanzar los objetivos deseados, que puede ser utilizada para mejorar un proceso.

RESUMEN

Cuando los gerentes o ingenieros de mantenimiento planifican, diseñan, organizan, programan y controlan el sistema de mantenimiento, con toda seguridad encontrarán muchos problemas y deberán tomar muchas decisiones. A menudo se pueden simplificar estos problemas empleando modelos apropiados. Sin embargo, si estos modelos no representan al mantenimiento como un sistema integrado, muy probablemente darán por resultado soluciones no óptimas. Este libro apoya el enfoque de un sistema integrado para el mantenimiento y presenta los tipos de modelos y técnicas necesarios para administrar y diseñar sistemas de mantenimiento, conjuntamente con ejemplos de sus usos y los problemas funcionales del mantenimiento.

EJERCICIOS

- 1.1 Defina el término proceso y dé ejemplos de tres procesos.
- 1.2 Defina un sistema y dé ejemplos de tres sistemas.
- 1.3 ¿Qué es más general, un sistema o un proceso?
- 1.4 Seleccione una organización dentro de su área e identifique tres de sus objetivos; demuestre cómo puede el mantenimiento contribuir a alcanzarlos.
- 1.5 ¿Cómo obtendría retroalimentación en un sistema de mantenimiento?
- 1.6 Haga una lista de las posibles estrategias de mantenimiento para los gerentes de mantenimiento.
- 1.7 ¿Cuál es la función de los estándares de trabajo en un sistema de mantenimiento?
- 1.8 Defina el término planeación de la capacidad de mantenimiento.
- 1.9 Dibuje un diagrama de proceso para mantenimiento que muestre todos los elementos del proceso.
- 1.10 ¿Cómo mediría la calidad del trabajo de mantenimiento?

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- British Standard Institute, *Glossary of General Terms Used in Maintenance Organization*. BS 3811.
- J. D. Campbell, *Uptime Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Productivity Press, Portland, OR.

- A. Kelly, *Maintenance Planning and Control*, Butterworth, London.
- A. Kelly, *Maintenance and Its Management*, Conference Communications Monks Hill, Surry.
- H. H. Martin, *New Developments in Maintenance*, Moret Ernst and Young Management Consultants, Vanolaan.
- B. W. Niebel, *Engineering Maintenance Management*, 2nd Ed., Dekker, New York.

2

OPERACIONES Y CONTROL DEL MANTENIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema eficaz de operación y control del mantenimiento es la columna vertebral de una sólida administración del mantenimiento. El control del mantenimiento significa coordinar la demanda del mantenimiento y los recursos disponibles para alcanzar un nivel deseado de eficacia y eficiencia. Un sistema eficaz de operación y control debe incorporar todas las siguientes características:

1. Demanda de mantenimiento (es decir, qué trabajo tiene que hacerse y cuándo).
2. Recursos de mantenimiento (es decir, quién hará el trabajo y qué materiales y herramientas se necesitan).
3. Procedimientos y medios para coordinar, programar, despachar y ejecutar el trabajo.
4. Normas de rendimiento y calidad (es decir, cuánto tiempo se requerirá para hacer un trabajo y las especificaciones aceptables).
5. Retroalimentación, monitoreo y control (es decir, el sistema debe generar información y reportes para el control del costo de calidad y la condición de la planta; también es esencial un mecanismo de recopilación de datos y un seguimiento regular para la retroalimentación y el control).

El sistema de órdenes de trabajo es el vehículo para planear y controlar el trabajo de mantenimiento. También proporciona la información necesaria para vigilar e informar sobre el trabajo de mantenimiento. Una meta

clara y procedimientos específicos son esenciales para la implantación del sistema de órdenes de trabajo y el control de las actividades de mantenimiento.

Este capítulo estudia los sistemas de operación y control del mantenimiento. Explica las formas y procedimientos necesarios para las operaciones y la realización de las funciones de mantenimiento, así como el control de estas operaciones. El concepto del ciclo de control del mantenimiento se resume en la sección 2.2. La sección 2.3 presenta el sistema de órdenes de trabajo y la 2.4 describe algunos procedimientos y formas que se utilizan para reportar y registrar datos diferentes de la orden de trabajo. La sección 2.5 resume la estructura del control del mantenimiento, y la 2.6 presenta varios programas eficaces de mantenimiento para mejorar la eficacia del sistema de control del mantenimiento.

2.2 CICLO DE CONTROL DEL MANTENIMIENTO

El mantenimiento puede verse como un proceso y, en consecuencia, una función para el control del mantenimiento puede aplicar los conceptos desarrollados en el control automático de procesos para mejorar la eficacia de las máquinas. El control automático de procesos es un ciclo continuo que consta de:

- muestreo de las salidas de la planta
- análisis de la muestra
- aplicación de la acción correctiva, si es necesario.

La figura 2.1 muestra un ciclo sencillo de control.

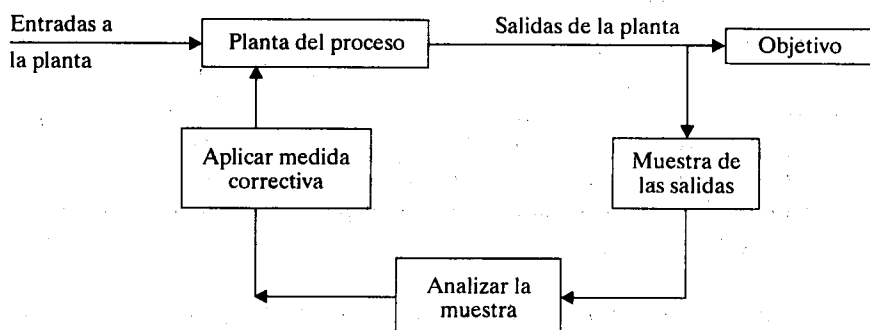


Figura 2.1 Ciclo de control del proceso.

Los conceptos de la figura 2.1 son aplicables al control del mantenimiento si se utilizan en el marco de trabajo correcto. En el mantenimiento, el ciclo de control puede definirse como sigue:

- el objetivo puede ser la disponibilidad de la planta y la calidad de los productos.
- el muestreo de la salida consiste en recopilar datos de los archivos de las órdenes de trabajo o de la historia del equipo.
- el análisis de la muestra consiste en el empleo de técnicas para determinar si se ha alcanzado el objetivo. Por ejemplo, ¿el nivel de calidad corresponde a la satisfacción del cliente o cumple con las especificaciones? También, ¿corresponde la disponibilidad del equipo a los objetivos de disponibilidad?
- la acción correctiva podría consistir en revisar las políticas de mantenimiento, modificar los programas de mantenimiento, mejorar las especificaciones del trabajo, capacitar a los trabajadores e implementar nuevos programas y estrategias de mantenimiento, en caso de ser necesario.

La figura 2.2 ilustra el ciclo de control del mantenimiento.

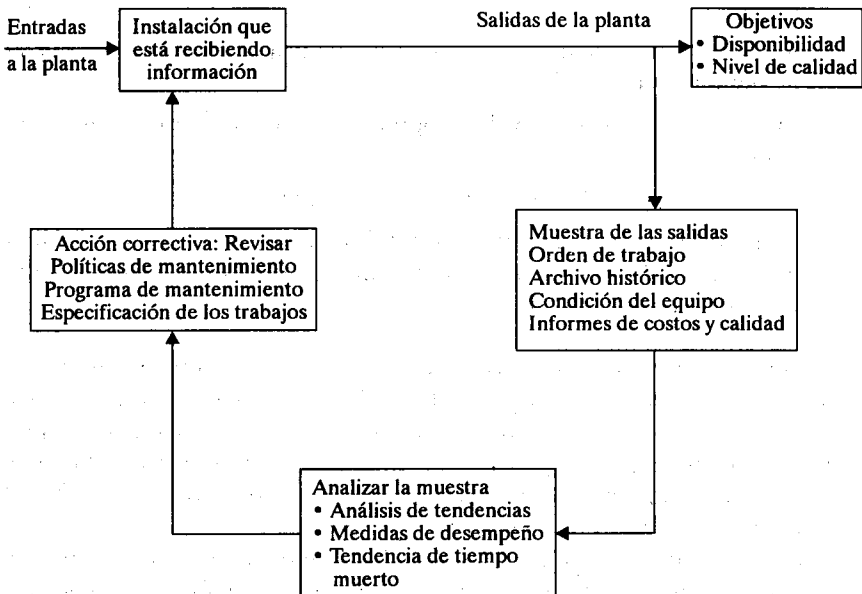


Figura 2.2 Ciclo de control del mantenimiento.

La aplicación de los conceptos de la figura 2.2 requiere el establecimiento de procedimientos y formas para administrar el trabajo de mantenimiento; normas para la recopilación y análisis de los datos; y medios para un informe eficaz del trabajo, la condición del equipo y la calidad del producto. Los últimos tres elementos son necesarios para el control de los trabajos, el control de costos y el control de la condición de la planta.

2.3 SISTEMA DE ÓRDENES DE TRABAJO DE MANTENIMIENTO

El primer paso en la planeación y el control del trabajo de mantenimiento se realiza mediante un sistema eficaz de órdenes de trabajo. La orden de trabajo es una forma donde se detallan las instrucciones escritas para el trabajo que se va a realizar y debe ser llenada para todos los trabajos. En la industria se hace referencia a ella con diferentes nombres, como solicitud de trabajo, requisición de trabajo, solicitud de servicio, etc. El propósito del sistema de órdenes de trabajo es proporcionar medios para:

1. Solicitar por escrito el trabajo que va a realizar el departamento de mantenimiento.
2. Seleccionar por operación el trabajo solicitado.
3. Asignar el mejor método y los trabajadores más calificados para el trabajo.
4. Reducir el costo mediante una utilización eficaz de los recursos (mano de obra, material).
5. Mejorar la planeación y la programación del trabajo de mantenimiento.
6. Mantener y controlar el trabajo de mantenimiento.
7. Mejorar el mantenimiento en general mediante los datos recopilados de la orden de trabajo que serán utilizados para el control y programas de mejora continua.

La administración del sistema de órdenes de trabajo es responsabilidad de las personas que están a cargo de la planeación y la programación. La orden de trabajo debe diseñarse con cuidado tomando en consideración dos puntos. El primero consiste en incluir toda la información necesaria para facilitar una planeación y una programación eficaces, y el segundo punto consiste en hacer énfasis en la claridad y facilidad de uso.

En los sistemas de mantenimiento hay dos tipos de órdenes de trabajo. El primer tipo es la orden de trabajo general (en ocasiones denominada orden de trabajo permanente o establecida) que se utiliza para pequeños trabajos de rutina y repetitivos, cuando el costo de procesar una orden de

trabajo individual podría exceder el costo del trabajo mismo o cuando éste es un trabajo fijo, de rutina, como el trabajo del conserje. En este caso, el conserje hace las mismas cosas todos los días y el trabajo es repetitivo y planeado con anterioridad. En ambos casos, la orden de trabajo general proporciona un costo global para tareas genéricas en los costos acumulados hasta la fecha y anuales. La unidad de planeación y programación del mantenimiento necesita definir claramente qué clases de trabajos se deben manejar utilizando la orden de trabajo general.

El segundo tipo es la orden de trabajo especial que se elabora para todos los demás trabajos individuales, para los cuales es necesario reportar todos los hechos acerca del trabajo.

2.3.1 Diseño de la orden de trabajo

La orden de trabajo, cuando se emplea en toda su extensión, puede ser utilizada como una forma de solicitud de trabajo, un documento de planeación, una gráfica de asignación de trabajos, un registro histórico, una herramienta para monitoreo y control, y una notificación de trabajo completado. Por lo tanto, es necesario tener cuidado al diseñar la orden de trabajo. Ésta debe contener dos tipos de información: la información requerida para planear y programar, y la información necesaria para el control. La información requerida para la planeación y la programación incluye lo siguiente:

- número del inventario, descripción de la unidad y ubicación
- persona o departamento que solicita el trabajo
- descripción del trabajo y estándares de tiempo
- especificación del trabajo y número de código
- prioridad del trabajo y fecha en que se requiere
- habilidades y conocimientos requeridos
- refacciones y materiales requeridos
- herramientas especiales requeridas
- procedimientos de seguridad
- información técnica (planos y manuales).

La información necesaria para el control incluye:

- tiempo real consumido
- códigos de costos para las habilidades y conocimientos
- tiempo muerto u hora en que se terminó el trabajo
- causa y consecuencias de la falla.

En el caso de una compañía mediana en general se llenan tres o cuatro copias de la orden de trabajo. En la figura 2.3 se muestra una orden de trabajo típica. Sin embargo, cada orden de trabajo debe diseñarse de manera específica

ORDEN DE TRABAJO							
Orden de trabajo núm.....			Turno A ☐ B ☐ C ☐		Dpto. solicitante..... Costo núm. Departamento Unidad		
Fecha							
Ubicación							
Equipo núm.							
Prioridad	Emergencia Urgente Normal Programada						
El trabajo debe completarse sin interrupción				Sí No			
Descripción general del trabajo							
Mano de obra				Materiales			
Habilidades (oficio o especialidad)	Tiempo		Descripción detallada del trabajo	Partes.....		Precio	
	Est.	Real		Desc.	Parte núm.	Unidad	Total
Aprobación del trabajo				Fecha de terminación			

Figura 2.3 Orden de trabajo típica.

para la industria en particular donde se va a utilizar. En los trabajos de mantenimiento es común que al estar realizando sus labores los trabajadores descubran algún trabajo adicional que se requiera y que no haya sido incluido en el plan de trabajo. Esto podría suceder debido a una planeación deficiente o a que el daño causado por la falla es mayor de lo que se esperaba. Este trabajo tiene que realizarse, y se debe agregar su descripción en la orden de trabajo debajo de la línea punteada de la figura 2.3. Las siguientes son guías generales aplicables a la mayoría de los sistemas:

- todos los departamentos de mantenimiento deben contar con una orden de trabajo para la planeación y ejecución de su trabajo de mantenimiento.
- las órdenes de trabajo deberán numerarse, y se requiere por lo menos tres copias para el control del mantenimiento.
- las solicitudes de órdenes de trabajo pueden ser iniciadas por cualquier persona en la organización y deben ser examinadas por el planificador o coordinador del mantenimiento.

2.3.2 Flujo del sistema de órdenes de trabajo

El flujo del sistema de órdenes de trabajo se refiere a los procedimientos para la realización del trabajo y el orden en que el trabajo se procesa desde su inicio hasta su terminación. En esta sección nos concentramos en el flujo de órdenes de trabajo. Los siguientes son los pasos secuenciales para el procesamiento de órdenes de trabajo:

1. Cuando el planificador recibe la solicitud de trabajo (que puede iniciarse por teléfono, terminal de computadora o forma escrita en papel), ésta se examina y se planea, y se completa una orden de trabajo que contiene la información requerida para la planeación, ejecución y control (ver el capítulo 6). Generalmente se llenan tres o cuatro copias y se envían a través del sistema.
2. La orden de trabajo se anota en un registro que incluye todos los datos pertinentes para cada orden de trabajo.
3. Una copia (generalmente la copia 1) se archiva por número de orden de trabajo en el departamento de control de mantenimiento. Dos copias (las copias 2 y 3) se entregan al encargado correspondiente y una copia (la copia 4) se envía a quien originó el trabajo.
4. El encargado asigna el trabajo al técnico apropiado y le entrega una copia (puede ser la copia 2 o la copia 3). Supongamos que es la copia 3. El trabajador efectúa el trabajo requerido y completa la información necesaria acerca del trabajo que realmente se llevó a cabo (como

tiempo real, material real utilizado, etc.) y entrega la copia al encargado.

5. El encargado verifica la información y revisa la calidad del trabajo terminado y anota esta información verificada en la copia 2. Posteriormente, el encargado envía las dos copias al departamento de control de mantenimiento.
6. El planificador anota la información en la copia 1 y envía la copia 3 a quien originó el trabajo.
7. El planificador envía la copia 2 al departamento de contabilidad, en donde se anota la información sobre costos. Después de esto, la copia se envía al departamento donde se conserva el sistema de información de mantenimiento (puede ser una unidad independiente o pertenecer al departamento de planeación y programación, dependiendo de la situación). La información de la orden de trabajo se asienta en un archivo de historia del equipo.
8. La copia 1 se archiva en un archivo de órdenes de trabajo concluidas y se guarda durante algún tiempo (generalmente de 3 a 6 meses) hasta que finalmente se destruye.

Los pasos anteriores pueden ser manuales o automatizados. La figura 2.4 muestra un diagrama de flujo en donde se ilustran estos pasos. Si se emplea un sistema automatizado, estas copias pueden almacenarse como copias en un sistema de cómputo y ser transmitidas a través de una red de área local.

2.4 CONSERVACIÓN DE REGISTROS

En esta sección se presentan los medios para el registro de datos acerca del trabajo o costos de mantenimiento.

2.4.1 Tarjeta de trabajo (reporte)

Para obtener los datos correctos para el trabajo, el costo y el control de la condición de la planta, es esencial contar con medios exactos para la recopilación de datos y el mantenimiento de registros. Es necesario informar tres aspectos importantes: 1) tiempo de reparación, 2) costos, y 3) tiempo muerto. La forma para el reporte del trabajo (tarjeta de trabajo) es un documento donde se registra el trabajo realizado y la condición del equipo. Se puede entregar una tarjeta de trabajo a cada empleado que participe en cada trabajo. La forma puede ser manual o automatizada.

La mayor parte de la información que se requiere en la tarjeta puede obtenerse de la orden de trabajo. En algunas compañías, cada empleado

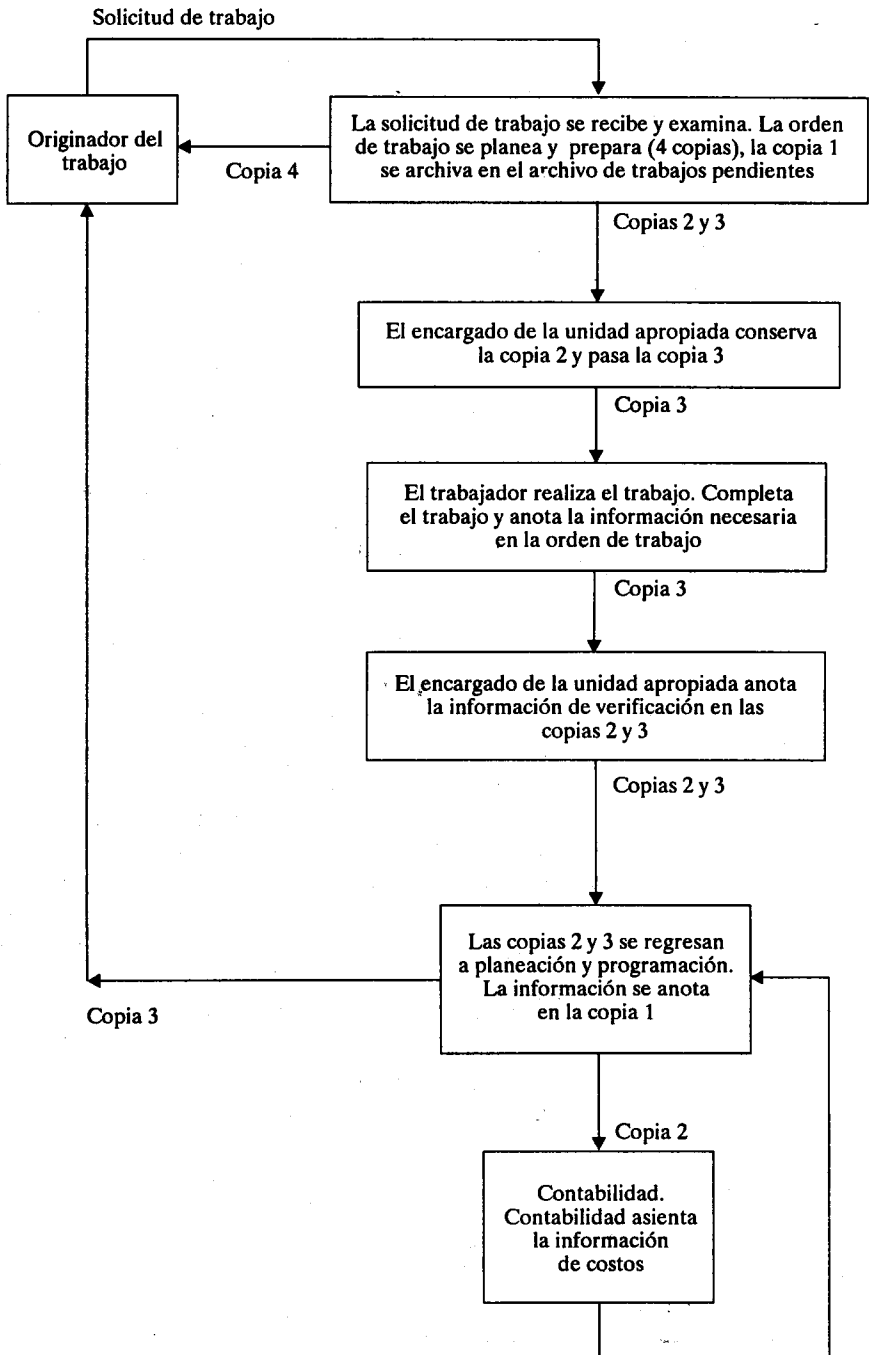


Figura 2.4 Un flujo típico de órdenes de trabajo.

Reporte de trabajo	Fecha	Reporte núm.
Nombre del empleado:	Ocupación:	Hora de inicio:
Nombre de la instalación:	Ubicación	Identificación
Defecto del equipo Acción correctiva Refacciones/materiales utilizados Medición/observaciones Condición general del equipo Observaciones: Tiempo consumido:		

Figura 2.5 Tarjeta de trabajo (reporte).

registra su trabajo diario en una tarjeta de tiempo de trabajo diario, en donde se anota el tiempo consumido en cada orden de trabajo. Las figuras 2.5 y 2.6 presentan ejemplos de una tarjeta de trabajo y una tarjeta de tiempo de trabajo diario.

2.4.2 Registro de la historia del equipo

El archivo de historia del equipo es un documento en el que se registra información acerca de todo el trabajo realizado en un equipo/instalación particular. Contiene información acerca de todas las reparaciones realizadas, el tiempo muerto, el costo de las reparaciones y las especificaciones del mantenimiento planeado. Es necesario registrar lo siguiente:

1. Especificaciones y ubicación del equipo.
2. Inspecciones, reparaciones, servicio y ajustes realizados, y las descomposturas y fallas con sus causas y las acciones correctivas emprendidas.
3. Trabajo realizado en el equipo, componentes reparados o reemplazados, condición de desgaste o rotura, erosión, corrosión, etc.
4. Mediciones o lecturas tomadas, tolerancia, resultados de pruebas e inspecciones.
5. Hora de la falla y tiempo consumido en llevar a cabo las reparaciones.

Existen muchos sistemas para registrar y almacenar información. El punto más importante es que la información debe ser completa y estar registrada en una forma organizada para su uso y acceso futuros. En la figura 2.7 se presenta una muestra de un archivo típico de historia del equipo.

Nombre del empleado

Semana que termina Turno

Aprobación del encargado: Nombre Firma

Día	Trabajo 1		Trabajo 2		Trabajo 3		Trabajo 4		Trabajo 5		Horas totales
	Número de orden de trabajo	Horas consu- midas	Número de orden de trabajo	Horas consu- midas	Número de orden de trabajo	Horas consu- midas	Número de orden de trabajo	Horas consu- midas	Número de orden de trabajo	Horas consu- midas	
L											
M											
M											
J											
V											
S											
D											

Figura 2.6 Tarjeta de tiempo de trabajo diario.

2.5 ESTRUCTURA DEL CONTROL DE MANTENIMIENTO

El control del mantenimiento comprende las siguientes tres importantes funciones:

- 1. Coordinación y planeación de las órdenes de trabajo.
- 2. Procesamiento de las órdenes de trabajo.
- 3. Retroalimentación de información y acción correctiva.

En la figura 2.8 se muestran las relaciones entre estas funciones.

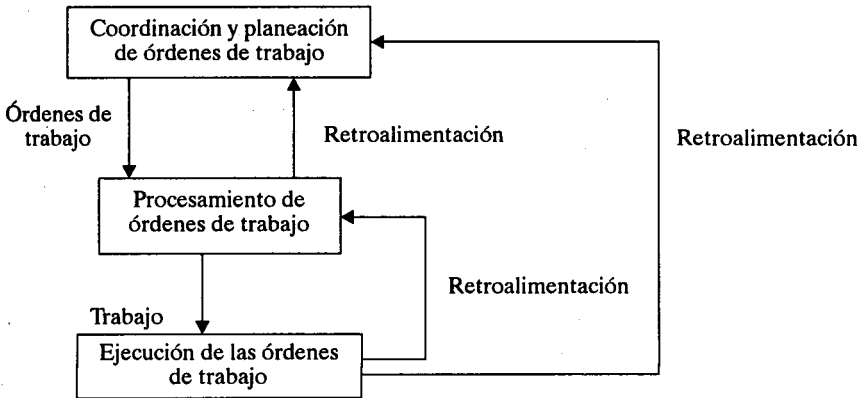


Figura 2.8 Estructura del control de mantenimiento.

ción de información y la toma de decisiones para alcanzar las metas y los objetivos establecidos.

2.5.1 Coordinación y planeación de las órdenes de trabajo

La función de coordinación de las órdenes de trabajo planea y coordina los diferentes tipos de solicitudes de mantenimiento con base en las restricciones de operación, la disponibilidad de recursos y la prioridad. Según Gits, la coordinación de las órdenes de trabajo comprende cuatro funciones de decisión (figura 2.9):

1. Planeación del mantenimiento preventivo.
2. Clasificación del mantenimiento correctivo.
3. Aceptación del mantenimiento adaptable.
4. Ajuste de la capacidad de mantenimiento.

La planeación del mantenimiento preventivo se ocupa de la vigilancia del plan de mantenimiento preventivo (MP) y la generación de las órdenes de trabajo de MP necesarias. Las órdenes de trabajo generadas deben satisfacer los requerimientos de producción, las restricciones de operación y las restricciones de la capacidad de mantenimiento.

La planeación del mantenimiento preventivo da por resultado dos flujos de trabajo. Un tipo consiste en órdenes de trabajo fijas que tienen que ser ejecutadas por el departamento de mantenimiento según está planeado. Por lo tanto, forman una entrada directa para la programación. El otro flujo

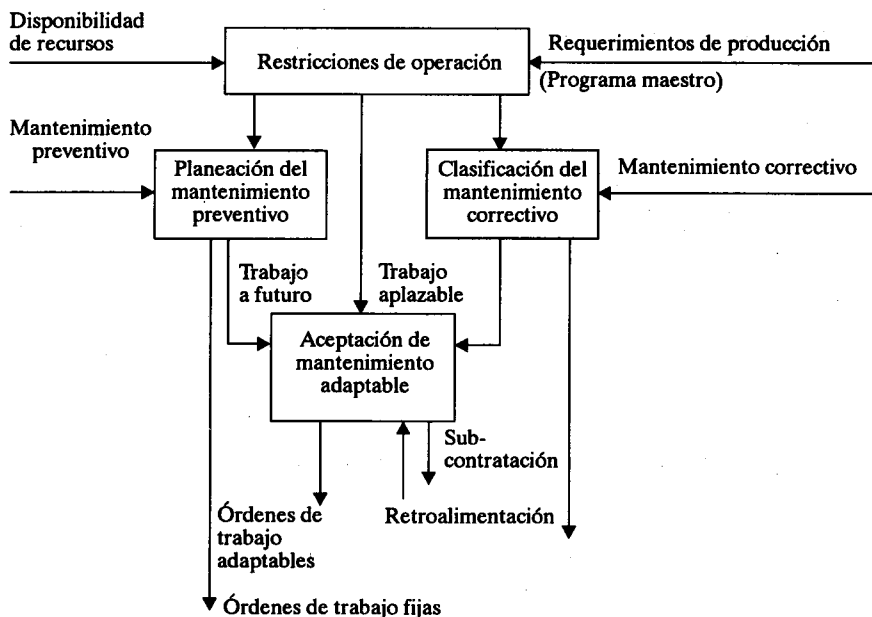


Figura 2.9 Estructura de la coordinación de órdenes de trabajo.

consiste en las órdenes de trabajo a futuro, para las cuales todavía debe decidirse su aceptación y ejecución final.

La clasificación del mantenimiento correctivo comprende la planeación y especificación de órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo. En esencia, esta función fija la prioridad de estas órdenes de trabajo de acuerdo con las consecuencias para la producción en caso de fallas, el estado actual de la capacidad de mantenimiento y las restricciones de operación. Según las características de la falla, debe llegarse a un acuerdo con la operación afectada con base en un sistema de prioridades para ejecutar este tipo de trabajo.

La clasificación del mantenimiento correctivo da por resultado dos tipos de flujo de trabajo. Un flujo consiste en las órdenes de trabajo urgentes, que tienen que ejecutarse de manera emergente, y el otro consiste en las órdenes de trabajo aplazables que pueden ser utilizadas como un grupo pendiente en espera de programación.

La aceptación de mantenimiento adaptable busca suavizar el trabajo ejecutado por el departamento de mantenimiento. Las fluctuaciones son ocasionadas por la variación en la carga de mantenimiento y la variabilidad de las tareas de mantenimiento. Las tareas de mantenimiento a futuro y aplazables se programan después de las órdenes urgentes cuando se disponga de materiales y mano de obra. El tamaño de este grupo pendiente de órdenes de trabajo debe estar entre un nivel mínimo y uno máximo. Si el grupo

cae abajo del mínimo, esto proporciona una señal a la función de planeación para activar la planeación de mantenimiento preventivo y liberar más órdenes de trabajo de MP. Cuando se rebasa el nivel máximo, esto señala la necesidad de tiempo extra o subcontratación para realizar el mantenimiento. Se pueden utilizar gráficas de control para controlar la variación en las fluctuaciones del trabajo. Ver en el capítulo 8 más detalles sobre las gráficas de control.

La aceptación de mantenimiento adaptable da por resultado dos tipos de trabajo. El primer tipo deberá hacerse externamente, y el segundo se realizará internamente. En la figura 2.9 se muestra la estructura de la coordinación de órdenes de trabajo.

El ajuste de la capacidad de mantenimiento es una función necesaria para evaluar si los recursos actuales satisfacen la demanda de mantenimiento. Esta función evalúa aspectos como la necesidad de tiempo extra o la subcontratación para el mantenimiento.

2.6 PROCESAMIENTO DE ÓRDENES DE TRABAJO

El procesamiento de órdenes de trabajo se concentra en la realización de las órdenes de trabajo según los acuerdos y los objetivos que deben alcanzarse, tomando en consideración el programa de producción a corto plazo. Consta de las siguientes tres funciones de control:

1. Liberación de órdenes de trabajo.
2. Programación de las órdenes de trabajo.
3. Despacho de las órdenes de trabajo.

La función de liberación de órdenes de trabajo controla la cantidad de órdenes de trabajo en progreso liberando las que son adaptables tomadas del grupo de aceptación. La principal función del área de liberación de órdenes de trabajo es decidir cuánto trabajo deberá liberarse por período, tomando en consideración, al mismo tiempo, la capacidad de mano de obra y materiales después de considerar las órdenes de trabajo urgentes.

La programación de órdenes de trabajo se ocupa de lograr el ajuste de los recursos con la orden de trabajo y el tiempo necesario para su ejecución. Así, el programa muestra los recursos que deben emplearse para la realización del trabajo en un tiempo dado. El programa final proporciona una idea bastante aproximada acerca de cuándo se completará el trabajo. Debido al alto grado de incertidumbre en la predicción del trabajo de mantenimiento, será imposible adherirse al programa preparado y, en muchos casos, el trabajo en progreso podría requerir la reprogramación de órdenes de trabajo adaptables o incluso la replaneación de las órdenes de trabajo fijas.

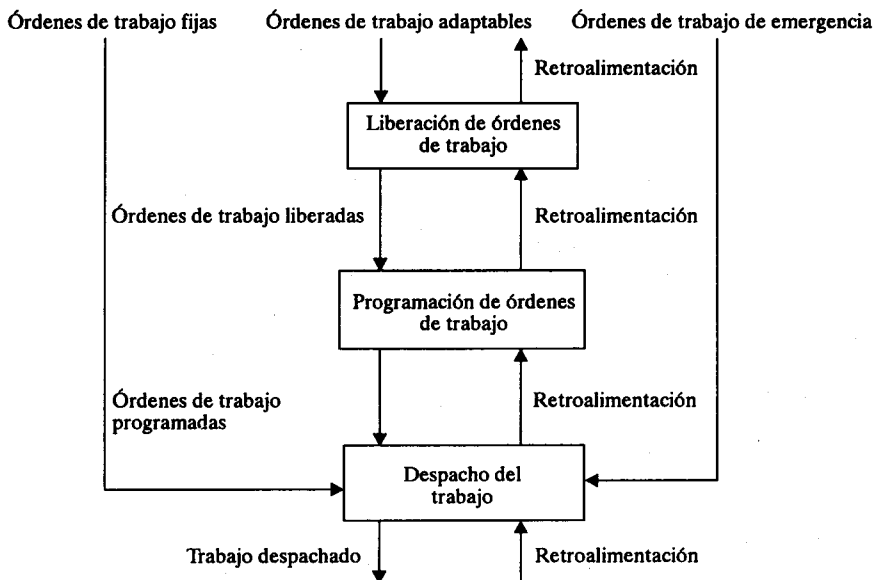


Figura 2.10 Estructura del procesamiento de órdenes de trabajo.

El despacho de las órdenes de trabajo es una función de control que se ocupa de determinar la secuencia del trabajo y asignarlo a un tipo de capacidad específico. El despacho se refiere a los procedimientos mediante los cuales se llevan a cabo los programas. Es importante contar con procedimientos claros de manera que a todo mundo se le informe en el momento adecuado de su responsabilidad y se mantengan registros tanto para los costos como para el flujo de información. La figura 2.10 resume la estructura del procesamiento de órdenes de trabajo.

2.7 RETROALIMENTACIÓN DE INFORMACIÓN Y ACCIÓN CORRECTIVA

La función de retroalimentación de información y de acción correctiva se ocupa de la recopilación de datos acerca del estado de la ejecución del trabajo, disponibilidad del sistema, trabajo pendiente y calidad del trabajo realizado. Luego, esta información se analiza y se formula el curso de acción apropiado. Este curso de acción y las decisiones correspondientes están encaminados a mejorar lo siguiente:

1. Control del trabajo.
2. Control de costos.
3. Control de calidad.
4. Control de la condición de la planta.

2.7.1 Control del trabajo

Este tipo de control vigila el estado del trabajo y el trabajo realizado para investigar si éste se ha efectuado de acuerdo con las normas (de calidad y tiempo). En este tipo de control se supone que el sistema de control de mantenimiento incluye normas que se asignan antes de llevar a cabo el trabajo real de mantenimiento. En esta categoría de control se genera un conjunto de informes. Éstos incluyen un informe que muestra el desempeño, con respecto a la norma, de las ocupaciones o puestos utilizados en el trabajo, y su productividad. En este informe es una buena práctica indicar qué proporción del trabajo de mantenimiento se efectúa empleando tiempo extra. Otros informes que son útiles para el control del trabajo son el de trabajos pendientes o atrasados, el porcentaje del mantenimiento de emergencia con relación al mantenimiento planeado, y el porcentaje de trabajos de reparación originados como resultado de inspección de MP. Todos estos informes reflejan algún tipo de medidas de eficiencia.

El informe de trabajos pendientes es esencial para el control del trabajo. Es una buena práctica mantener un informe semanal de trabajos pendientes por ocupación o puesto. El informe también deberá indicar la causa del atraso. Es esencial tener un número aceptable de trabajos pendientes, que generalmente comprenden de 2 a 4 semanas. Tener demasiados o muy pocos trabajos pendientes requiere una acción correctiva. En caso de que se identifique una tendencia descendente en los trabajos pendientes, puede ser necesario alguna de las siguientes acciones correctivas:

1. Reducir el mantenimiento por contrato.
2. Considerar una transferencia entre departamentos.
3. Reducir la fuerza de trabajo de mantenimiento.

Si la cantidad de trabajos pendientes está aumentando y se identifica una tendencia clara, puede ser necesaria alguna de las siguientes acciones correctivas:

1. Incrementar el mantenimiento por contrato.
2. Considerar la transferencia entre departamentos.
3. Programar tiempo extra que sea eficaz en costos.
4. Incrementar la fuerza de trabajo de mantenimiento.

El total de trabajos pendientes deberá controlarse utilizando herramientas para el control estadístico de procesos, especialmente las gráficas de control (ver el capítulo 8). Las gráficas de control son aquellas que tienen una línea central para el promedio y dos límites de control. La línea central del promedio para los trabajos pendientes corresponde al promedio de los promedios de los trabajos pendientes durante varios períodos. Los límites superior e inferior de control son funciones de la variabilidad en la cantidad de trabajos pendientes:

$$\text{Promedio de línea central} = \text{CLA} = \bar{\bar{X}} \quad (2.1)$$

$$\text{Límite superior de control} = \text{UCL} = \bar{\bar{X}} + 3\sigma_x = \bar{\bar{X}} + 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.2)$$

$$\text{Límite inferior de control} = \text{LCL} = \bar{\bar{X}} - 3\sigma_x = \bar{\bar{X}} - 3\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

en donde $\bar{\bar{X}}$ es el promedio de los promedios de trabajos pendientes durante varios períodos, σ es la desviación estándar de los trabajos pendientes, y n es el tamaño de la muestra. El siguiente ejemplo muestra el uso de las gráficas de control para el control de trabajos pendientes.

En la tabla 2.1 se dan los datos de trabajos pendientes semanales para la división mecánica del departamento de mantenimiento, en términos de las horas de mano de obra durante los últimos 6 meses. Las semanas de cada mes se agrupan y se calculan sus promedios, indicándolos con la notación $\bar{X}_i$, $i = 1, \dots, 6$.

Existe una relación bien conocida entre el rango de una muestra de una distribución normal y la desviación estándar. La variable aleatoria $W = R/\sigma$, en donde R es el rango de la muestra y σ es la desviación estándar de la distribución normal. W se conoce como rango relativo y R está dado como

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (2.4)$$

TABLA 2.1 Datos semanales de trabajos pendientes.

Número i	Mes	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Promedio semanal $\bar{X}_i$	Rango semanal R_i
1	Enero	180	170	200	210	190	40
2	Febrero	200	216	250	226	223	50
3	Marzo	180	160	150	190	170	30
4	Abril	170	175	160	190	174	30
5	Mayo	210	206	226	190	208	36
6	Junio	195	185	175	205	190	30

TABLA 2.2 Valores de d_2 para diferentes tamaños de muestra.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_2	1.128	1.693	2.059	2.325	2.534	2.704	2.843	1.970	3.078

Los parámetros de W son una función del tamaño de la muestra n , y la media de W es d_2 . En consecuencia, un estimador de σ es

$$\hat{\sigma} = \frac{R}{d_2} \quad (2.5)$$

R se estima con $\bar{R}$, que es el rango promedio de varias muestras (grupos) del mismo tamaño n . Así, una estimación de σ se calcularía como

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (2.6)$$

La tabla 2.2 proporciona valores para d_2 para varios tamaños de muestra. Por lo tanto,

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m}, \text{ donde } R_i \text{ es el rango del grupo } i \quad (2.7)$$

Para los datos de la tabla 2.1,

$$\bar{R} = \frac{40 + 50 + 30 + 30 + 30 + 30}{6} = 36$$

$$\hat{\sigma} = \frac{32.7}{d_2} = \frac{32.7}{2.059} = 15.9$$

$$\text{UCL} = \bar{\bar{x}} + 3\hat{\sigma} = 192.5 + 3(15.9) = 245$$

$$\text{LCL} = \bar{\bar{x}} - 3\hat{\sigma} = 192.5 - 3(15.9) = 140$$

La figura 2.11 muestra la gráfica de control para la cantidad semanal de trabajos pendientes.

En términos del promedio semanal, la cantidad de trabajos pendientes está bajo control si cae entre 140 y 245, siempre y cuando no haya ciclos o tendencias en los puntos entre los límites de la gráfica de control. Si un promedio mensual está fuera de los límites, deberá hacerse una investigación para determinar la causa y podría ser necesaria una acción correctiva.

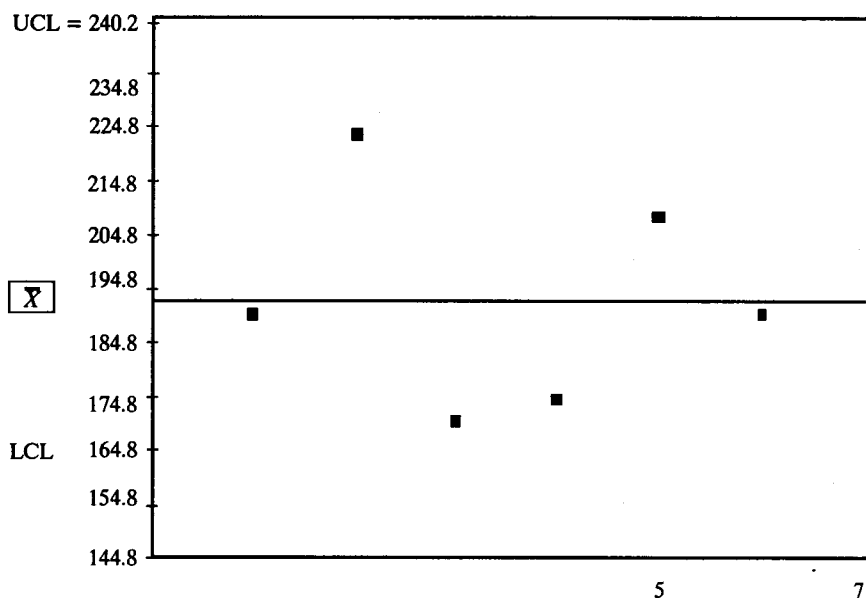


Figura 2.11 Gráfica para el control de trabajos pendientes por semana.

2.7.2 Control de costos

El costo de mantenimiento comprende:

1. El costo directo de mantenimiento, que es el costo de la mano de obra, las refacciones, los materiales, el equipo y las herramientas.
2. Costo de paro de las operaciones debido a la falla.
3. Costo de calidad debido a que un producto está fuera de las especificaciones como resultado de defectos en la máquina.
4. Costo de redundancia debido a equipos de respaldo.
5. Costo de deterioro del equipo por la falta de mantenimiento adecuado.
6. Costo de mantenimiento excesivo.

Casi toda la información sobre los costos está disponible en la orden de trabajo. Se debe entregar mensualmente un resumen de los costos de mantenimiento por orden de trabajo. Este se utiliza para controlar los costos de mantenimiento y determinar los costos de los productos manufacturados.

Los informes de costos indicarán los programas de reducción de costos que más se necesitan. La reducción de costos deberá ser un esfuerzo perma-

nente en cualquier programa de mantenimiento acertado. Las áreas en donde pueden lanzarse programas de reducción de costos son las siguientes:

1. Considerar el uso de materiales alternos para mantenimiento.
2. Modificar los procedimientos de inspección.
3. Revisar los procedimientos de mantenimiento, haciendo ajustes particularmente en el tamaño de las cuadrillas y los métodos.
4. Rediseñar los procedimientos de manejo de materiales y la distribución del taller.

2.7.3 Control de calidad

El mantenimiento tiene un enlace directo con la calidad de los productos. El equipo con un buen mantenimiento produce menos desperdicios que el equipo con un mantenimiento deficiente. También existen pruebas de que la condición de las máquinas afecta su capacidad de proceso. La investigación actual ha establecido el enlace entre el mantenimiento y la calidad. Por ejemplo, la capacidad de una máquina herramienta en óptimas condiciones puede tener una distribución de tolerancias que tenga un 99% de los productos dentro de las especificaciones. Sin embargo, una máquina desgastada tendrá mayor traqueteo y vibración. La distribución de tolerancias de una máquina desgastada será más amplia y mostrará una mayor varianza, además de que un menor porcentaje de la producción estará dentro de las especificaciones.

Un informe mensual sobre el porcentaje de trabajos repetidos y rechazos de productos puede ayudar a identificar cuáles máquinas requieren una investigación para determinar las causas de problemas de calidad. Una vez que se investigan las máquinas, se tomará una medida de acción correctiva para remediar el problema. La medida puede dar por resultado una modificación de la política actual de mantenimiento y de la capacitación de la fuerza de trabajo de un oficio particular (para más detalles, ver el capítulo 8).

2.7.4 Control de la condición de la planta

El control de la condición de la planta requiere un sistema eficaz para el registro de la fallas y las reparaciones de equipos críticos e importantes en la planta. Esta información generalmente se obtiene de la orden de trabajo y el archivo de historia del equipo. Los registros en el archivo de historia del equipo incluyen el momento de la falla, la naturaleza de ésta, las reparaciones realizadas, el tiempo muerto total, y las máquinas y refacciones que fueron empleadas.

Un informe mensual de mantenimiento deberá incluir el tiempo muerto de los equipos críticos e importantes y su disponibilidad. Si el tiempo muerto es excesivo o si la disponibilidad y prontitud para uso de la máquina son bajas, se debe tomar una medida correctiva para disminuir la ocurrencia de fallas. La medida correctiva puede requerir el establecimiento de un programa de mejora de confiabilidad o un programa de mantenimiento planeado, o ambos.

2.8 DISEÑO EFICAZ DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

En esta sección se describen seis diseños de programas de mantenimiento. Estos programas ofrecen acertados cursos de acción que pueden ser adoptados en el ciclo de control del mantenimiento. Los objetivos de estos programas son mejorar la disponibilidad de la planta, reducir los costos y mejorar la confiabilidad del equipo y la calidad del producto. Estos programas son:

1. Mantenimiento planeado.
2. Manejo del mantenimiento de emergencia.
3. Mejora de la confiabilidad.
4. Programa de administración del equipo.
5. Reducción de costos.
6. Capacitación y motivación de los empleados.

2.8.1 Mantenimiento planeado

El mantenimiento planeado es un esfuerzo integrado para convertir la mayor parte del trabajo de mantenimiento en mantenimiento programado. El mantenimiento planeado es el trabajo que se identifica mediante el mantenimiento preventivo y predictivo. Incluye la inspección y el servicio de trabajos que se realizan a intervalos recurrentes específicos. También incluye el mantenimiento con base en las condiciones.

En el mantenimiento planeado, todas las actividades se planean previamente. Esto incluye la planeación y abastecimiento de materiales. La planeación de los materiales permite una programación más confiable, además de los ahorros de costos en entrega y pedidos de materiales. Asimismo, los trabajos se programan en momentos que no alteren los programas de entregas y de producción. Los ahorros con la introducción del mantenimiento planeado son significativos en términos de la reducción del tiempo muerto y los costos de materiales. El mantenimiento planeado ofrece un enfoque

acertado para mejorar el mantenimiento y cumplir con los objetivos establecidos.

2.8.2 Mantenimiento de emergencia

El mantenimiento de emergencia se refiere a cualquier trabajo no planeado que deberá empezarse el mismo día. El mantenimiento de emergencia, por su naturaleza, permite muy poco tiempo para su planeación. Se debe reducir al mínimo la cantidad de mantenimiento de emergencia y no deberá exceder del 10% del trabajo total de mantenimiento. El departamento de mantenimiento debe tener una política clara para el manejo del mantenimiento de emergencia. A continuación se presentan dos posibilidades para el manejo del mantenimiento de emergencia:

1. Introducir el mantenimiento de emergencia en el programa regular y luego escoger los trabajos pendientes con tiempo extra, trabajadores temporales o mantenimiento por contrato. Es una práctica aceptable en la industria conceder del 10% al 15% de capacidad de carga para el trabajo de mantenimiento de emergencia.
2. Estimar la cantidad de mantenimiento de emergencia y asignar trabajadores hábiles y dedicados para la orden de trabajo de este tipo.

En la mayoría de las plantas se adopta el primer método debido a que se espera que dé por resultado una mayor utilización de la fuerza laboral; sin embargo, el segundo ofrece la capacidad de responder con rapidez. Es necesario, tan pronto como se haya iniciado el trabajo y sea posible estimar la cantidad de reparación necesaria para el trabajo de emergencia, planear el resto del trabajo con base en la información disponible.

2.8.3 Mejora de la confiabilidad

Un programa de mejora de la confiabilidad ofrece una alternativa inteligente para mejorar la función de mantenimiento. Se deben mantener archivos históricos de los equipos críticos e importantes, y hacer estimaciones del tiempo medio entre fallas (TMEF). La frecuencia del mantenimiento de emergencia es una función de la tasa de fallas del equipo. Puede calcularse para un período de operación de n horas, durante las cuales habrá n/TMEF acciones de mantenimiento de emergencia. Entre mayor sea el TMEF, menor será el número de incidentes de mantenimiento de emergencia.

Otro método que mejora la confiabilidad del equipo y optimiza las operaciones de mantenimiento es un programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC). En el MCC, el programa de mantenimiento se desarrolla bajo el concepto de restablecer la función del equipo más que de

llevar al equipo a una condición ideal. El MCC ha sido aplicado con éxito en la industria de la aviación comercial y en plantas generadoras de energía. En el capítulo 13 se describe un método sistemático para desarrollar un programa MCC.

2.8.4 Programa de administración del equipo

El mantenimiento productivo total (MPT) (ver el capítulo 13) es una filosofía japonesa que se concentra en la administración del equipo a fin de mejorar la calidad del producto. Su objetivo es reducir pérdidas de equipo para mejorar la eficacia global del equipo (EGE). Según Nakajima, las seis principales causas de pérdidas de equipo son las siguientes:

1. Falla.
2. Preparación y ajustes.
3. Equipo sin trabajo y paros menores.
4. Velocidad reducida.
5. Defectos del proceso.
6. Rendimiento reducido.

Asimismo, el programa de administración del equipo se centra en establecer un programa acertado de MPT para cada equipo y proporcionar un método satisfactorio para mejorar el estado del mantenimiento.

2.8.5 Reducción de costos

El mantenimiento puede contribuir a reducir el costo del producto mediante un esfuerzo continuo de reducción de costos en las operaciones de mantenimiento. La reducción de costos en el mantenimiento puede obtenerse aplicando técnicas de ingeniería de métodos. Estas técnicas estudian la forma en que el trabajo se está llevando a cabo con el fin de desarrollar una mejor forma de realizar el mantenimiento. La ingeniería de métodos tiene pasos bien definidos para examinar el trabajo de mantenimiento a fin de simplificar y eliminar pasos innecesarios. Esta reducción y simplificación del trabajo da como resultado ahorros en costos. En los esfuerzos dirigidos a la reducción de costos, se debe considerar lo siguiente:

1. Materiales y refacciones alternos.
2. Método alternativo para inspección y reparación general.
3. Equipos y herramientas alternos.

4. Procedimientos alternos para la planeación y la programación.
5. Estándares de tiempo alternos para los trabajos.

La técnica de la ingeniería de métodos ofrece medios valiosos para mejorar el mantenimiento y controlar los costos.

2.8.6 Capacitación y motivación de los empleados

El mantenimiento de producción (la acción de realizar mantenimiento) depende, en gran medida, de las habilidades de técnicos específicos. Gran parte de la ineficacia en el mantenimiento puede encontrarse en la falta de trabajadores técnicos calificados. Por lo tanto, es necesario contar con un programa permanente de capacitación en el trabajo (CET) para asegurar que los empleados estén equipados con las habilidades necesarias para un mantenimiento eficaz. Las habilidades incluyen juicio, habilidades de comunicación y lectura de información técnica y, en algunos casos, habilidades en campos múltiples (multihabilidades).

El programa de capacitación deberá incluir capacitación fuera del y en el trabajo. El departamento de mantenimiento debe contar con un programa anual de capacitación para mejorar y actualizar el conocimiento de su personal. La capacitación deberá incluir un programa de técnicas modernas que lleve de manera periódica las últimas técnicas de mantenimiento a todos los interesados.

El programa de capacitación deberá ir acompañado de un programa de motivación. La motivación de los empleados puede lograrse mediante un programa de incentivos que recompense a los trabajadores productivos y fomente la mejora continua.

RESUMEN

Los sistemas de control de mantenimiento desempeñan una función clave en un programa eficaz de mantenimiento. Los conceptos del control automático de procesos, que incluyen objetivos del proceso, muestreo, análisis de las muestras y aplicación de medidas correctivas, se definen y utilizan para establecer un sistema eficaz de control del mantenimiento. Más adelante se explica con detalle la estructura del control del mantenimiento. Ésta comprende la coordinación de las órdenes de trabajo, el procesamiento de las mismas, e información de retroalimentación y acciones correctivas. Los pasos para un control eficaz del mantenimiento son los siguientes:

1. Definir objetivos y metas en términos de calidad, disponibilidad y eficiencia.

2. Coordinar y planear las órdenes de trabajo.
3. Procesar las órdenes de trabajo.
4. Recopilar información de las órdenes de trabajo y los archivos históricos y compilar informes sobre eficiencia, disponibilidad y calidad.
5. Examinar la desviación con respecto de los objetivos y metas establecidos.
6. Si existe una desviación, tomar una medida correctiva, o bien mejorar las metas.

Los seis diseños de programas de mantenimiento descritos en la sección 2.8 ofrecen formas y medios para formular una acción correctiva en caso de ser necesario. También proporcionan métodos para mejorar el estado actual del mantenimiento.

EJERCICIOS

- 2.1 Describa el ciclo de control del mantenimiento.
- 2.2 Haga una lista de tres objetivos del control del mantenimiento.
- 2.3 ¿Cuál es el propósito de la orden de trabajo? Describa su flujo en el sistema de mantenimiento.
- 2.4 ¿Cuáles son los métodos y las acciones que podría necesitar para el control de trabajos pendientes?
- 2.5 Diseñe una orden de trabajo para una organización de tamaño mediano.
- 2.6 Visite tres organizaciones en su área y recopile muestras de sus órdenes de trabajo. Para cada organización, señale las deficiencias de la orden de trabajo y sugiera mejoras.
- 2.7 ¿Cuáles son las tres funciones de control en el procesamiento de órdenes de trabajo?
- 2.8 ¿Cuáles son los cursos de acción posibles con los que se cuenta para mejorar el estado actual del mantenimiento para alcanzar los objetivos establecidos?
- 2.9 Proponga dos esquemas para el manejo del mantenimiento de emergencia.
- 2.10 El mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) y el mantenimiento productivo total (MPT) son programas que pueden ayudar a mejorar el control del mantenimiento. Describa de qué manera cada

uno de estos programas puede ayudar a lograr un mejor control sobre el desempeño del mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- M. Ben Daya and S. O. Duffuaa, "Maintenance and Quality: The Missing Link," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 20-26.
- R. H. Clifton, *Principles of Planned Maintenance*, Arnold, London.
- C. W. Gits, "Structuring Maintenance Control Systems," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 14, No. 7, pp. 5-17.
- A. Kelly, *Maintenance Planning and Control*, Butterworth, London.
- S. Nakajima, *Introduction to TPM*, Productivity Press, Portland, OR.
- B. W. Niebel, *Engineering Maintenance Management*, 2nd Ed., Dekker, New York.
- K. S. Al-Sultan and S. O. Duffuaa, "Maintenance Control Via Mathematical Programming," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 36-46.

3

MANTENIMIENTO PREVENTIVO, CONCEPTOS, MODELOS Y ANÁLISIS

3.1 INTRODUCCIÓN

Si el mantenimiento se define como el aseguramiento de que una instalación, un sistema de equipos, una flotilla u otro activo fijo continúen realizando las funciones para las que fueron creados, entonces el mantenimiento preventivo es una serie de tareas planeadas previamente que se llevan a cabo para contrarrestar las causas conocidas de fallas potenciales de dichas funciones. Esto es diferente a un mantenimiento de reparación, el cual normalmente se considera como el reemplazo, renovación o reparación general del o de los componentes de un equipo o sistema para que sea capaz de realizar la función para la que fue creado.

El mantenimiento preventivo es el enfoque preferido para la administración de los activos:

- puede prevenir una falla prematura y reducir su frecuencia.
- puede reducir la severidad de la falla y mitigar sus consecuencias.
- puede proporcionar un aviso de una falla inminente o incipiente para permitir una reparación planeada.
- puede reducir el costo global de la administración de los activos.

El mantenimiento de reparación puede dividirse en dos amplias categorías: reparación planeada y reparación no planeada. La reparación planeada implica, en primer lugar, que todos los recursos necesarios para realizar las tareas han sido planeados previamente y están disponibles, y en segundo

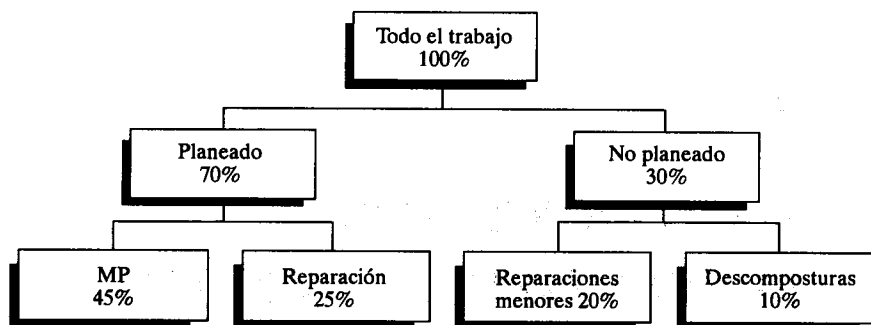


Figura 3.1 Distribución del trabajo.

lugar, que el trabajo se llevará a cabo de acuerdo con un programa establecido. La reparación no planeada puede tener disponibles un conjunto de instrucciones normales, puede tener a la mano los trabajadores y piezas necesarias, o puede estar insertado en un programa de mantenimiento bajo una base *ad hoc*, pero no cumple con los criterios de planeación previa ni de programación previa. Si el mantenimiento preventivo se considera como trabajo “planeado”, la distribución por horas de mano de obra en una instalación industrial que funciona correctamente puede ser como la que se describe en la figura 3.1

El mantenimiento preventivo se lleva a cabo para asegurar la disponibilidad y confiabilidad del equipo. La disponibilidad del equipo puede definirse como la probabilidad de que un equipo sea capaz de funcionar siempre que se le necesite. La confiabilidad de un equipo es la probabilidad de que el equipo esté funcionando en el momento t . El objetivo del mantenimiento preventivo es aumentar al máximo la disponibilidad y confiabilidad del equipo llevando a cabo un mantenimiento planeado, que se conoce comúnmente como mantenimiento preventivo. Una de las características principales de un equipo bien diseñado es que puede repararse/mantenerse durante el tiempo especificado para ello. Esto se conoce como mantenibilidad o facilidad de mantenimiento y puede definirse como la probabilidad de ser reparado/mantenido durante un tiempo específico. El mantenimiento preventivo también es un medio para proporcionar retroalimentación a los diseñadores de equipo para mejorar su facilidad de mantenimiento.

El mantenimiento preventivo puede estar basado en las condiciones o en datos históricos de fallas del equipo. La figura 3.2 muestra una representación gráfica del mantenimiento preventivo. Consta de dos categorías; éstas tienen una base estadística y de confiabilidad o se basan en las condiciones. La primera categoría se basa en datos obtenidos de los registros históricos del equipo. La segunda categoría se basa en el funcionamiento y las condi-

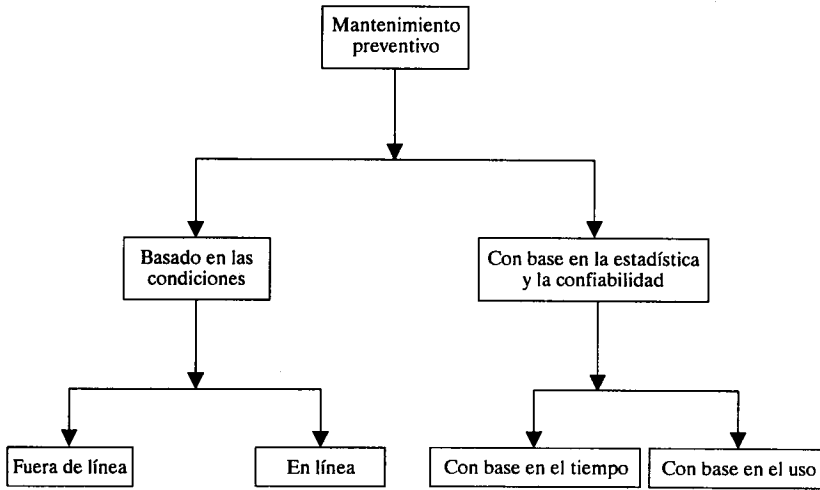


Figura 3.2 Categorías del mantenimiento preventivo.

ciones del equipo. En la siguiente sección se ofrece una descripción detallada del mantenimiento preventivo.

En la sección 3.2 de este capítulo se presentan los conceptos del mantenimiento preventivo. La sección 3.3 presenta varias técnicas de diagnóstico que son útiles en la implementación de un programa de mantenimiento basado en las condiciones. La sección 3.4 describe los conceptos necesarios en las decisiones sobre reemplazo. La sección 3.5 resume los pasos para desarrollar un programa de mantenimiento planeado en una forma sencilla y directa. La sección 3.6 describe modelos matemáticos para un mantenimiento preventivo y reemplazo óptimos. Se presenta una buena cantidad de modelos. La sección 3.7 presenta varios modelos matemáticos para inspección. Estos modelos ayudan a determinar la frecuencia de las inspecciones que permitirán establecer la condición de un equipo a fin de planear una acción apropiada de mantenimiento. La sección 3.8 presenta conceptos avanzados para elaborar modelos de mantenimiento preventivo cuando la acción de mantenimiento es imperfecta. La sección 3.9 describe el concepto de modelos de tiempo de demora y su uso para determinar el mantenimiento preventivo.

3.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo (MP) se definió como una serie de tareas planeadas previamente, que se llevan a cabo para contrarrestar las causas conocidas de fallas potenciales de las funciones para las que fue creado un

activo. Puede planearse y programarse con base en el tiempo, el uso o la condición del equipo. Es el enfoque preferido frente al mantenimiento correctivo por cuatro razones principales:

- La frecuencia de fallas prematuras puede reducirse mediante una lubricación adecuada, ajustes, limpieza e inspecciones promovidas por la medición del desempeño.
- Si la falla no puede prevenirse, la inspección y la medición periódicas pueden ayudar a reducir la severidad de la falla y el posible efecto dominó en otros componentes del sistema del equipo, mitigando de esta forma las consecuencias negativas para la seguridad, el ambiente o la capacidad de producción.
- En donde podamos vigilar la degradación gradual de una función o un parámetro, como la calidad de un producto o la vibración de una máquina, puede detectarse el aviso de una falla inminente.
- Finalmente, hay importantes diferencias en costos tanto directos (por ejemplo, materiales) como indirectos (por ejemplo, pérdidas de producción) debido a que una interrupción no planeada a menudo provoca un gran daño a los programas de producción y a la producción misma, y debido también a que el costo real de un mantenimiento de emergencia es mayor que uno planeado y a que la calidad de la reparación puede verse afectada de manera negativa bajo la presión de una emergencia.

La pregunta más crítica en el mantenimiento preventivo es: ¿Qué tarea o serie de tareas deben realizarse para impedir una falla? Obviamente, si entendemos el mecanismo de la falla real del equipo, podemos decidir qué tareas son lógicas para impedir la falla y cuáles no son pertinentes. Si el programa de MP requiere cambiar las luces delanteras de un automóvil cada mes, ¿tendrá esto algún impacto en la tasa de fallas? Probablemente no, debido a que el mecanismo de falla no está relacionado con el tiempo, sino con otras variables, como la distancia a la que va un automóvil detrás de un gran camión de carga en un camino de arena.

Si el mecanismo dominante de falla se basa en el tiempo o se debe al desgaste, es decir, si la probabilidad de la falla aumenta gradualmente con el tiempo, la edad o el uso, entonces las tareas de mantenimiento tienen que basarse en el tiempo. Si, por otra parte, la probabilidad de una falla es constante independientemente del tiempo, la edad o el uso, y existe una degradación gradual desde el principio de la falla, entonces las tareas de mantenimiento pueden basarse en las condiciones. Las tareas basadas en el tiempo se justifican si un restablecimiento o un reemplazo periódicos de componentes restablecen el equipo al estado en que pueda realizar las funciones para las que fue creado. Esta tarea podría variar en complejidad

desde una reparación general completa de toda la unidad hasta el simple reemplazo de un filtro.

Las tareas basadas en las condiciones, justificadas cuando se desconoce el enfoque de prevención de fallas, se centran en la medición de un parámetro que indique un deterioro o una degradación en el rendimiento funcional del equipo. Las mediciones y las inspecciones mismas pueden programarse regularmente, pero no las tareas de restauración o preventivas. Estas mediciones pueden relacionarse directamente con la operación de la máquina, como la vibración, la temperatura durante el funcionamiento, el amperaje requerido, los contaminantes en el aceite de lubricación o el nivel de ruido, o pueden ser una medida sustituta de la operación de la máquina, como la calidad del producto, sus dimensiones, patrones de desgaste o composición. En la industria de la aviación se ha realizado un amplio estudio de distribuciones de fallas reales o curvas de probabilidad condicional de fallas para los sistemas y componentes de los equipos. Estos estudios sugieren que los patrones predominantes muestran una probabilidad constante de falla con la edad, con excepción de la "mortandad infantil", o falla en el primer período después de la puesta en servicio. Por lo tanto, cuando el equipo es nuevo o ha sido sometido recientemente a una reparación general, tiene una probabilidad de falla mayor que en un período posterior. Esto es atribuible a posibles errores de diseño, manufactura, reparación general o instalación, o a procedimientos iniciales inapropiados de operación y mantenimiento. Una vez que éstos se corrigen, las fallas virtualmente ya no se relacionan con la edad.

Si se consideran los rodamientos, por ejemplo, sólo un pequeño porcentaje de éstos fallan realmente durante el servicio y, de hecho, por lo general duran más tiempo que el equipo donde se instalan. La mayoría de las fallas de los rodamientos ocurren debido a una lubricación deficiente o inadecuada, a contaminantes sólidos o líquidos que entran en el rodamiento, o a un inadecuado manejo o montaje. Cuando los rodamientos se manejan, se montan, se alinean, se sellan y se lubrican correctamente y se mantienen fuera de temperaturas extremas, su modo predominante de falla es la fatiga -envejecimiento-. Por lo tanto, el mantenimiento preventivo sin intrusión con base en las condiciones es la elección lógica para el monitoreo de los rodamientos.

El mantenimiento basado en el tiempo (por ejemplo, reparaciones generales) es técnicamente factible si la pieza tiene una vida promedio identificable. La mayoría de las piezas sobreviven dicha edad y la acción restablece la condición de la pieza a su función deseada. El mantenimiento basado en las condiciones es técnicamente factible si es posible detectar condiciones o funcionamiento degradado, si existe un intervalo de inspección práctico, y si el intervalo de tiempo (desde la inspección hasta la falla funcional) es suficientemente grande para permitir acciones correctivas o reparaciones. Las figuras 3.3 y 3.4 muestran cuándo se debe emplear el mantenimiento basado en el tiempo o el mantenimiento basado en las condiciones.

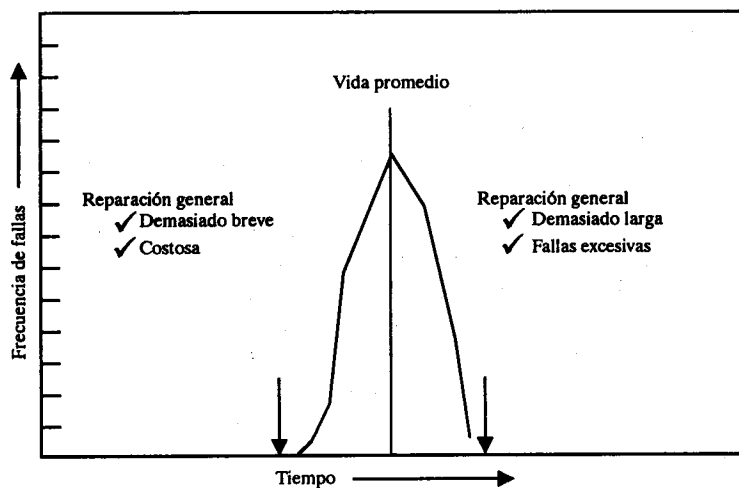


Figura 3.3 Reparación general basada en el tiempo.

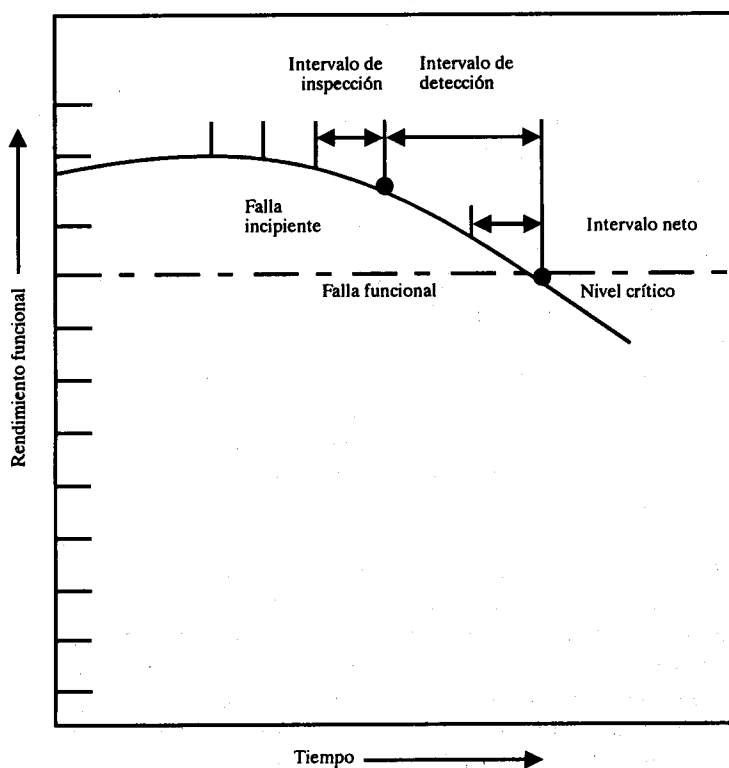


Figura 3.4 Mantenimiento basado en las condiciones.

Debido a que los equipos complejos y sus componentes tendrán varias causas posibles de falla, es necesario desarrollar una serie de acciones de mantenimiento preventivo —algunas basadas en las condiciones y otras basadas en el tiempo— para el mismo equipo, y consolidar éstas en un programa de MP. El programa tendrá tareas agrupadas por periodicidad (es decir, diaria, semanal o anualmente, por horas de operación, por ciclos, etc.) y agrupadas por oficio (es decir, mecánico, electricista, operador, técnico, etc.). Ver la tabla 3.1

El mantenimiento preventivo es el principal requisito para reducir la frecuencia y severidad de las descomposturas de las máquinas. Se utilizan tres amplias medidas para vigilar que el programa de MP sea completo:

- Cobertura del MP — el porcentaje de equipo crítico para el cual se han desarrollado programas de MP.
- Cumplimiento del MP — el porcentaje de rutinas del MP que han sido completadas de acuerdo con su programa.
- Trabajo generado por la rutinas del MP — el número de acciones de mantenimiento que han sido solicitadas y tienen como origen rutinas del MP.

El mantenimiento preventivo basado en las condiciones requiere monitorear una variable que está estrechamente relacionada con la falla de los equipos. Es necesario identificar qué parámetro debe vigilarse y medirse. A continuación se presentan una serie de técnicas de diagnóstico que ayudarán a desarrollar un sistema de mantenimiento basado en las condiciones.

TABLA 3.1 Acciones del programa de mantenimiento preventivo.

Quién	Cuándo	Acción	Equipo	Condición	Medida
Mecánico	Semanalmente	Inspeccionar/ ajustar	Sistema hidráulico	Presión	$2\,500\text{ lb/pulg}^2 \pm 50\text{ lb/pulg}^2$
Técnico	Semestralmente	Tomar lectura	Rodamientos de motor	Vibración	Banda octava con respecto a la línea básica
Operador	Mensualmente	Lubricar	Motor reductor	Nivel de la varilla de inmersión	Llenar hasta indicador máximo con aceite 10 W 40
Operador	Diariamente	Verificar	Motor reductor	Presión del aceite	Reemplazar el filtro de aceite con P-OF-4201-86 si $\delta p > 10\text{ lb/pulg}^2$

3.3 TECNOLOGÍAS DE DIAGNÓSTICO

Antes de la creación de tecnologías para evaluar la condición del equipo, los operadores y el personal de mantenimiento acostumbraban confiar en sus propios sentidos: tacto (temperatura, vibración, desgaste); olfato (temperatura, contaminación); vista (vibración, temperatura, alineación); oído (ruido, vibración, cavitación, desgaste); gusto (contaminación); y ese “sexto” sentido, que actualmente se duplica como sistemas expertos de diagnóstico. El objetivo de la inspección era buscar una señal de falla inminente, de manera que la reparación pudiera planearse, programarse y completarse para minimizar el impacto en las operaciones y el costo total. La dificultad clave en el empleo de los sentidos humanos es la subjetividad en la recopilación de los datos y su interpretación, y la cantidad de tiempo disponible para reaccionar después que se determina la condición.

Las tecnologías de diagnóstico se han extendido en todos los sectores industriales durante las últimas décadas. Las técnicas de mantenimiento basado en las condiciones que se aplican más comúnmente son el análisis de vibraciones, el análisis de aceites lubricantes, la termografía, el ultrasonido, el monitoreo de efectos eléctricos y los penetrantes.

3.3.1 Análisis de vibraciones

La vibración puede definirse como el movimiento de una masa desde su punto de reposo a lo largo de todas las posiciones y de regreso al punto de reposo, en donde está lista para repetir el ciclo. El tiempo que requiere para esto es su período, y el número de repeticiones de este ciclo en un tiempo dado es su frecuencia.

La severidad de la vibración se determina por la amplitud, o el máximo movimiento de su velocidad pico y de su aceleración pico. El ángulo de fase a menudo se mide cuando se compara el movimiento de una pieza que está vibrando con respecto a una referencia fija. Las máquinas vibrarán a lo largo de un amplio espectro de frecuencias. El análisis de vibraciones en el monitoreo de condiciones se realiza comparando las características de las vibraciones de la operación actual con respecto a una línea de referencia, la cual se midió cuando se sabía que la máquina estaba operando normalmente. La selección de los parámetros específicos a medir depende principalmente de la frecuencia de la vibración.

Las técnicas para el análisis de vibraciones pueden utilizarse para vigilar el rendimiento del equipo mecánico que gira, realiza movimiento recíprocante o tiene otras acciones dinámicas. Entre los ejemplos se incluyen las cajas de engranes, los rodamientos, motores, bombas, ventiladores, turbinas, transmisiones de banda o cadena, compresores, generadores, transportadores, máquinas recíprocas y máquinas indexadoras.

Los siguientes son tres tipos comunes de análisis de vibraciones:

El análisis de vibraciones de banda amplia monitorea el tren total de la máquina y es útil para revisar información básica y tendencias, pero tiene un uso limitado en señalar áreas con problemas.

El análisis de vibraciones de banda octava es más útil, con el espectro dividido en una serie de rangos que pueden compararse con valores predefinidos para descubrir desviaciones en la frecuencia de vibraciones.

El análisis de vibraciones de banda estrecha es el más útil como herramienta para diagnóstico, con la capacidad para determinar el área específica del problema y su causa.

3.3.2 Análisis de lubricantes

Cuando se analiza el aceite de una máquina, existen varias técnicas diferentes que pueden aplicarse para determinar la composición química del aceite y buscar materiales extraños en él.

La ferrografía y la detección de virutas magnéticas examinan partículas de desgaste con base de hierro en los aceites lubricantes para determinar el tipo y grado del desgaste, y pueden ayudar a señalar el componente específico que se está desgastando.

El análisis espectrométrico del aceite mide la presencia y cantidad de contaminantes en el aceite mediante el espectrómetro de emisión atómica u absorción. Es útil para determinar la presencia no sólo de hierro, sino también de otros elementos metálicos y no metálicos, que pueden estar relacionados con la composición de las diversas partes de la máquina, como rodamientos, cojinetes, anillos de pistones, etc. Es útil cuando las partículas de desgaste están siendo generadas inicialmente en las primeras etapas de la falla, ya que dichas partículas son pequeñas.

La cromatografía mide los cambios en las propiedades de los lubricantes, incluyendo la viscosidad, punto de inflamación, pH, contenido de agua y fracción insoluble, mediante la absorción y análisis selectivos.

3.3.3 Termografía

Los usos más comunes de la termografía, que mide la temperatura superficial mediante la medición de radiación infrarroja, son los de determinar conexiones eléctricas deficientes y puntos peligrosos, desgaste del refractario en hornos, y sobrecalentamientos críticos en componentes de calderas y turbinas. Una cámara de rayos infrarrojos muestra variaciones en la temperatura superficial, calibrada para proporcionar la temperatura absoluta o los

gradientes de temperatura mediante variaciones en blanco y negro o a color.

3.3.4 Ultrasonido

Existen varias técnicas para las pruebas de ultrasonido, pero todas ellas se emplean para determinar fallas o anomalías en soldaduras, recubrimientos, tuberías, tubos, estructuras, flechas, etc. Las grietas, huecos, acumulaciones, erosión, corrosión e inclusiones se descubren transmitiendo pulsos u ondas de ultrasonido a través del material y evaluando la marca resultante para determinar la ubicación y severidad de la discontinuidad. Esta técnica también se utiliza para medir la cantidad de flujo.

3.3.5 Monitoreo de efectos eléctricos

Existen varias pruebas para determinar la corrosión empleando un circuito eléctrico sencillo, el cual se monitorea mediante instrumentación de diferentes grados de complejidad. El Corrator utiliza el método de polarización electroquímica en un recipiente con un líquido corrosivo. El Corrometer utiliza la resistencia eléctrica a través de una varilla insertada en el entorno activo (por ejemplo, equipo de proceso en una refinería).

Los dispositivos más comunes utilizados para monitorear o probar los motores o los generadores son los generadores de voltaje, incluyendo fusionadores. Éstos miden la resistencia del aislamiento y aplican un voltaje de prueba que va de 250 a 10 000 voltios.

3.3.6 Penetrantes

Los penetrantes electrostáticos y de tintes líquidos se utilizan para detectar grietas y discontinuidades en superficies provocadas en la manufactura por desgaste, fatiga, procedimientos de mantenimiento y reparación general, corrosión o desgaste general por agentes atmosféricos. Se aplica el penetrante y se permite que penetre en las anomalías. La superficie se limpia y así el penetrante se revela mediante técnicas visuales, fluorescentes o electrostáticas.

3.4 MODELOS PARA DECISIONES DE REEMPLAZO

La decisión de reparar, actualizar o reemplazar un equipo o refacciones reparables puede ser tomada en la etapa de diseño de un nuevo sistema, en un punto en el ciclo de vida de un equipo cuando ha ocurrido una descompostura o cuando resulta evidente la obsolescencia. Requiere un examen de los costos del ciclo de vida total de la pieza durante la porción restante de

su ciclo de vida. El ciclo de vida total del equipo o de la pieza incluye el momento desde su adquisición hasta su eliminación final. Se consideran todos los costos desde la compra inicial, instalación, reparación, reemplazos, actualización, movimiento hacia y desde las instalaciones de reparación, remoción del servicio, desmantelamiento y eliminación.

Las piezas reparables tienen una consideración adicional, a saber, reparar o reemplazar la pieza cuando se descompone. ¿Se puede reparar la pieza físicamente? En el caso de piezas complejas como las turbinas, la respuesta generalmente es "sí", y en el caso de muchos componentes como los filtros, la respuesta a menudo es "no". Los componentes grandes, de una sola pieza, como las flechas, impulsores, rotores y cubiertas de máquinas son muy costosos y la reparación puede ser más económica que el reemplazo. Si se sabe que el fabricante original del equipo ya no produce la pieza y no existe un sustituto conocido, a menudo es necesario reparar la pieza a cualquier costo, o elevar la decisión al nivel de reemplazo junto con el ensamble inmediato superior frente a la decisión de la reparación de la pieza inservible.

La decisión de reparar también deberá estar acompañada de la decisión acerca de la cuadrilla de reparación más económica a utilizar. El costo y la capacidad de reparación empleando recursos internos, también conocido como reparación orgánica, deberá compararse con el costo de envío de la pieza hacia y desde un contratista o taller de apoyo de reparaciones para su reparación.

El mejor momento para tomar decisiones de reemplazo en el caso de piezas reparables es durante la fase de diseño del ciclo de vida del equipo. Gran parte de la información necesaria para tomar la decisión se puede obtener fácil y directamente del proveedor del equipo. Cuando transcurren varios años después de adquirido el equipo, es más difícil obtener ese tipo de información debido a que el proveedor tal vez ya no esté suministrando el mismo equipo. Los costos de reemplazo para el equipo y sus componentes pueden tomarse directamente de los costos de compra del equipo y las listas de las refacciones recomendadas. Los costos de reparación pueden solicitarse al proveedor y a los centros de reparación recomendados por el proveedor para compararlos con las propias estimaciones de una reparación interna. Los datos sobre tasa de fallas serán necesarios para predecir la frecuencia de los eventos de reparación y poder calcular el costo total durante el ciclo de vida. Nuevamente, éste será más fácil de obtener en el momento de compra del equipo, pero tal vez no sea tan exacto como los registros de fallas específicos a la aplicación del equipo. En ausencia de datos de fallas por parte del fabricante, es posible utilizar datos genéricos a partir de tasas de fallas y bases de datos de confiabilidad de la industria en cuestión.

El costo total del ciclo de vida de una pieza está compuesto de la suma de los costos de adquisición, inversión, operación y soporte, y eliminación. Cada uno de éstos tiene varios costos componentes, pero la decisión de

reparar o reemplazar está principalmente en la evaluación de los costos de la inversión inicial, operación y soporte, y en ocasiones en los costos de eliminación del equipo:

$$C_{LC} = C_{\text{adquisición}} + C_{\text{inversión}} + C_{\text{O\&S}} + C_{\text{eliminación}} \quad (3.1)$$

en donde LC es el ciclo de vida y O&S es la operación y el soporte.

Los costos de adquisición a menudo son fijos e incluyen los costos de diseño, evaluación, ingeniería y administración del proyecto de la pieza.

Los costos de inversión inicial pueden diferir cuando se comparan los diseños reparables y los no reparables. En particular, los costos de refacciones iniciales pueden variar considerablemente, dependiendo de si las refacciones son reparables o no. Si las refacciones son reparables, los costos de dichas reparaciones deben ser considerados como parte de los costos de operación y soporte. El equipo de soporte para la solución de problemas, reparación y prueba de la pieza que está siendo considerada también debe ser tomado en cuenta en los costos de inversión inicial. El equipo de soporte puede incluir cualquier cosa, desde herramientas de propósito especial hasta equipo de diagnóstico computarizado y programación del mismo. También deberá considerarse el costo de la documentación técnica requerida para apoyar las actividades de reparación, ya que con frecuencia es más costoso adquirir esta documentación detallada que aceptar los manuales de operación normal y mantenimiento del fabricante.

Los costos de operación y soporte incluyen los costos de artículos consumibles usados en la reparación y operación de la pieza; los costos de refacciones de reemplazo; los costos de manejo de inventario; los costos del personal para las reparaciones; los costos de las instalaciones para las reparaciones; los costos directos de mantenimiento; los costos de empaque, manejo y almacenamiento; los costos de soporte técnico; y los costos de modificaciones futuras.

Los costos de eliminación también pueden verse afectados si las opciones de diseño de la competencia requieren arreglos especiales para manejo y eliminación o provisiones para el manejo de desperdicios.

Dentro de la categoría de costos de operación y soporte se requiere una atención especial para evaluar las opciones de reemplazo y de reparación. Los costos que deben tomarse en cuenta incluyen los siguientes:

- Reparación *in situ*.
- Remoción, eliminación y reemplazo con refacciones.
- Remoción, reemplazo con refacciones, reparación y regreso de la pieza reparada al inventario.
- Agente de reparación que lleva a cabo el trabajo.

La reparación *in situ* significa reparar el equipo sin reemplazar piezas reparable con refacciones. Esto a menudo puede hacer que aumenten los costos de tiempo de reparación y costos de mano de obra asociados, y puede dar por resultado menor tiempo de operación para el sistema en el que está instalado el equipo.

El reemplazo con refacciones de ensambles que han fallado a menudo requiere menor tiempo fuera de servicio, pero requiere tener existencias en inventario de las refacciones que se espera serán requeridas para dichas reparaciones. Los niveles de existencias deberán decidirse por adelantado, y estas existencias representan una inversión por parte del propietario y generan la necesidad de ampliar los costos de manejo mientras las existencias estén en inventario y ocupen espacio en la planta. La cantidad de existencias que se va a mantener puede calcularse empleando varios modelos de decisión, que están disponibles comercialmente y que se estudian en el capítulo 7.

El mecanismo de falla influye en la selección de un curso de acción para el reemplazo del equipo. Por ejemplo, las fallas verdaderamente aleatorias no pueden predecirse o prevenirse, y tampoco pueden eliminarse, mediante un reemplazo basado en el tiempo. No obstante, es necesario decidir cómo manejar el evento aleatorio. Si la falla aleatoria es pequeña al inicio y avanza hasta un punto en el que el equipo llega a ser inservible, puede ser posible emplear técnicas basadas en el tiempo o de monitoreo continuo basado en las condiciones para identificar la falla incipiente antes de que avance demasiado, y luego basar una decisión de reemplazo en la condición observada. Muchas fallas aleatorias siguen dicho patrón y pueden manejarse como se describió. Será necesaria la decisión económica acerca de una reparación o reemplazo para determinar la acción en el caso de los componentes que han fallado (que se remueven). Otras fallas que impliquen mecanismos que se desgastan, como esfuerzos cíclicos o trastornos térmicos, dependen totalmente del tiempo o del uso, y se prestan muy bien para el reemplazo sin el monitoreo de condiciones con base en el tiempo. Nuevamente, la decisión de reparar o reemplazar la pieza desgastada o gastada se basa en un análisis económico como se describió con anterioridad.

3.5 ELEMENTOS DEL MANTENIMIENTO PLANEADO

El mantenimiento planeado se refiere al trabajo de mantenimiento que se realiza con una planeación, previsión, control y registros por adelantado. Incluye toda la gama de tipos de mantenimiento y se aplica a las estrategias de reemplazo, mantenimiento preventivo y correctivo. Se caracteriza por lo siguiente:

- La política de mantenimiento se ha establecido cuidadosamente.
- La aplicación de la política se planea por adelantado.

- El trabajo se controla para que se ajuste al plan original.
- Se recopilan, analizan y utilizan datos que sirvan de guía a las políticas de mantenimiento futuras.

En esta sección se presentan los pasos para desarrollar un programa de mantenimiento planeado.

3.5.1 Administración del plan

El primer paso en el desarrollo de un programa completo de mantenimiento planeado consiste en reunir una fuerza de trabajo que inicie y ejecute el plan. Se designará a una sola persona como jefe de la fuerza de trabajo, además de que es esencial el compromiso de la dirección para el cumplimiento exitoso del plan. Después de anunciar el plan y formar la organización necesaria para el mismo, la fuerza de trabajo deberá emprender la tarea de conformar el programa.

3.5.2 Inventario de las instalaciones

El inventario de las instalaciones es una lista de todas las instalaciones, incluyendo todas las piezas, de un sitio. Se elabora con fines de identificación. Se deberá elaborar una hoja de inventario de todo el equipo que muestre la identificación de éste, la descripción de la instalación, su ubicación, tipo y prioridad (importancia).

3.5.3 Identificación del equipo

Es esencial desarrollar un sistema mediante el cual se identifique de manera única a cada pieza del equipo. Se deberá establecer un sistema de códigos que ayude en este proceso de identificación. El código deberá indicar la ubicación, tipo y número de máquina. Este sistema de códigos deberá diferir de planta a planta y su diseño reflejará la naturaleza de la instalación.

3.5.4 Registro de las instalaciones

El registro de las instalaciones es un archivo (electrónico o en papel) que contiene los detalles técnicos acerca de los equipos incluidos en el plan de mantenimiento. Estos datos son los primeros que deben alimentarse al sistema de información de mantenimiento. El registro del equipo (partida) debe incluir el número de identificación, ubicación, tipo de equipo, fabricante, fecha de fabricación, número de serie, especificaciones, tamaño, capacidad, velocidad, peso, energía de servicio, detalles de conexión, detalles

de cimentación, dimensiones generales, tolerancias, número de plano de referencia, número de referencia para los manuales de servicio, intercambiabilidad con otras unidades, etc.

3.5.5 Programa específico de mantenimiento

Debe elaborarse un programa específico de mantenimiento para cada pieza de equipo dentro del programa general. El programa es una lista completa de las tareas de mantenimiento que se van a realizar en el equipo. El programa incluye el nombre y número de identificación del equipo, su ubicación, número de referencia del programa, lista detallada de las tareas que se llevarán a cabo (inspecciones, mantenimiento preventivo, reemplazos), frecuencia de cada tarea, tipo de técnicos requeridos para realizar la tarea, tiempo para cada tarea, herramientas especiales que se necesitan, materiales necesarios y detalles acerca de cualquier arreglo de mantenimiento por contrato.

3.5.6 Especificación del trabajo

La especificación del trabajo es un documento que describe el procedimiento para cada tarea. Su intención es proporcionar los detalles de cada tarea en el programa de mantenimiento. La especificación del trabajo deberá indicar el número de identificación de la pieza (equipo), ubicación de la misma, referencia del programa de mantenimiento, número de referencia de especificación del trabajo, frecuencia del trabajo, tipo de técnicos requeridos para el trabajo, detalles de la tarea, componentes que se van a reemplazar, herramientas y equipos especiales necesarios, planos de referencia, y manuales y procedimientos de seguridad a seguir.

3.5.7 Programa de mantenimiento

El programa de mantenimiento es una lista donde se asignan las tareas de mantenimiento a períodos de tiempo específicos. Cuando se ejecuta el programa de mantenimiento, debe realizarse mucha coordinación a fin de balancear la carga de trabajo y cumplir con los requerimientos de producción. Esta es la etapa en donde se programa el mantenimiento planeado para su ejecución.

3.5.8 Control del programa

El programa de mantenimiento debe ejecutarse según se ha planeado. Es esencial una vigilancia estrecha para observar cualquier desviación con

respecto al programa. Si se observan desviaciones, es necesaria una acción de control. En el capítulo 4 se detallan los métodos de control.

3.6 MODELOS MATEMÁTICOS PARA POLÍTICAS ÓPTIMAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En esta sección se definen varias políticas de mantenimiento preventivo para sistemas que están sujetos a fallas estocásticas y se formulan los modelos matemáticos para determinar el nivel óptimo de cada política.

En la literatura se han examinado ampliamente dos políticas básicas de mantenimiento preventivo propuestas por Barlow y Hunter [3]. Estas son las políticas basadas en la edad y en el reemplazo a intervalos constantes, las cuales se conocen, respectivamente, como políticas tipo I y tipo II. Los planteamientos de las políticas, sus modelos y generalización se presentan en las secciones subsecuentes. La notación siguiente es necesaria para la formulación de los modelos:

C_p = Costo del mantenimiento preventivo

C_f = Costo del mantenimiento correctivo (fallas)

$f(t)$ = Función de densidad de probabilidad de tiempo hasta la falla (f.d.p.)

$F(t)$ = Distribución de tiempo hasta la falla del equipo o sistema; es la integral de $f(t)$ desde $-\infty$ hasta t

$r(t)$ = Función de tasa de fallas

$N(t_p)$ = Número de fallas en el intervalo $(0, t_p)$; $N(t_p)$ es una variable aleatoria

$H(t_p)$ = Número esperado de fallas en el intervalo $(0, t_p)$

$R(t)$ = Confiabilidad o función de sobrevivencia

$M(t_p)$ = Valor esperado de la distribución truncada con una f.d.p. $f(t)$ truncada en t_p

$$M(t_p) = \int_{-\infty}^{t_p} t f(t) dt / [1 - R(t_p)]$$

$EC(t_p)$ = Costo esperado por ciclo

$UEC(t_p)$ = Costo esperado por unidad de tiempo

3.6.1 Reemplazo preventivo óptimo basado en la edad (política tipo I)

Una política tipo I (reemplazo preventivo con base en la edad) se define de la siguiente manera: llevar a cabo un reemplazo preventivo después de t_p horas de operación continua sin falla; t_p puede ser finito o infinito. En caso de un t_p infinito, no se programa ningún mantenimiento preventivo (reemplazo). Si el sistema falla antes de que hayan pasado t_p horas, efectúe el mantenimiento (reemplazo) en el momento de la falla y re programe el mantenimiento preventivo después de t_p horas de operación. En esta política se supone que el sistema queda tan bien como si estuviera nuevo después de efectuar el mantenimiento preventivo (reemplazo). Esta política es adecuada para un equipo sencillo o una sola unidad en el que la reparación al momento de la falla (o reemplazo) podría corresponder muy cercanamente a una reparación general. Un ejemplo de este tipo de equipo es un tubo de vacío. Esta política se ilustra en la figura 3.5. En esta situación hay dos ciclos de operaciones. En un ciclo, el equipo opera hasta el momento del mantenimiento preventivo (reemplazo) t_p ; y en el segundo ciclo, el equipo falla antes del mantenimiento planeado.

El objetivo del modelo de esta sección es determinar el t_p óptimo, que corresponde al t_p en el que el reemplazo preventivo se lleva a cabo después de que el equipo ha operado continuamente durante t_p horas sin falla. El modelo determina el t_p que reduce al mínimo el costo total esperado del mantenimiento preventivo y del correctivo por unidad de tiempo de la siguiente manera:

$$UEC(t_p) = \frac{\text{Costo total esperado por ciclo}}{\text{Longitud esperada del ciclo}} \quad (3.2)$$

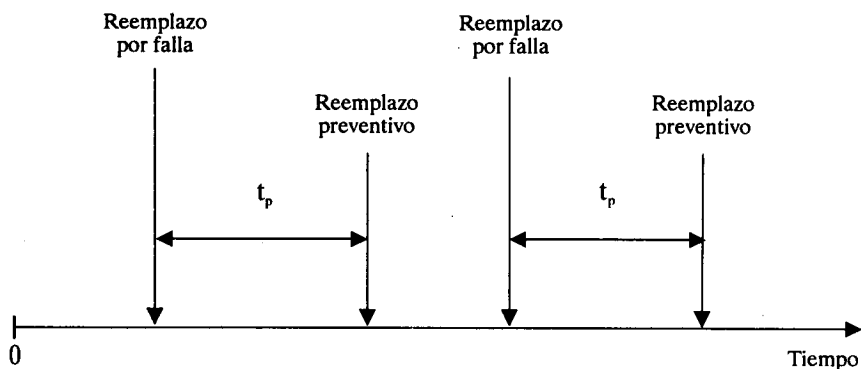


Figura 3.5 Ciclos de la política tipo I.

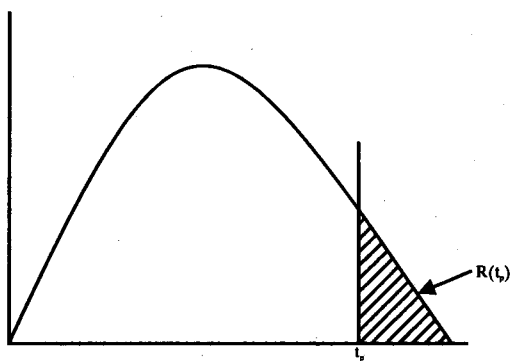


Figura 3.6 Área bajo la distribución de probabilidad que representa $R(t_p)$.

El costo total esperado por ciclo consiste en el costo de mantenimiento preventivo más el costo del mantenimiento correctivo (falla), que es

$$EC(t_p) = C_p \times R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)] \quad (3.3)$$

$R(t_p)$ es la probabilidad de que el equipo sobreviva hasta la edad t_p , indicada por el área sombreada en la figura 3.6.

La longitud esperada del ciclo consiste en la longitud esperada de un ciclo preventivo más la longitud esperada de un ciclo de falla:

$$\text{Longitud esperada del ciclo} = t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)] \quad (3.4)$$

en donde

$$M(t_p) = \frac{\int_{-\infty}^{t_p} t f(t) dt}{1 - R(t_p)} \quad (3.5)$$

$M(t_p)$ es la media de la distribución truncada en t_p (ver la figura 3.6). Por lo tanto,

$$UEC(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)]} \quad (3.6)$$

El $UEC(t_p)$ es una función de una variable, a saber, el t_p . Para resolver este tipo de problema se pueden utilizar métodos como el de la sección dorada o

el método de Newton. La siguiente sección proporciona los detalles del método de la sección dorada.

3.6.2 Método de la sección dorada

El algoritmo de esta sección es un algoritmo de búsqueda directa. Depende de la evaluación funcional y no utiliza información sobre derivadas. Otros métodos basados en derivadas, como el método de Newton que se presenta en el Apéndice A, pueden utilizarse para resolver problemas que buscan el mínimo o el máximo de una función de una sola variable. Para emplear este algoritmo, el problema debe plantearse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } g(t) \\ &\text{sujo to a } a \leq t \leq b \end{aligned} \quad (3.7)$$

Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Elija un nivel de tolerancia final permisible, δ , y suponga que el intervalo inicial en el que se encuentra el mínimo es $[a_1, b_1] = [a, b]$ y haga $\lambda_1 = a_1 + (1 - \alpha)(b_1 - a_1)$, $\mu_1 = a_1 + \alpha(b_1 - a_1)$, $\alpha = 0.618$. Evalúe $g(\lambda_1)$ y $g(\mu_1)$, haga $k = 1$, y vaya al paso 2.
2. Si $b_k - a_k < \delta$, termine, ya que la solución óptima es $t^* = (a_k + b_k)/2$. En caso contrario, si $g(\lambda_k) > g(\mu_k)$, vaya al paso 3; si $g(\lambda_k) \leq g(\mu_k)$, vaya al paso 4.
3. Haga $a_{k+1} = \lambda_k$ y $b_{k+1} = b_k$. Además, haga $\lambda_{k+1} = \mu_k$ y haga $\mu_{k+1} = a_{k+1} + \alpha(b_{k+1} - a_{k+1})$. Evalúe $g(\mu_{k+1})$, y vaya al paso 5.
4. Haga $a_{k+1} = a_k$ y $b_{k+1} = \mu_k$; también haga $\mu_{k+1} = \lambda_k$ y $\lambda_{k+1} = a_{k+1} + (1 - \alpha)(b_{k+1} - a_{k+1})$; evalúe $g(\lambda_{k+1})$ y vaya al paso 5.
5. Sustituya k por $k + 1$ y vaya al paso 1.

Para más detalles sobre las propiedades y la convergencia de este algoritmo, ver a Bazaraa *et al.* [4].

Ejemplo 3.1 Una pieza de equipo tiene una función de densidad de probabilidad de tiempo hasta la falla $f(t)$ que sigue una distribución uniforme entre $[0, 10]$ semanas. El costo del reemplazo preventivo es de 5 dólares y el costo de reemplazo por falla es de 50 dólares. Determine t_p , el tiempo óptimo de reemplazo preventivo.

El empleo de una política de tipo I es apropiada cuando la función de tasa de fallas es una función creciente del tiempo. En otras palabras, a medida que aumenta la edad del equipo, es más probable que éste falle.

La función de densidad de probabilidad uniforme para el tiempo hasta la falla está dada como

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{10} & 0 \leq t \leq 10 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (3.8)$$

La función de distribución para la falla en el tiempo t es

$$F(t) = \begin{cases} \int_0^t \frac{1}{10} dt = \frac{1}{10} t & 0 \leq t < 10 \\ 1 & \text{si } t \geq 10 \end{cases} \quad (3.9)$$

La confiabilidad del equipo en el tiempo t es

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{1}{10} t \quad (3.10)$$

La función de falla está dada por

$$r(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{10}}{1 - \frac{1}{10} t} = \frac{1}{10 - t}$$

El término $r(t)$ es una función creciente en el rango especificado. Para aplicar el modelo en esta sección, necesitamos calcular $M(t_p)$, a partir de (3.5),

$$\begin{aligned} M(t_p) &= \frac{\int_0^{t_p} t f(t) dt}{1 - R(t_p)} \\ &= \frac{\int_0^{t_p} t \frac{1}{10} dt}{1 - R(t_p)} = \frac{t_p}{2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

El costo esperado por unidad de tiempo es

$$\begin{aligned}
 UEC(t_p) &= \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + M(t_p) [1 - R(t_p)]} \\
 &= \frac{5 \left(1 - \frac{1}{10} t_p\right) + 50 \frac{1}{10} t_p}{t_p \left[1 - \frac{1}{10} t_p\right] + \frac{t}{2} \frac{1}{10} t_p} \\
 &= \frac{5 + 4.5 t_p}{t_p - \frac{1}{20} t_p^2} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

El t_p^* óptimo es el valor de t_p que minimiza el $UEC(t_p)$ dado en (3.12). Una forma sencilla para esto consiste en restringir nuestro período a semanas completas y evaluar la función en los puntos 1, 2,..., 10 y seleccionar el valor que proporcione el menor valor $UEC(t_p)$. Este enfoque es sencillo; sin embargo, no garantiza el mínimo y en ocasiones es tedioso si el número de puntos donde se va a evaluar la función es grande. Si se requiere una solución más precisa, debe emplearse un método de optimización, como el método de la sección dorada.

Mediante el enfoque sencillo que se dio anteriormente, evaluamos la función $UEC(t_p)$ en los puntos 1, 2,..., 10. Los resultados de la evaluación, calculados hasta dos decimales, se muestran en la tabla 3.2. El valor mínimo se encuentra en $t_p^* = 4$ semanas; es decir, el tiempo para llevar a cabo un reemplazo preventivo es cada 4 semanas.

A continuación se aplica el método de la sección dorada para obtener el t_p^* óptimo.

ITERACIÓN 1

$$[a_1, b_1] = [0, 10]$$

$$\alpha = 0.618 \quad 1 - \alpha = 0.382$$

$$\lambda_1 = 0 + 0.382 * 10 = 3.82$$

$$\mu_1 = 0 + 0.618 * 10 = 6.18$$

TABLA 3.2 Evaluación del costo esperado por unidad de tiempo

t_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$UEC(t_p)$	10	7.78	7.25	7.18	7.33	7.62	7.91	8.54	9.91	∞

$$UEC(\lambda_1) = UEC(3.82) = \frac{22.19}{3.09038} = 7.18$$

$$UEC(\mu_1) = UEC(6.18) = \frac{32.81}{4.27038} = 7.68$$

Debido a que $UEC(\lambda_1) \leq UEC(\mu_1)$, el siguiente intervalo es $[a_2, b_2] = [0, 6.18]$.

ITERACIÓN 2

$$[a_2, b_2] = [0, 6.18]$$

$$\lambda_2 = 0 + 0.382 \times 6.18 = 2.36 \qquad \mu_2 = 3.82$$

$$UEC(\lambda_2) = UEC(2.36) = \frac{15.62}{2.08152} = 7.50$$

$$UEC(\mu_2) = UEC(3.82) = 7.18$$

Debido a que $UEC(\lambda_2) > UEC(\mu_2)$, el siguiente intervalo donde se encuentra la solución óptima es $[a_3, b_3] = [2.36, 6.18]$.

ITERACIÓN 3

$$[a_3, b_3] = [2.36, 6.18]$$

$$\lambda_3 = 3.82 \quad \mu_3 = 2.36 + 0.618 \times 3.82 = 4.72$$

$$UEC(\lambda_3) = UEC(3.82) = 7.18$$

$$UEC(\mu_3) = UEC(4.72) = \frac{26.24}{3.60608} = 7.28$$

Debido a que $UEC(\lambda_3) \leq UEC(\mu_3)$, el siguiente intervalo es $[2.36, 4.72]$.

ITERACIÓN 4

$$[a_4, b_4] = [2.36, 4.72]$$

$$\lambda_4 = 3.261 \quad \mu_4 = 3.82$$

$$UEC(\lambda_4) = UEC(3.261) = \frac{19.67}{2.72862} = 7.21$$

$$UEC(\mu_4) = UEC(3.82) = 7.18$$

El siguiente intervalo es $[a_5, b_5] = [3.26, 4.72]$.

ITERACIÓN 5

$$[a_5, b_5] = [3.26, 4.72]$$

$$\lambda_5 = 3.82 \quad \mu_5 = 4.16$$

$$UEC(\lambda_5) = UEC(3.82) = 7.18$$

$$UEC(\mu_5) = UEC(4.16) = \frac{23.72}{3.29} = 7.21$$

El siguiente intervalo donde se encuentra la solución es $[3.26, 4.16]$. Podemos proceder a encontrar la solución óptima. Sin embargo, si decidimos terminar después de cinco iteraciones, la solución óptima se puede aproximar con

$$t_p^* = \frac{4.16 + 3.26}{2} = 3.71 \quad UEC(3.71) = 7.179$$

que es ligeramente inferior que el mínimo $UEC(4)$, obtenido mediante una búsqueda sistemática. Si aproximamos 3.71 al entero más próximo, obtenemos $t_p^* = 4$. Mediante la búsqueda sistemática o la búsqueda de la sección dorada, obtuvimos casi las mismas soluciones. Sin embargo, el método de la sección dorada realiza una búsqueda inteligente y es más exacto que una búsqueda sistemática, y generalmente requiere menos cálculos que esta última. Además, se encuentra en la mayoría de las bibliotecas de software de optimización.

3.6.3 Reemplazo preventivo óptimo a intervalos constantes (política tipo II)

Una política tipo II (reemplazo en bloque) se define de la siguiente manera: Efectúe un mantenimiento preventivo en el sistema después de que haya estado operando un total de t_p horas, independientemente del número de fallas intermedias. En caso de que ocurra una falla antes de t_p , se efectúa una reparación mínima. La reparación mínima no cambia la tasa de fallas del sistema, y el mantenimiento preventivo renueva el sistema y éste queda como nuevo. Esta política es apropiada para sistemas complejos, como motores y turbinas.

El objetivo del modelo de esta sección es determinar el t_p^* óptimo que minimice el mantenimiento esperado de reparación y preventivo. Como se mencionó anteriormente, se supone que el mantenimiento preventivo deja

al sistema tan bien como si estuviera nuevo, y las reparaciones mínimas no afectan la tasa de fallas del sistema:

$$UEC(t_p) = \frac{\text{Costo total esperado por mantenimiento preventivo y reparaciones mínimas}}{\text{Longitud esperada del intervalo}}$$

El costo total esperado $EC(t_p)$ consiste en el costo del mantenimiento preventivo C_p , además del costo de las reparaciones. El costo de las reparaciones es el costo de una sola reparación multiplicado por el número esperado de reparaciones

$$UEC(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (3.13)$$

Barlow y Hunter [3] han demostrado que el número esperado de fallas en el intervalo $(0, t_p)$ es la integral de la función de la tasa de fallas, es decir,

$$E[N(t_p)] = H(t_p) = \int_0^{t_p} r(t) dt \quad (3.14)$$

$UEC(t_p)$ es una función de una sola variable t_p , y para encontrar t_p^* se puede utilizar un método de búsqueda directa, como el método de la sección dorada.

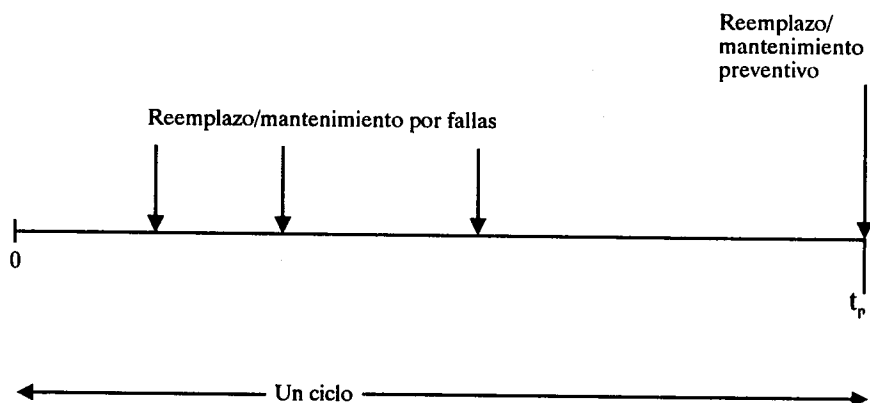


Figura 3.7 Ciclo de la política tipo II.

Ejemplo 3.2 Calcule la política óptima tipo II para el problema dado en el ejemplo 3.1. Una política de tipo II determina t_p^* , que es el número de horas totales de operación después de las cuales se efectúa un mantenimiento preventivo. El término t_p^* minimiza la siguiente función:

$$UEC(t_p) = \frac{C_p + C_f H(t_p)}{t_p} \quad (3.15)$$

Necesitamos determinar $H(t_p)$, que es el número esperado de fallas en el intervalo $(0, t_p)$. Éste puede obtenerse empleando la fórmula (3.13).

$$\begin{aligned} H(t_p) &= \int_0^{t_p} r(t) dt \\ r(t) &= \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (\text{la función de la tasa de fallas}) \\ f(t) &= \frac{1}{10} \quad 0 \leq t \leq 10 \\ r(t) &= \frac{1}{1 - \frac{1}{10}t} = \frac{1}{10 - t} \\ H(t) &= \int_0^{t_p} \frac{1}{10 - t} dt = -\ln(10 - t) \Big|_0^{t_p} = \ln \frac{10}{10 - t_p} \\ UEC(t_p) &= \frac{5 + 50 \ln \frac{10}{10 - t_p}}{t_p} = \frac{5}{t_p} + \frac{50}{t_p} \ln \frac{10}{10 - t_p} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Aplicando el procedimiento de búsqueda sistemática simple que se utilizó en el ejemplo previo para la función $UEC(t_p)$, se obtienen los valores de la tabla 3.3 para valores enteros en el rango $(0, 10)$. El valor de t_p que da el menor costo es $t_p^* = 3$. Por lo tanto, el mantenimiento preventivo deberá realizarse cada 3 semanas. Es mejor aplicar el método de la sección dorada para encontrar el t_p^* óptimo, sin restricciones sobre t_p como se hizo en el ejemplo anterior.

TABLA 3.3 Evaluación del costo esperado para el ejemplo 3.2

t_p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$UEC(t_p)$	10.27	8.07	7.61	7.63	7.93	8.47	9.30	9.57	13.35	∞

3.6.4 Extensiones de las políticas I y II

Nguyen y Murthy [14] generalizaron las dos políticas básicas de mantenimiento preventivo propuestas por Barlow y Hunter [3]. Su política tipo I es apropiada para un solo sistema, como un motor o un televisor, y su política tipo II es apropiada para un sistema de elementos múltiples, como los focos de una fábrica. Las políticas se describen de la siguiente manera:

La política tipo I se define como sigue: reemplace el sistema después de $(k - 1)$ reparaciones. En el caso de un sistema sometido a $(i - 1)$ reparaciones, éste se repara (o se reemplaza si $i = k$) en el momento de la falla o a la edad T_i (T_i es el número de horas desde la última reparación o reemplazo), según lo que ocurra primero.

La política tipo II se define como sigue: reemplace el sistema después de $(k - 1)$ reparaciones. En el caso de un sistema sometido a $(i - 1)$ reparaciones, éste siempre se repara (o reemplaza si $i = k$) a la edad T_i . En caso de falla, se efectúa una reparación mínima.

En caso de que $k = 1$, las dos políticas anteriores se reducen a las propuestas por Barlow y Hunter, que se presentaron en las secciones anteriores. Las dos políticas anteriores se caracterizan por k y T_i , $i = 1, \dots, k$, donde T_i es la edad de mantenimiento.

3.6.4.1 Política general óptima de tipo I En el siguiente modelo, los costos de mantenimiento consisten en el costo de reemplazo C_R , el costo de mantenimiento preventivo C_p y el costo de mantenimiento correctivo (por falla) C_f .

En el caso de un sistema sometido a $(i - 1)$ mantenimientos preventivos, si adoptamos la política de realizar una reparación en el momento de una falla o a la edad T_i , según lo que ocurra primero, el costo esperado de mantenimiento preventivo está dado como sigue:

$$C_p(T_i) = C_p + C_f F_i(T_i) \quad (3.17)$$

donde $F_i(t)$ es la distribución del tiempo hasta la falla de un sistema sometido a $(i - 1)$ reparaciones. Por lo tanto, el costo esperado del ciclo de reemplazo es

$$EC(k, T_i) = (k - 1)C_p + C_R + C_f \sum_{i=1}^k F_i(T_i) \quad (3.18)$$

La longitud esperada del ciclo está dada como

$$L(k, T_i) = \sum_{i=1}^k \int_0^{T_i} \bar{F}_i(t) dt \quad (3.19)$$

Debido a que se sabe que

$$\mu_i = \int_0^{\infty} \bar{F}_i(t) dt \quad (3.20)$$

en donde μ_i es el valor esperado de T_i .

El modelo que minimiza el costo esperado por unidad de tiempo es

$$UEC[k, T_1, \dots, T_k] = \frac{(k-1)C_p + C_R + C_f + \sum_{i=1}^k F_i(T_i)}{\sum_{i=1}^k \int_0^{\infty} \bar{F}_i(t) dt} \quad (3.21)$$

La política óptima consiste en seleccionar k y las edades del mantenimiento $\{T_i(k)\}$, $i = 1, \dots, k$, de manera que se minimice $C[k, T_1, \dots, T_k]$ (3.21).

3.6.4.2 Política general óptima de tipo II En el caso de la política general tipo II, el costo de mantenimiento incluye el costo de reemplazo, el costo del mantenimiento preventivo y las reparaciones mínimas (mantenimiento correctivo).

El costo total esperado por unidad de tiempo para la política general tipo II está dado como

$$UEC[k, T_1, \dots, T_k] = \frac{(k-1)C_p + C_R + C_f \sum_{i=1}^k \int_0^{T_i} r_i(t) dt}{\sum_{i=1}^k T_i} \quad (3.22)$$

en donde $r_i(t)$ es la tasa de fallas en el momento t para un sistema sometido a $(i-1)$ reparaciones. La función de costos en (3.22) puede reducirse utilizando técnicas de optimización para obtener la política óptima.

3.7 MODELOS DE INSPECCIÓN

El principal propósito de las inspecciones es obtener información útil acerca del estado de una pieza de equipo o un sistema técnico más grande. Los inspectores recopilan información sobre indicadores útiles como desgaste de rodamientos, lecturas de calibradores, vibraciones, restos de aceite y la calidad del producto. La información sobre estos indicadores puede utilizarse para

predecir fallas del equipo y planear acciones adicionales de mantenimiento, dependiendo del estado del equipo. Las inspecciones son útiles y pueden conducir a lo siguiente:

- reparaciones menos extensas de fallas potenciales si se detectan antes de que creen un daño complementario.
- planeación y acciones correctivas apropiadas de manera que puedan realizarse en momentos en que ocasionen la menor alteración a las operaciones del sistema.

El mantenimiento basado en las condiciones (MBC) ha sido ampliamente aceptado en los últimos años, debido a que permite que las decisiones de mantenimiento se basen en el estado del equipo. Esto conduce a un mantenimiento más eficaz en costos reduciendo reparaciones innecesarias, mantenimientos generales y reemplazos. El método MBC depende del monitoreo y análisis de los datos obtenidos de un sistema de operaciones. El monitoreo y la inspección continuos proporcionan al MBC la información necesaria acerca del estado del equipo. La frecuencia de las inspecciones y el nivel de monitoreo dependen del costo de la inspección y el beneficio que ésta logre al proporcionar información correcta acerca del estado del sistema y su capacidad para predecir la inminencia de una falla. Por lo tanto, las decisiones de inspección son importantes para el éxito de cualquier programa de mantenimiento predictivo. En esta sección se presentarán varios modelos que ayudan a determinar la frecuencia de las inspecciones.

3.7.1 Programa óptimo de inspección que minimiza el costo esperado para una sola máquina

Una pieza de equipo se utiliza como parte de un proceso de producción. El equipo se encuentra ya sea en buen estado o en estado de falla. Es posible detectar el estado de un equipo mediante la inspección de sus productos u otros indicadores. Cuando se detecta una falla, el equipo es regresado a un buen estado mediante mantenimiento y el ciclo de producción comienza otra vez en un horizonte infinito. El modelo de esta sección determinará el programa óptimo de inspección que minimice el costo total esperado por unidad de tiempo asociado con la inspección, el mantenimiento y la no detección del equipo que haya fallado. Éste es el mismo modelo que se estudia en [10]. En cierto sentido, este modelo es equivalente a reemplazar el equipo cuando se detecta una falla. La política de inspección consiste en realizar una inspección en los momentos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ hasta que se detecta una falla. Cuando se detecta una falla, el equipo es llevado a una nueva condición mediante mantenimiento, y el ciclo de producción comienza nuevamente con un horizonte infinito.

El modelo emplea la siguiente notación:

$f(t)$ = Función de densidad del tiempo hasta la falla del equipo

C_i = Costo de la inspección

C_u = Costo por unidad asociado con una falla no detectada del equipo

C_r = Costo de la reparación

T_r = Tiempo de reparación

$EC(x_1, x_2, \dots, x_n)$ = Costo total esperado por ciclo

$ET(x_1, x_2, \dots, x_n)$ = Longitud esperada del ciclo

$UEC(x_1, x_2, \dots, x_n)$ = Costo total esperado por unidad de tiempo

El objetivo consiste en determinar los valores $x_1, x_2, \dots, x_n$ que minimicen el $UEC(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Si ocurre una falla entre x_{k-1}, x_k en el momento t_i , el costo del ciclo es

$$kC_i + C_u(x_i - t_i) + C_r \quad (3.23)$$

y el valor esperado del costo es

$$\int_{x_{k-1}}^{x_k} [kC_i + C_u(x_u - t) + C_r] f(t) dt \quad (3.24)$$

Sumando para todos los valores de k , obtenemos el costo esperado como sigue:

$$\begin{aligned} EC(x_1, x_3, \dots, x_n) &= \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [(k+1)C_i + C_u(x_{k+1} - t) + C_r] f(t) dt \\ &= C_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} [(k+1)C_i + C_u(x_{k+1} - t)] f(t) dt \end{aligned} \quad (3.25)$$

Utilizando argumentos similares, la longitud esperada del ciclo es

$$ET(x_1, x_3, \dots, x_n) = \mu + T_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - t) f(t) dt \quad (3.26)$$

El costo esperado por unidad de tiempo se obtiene dividiendo el término en (3.25) entre el término en (3.26) y está dado por

$$UEC'(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$= \frac{C_r + \sum \int [(k+1)C_i + C_u(x_{k+1} - t)]f(t) dt}{\mu + T_r + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{x_{k-1}}^{x_{k+1}} (x_{k+1} - t)f(t) dt} \quad (3.27)$$

Otros modelos que maximizan la disponibilidad se dan con detalle en [10].

3.7.2 Modelo de maximización de utilidades para la inspección de una sola máquina

En esta sección se determina la frecuencia de inspecciones para una máquina sujeta a falla empleando un modelo que maximiza la utilidad por unidad de tiempo. Este modelo ha sido desarrollado por Hariga [9]. El modelo está formulado para una máquina que tiene una distribución de fallas generales. Las inspecciones revelarán las condiciones de la máquina y pueden dar como resultado que se reduzca la severidad de las fallas. La reparación de una máquina que ha fallado hace que se incurra en un costo de reparación C_r . El costo de inspección es C_i y p es la utilidad por unidad de tiempo cuando la máquina está operando. La pregunta a la que da respuesta el modelo es: ¿Qué tan seguido debe inspeccionarse esta máquina para maximizar la utilidad?

La utilidad esperada por ciclo $P(T)$ consta de una utilidad $P_1(T)$ de un ciclo sin falla multiplicada por la probabilidad de que no ocurra una falla en el ciclo, más una utilidad $P_2(T)$ de un ciclo con falla multiplicada por la probabilidad de falla en el ciclo.

Para un ciclo sin falla, $P_1(T)$ está dada por

$$P_1(T) = pT - C_i \quad (3.28)$$

Para un ciclo con falla, suponga que la falla ocurrió en t , $t < T$. Entonces

$$P_2(T) = E[pt|t < T] - C_i - C_r = \frac{\int_0^T ptf(t) dt}{F(T)} - C_i - C_r \quad (3.29)$$

La utilidad esperada por ciclo se obtiene multiplicando los términos en (3.28) y (3.29) por sus probabilidades respectivas y sumándolas como sigue:

$$P(T) = (pT - C_i)R(T) + \int_0^T ptf(t) dt - (C_i + C_r)F(T) \quad (3.30)$$

Sustituyendo $F(T) = 1 - R(T)$, establecemos

$$P(T) = p \int_0^T R(t) dt + C_r R(T) - C_i - C_r \quad (3.31)$$

La utilidad esperada por unidad de tiempo $UP(T) = P(T)/T$ está dada por

$$UP(T) = \frac{p \int_0^T R(t) dt + C_r R(T) - C_i - C_r}{T} \quad (3.32)$$

$UP(T)$ es una función de una variable que necesita maximizarse.

3.7.3 Modelo de inspección para minimizar el costo esperado con reparaciones mínimas

Una sola máquina se utiliza en un proceso de producción. Cada ciclo de producción comienza con una máquina nueva (o una a la que se le dio un mantenimiento general para llevarla a una condición de tan buena como nueva). Después de un período de producción, el proceso podría pasar a un estado fuera de control, que es equivalente a una falla de la máquina. Cuando el proceso cambia a un estado fuera de control, se realiza una acción de mantenimiento (reparación mínima) sobre la máquina para que el proceso quede bajo control. La inspección se realiza en los momentos $T_1, T_2, \dots, T_n$ para observar el estado de la máquina (el proceso) a fin de emprender una acción de mantenimiento apropiada. Se consideran tres tipos de costos: el costo de reemplazo o reparación general C_r , el costo de inspección C_i y el costo de reparación C_f y el costo aumentado por unidad de tiempo de funcionar en un estado s fuera de control. El objetivo es determinar el valor óptimo de n y $T_i, i = 1, 2, \dots, n$, de manera que se minimice el costo total esperado de operación por unidad de tiempo. Las suposiciones del modelo son las siguientes:

1. La vida de la máquina es una variable aleatoria con función de densidad de probabilidad $f(t)$.
2. Los tiempos de reparación son insignificantes y la reparación lleva de nuevo a la máquina a un estado dentro de control. Las reparaciones

no cambian la distribución de las fallas (es decir, las reparaciones son mínimas).

El modelo de esta sección difiere del de la sección 3.7.1 debido a que incluye reparaciones mínimas, inspecciones y reemplazos. Asimismo, relaciona de una forma más directa el costo de fallas con el hecho de que el proceso esté fuera de control.

El costo total esperado durante un ciclo de producción T consiste en 1) el costo de reemplazo C_r , 2) el costo de inspección nC_i , y 3) el costo esperado debido a reparaciones y funcionamiento en un estado fuera de control durante el ciclo de producción. El último costo consiste en la suma de n términos (uno para cada intervalo de inspección) que resultan de reparación y funcionamiento en un estado fuera de control durante el i -ésimo intervalo de inspección. Obviamente, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1$. Por lo tanto,

$$C_{i+1} = \frac{\int_{T_i}^{T_{i+1}} [r + s(T_{i+1} - t)] f(t) dt}{\bar{F}(T_i)} \quad (3.33)$$

donde

$$\bar{F}(T_i) = 1 - F(T_i) \quad \text{y} \quad F(T_i) = \int_0^{T_i} f(t) dt \quad (3.34)$$

Luego se obtiene el costo esperado durante un ciclo de producción sumando todos los componentes de costos dados anteriormente, y está dado como

$$EC[T, T_1, T_2, \dots, T_n] = C_r + nC_i + \sum_{i=0}^{n-1} C_{i+1} \quad (3.35)$$

El costo esperado por unidad de tiempo está dado como

$$UEC[T, T_1, T_2, \dots, T_n] = \frac{C_r + nC_i + \sum_{i=0}^{n-1} C_{i+1}}{T}$$

El modelo puede simplificarse considerando $T_n = T$, y el objetivo consiste en determinar el número de inspecciones n y el momento para cada inspección. Además, se ha demostrado que si la tasa de fallas sigue una distribución exponencial, entonces las inspecciones se realizan a intervalos iguales, es decir,

$$T_{i+1} - T_i = T_i - T_{i-1} \quad \text{para todas las } i$$

En Banerjee y Chuiv [2] se presenta un análisis detallado de este modelo y extensiones adicionales.

3.7.4 Modelo para coordinar la inspección de un grupo de máquinas

Ben Daya y Duffuaa [5] han ampliado el modelo de la sección anterior para coordinar la inspección de varias máquinas. La coordinación de las actividades de mantenimiento aprovecha los costos de preparación y puede resultar en ahorros. En esta sección se presentará un modelo que desarrolla un programa de inspecciones para un grupo de máquinas. El costo en este modelo consta de dos partes: un costo de preparación en el que se incurre siempre que tiene lugar una revisión para determinar cuáles máquinas se van a inspeccionar, independientemente del número de máquinas inspeccionadas, y un costo de preparación asociado con cada máquina que se va a inspeccionar. La segunda parte es el costo de falla, que incluye el costo de reparación y el costo en que se incurre al operar en un estado fuera de control.

El tiempo entre dos preparaciones consecutivas es el ciclo básico. La coordinación aprovecha el costo de preparación para minimizar el costo total esperado. El objetivo del modelo es determinar el tiempo de inspección T_i para la máquina i como un múltiplo del ciclo básico de manera que se minimice el costo esperado por unidad de tiempo.

Para el planteamiento del modelo se necesita la siguiente notación:

N = Número de máquinas

A = Costo promedio de preparación, en el que se incurre siempre que se realiza una revisión para inspección, independientemente de cuáles máquinas se inspeccionen

a_i = Costo de inspección de la máquina i

C_{ij} = Costo de falla de la máquina i durante el intervalo j

T_0 = Tiempo entre dos momentos de preparación consecutivos (denominado ciclo básico)

T_{ij} = Tiempo entre la $(j - 1)$ ésima y la j ésima inspecciones de la máquina i

k_i = Número de ciclos básicos entre dos inspecciones consecutivas de la máquina i

$f_i(t)$ = Función de densidad de probabilidad del tiempo para pasar a un estado fuera de control de la máquina i

$F_i(t)$ = Función de distribución acumulada del tiempo para el cambio

r_i = Costo de reparación de la máquina i

s_i = Costo aumentado por unidad de tiempo de operar la máquina i en un estado fuera de control

t_{ij} = Tiempo de la j -ésima inspección de la máquina i

T = Longitud del horizonte de planeación

Las suposiciones del modelo son las siguientes:

1. Un programa de ciclo se repite cada T unidades de tiempo.
2. Al final de cada intervalo de longitud T_0 , se hace una revisión para determinar cuál máquina deberá inspeccionarse al costo A , que se denomina costo de preparación. Esta revisión periódica, a intervalos iguales de longitud T_0 , es atractiva desde un punto de vista práctico ya que simplifica la administración de las actividades de inspección.
3. Cada máquina está sujeta a un cambio de un estado de control a un estado fuera de control que sólo puede ser detectado mediante una inspección. El tiempo para el cambio de la máquina i es una variable aleatoria exponencial con una función de densidad de probabilidad $f_i(t) = (1/\lambda_i)e^{-\lambda_i t}$. Esta suposición nos permite utilizar un intervalo constante de inspección para cada máquina, es decir, $t_{i,j+1} - t_{ij} = t_{ij} - t_{i,j-1} = T_i$ para todas las j . Esta suposición se puede moderar fácilmente, y el modelo puede generalizarse para incluir funciones de falla generales.

El costo total esperado consta de tres tipos de costos, que pueden calcularse como sigue:

1. Un costo de preparación en el que se incurre en cada ciclo básico y se calcula como

$$\frac{T}{T_0} A \quad (3.36)$$

2. El costo de inspección para cada máquina es el costo de inspección para la máquina i , sumado para todas las máquinas:

$$\sum_{i=1}^N \frac{T}{T_i} a_i \quad (3.37)$$

3. El costo de falla consiste en el costo de reparación más el costo aumentado cuando la máquina está operando en un estado fuera de control. El costo de falla cuando la máquina i queda fuera de control en el tiempo t en el intervalo $[t_{ij}, t_{ij+1}]$ está dado como

$$C_{i,j+1} = \frac{\int_{t_{ij}}^{t_{ij+1}} [r_i + s(t_{ij+1} - t)] f_i(t) dt}{\bar{F}(t_{ij})} \quad (3.38)$$

El costo total se obtiene sumando C_{ij+1} en (3.38) para todos los intervalos para cada máquina y luego sumando para todas las máquinas. Está dado como

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{n_i-1} C_{i,j+1} \quad (3.39)$$

en donde $n_i = T/T_i$. Por lo tanto, el costo esperado por ciclo de longitud T es

$$TEC(T_0, T_2, \dots, T_n) = \frac{T}{T_0} A + \sum_{i=1}^N \frac{T}{T_i} a_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{n_i-1} C_{i,j+1} \quad (3.40)$$

El costo esperado por unidad de tiempo se obtiene dividiendo $TEC(T_0, T_1, T_2, \dots, T_n)$ en (3.40) entre T :

$$UEC(T_0, T_1, T_2, \dots, T_N) = \frac{A}{T_0} + \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{T_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^{n_i-1} \frac{C_{i,j+1}}{T} \quad (3.41)$$

y $T_i = kT_0$, donde k es un entero.

3.8 MANTENIMIENTO PREVENTIVO IMPERFECTO

Los modelos presentados hasta el momento en este capítulo y aquellos que se aplican en la mayoría de los estudios sobre reparaciones, mantenimiento preventivo y reparaciones generales se basan en dos suposiciones. En un extremo está la suposición de “tan malo como viejo”, que significa que la tasa de fallas del sistema no se reduce con reparaciones mínimas. En el otro extremo está la suposición de “tan bueno como nuevo”, lo cual significa que el sistema se restablece a una condición de nuevo después del mantenimiento

preventivo. En la mayoría de las situaciones del mundo real, todos los tipos de mantenimiento pueden mejorar el estado del equipo o el sistema hasta un nivel entre estos dos extremos y, en ocasiones, podría quedar peor que antes del mantenimiento preventivo debido a procedimientos deficientes.

A finales de la década de 1970, Nakagawa [12, 13] y Malik [11] introdujeron el concepto de mantenimiento imperfecto, en el que se asume que el mantenimiento mejorará en algo la condición del equipo, pero no lo restablecerá hasta un estado de nuevo a menos que el equipo se reemplace virtualmente de manera completa. El nivel de mejora depende de la cantidad y calidad de los recursos utilizados para efectuar el mantenimiento. Se han sugerido tres enfoques para modelar el efecto del mantenimiento preventivo sobre el estado del equipo:

1. El equipo después del MP tiene la misma tasa de fallas que antes del MP o quedó tan bueno como nuevo con ciertas probabilidades.
2. La edad del equipo se reduce en x unidades de tiempo después de cada MP.
3. La edad y la tasa de fallas del equipo se reducen a sus valores originales al comienzo de todos los MP en proporción al costo del MP.

Se han desarrollado modelos para estos tres planteamientos y en [13] se reportan políticas óptimas de mantenimiento preventivo imperfecto que minimizan el costo esperado por unidad de tiempo.

3.8.1 Suposiciones y notación de los modelos

Los modelos describen un sistema de una unidad que deberá operar en un horizonte infinito bajo las siguientes suposiciones:

1. La unidad comienza a operar en el tiempo 0. Tiene una distribución de fallas $F(t)$ y una función de densidad $f(t)$.
2. La tasa de fallas $r(t) = f(t)/[1 - F(t)]$ aumenta de manera monótona.
3. La unidad recibe mantenimiento preventivo en los tiempos

$$kT, k = 1, 2, \dots, T > 0$$

4. La unidad sólo sufre reparaciones mínimas en las fallas entre el mantenimiento preventivo. Las reparaciones mínimas no cambian la tasa de fallas (ésta es una política de MP tipo II).
5. Los tiempos de reparación y MP son insignificantes.

6. El costo del MP es C_p y el costo de reparación es C_f .
7. $EC[]$ designa el costo esperado por ciclo, $E[CD]$ designa la duración esperada del ciclo y $UE[]$ el costo esperado por unidad de tiempo.

3.8.2 Modelo del enfoque 1

En esta posibilidad para modelar el mantenimiento imperfecto, el equipo tiene la misma tasa de fallas después del MP que la que existía antes del MP con probabilidad P , $0 \leq P < 1$, y queda tan bueno como nuevo con probabilidad $q = 1 - P$.

El costo total esperado desde el tiempo 0 hasta el tiempo en que el equipo queda tan bueno como nuevo por el MP perfecto se deriva como sigue. Si el equipo sobrevivió hasta el tiempo jT , entonces el costo comprende el costo del mantenimiento preventivo j y el número esperado de reparaciones hasta el tiempo jT . Está dado como

$$jC_p + C_f \int_0^{jT} r(t) dt \quad (3.42)$$

El costo esperado se obtendrá multiplicando el término en (3.42) por la probabilidad de supervivencia hasta el tiempo jT , que es qP^{j-1} . Por lo tanto, el costo esperado está dado por

$$EC[(P, T)] = \sum_{j=1}^{\infty} qP^{j-1} \left(jC_p + C_f \int_0^{jT} r(t) dt \right) \quad (3.43)$$

La duración esperada del ciclo hasta el MP perfecto, empleando el mismo argumento probabilístico, está dada por

$$E[CD] = \sum_{j=1}^{\infty} qP^{j-1} (jT) \quad (3.44)$$

La división del costo esperado en (3.43) entre la duración esperada en (3.44) da por resultado el costo esperado por unidad de tiempo

$$UEC[(P, T)] = \frac{EC[(P, T)]}{E[CD]}$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^{\infty} qP^{j-1} \left(jC_p + C_f \int_0^T r(t) dt \right)}{\sum_{j=1}^{\infty} qP^{j-1} (jT)} \quad (3.45)$$

El término anterior puede simplificarse como sigue:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{\infty} qP^{j-1} (jC_p) &= qC_p \sum_{j=1}^{\infty} jP^{j-1} = qC_p \frac{d}{dP} \left(\sum_{j=1}^{\infty} P^j \right) \\ &= qC_p \frac{d}{dP} \left[\frac{P}{1-P} \right] = \frac{qC_p}{(1-P)^2} = \frac{qC_p}{q^2} = \frac{C_p}{q} \end{aligned}$$

También,

$$\sum_{j=1}^{\infty} qP^{j-1} (jT) = qT \sum_{j=1}^{\infty} jP^{j-1} = \frac{qT}{q^2} = \frac{T}{q}$$

Sustituyendo en (3.45) y simplificando, establecemos

$$UEC[(P, T)] = \frac{C_p + C_f q^2 \sum_{j=1}^{\infty} P^{j-1} \int_0^T r(t) dt}{T} \quad (3.46)$$

Diferenciando $UEC[(P, T)]$ y fijando la derivada en 0, obtenemos

$$\sum_{j=1}^{\infty} P^{j-1} \int_0^T t dr(t) = \frac{C_p}{C_f q^2} \quad (3.47)$$

A partir de la suposición acerca de $r(t)$, es claro que el lado izquierdo de la ecuación anterior está aumentado. Por lo tanto, $\int_0^{\infty} t dr(t) > C_p / (C_f q^2)$ y, por lo tanto, existe un T^* finito y único que satisface a (3.47). El costo esperado resultante es

$$UEC[(T^*, P)] = C_p q^2 \sum_{j=1}^{\infty} P^{j-1} r(jT^*) \quad (3.48)$$

3.8.3 Modelo del enfoque 2

Aquí el equipo se vuelve x unidades de tiempo más joven después de cada MP ($0 \leq x \leq T$). Si $x = T$, entonces el equipo queda tan bueno como nuevo (MP perfecto). Si $x = 0$, entonces el equipo queda tan malo como viejo. Suponga que el equipo es reemplazado después de N intervalos, es decir, a la edad NT . N es un entero positivo y se incurre en un costo de C_r de reemplazo en cada momento de reemplazo. Entonces el costo esperado por unidad de tiempo está dado como

$$UEC[(T, N, x)] = \frac{C_r + (N-1)C_p + C_f \sum_{j=1}^{N-1} \int_{j(T-x)}^{T+j(T-x)} r(t) dt}{NT} \quad (3.49)$$

El costo esperado por unidad de tiempo está disminuyendo en x . Por lo tanto,

$$UEC[(T, N, 0)] \geq UEC[(T, N, x)] \geq UEC[(T, N, T)] \quad (3.50)$$

Si fijamos N y hacemos que T sea una variable entre $(0, \infty)$, una condición necesaria para que un T^* finito minimice el $UEC[(T, N, x)]$ es que satisfaga a

$$\sum_{j=0}^{N-1} \int_{j(T-x)}^{T+j(T-x)} t dr(t) = \frac{(N-1)C_p + C_r}{C_f} \quad (3.51)$$

La ecuación (3.51) se obtiene diferenciando (3.49) con respecto a T y simplificando. A continuación, fijamos T . Entonces una condición necesaria para que N^* minimice a $UEC[(T, N, x)]$ es que N^* satisfaga a

$$\begin{aligned} UEC[(T, N^* + 1, x)] &\geq UEC[(T, N^*, x)] \\ UEC[(T, N^*, x)] &< UEC[(T, N^* - 1, x)] \end{aligned} \quad (3.52)$$

La ecuación (3.52) ha sido utilizada por Nakagawa para desarrollar políticas óptimas de MP y reemplazo, cuyos detalles están más allá del alcance de este libro. El lector avanzado puede consultar [11, 12, 13, 15].

3.8.4 Modelo del enfoque 3

El planteamiento número 2 para modelar el mantenimiento imperfecto suponía que la reducción en edad fuera independiente del costo del MP. En el tercer planteamiento, se supone que la edad y la tasa de fallas de una pieza de equipo se reducen en una cantidad proporcional al costo C_p del MP.

En caso de que se suponga que la reducción en la edad sea proporcional al costo del MP y si el equipo está en un estado estable, la siguiente ecuación relaciona la nueva edad y la edad vieja como

$$y = \left[1 - \frac{C_p}{C_0} \right] (y + T) \quad (3.53)$$

en donde C_0 es el costo inicial del equipo, $y + T$ es la edad justo antes del MP y y es la edad justo después del MP. Por lo tanto,

$$y = \left[\frac{C_0}{C_p} - 1 \right] T \quad (3.54)$$

Así, el costo esperado por unidad de tiempo $UEC[(T)]$ está dado por

$$UEC[(T)] = \frac{C_p + C_f \int_0^T r(t+y) dt}{T} = \frac{C_p + C_f \int_{[C_0/C_p - 1]T}^{C_0/C_p T} r(t) dt}{T} \quad (3.55)$$

Diferenciando la ecuación anterior, obtenemos la condición necesaria para el T óptimo:

$$\int_{[C_0/C_p - 1]T}^{C_0/C_p T} t dr(t) = \frac{C_p}{C_f} \quad (3.56)$$

Dados $r(t)$, C_0 , C_p y C_f , podemos emplear (3.56) para encontrar el T óptimo.

En caso de que la tasa de fallas de una pieza de equipo se reduzca a

$$\left[1 - C_p / C_0 \right] r(y + T)$$

por cada MP cuando era $r(y + T)$ antes del MP, en una situación de estado estable obtenemos

$$\left[1 - \frac{C_p}{C_0} \right] r(y + T) = r(y) \quad (3.57)$$

El costo esperado por unidad de tiempo es

$$UEC[(T, y)] = \frac{C_p + C_f \int_0^T r(t+y) dt}{T} \quad (3.58)$$

Si la edad y se obtiene de (3.54) y se sustituye en (3.58), entonces se obtendrá una ecuación de costo en T solo. La ecuación resultante puede minimizarse por los métodos de optimización presentados en este capítulo.

3.9 MODELO DE TIEMPO DE DEMORA

El concepto de tiempo de demora, en su forma más sencilla, define un proceso de falla en dos etapas. En la primera etapa, un defecto se vuelve detectable y, en la segunda, este defecto detectable da lugar con el paso del tiempo a una falla del equipo. El período h entre el tiempo cuando el defecto es detectable inicialmente y el tiempo de la falla se conoce como tiempo de demora. Este concepto es entendido por los ingenieros y proporciona el fundamento para la inspección y el mantenimiento preventivo. La incorporación de las verificaciones de inspección puede aumentar la disponibilidad del sistema identificando causas potenciales de fallas y eliminándolas. Ha sido posible obtener estimaciones subjetivas de la función de densidad de probabilidad $f(h)$ del tiempo de demora h . El conocimiento acerca de $f(h)$ permite la construcción de modelos de la relación entre el período de inspección T y otras variables como el tiempo muerto esperado o el costo esperado de operación por unidad de tiempo.

El modelo básico de inspección desarrollado mediante el empleo del concepto de tiempo de demora se presenta en [6]. En este modelo se supuso que los defectos surgen y son fijos, ya sea como reparaciones por descompostura o como reparaciones por inspección (reparaciones de MP), es decir, identificados por inspección y reparados. A medida que aumenta el período de inspección T , aumenta la probabilidad de que un defecto dé lugar a una descompostura $P(T)$. En este modelo se ha estimado $P(T)$ bajo ciertas suposiciones y se desarrolló un modelo que estima el costo esperado por unidad de tiempo. A continuación se presentan las suposiciones del modelo de inspección más sencillo, el cual se desarrolló empleando el concepto de tiempo de demora:

1. Se realiza una inspección cada T unidades de tiempo a un costo C_i y requiere d unidades de tiempo, $d \ll T$.
2. Las inspecciones son perfectas por el hecho de identificar cualquier defecto presente dentro de la planta.

3. Los defectos que se identifican en la inspección serán reparados dentro del período de inspección.
4. El instante inicial en el que puede suponerse que aparezca primeramente un defecto dentro de la planta (conocido como el momento de origen de la falla) está distribuido uniformemente a lo largo del tiempo desde la última inspección y es independiente de h . Las fallas surgen a razón de k por unidad de tiempo.
5. La función de densidad de probabilidad del tiempo de demora $f(h)$ es conocida.

La suposición 3 requiere que todas las reparaciones realizadas después de una inspección puedan completarse dentro del período fijado d , independientemente del número de reparaciones. Ésta es una suposición razonable si existe suficiente personal de mantenimiento para efectuar las reparaciones de manera simultánea. La suposición 4 proporciona una estimación del número esperado de defectos que surgen en el período T , a saber, kT . Esto ignora el tiempo muerto debido a las descomposturas, durante el cual no surgirán fallas debido a que la maquinaria está ociosa. Sin embargo, si este tiempo muerto es pequeño comparado con T , entonces el error también será pequeño.

Suponga que una falla que se presenta dentro del período $(0, T)$ tiene un tiempo de demora en el intervalo $(h, h + dh)$. La probabilidad de este evento se calcula como $f(h) dh$. Esta falla se reparará como una reparación por descompostura si la falla se presenta durante el período $(0, T - h)$: ver la figura 3.8. En caso contrario, se considera como una reparación por inspección. La probabilidad de que la falla se presente antes de $(T - h)$, dado que se presentará una falla, es $(T - h/T)$ (suposición 4). La probabilidad de que una falla se repare como una reparación por descompostura y tenga un tiempo de demora en $(h, h + dh)$ está dada por

$$\frac{T - h}{T} f(h) dh \quad (3.59)$$

Sumando todos los h posibles, la probabilidad de que una falla se presente como una descompostura $P(T)$ está dada por la ecuación (3.60).

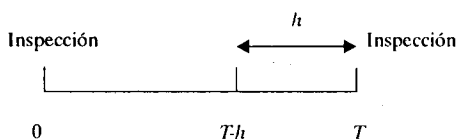


Figura 3.8 Proceso del tiempo de demora.

$$P(T) = \int_{h=0}^T \left(\frac{T-h}{T} \right) f(h) dh \quad (3.60)$$

Si el tiempo muerto promedio para la reparación por descompostura es d_b , el tiempo muerto esperado por unidad de tiempo en el que se incurrirá bajo una política de inspección del período T está dado por $D(T)$, donde

$$D(T) = \frac{1}{T+d} [kTd_b P(T) + d] \quad (3.61)$$

y k es la tasa de llegada de defectos por unidad de tiempo. La ecuación (3.61) puede usarse como una función objetivo para determinar la frecuencia óptima de inspecciones T . Un objetivo más apropiado consiste en minimizar el costo esperado, que consta de los costos esperados de reparación por descomposturas, mantenimiento preventivo e inspección.

El costo esperado de las reparaciones por descompostura $C_f(T)$ se obtiene multiplicando el costo de la reparación por descompostura C_f por el número esperado de descomposturas en el intervalo T . Está dado como

$$C_f(T) = C_f kTP(T) \quad (3.62)$$

El costo esperado del mantenimiento preventivo $C_p(T)$ se obtiene multiplicando el número esperado de reparaciones preventivas por el costo de la reparación preventiva C_p

$$C_p(T) = C_p kT[1 - P(T)] \quad (3.63)$$

El costo de inspección es C_i . Así, el costo total esperado por unidad de tiempo es

$$UEC(T) = \left(\frac{1}{T+d} \right) [kT \{C_f P(T) + C_p [1 - P(T)]\} + C_i] \quad (3.64)$$

El modelo anterior se ha ampliado para los casos de inspección no perfecta y situaciones donde no se cumple la suposición 3. El modelo puede usarse para determinar la frecuencia óptima de inspecciones y los programas de mantenimiento preventivo, y se ha aplicado en muchos casos para estudio del mantenimiento de plantas de producción. Los detalles completos de este tema están más allá del alcance de este libro. El lector puede consultar [1, 6-8].

RESUMEN

En la primera parte de este capítulo se presentan los conceptos del mantenimiento preventivo. El mantenimiento preventivo comprende principalmente dos tipos de mantenimiento planeado. El primer tipo es el mantenimiento preventivo que se basa en la estadística y la confiabilidad y que se deriva a partir de datos históricos. El segundo se basa en las condiciones. La tendencia es apoyarse más en el mantenimiento preventivo con base en las condiciones. Con este fin, se proporcionan numerosas técnicas de diagnóstico. Se resaltan los aspectos relacionados con las decisiones de reemplazo, y se describe un procedimiento paso a paso para desarrollar un mantenimiento planeado acertado.

La segunda parte del capítulo se centra en los modelos matemáticos del mantenimiento preventivo. Se presentan bastantes modelos para determinar un programa óptimo de mantenimiento preventivo y la frecuencia óptima de las inspecciones. También se incluyen modelos para mantenimiento preventivo cuando las acciones de mantenimiento son imperfectas. Se presenta el concepto de tiempo de demora y se describe su empleo para determinar el mantenimiento preventivo.

EJERCICIOS

- 3.1 ¿Por qué el mantenimiento preventivo es generalmente más eficaz que los otros tipos de estrategias de mantenimiento?
- 3.2 Visite una planta en su área e identifique la necesidad de un mantenimiento basado en las condiciones (MBC). Haga una lista de técnicas de diagnóstico que necesite la planta. Identifique el tipo de monitoreo y de equipo que necesite la planta para que pueda operar el MBC.
- 3.3 ¿Cuáles son los componentes de costo que participan en el ciclo de vida del equipo? ¿Cómo estima cada componente?
- 3.4 Visite una planta en su área y seleccione una pieza de equipo crítico y diseñe un programa de mantenimiento planeado para él.
- 3.5 El tiempo hasta la falla de un equipo sigue una distribución exponencial con una media de 500 días. Los costos del mantenimiento preventivo y del mantenimiento de fallas son de 50 y 300 dólares, respectivamente. Determine t_p , el momento óptimo para el reemplazo preventivo, empleando las siguiente políticas:
 - a. Política tipo I.
 - b. Política tipo II.

- 3.6 Resuelva el mismo problema del ejercicio 3.1 si la distribución de fallas es logarítmica normal con parámetro de escala $\mu = 2$ y parámetro de forma $\sigma^2 = 0.01$.
- 3.7 Determine el t_p óptimo del ejemplo 3.2 empleando el método de la sección dorada.
- 3.8 Determine el t_p óptimo para los ejemplos 3.1 y 3.2 empleando el método de Newton.
- 3.9 Una pieza de equipo tiene una distribución de tiempos de falla $F(t)$ y una función de densidad $f(t)$. Muestre lo siguiente:
- $\mu = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dt.$
 - $r(t) = f(t)/1 - F(t).$
 - El número esperado $H(t_p)$ de fallas en el intervalo $(0, t_p)$ es $H(t_p) = \int_0^{t_p} r(t) dt.$
- 3.10 Desarrolle un método de optimización para encontrar los valores óptimos $k, T_1, \dots, T_k$ para las políticas generalizadas tipo I y tipo II de la sección 3.6.4.
- 3.11 Considere el modelo de inspección de la sección 3.7.2. Muestre que existe un intervalo de inspección de equilibrio para cualquier distribución de fallas. Muestre que el punto de equilibrio es único en los casos de las distribuciones exponencial y de Weibull (los resultados se dan en [9]).
- 3.12 Considere el modelo de la sección 3.7.2. Derive el programa óptimo de inspecciones para la distribución exponencial con un parámetro λ en términos de p, C_r, C_i y λ . Encuentre el programa si $\lambda = 0.01, p = 500, C_r = 4000$ y $C_i = 50$.
- 3.13 Considere el modelo de la sección 3.7.3. Muestre que si la distribución de la tasa de fallas es exponencial, entonces las inspecciones se dan a intervalos iguales, es decir, $T_{i+1} - T_i = T_i - T_{i-1}$.
- 3.14 Utilice el modelo dado en la sección 3.7.4 para coordinar las inspecciones de cinco máquinas. Los datos para las máquinas son los siguientes:

Máquina i	$\$C_i$	λ_i	$\$r_i$	$\$s_i$
1	5	0.01	100	10
2	10	0.05	200	100
3	5	0.08	100	10
4	5	0.02	300	100
5	10	0.1	200	50

$A=25, N=5$ (datos tomados de [3]).

3.15 Suponga que la distribución de fallas para una pieza de equipo es de tipo Weibull con parámetro de forma $\alpha = 2$ y parámetro de escala $\beta = 50$. Muestre lo siguiente:

- a. La función de la tasa de fallas está dada por $r(t) = \beta \alpha t^{\alpha-1}$.
- b. La función de la tasa de fallas $r(t)$ crece de manera monótona.
- c. Calcule T^* para los modelos dados para los planteamientos 1 y 3 para el modelado del mantenimiento imperfecto.

REFERENCIAS

1. R. D. Baker and A. H. Christer, "Review of Delay-Time or Modeling of Engineering Aspects of Maintenance," *European Journal of Operational Research*, Vol. 73, pp. 407-422.
2. P. K. Banerjee and N. N. Chiuiv, "Inspection Policies for Repairable Systems," Working Paper, , Department of Mathematics and Statistics, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
3. R. E. Barlow and L. C. Hunter, "Optimum Preventive Maintenance Policies," *Operations Research*, Vol. 8, pp. 90-100.
4. M. S. Bazaraa, C. M. Shetty and H. Sherali, *Nonlinear Programming Theory and Algorithms*, 2nd Ed., Wiley, New York.
5. M. Ben Daya and S. O. Duffuaa, "Co-ordination of Inspections for a Group of Machines," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 199-208.
6. A. H. Christer and W. M. Walker, "Delay Time Models for Industrial Inspection Maintenance Problem," *Journal of Operational Research Society*, Vol. 35, No. 5, pp. 401-406.
7. A. H. Christer and W. Wang, "A Model of Condition Monitoring of a Production Plant," *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 2199-2211.
8. A. H. Christer, W. Wang, J. M. Sharp and R. D. Baker, "Stochastic Maintenance Modeling of High-Tech Steel Production Plant." In: A. H. Christer, S. Osakei and L. Thomas, Eds., *Stochastic Modeling in Innovative Manufacturing, Lecture Notes in Economics and Mathematical Science*, Springer, Hamburg, pp. 196-214.
9. M. A. Hariga, "A Maintenance Inspection Model for a Single Machine with General Failure Distribution," *Microelectronics and Reliability*, Vol. 36, No. 3, pp. 353-358.

10. A. K. S. Jardine, *Maintenance, Replacement and Reliability*, Pitman, New York.
11. M. A. K. Malik, "Reliable Preventive Maintenance Scheduling," *AIIE Transactions*, Vol. 11, pp. 221-228.
12. T. Nagakawa, "Optimal Policies when Preventive Maintenance Is Imperfect," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-28, pp. 331-332.
13. T. Nagakawa, "A Summary of Imperfect Preventive Maintenance Policies with Minimal Repair," *Researcher Operationele/Operations Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 249-255.
14. D. G. Nguyen and D. N. Murthy, "Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems," *Operations Research*, Vol. 29, No. 6, pp. 1181-1194.
15. F. O. Olorunniwo and A. Izuchukwu, "Scheduling Imperfect Preventive and Overhaul Maintenance", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 8, No. 4, pp. 67-79.



4

MEDICIÓN DEL TRABAJO DE MANTENIMIENTO

4.1 INTRODUCCIÓN

La eficacia de la administración de las operaciones puede mejorar considerablemente si se establecen e implementan metas para evaluar y mejorar el rendimiento de tales operaciones. Un prerequisite esencial y necesario para evaluar la productividad y el rendimiento es contar con normas o estándares de trabajo. Una norma de trabajo especifica la producción esperada de un trabajador calificado con un desempeño o rendimiento estándar. Un trabajador calificado es aquel que ha adquirido las habilidades, los conocimientos y otros atributos necesarios para llevar a cabo el trabajo en cuestión de acuerdo con normas satisfactorias de cantidad, calidad y seguridad. El rendimiento estándar corresponde a la tasa de producción que un trabajador calificado alcanzará de manera normal, sin excesiva fatiga, como promedio de la jornada de trabajo. Las normas de trabajo se emplean generalmente para evaluar el rendimiento de los trabajadores y las instalaciones, y para predecir, planear, programar y controlar el trabajo, los costos y las operaciones. Las normas de trabajo son necesarias para planear los recursos de mantenimiento, como el personal del departamento de mantenimiento, y no sería posible desarrollar una programación y control eficaces sin normas de trabajo confiables. Las normas de trabajo para mantenimiento pueden elaborarse utilizando varias técnicas de medición del trabajo.

Hay que considerar las características distintivas del trabajo de mantenimiento, antes de describir e ilustrar la aplicación de estas técnicas. El trabajo de mantenimiento es único cuando se compara con un trabajo típico de producción. Gran parte del trabajo de mantenimiento ocurre en forma aleatoria y en lugares inesperados, y tiene una duración variable. El trabajo de mantenimiento puede requerir que el trabajador realice su labor bajo

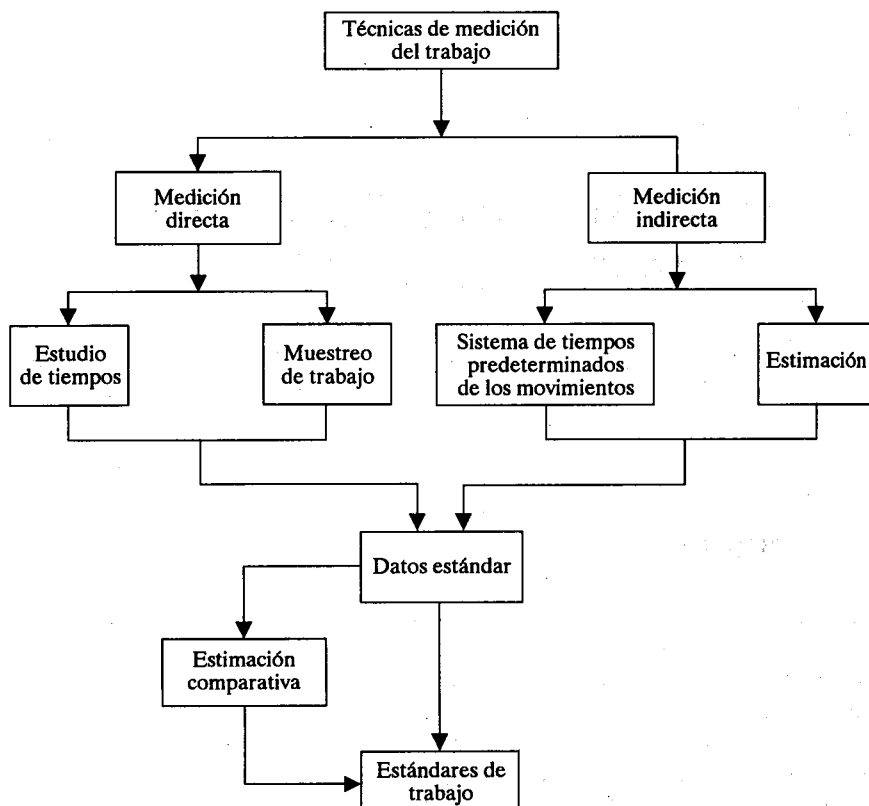


Figura 4.1 Técnicas de medición del trabajo.

condiciones ambientales variables de temperatura, iluminación y nivel de ruido. Un trabajador típico del área de producción no está sujeto a tales incertidumbres. Este capítulo presenta varias técnicas para establecer normas de trabajo, tomando en cuenta el carácter único del trabajo de mantenimiento. La sección 4.2 cubre las técnicas de la medición del trabajo, la sección 4.3 describe el muestreo de trabajo, y la sección 4.5 presenta sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos. La sección 4.6 cubre los datos estándar y la sección 4.7 presenta la técnica de estimación.

4.2 TÉCNICAS DE LA MEDICIÓN DEL TRABAJO

Las técnicas de la medición del trabajo se pueden clasificar de manera general en dos categorías: 1) técnicas de medición directa, y 2) técnicas de medición indirecta. Estas técnicas se muestran en la figura 4.1. El estudio de

tiempos y los sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos se utilizan en el desarrollo de los datos estándar para trabajos de mantenimiento que se necesitan para la elaboración de estándares de trabajo de mantenimiento. Estas técnicas se describen brevemente a continuación:

4.2.1 Estudio de tiempos

El estudio de tiempos se realiza cronometrando al trabajador a medida que se realiza el trabajo, sumando los tiempos para los elementos pertinentes del trabajo, estandarizando los tiempos observados y agregando tolerancias para necesidades personales y otras condiciones de trabajo variables.

4.2.2 Procedimientos del estudio de tiempos

Básicamente, el procedimiento del estudio de tiempos consta de los seis pasos siguientes:

1. *Seleccionar el trabajo.* El trabajo seleccionado deberá estar estandarizado en términos de equipo y materiales y el operador deberá ser un trabajador calificado.

2. *Descomponer el trabajo en elementos.* Identificar los elementos que constituyen un ciclo de trabajo. Un trabajo de mantenimiento se divide en segmentos conocidos como elementos. Algunas de las consideraciones básicas al descomponer el trabajo en elementos son las siguientes:

- Los elementos de máquina deberán separarse de los elementos manuales.
- Los elementos deberán ser fáciles de identificar y cronometrar.
- Los elementos asociados con la ejecución del trabajo propio de mantenimiento deberán separarse de las tareas de obtener material, esperar en el cuarto de herramientas, caminar, etc.

Existen varias razones para dividir el trabajo de mantenimiento en elementos. Se incluyen, en forma enunciativa mas no limitativa, las siguientes:

- Los tiempos recopilados de los elementos pueden categorizarse en datos estándar que pueden combinarse para obtener estándares para algunos trabajos de mantenimiento sin necesidad de cronometrar estos elementos por separado para cada trabajo.
- Los tiempos para elementos similares de varios trabajos pueden compararse para ayudar a mantener uniformes los estándares de trabajo.

- Un trabajador de mantenimiento quizá no efectúe todos los elementos al mismo ritmo. El analista debe ajustar el tiempo del trabajador de mantenimiento de manera que represente el tiempo que consumiría un trabajador calificado para cada uno de los elementos bajo un desempeño estándar.

3. *Observar el trabajo.* El número de veces que un trabajo deberá observarse y cronometrarse aumenta con el grado de exactitud deseado para la norma de trabajo y el nivel de importancia requerido (el nivel de confianza requerido en la estimación de la norma de trabajo). La fórmula para encontrar el número de observaciones requeridas n es la siguiente:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{A\mu} \right)^2 \quad (4.1)$$

en donde

n = Número total de observaciones que deberán hacerse para proporcionar la exactitud deseada

μ = Media verdadera del tiempo de la actividad

A = Exactitud deseada, expresada como una fracción del valor verdadero del parámetro de la población

$Z_{\alpha/2}$ = Desviación normal estandarizada que tiene $\frac{1}{2}\alpha$ como área restante en la cola de la distribución normal estándar más allá de ella

σ = Desviación estándar de la población

Debido a que la fórmula en 4.1 garantizará el nivel requerido de confianza si σ es conocida, y en caso de que S (la desviación estándar de la muestra) se utilice como una estimación para σ , son necesarios los siguientes pasos para encontrar un valor de n que asegure el nivel de confianza deseado:

- Tomar una muestra inicial de tamaño n_1 y estimar σ y μ con S y $\bar{X}$, respectivamente.
- Sustituir S y $\bar{X}$ (media de la muestra) en lugar de σ y μ en (4.1) y calcular n .
- Si $n \leq n_1$, terminar; en caso contrario, hacer $n = n_1$ e ir al primer paso.

Por ejemplo, suponga que estamos interesados en estimar el tiempo medio real para ejecutar un elemento. Los tiempos observados de los elementos para seis observaciones se dan en la tabla 4.1. Suponga que deseamos proporcionar un nivel de confianza del 95% de que el tiempo de la media verdadera

TABLA 4.1 Tiempos observados de los elementos.

Número de observación	Tiempo del elemento observado x_i
1	0.07
2	0.08
3	0.11
4	0.09
5	0.05
6	0.07

para efectuar este elemento de trabajo de mantenimiento se encuentre con un 10% de exactitud. Por lo tanto,

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i}{6} = \frac{0.47}{6} = 0.07833$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - \left(\frac{\sum x_i}{n}\right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.0389 - \frac{(0.47)^2}{6}}{5}} = 0.0204$$

Utilizando (4.1), se obtiene n

$$n = \left[\frac{Z_{\alpha/2} S}{AX} \right]^2 = \left[\frac{1.96(0.0204)}{0.1(0.07833)} \right]^2 = 26$$

El objetivo de este estudio es llegar a un estándar que sea apropiado para un trabajador calificado actuando con un desempeño estándar; sin embargo, el trabajador que fue cronometrado tal vez no haya estado trabajando a un ritmo estándar (100%). Se hace un ajuste, conocido como calificación o nivelación, para ajustar los tiempos observados al tiempo requerido por alguien que trabaje a un ritmo "estándar". La calificación es el proceso de comparar la tasa de desempeño del trabajador, para cada elemento del trabajo de mantenimiento, con el concepto del analista de un ritmo estándar (normal).

4. *Calcular los tiempos básicos.* El tiempo básico para el trabajo es el tiempo que debería tomarle a un trabajador calificado ejecutar los elementos del trabajo al trabajar a un ritmo estándar. El tiempo básico se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$BT = OT \left(\frac{\text{Calificación}}{\text{Calificación estándar}} \right) \quad (4.2)$$

en donde

BT = Tiempo básico

OT = Tiempo observado

Calificación estándar = 100%

Suponga que se observó a un trabajador laborando 15% más rápido que el ritmo estándar. A él se le daría una calificación de 115%. Si el tiempo observado es de 4.23 minutos, entonces, empleando (4.2), el tiempo básico se obtiene de la siguiente forma:

$$BT = 4.23 \left[\frac{115}{100} \right] = 4.86 \text{ minutos}$$

5. Determinar las tolerancias. Una tolerancia es el porcentaje del tiempo básico que se concede por demoras y fatiga. Las tolerancias pueden clasificarse como constantes o variables. Las tolerancias constantes se conceden por necesidades personales y fatiga. Las tolerancias variables están relacionadas con las características del trabajo de mantenimiento. En la tabla 4.2 se dan algunas guías generales para las tolerancias. Las demoras pueden ocurrir en un trabajo sin ser culpa del trabajador de mantenimiento, quien tal vez tenga que esperar instrucciones, esperar en el almacén de herramientas, o esperar a que venga una grúa para llevarse una pieza de trabajo. Se tiene que conceder una tolerancia por demoras inevitables.

6. Establecer un estándar de trabajo.

$$\text{Estándar de trabajo} = BT (1 + \text{Tolerancias}) \quad (4.3)$$

El estudio de tiempos directo se utiliza generalmente para el desarrollo de estándares de trabajos que requieren más de 100 horas, como en el caso de las reparaciones generales de las máquinas. Los estándares de trabajo pueden utilizarse como base en el desarrollo de los datos estándar para tareas de mantenimiento que contienen trabajo(s) de mantenimiento para los cuales se han desarrollado estándares. Los datos estándar se explican en la sección 4.6.

TABLA 4.2 Guías generales para el cálculo de tolerancias.

Porcentaje que se agrega al tiempo normal de un elemento para tomar en cuenta sus condiciones de trabajo			
A. Tolerancias constantes		E. Condiciones atmosféricas	
a. Tolerancia personal	5	(calor y humedad)	
b. Tolerancia básica por fatiga	4	Variable	0-10
B. Tolerancias variables		F. Atención estrecha	
i. Tolerancias por estar de pie	2	a. Trabajo ligeramente fino	0
ii. Tolerancias por posición anormal		b. Fino o exacto	2
a. Ligeramente incómoda	0	c. Muy fino o exacto	5
b. Incómoda (doblado)	2	G. Nivel de ruido	
c. Muy incómoda (acostado, estirado)	7	a. Continuo	0
C. Uso de fuerza o energía muscular (levantar, jalar, empujar)		b. Intermitente-fuerte	2
Peso levantado (libras)		c. Intermitente-muy fuerte	5
5	0	d. Muy agudo-fuerte	5
10	1	H. Tensión mental	
15	2	a. Proceso ligeramente complejo	1
20	3	b. Complejo o amplio tramo de atención	4
25	4	c. Muy complejo	8
30	5	I. Monotonía	
35	7	a. Poca	0
40	9	b. Mediana	1
45	11	c. Grande	4
50	13	J. Tedio	
60	17	a. Poco tedioso	0
70	22	b. Tedioso	2
		c. Muy tedioso	5
D. Mala iluminación			
a. Ligeramente abajo de la recomendada	0		
b. Bastante abajo de la recomendada	2		
c. Muy inadecuada	5		

4.3 MUESTREO DE TRABAJO

El muestreo de trabajo es una técnica para encontrar el porcentaje de ocurrencia de una actividad determinada empleando el muestreo estadístico. Para obtener una imagen completa y exacta del tiempo productivo de los trabajadores de mantenimiento en determinada área, sería necesario observar continuamente a todos los trabajadores en dicha área y hacer un registro de cuándo y por qué algunos de los trabajadores estuvieron ociosos. Sería casi imposible hacer esto y demasiado costoso.

Suponga que es posible observar de un solo vistazo el estado de cada trabajador en un departamento en un momento determinado y, suponga, por ejemplo, que en un momento se observa que 70% están trabajando y 30% están ociosos. Si esta acción se repite 50 veces o más a diferentes horas del día y cada vez la proporción de trabajadores trabajando es siempre 70%, sería posible decir con cierta confianza que, en un momento dado, el 70% de los trabajadores estarán trabajando. Como generalmente tampoco es posible hacer eso, el siguiente mejor método consiste en hacer recorridos por el departamento de mantenimiento a intervalos aleatorios para observar qué trabajadores están trabajando y cuáles están ociosos, y las razones de esto. Ésta es la base del muestreo de trabajo. Cuando el tamaño de la muestra es grande y las observaciones son realmente al azar, hay una elevada probabilidad de que estas observaciones reflejarán la situación real más o menos un cierto margen de error.

Para demostrar la aplicación del muestreo de trabajo, suponga que se desea estimar la utilización de un trabajador de mantenimiento. El trabajador es observado 1000 veces durante un período de 6 semanas a horas aleatorias del día. La hoja del registro del muestreo de trabajo de la tabla 4.3 resume los datos del estudio.

La fracción del tiempo, p , que el trabajador estuvo ocioso puede calcularse de la siguiente manera:

$$\hat{p} = \frac{X}{n} \quad (4.4)$$

TABLA 4.3 Hoja sencilla para el registro del muestreo de trabajo.

Fecha:	Observador:	Estudio núm.	
Número de observaciones = 1000		Total	Porcentaje
Número de veces que se observó al trabajador laborando		750	75
Número de veces que se observó al trabajador ocioso		250	25

en donde

X = Número de veces que se observó al trabajador ocioso

n = Número total de observaciones

Para los datos de la tabla 4.3,

$$\hat{p} = \frac{250}{1000} = 0.25$$

El número de veces que se observó al trabajador ocioso, X , es una variable aleatoria binomial con una función de masa de probabilidad como sigue:

$$b(n, p, x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} \quad x = 0, 1, 2, \dots, n \quad q = 1 - p \quad (4.5)$$

La media μ y la varianza σ^2 de la variable aleatoria X son

$$\mu_X = np \quad \text{y} \quad \sigma_X^2 = npq \quad (4.6)$$

Entonces, $\hat{p} = X/n$ es una variable aleatoria con media $\mu_{\hat{p}}$ y varianza $\sigma_{\hat{p}}^2$ dadas como

$$\mu_{\hat{p}} = p \quad \text{y} \quad \sigma_{\hat{p}}^2 = \frac{pq}{n} \quad (4.7)$$

Si n es grande, la distribución de $\hat{p}$ puede aproximarse mediante una distribución normal con media p y varianza pq/n y, por lo tanto, un intervalo de confianza $(1 - \alpha)$ con respecto a p está dado por

$$\hat{p} \pm Z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\hat{p}\hat{q}}{n}} \quad (4.8)$$

en donde $\hat{q} = 1 - \hat{p}$.

4.3.1 Número de observaciones requeridas para un estudio de muestreo de trabajo

El número de observaciones requeridas para un estudio de muestreo de trabajo puede basarse en el error estándar de p y está dado por

$$N = \left[\frac{Z_{\alpha/2}}{A} \right]^2 \left[\frac{1-p}{p} \right] \quad (4.9)$$

En donde $Z_{\alpha/2}$ y A se definen como en (4.1).

Por ejemplo, considere el caso en que se desea la utilización de un solo trabajador de mantenimiento. Se recopilan los datos de la tabla 4.3. Calcule el intervalo en que se encuentra la proporción de tiempo ocioso p , con 95% de nivel de confianza. Determine cuántas observaciones adicionales se necesitan si se requiere que la estimación esté dentro del 10% de p :

$$n = \left[\frac{Z_{0.025}}{A} \right]^2 \frac{1-p}{p}$$

En donde $Z_{0.025} = 1.96$ de la tabla normal estándar.

$$A^2 = \frac{(1.96)^2}{1000} \frac{0.8}{0.2} = \frac{(1.96)^2}{1000} \frac{8}{2} = 0.01537$$

$$A = 0.124$$

El intervalo en donde se encuentra p con 95% de nivel de confianza es $\hat{p} \pm A$, dado como

$$0.175 \leq p \leq 0.225$$

El número de observaciones requeridas para un nivel de confianza de 95% y un nivel de exactitud del 10% es

$$n = \left(\frac{1.96}{0.1} \right)^2 \frac{0.8}{0.2} = 1537$$

El número de observaciones adicionales requeridas es $1537 - 1000 = 537$.

4.3.2 Planeación de un estudio de muestreo de trabajo

El valor de un estudio de muestreo de trabajo se verá grandemente afectado por el cuidado y la eficacia de los esfuerzos de planeación. El esfuerzo que se haga en la etapa de planeación producirá resultados significativos y estadísticamente válidos. Para planear y llevar a cabo un estudio de muestreo de trabajo se sugieren los siguientes pasos.

1. *Objetivos del estudio.* Definir claramente los objetivos del estudio, que deberán incluir la necesidad y la información específica que se requiere.
2. *Identificación de la población.* Determinar el grupo de trabajadores de mantenimiento, máquinas, equipos, etc., a los que se hará el muestreo de trabajo. Incluir las características de la población (es decir, su tamaño y ubicación). La población debe clasificarse según el trabajador y deberá tener marcas visibles para su identificación.
3. *Definición de actividades.* Seleccionar las actividades del trabajo que se van a observar que estén claramente definidas, sean mutuamente exclusivas y fáciles de reconocer.
4. *Diseño del formulario para las observaciones.* Elaborar un formulario para las observaciones, sencillo y fácil de usar, que contenga preguntas para toda la información necesaria. En la tabla 4.4 se presenta un ejemplo.
5. *Planeación de las rutas para las observaciones.* Planear las rutas de observaciones que el observador tiene que seguir a fin de recopilar los datos. Dichas rutas deberán incluir todas las áreas posibles de reunión de la población y cubrir el 67% como mínimo en cada ronda de muestreo. Puede haber más de una ruta; sin embargo, deberá estar presente un grado razonable de aleatoriedad. Esto puede obtenerse con un punto de inicio aleatorio o una selección aleatoria de la ruta en caso de que se planeen rutas múltiples.
6. *Horarios para el estudio.* Seleccionar un período de estudio que asegure la confiabilidad de los hallazgos del muestreo de trabajo. El período seleccionado tiene que reflejar tanto como sea posible la carga de trabajo y condiciones normales. Por lo común, debe disponerse de un período de 10 días laborales para realizar el estudio.
7. *Número de observaciones.* Seleccionar una estimación inicial de p para cada actividad del estudio, la exactitud requerida y el nivel de confianza $(1 - \alpha)$. El número requerido de observaciones para cada actividad puede calcularse usando la fórmula para el tamaño de la muestra dado en (4.9). Se deberá utilizar el mayor número calculado de n , ya que cubre los requerimientos de exactitud de todas las actividades. Al calcular el número de observaciones n , puede ser necesario recalcular n varias veces para asegurar el nivel de confianza requerido, como se explicó en la sección 4.2.2, inciso 3.
8. *Programa para las horas de las observaciones.* Programar las observaciones del muestreo empleando números aleatorios a fin de evitar cualquier sesgo. Se puede generar una serie de números aleatorios usando una calculadora o una tabla de números aleatorios estándar.
9. *Preparación de la población de la muestra.* Informar acerca del estudio a la fuerza de trabajo de mantenimiento a la que se le hará el mues-

TABLA 4.4 Formulario de observaciones para el muestreo de trabajo.

Día	Hora	Actividades							
Totales									
%									

treo de trabajo, antes de comenzar las observaciones. Esto deberá incluir una explicación sobre los objetivos del estudio y la importancia de trabajar de manera normal sin poner atención al observador.

10. *Capacitación de los observadores.* Capacitar a los observadores para alcanzar los objetivos del estudio y minimizar los errores y los sesgos. Esta capacitación deberá asegurar una clara comprensión de los objetivos del estudio. Es necesaria una familiaridad completa con las definiciones de las actividades y la(s) ruta(s) de las observaciones. Esta capacitación puede incluir corridas de prueba del estudio de muestreo de trabajo según se planeó. Esto proporcionará una estimación de p necesaria para el cálculo de las observaciones y también minimizará las incertidumbres que el observador pudiera tener.

4.4 GRÁFICAS DE CONTROL

4.4.1 Introducción

Las gráficas de control se emplean para detectar inestabilidad en un estudio de muestreo de trabajo. En esta gráfica se traza p contra las muestras individuales recopiladas diariamente. Los límites de control superior e inferior de p también se indican en la gráfica de control. Si todos los puntos caen dentro de los límites, puede concluirse que el estudio es estable. La inestabilidad puede atribuirse a errores en la metodología del estudio o a un cambio en el entorno de trabajo. Indica si ha ocurrido un cambio y, en consecuencia, deberán investigarse los incidentes de inestabilidad y tomarse medidas correctivas.

4.4.2 Construcción de las gráficas de control

Las gráficas de control generalmente comienzan a los tres días de iniciado el estudio de muestreo y se mantienen actualizadas a medida que avanza el estudio.

$$\bar{p} = \frac{\text{Número total de observaciones para esa actividad por día}}{\text{Número total de observaciones para todas las actividades por día}}$$

$$\text{Límite superior de control (UCL)} = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (4.10)$$

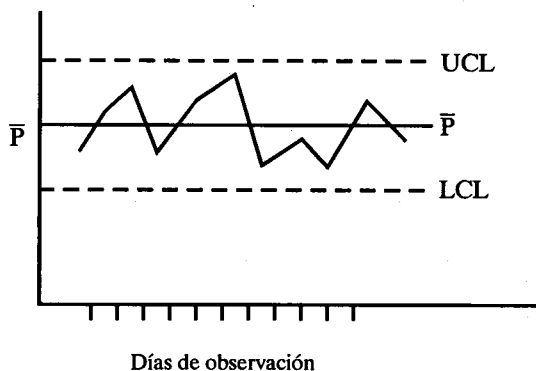


Figura 4.2 Gráfica de control típica.

$$\text{Límite inferior de control (LCL)} = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (4.11)$$

Es importante calcular nuevos límites siempre que haya un cambio en $\bar{p}$. En la figura 4.2 se muestra una gráfica de control típica. El muestreo de trabajo es una técnica que se utiliza muy comúnmente para elaborar los estándares de trabajos de mantenimiento y para determinar la eficacia de los trabajadores de mantenimiento.

4.5 SISTEMAS DE TIEMPOS PREDETERMINADOS DE LOS MOVIMIENTOS

Los sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos (STPM) se emplean para establecer estándares de trabajo. Uno de los sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos mejor conocidos es el sistema de medición del tiempo de los métodos (MTM). Los tiempos de los movimientos fundamentales son resultado del estudio de una gran muestra de operaciones muy diversas. Para el establecimiento de un estándar de trabajo, un analista descompondría el trabajo en los movimientos básicos requeridos para realizarlo, y luego sumaría los tiempos predeterminados apropiados para todos los movimientos básicos involucrados. El MTM se desarrolló inicialmente para operaciones de producción. Estos sistemas de tiempos en la actualidad están disponibles en una escala más amplia, de manera que el sistema puede ser económico para operaciones del tipo de mantenimiento, es decir, actividades de ciclos largos. El sistema es conocido como MTM-2.

4.5.1 Sistema MTM-2

El MTM-2 se basa en las categorías de movimientos de la tabla 4.5. A continuación se presenta un resumen de los datos del MTM-2 en unidades de medición del tiempo (TMU). Un TMU es una cienmilésima de hora o 10^{-5} horas.

Código	GA	BG	GC	PA	PB	PC
-5	3	7	14	3	10	21
-15	6	10	19	6	15	26
-30	9	14	23	11	19	30
-45	13	18	27	15	24	36
-80	17	23	32	20	30	41

GW, 1 por kilogramo (1/kg), PW, 1/5 kg.

A	R	E	C	S	F	B
14	6	7	15	18	9	61

Código	Distancia
5	0-2 pulgadas
15	$\geq 2 < 6$
30	$\geq 6 < 12$
45	$\geq 12 < 18$
80	≥ 18

El sistema MTM-2 también considera los movimientos manuales simultáneos y toma en cuenta los casos en que los movimientos simultáneos

TABLA 4.5 Categorías de movimientos para el MTM-2.

Categoría	Abreviatura
Get (Obtener)	G
Put (Colocar)	P
Get weight (Obtener peso)	GW
Put weight (Colocar peso)	PW
Grasp (Asir)	R
Apply pressure (Aplicar presión)	A
Eye action (Acción ocular)	E
Foot action (Acción del pie)	F
Step (Dar un paso)	S
Bend and rise (Inclinarse y levantarse)	B
Crank (Girar volante)	C

requieren un tiempo adicional. La aplicación eficaz de estos datos requiere una capacitación adecuada.

4.5.2 Procedimientos para el establecimiento de un estándar predeterminado

A continuación se presenta el procedimiento general para establecer un estándar mediante tiempos predeterminados:

1. Observar el trabajo o pensarlo bien si aún no se establece.
2. Descomponer el trabajo en elementos y registrar cada elemento.
3. Obtener de las tablas las unidades de tiempo para cada elemento del trabajo.
4. Sumar las unidades del total de movimientos para todos los elementos.
5. Estimar las tolerancias para necesidades personales, demoras y fatiga.
6. Sumar el tiempo para el desempeño de los movimientos y las unidades de tolerancias para una unidad de movimiento estándar de trabajo, y calcular las unidades de movimiento en tiempos reales de minutos, horas, etc. Un STPM puede emplearse para el establecimiento de estándares de trabajo aun antes de que se inicie el trabajo.

4.6 DATOS ESTÁNDAR

Los datos estándar se refieren a bancos de datos estándar para varios elementos que ocurren repetidamente en el lugar de trabajo. Estos elementos pueden reunirse para determinar estándares de trabajo.

4.6.1 Introducción

Varios trabajos de mantenimiento en una compañía pueden contener los mismos elementos de trabajo. No es necesario cronometrar estos elementos de trabajo para cada trabajo si se ha determinado un estándar de trabajo razonable a partir de uno o más trabajos estudiados previamente. En el departamento de mantenimiento se puede conservar una base de datos para la duración de elementos de trabajo según se obtuvieron mediante estudios de tiempo previos, o mediante sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos. Si los tiempos requeridos para todos los elementos de un nuevo trabajo están disponibles en los datos estándar, se pueden sumar para llegar al tiempo básico para el trabajo. Al tiempo básico se le deben agregar

tolerancias personales, por fatiga y por demoras inevitables para llegar a un estándar para el nuevo trabajo.

El desarrollo de datos estándar es una de las actividades deseadas de un departamento de mantenimiento. A continuación se presentan algunas de las ventajas que ofrece:

- elimina el trabajo repetitivo del analista de estudio de tiempos.
- ahorra tiempo en el establecimiento de estándares de trabajo.
- proporciona una mayor consistencia entre estándares de trabajos similares.

4.6.2 Pasos para el desarrollo de datos estándar

Los pasos para el desarrollo de datos estándar comienzan con la recopilación de datos para identificar trabajos y estándares de trabajos que pudieran utilizarse en el desarrollo de datos estándar. Los detalles de los trabajos y los valores de tiempo correspondientes de los elementos se reúnen bajo la forma de una lista maestra de elementos. Los elementos con valores constantes se separan de los elementos con valores variables. Se pueden realizar ajustes de curvas y desarrollar fórmulas empleando las técnicas estándar.

Para evaluar y mejorar los datos estándar, se analizan las horas estándar para el trabajo estudiado. Para el trabajo estudiado, se calcula la proporción de “tiempo” a partir de los datos estándar con respecto al “tiempo” a partir del estudio de tiempos. Suponga que el tiempo de los datos estándar es 6.35 minutos y que el tiempo de un estudio de tiempos es 6.44. Entonces el índice de comparación es $6.35/6.44 = 0.968$. Si este valor está dentro o es mayor que el 98% de intervalo de confianza, entonces no se requiere mayor investigación. En caso contrario, los valores de la tabla de datos estándar tendrán que ser ajustados por un índice de comparación, en donde el índice de comparación está dado por

$$IOC = \frac{\text{Estándar de trabajo (datos estándar)}}{\text{Estándar de trabajo (estudio de tiempos)}}$$

4.7 ESTIMACIÓN

La estimación es el proceso de emplear la experiencia pasada para predecir eventos futuros. Puede ser utilizada para establecer estándares de trabajo de manera económica.

4.7.1 Introducción

Este tipo de medición del trabajo se realiza aplicando un conocimiento basado en la experiencia. Este método se emplea en todas las plantas hasta cierto grado, ya que no es económicamente factible el establecimiento de estándares de trabajo para todos los trabajos de mantenimiento. Algunas de las ventajas de este método de medición del trabajo incluyen menores costos y poder estimar el estándar antes de iniciar el trabajo. Sin embargo, este método también tiene algunas desventajas:

- Los estándares de trabajo estimados a menudo son inconsistentes.
- Puede ser que no se tomen en cuenta los cambios en los métodos (es decir, tal vez no se recalcula el estándar para el trabajo cuando es necesario).
- Los estándares de trabajo estimados no pueden aplicarse a trabajos para los cuales no se tiene experiencia.

El trabajo de mantenimiento generalmente puede dividirse en las siguientes categorías:

1. Trabajo rutinario de frecuencia regular.
2. Trabajo rutinario de frecuencia irregular.
3. Trabajo único que requiere menos de 100 horas.
4. Trabajos no rutinarios que requieren más de 100 horas.

En el caso de las categorías 1 y 2, el tiempo consumido en el pasado puede ser usado como estándar. La categoría 3 puede subdividirse en las siguientes clases:

- 0-8 horas
- 9-16 horas
- 17-32 horas
- 33-50 horas
- 51-100 horas

Se puede utilizar un tiempo promedio para cada uno de tales grupos como estándar de trabajo. En el caso de la categoría 4, los estándares de trabajo pueden establecerse empleando ya sea el estudio de tiempos o un STPM.

4.7.2 Estimación comparativa (inserción)

La estimación comparativa es una técnica de medición del trabajo que se usa para medir el contenido de trabajo de trabajos de mantenimiento sencillos y repetitivos. El establecimiento de estándares de trabajo de mantenimiento con un estudio de tiempos es demasiado costoso. Los datos estándar basados en estudios de tiempos o sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos ofrecen una mejor solución. Los estándares de trabajos de mantenimiento obtenidos por estimación son inconsistentes. La estimación comparativa es una alternativa relativamente económica. Se basa en el principio de que un trabajador experimentado puede estimar un rango de tiempo durante el cual puede completarse una tarea la mayoría de las veces.

4.7.3 Aplicación de la estimación comparativa

La base de la estimación comparativa es que se apoya en una serie de trabajos de referencia. Estas referencias son trabajos, representativos de una gama de trabajos, que son similares en requerimientos de trabajo, tipos de herramientas utilizadas, etc., y pueden medirse mediante técnicas aceptadas de medición del tiempo.

Una serie de tales referencias forman “grupos de trabajos” o “áreas de tareas”, que son similares pero que tienen un rango de tiempo de contenido de trabajo que permite establecer límites dentro de dicho rango. Suponga que un área de tareas, designada como trabajo correctivo eléctrico, cubre un rango de 0-60 minutos dentro de los siguientes límites:

Grupo D: 0-20 minutos

Grupo E: 21-40 minutos

Grupo F: 41-60 minutos

La hoja de datos de la siguiente página es un ejemplo que cubre un área de tareas en particular. Cada una de las referencias ha sido medida mediante algunas de las técnicas de medición del trabajo que se explicaron anteriormente.

El grupo D tiene las referencias E1, E2, E3, E4 y E5 con tiempos estándar entre 0 y 20 minutos, con E1 más cercano a 0 y E5 más cercano a 20. El valor medio de las referencias del Grupo D es de 15 minutos. Todos los otros grupos dentro de esta área de tareas, cubiertos por esta hoja de datos han sido tratados de manera similar para producir una media de 30 minutos para el Grupo E y 50 minutos para el Grupo F. Este procedimiento puede seguirse para cubrir otras áreas de tareas como reparación mecánica general, etc. La colocación de un nuevo trabajo o un trabajo no medido en un grupo apropiado de referencias se conoce como inserción o *slotting*. Hay

HOJA DE DATOS Y REFERENCIAS PARA TRABAJO CORRECTIVO ELÉCTRICO

Área de tareas: Reparación eléctrica general

Grupo D

0-20 minutos

Tiempo estándar: 15 minutos

E1	Reparar y ajustar interruptores de límite con fallas en elevadores de carga para camiones
E2	Rectificar falla en válvula solenoide, unidad transversal
E3	Verificar y rectificar fallas en el motor y circuitos de máquina empapeladora
E4	Reparar circuitos de válvula hidráulica en unidad de intercambio
E5	Verificar y reparar la operación defectuosa de válvulas hidráulicas en unidades de celdas

HOJA DE DATOS Y REFERENCIAS PARA TRABAJO CORRECTIVO ELÉCTRICO

Área de tareas: Reparación eléctrica general

Grupo E

21-40 minutos

Tiempo estándar: 30 minutos

E20	Verificar y reparar la operación defectuosa de lámparas, interruptores y fusibles en la mesa de inspección
E30	Reparar y restablecer los interruptores de compuerta en el elevador Wadsworth

HOJA DE DATOS Y REFERENCIAS PARA TRABAJO CORRECTIVO ELÉCTRICO

Área de tareas: Reparación eléctrica general

Grupo F

41-60 minutos

Tiempo estándar: 50 minutos

E52	Reparar fallas en interruptor flotante
E60	Reemplazar elemento calefactor defectuoso
E64	Verificar y reparar fallas en uñas y relevadores

dos métodos aceptados de inserción, a saber, clasificación y comparación directa.

1. *Clasificación*. Anteriormente se dijo que cada referencia en un grupo particular se acomodaría en orden ascendente (es decir, E1, en la primera hoja de datos estaría más cercano a 0, en tanto que E5 estaría más cercano a 20 minutos). En el sistema de clasificación, la especificación de trabajo de cualquier trabajo que no se haya medido, pero que tenga requerimientos similares, se compararía con el trabajo de referencia en la hoja de datos. Cuando se haya encontrado en cualquier grupo *uno* similar pero con ligeramente *menor* contenido de trabajo que la referencia, y otro con ligeramente *mayor* contenido de trabajo dentro del *mismo* grupo, entonces al nuevo trabajo se le daría el tiempo promedio para dicho grupo.

Si la referencia con el mayor contenido está en el siguiente grupo, entonces tendrá que evaluarse si el nuevo trabajo cae, por ejemplo, en el Grupo D o el Grupo E o el Grupo F.

2. *Comparación directa*. En este método, el contenido de trabajo del nuevo trabajo se compara con una referencia de contenido de trabajo similar, y se evalúa si la diferencia entre los dos sacará al nuevo trabajo de dicha inserción (slot) particular. La evaluación consiste, por lo tanto, en determinar si la diferencia en contenido de trabajo entre los dos trabajos es mayor que la diferencia entre el tiempo básico del trabajo de referencia y el límite del grupo o slot.

A diferencia del trabajo de producción, no toda actividad de mantenimiento requiere un estándar de trabajo. Una compañía puede obtener estándares utilizando la estimación en las primeras etapas y, posteriormente, haciendo un monitoreo cuidadoso para mejorar los estándares de trabajo estimados. Las demás técnicas pueden utilizarse cuando se presenten situaciones apropiadas.

RESUMEN

Los estándares de trabajo numéricos se emplean para evaluar el rendimiento de los trabajadores y las instalaciones y para predecir, planear, programar y controlar el trabajo, los costos y las operaciones. Se examinaron las técnicas de medición del trabajo que pueden utilizarse en establecimiento de estándares en trabajos de mantenimiento. Las técnicas incluyen el estudio de tiempos, el muestreo de trabajo, los sistemas de tiempos predeterminados de los movimientos, la estimación y los datos estándar. También se presentó un procedimiento paso a paso que puede adoptarse en cada

técnica de medición del trabajo. Estos enfoques se ilustraron con ayuda de ejemplos.

EJERCICIOS

- 4.1** Un trabajo de mantenimiento se ha estudiado con 20 observaciones. El tiempo medio real es de 5.8 minutos y la desviación estándar del tiempo se estima en 2.0 minutos. ¿Cuántas observaciones adicionales deberán hacerse para tener un nivel de confianza de 95% de que el tiempo medio real ha sido determinado dentro del 15%?
- 4.2** Un analista ha observado un trabajo de mantenimiento lo suficiente para familiarizarse con él, y lo ha dividido en cuatro elementos. En la siguiente tabla se muestran los tiempos de los elementos para los primeros cinco ciclos, junto con una calificación del rendimiento para cada elemento:

Número de elemento	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Calificación del rendimiento %
1	1.5	1.6	1.5	1.6	1.7	100
2	2.5	2.3	2.3	2.4	2.3	90
3	1.8	3.0	1.8	1.8	1.9	95
4	1.3	1.1	1.4	1.2	1.3	115

- a. Calcule un tiempo básico estimado para el trabajo con base en los datos disponibles.
- b. Con base en los datos disponibles, ¿qué tamaño de muestra deberá tomarse? Estime el tiempo para el elemento 1 dentro del 5% del tiempo de la media verdadera con 95% de nivel de confianza.
- 4.3** El analista del ejercicio anterior realizó un estudio de muestreo de trabajo para la tarea y registró lo siguiente:

Categoría de las actividades	Frecuencia observada
Actividad de trabajo normal	112
Demoras evitables	17
Demoras inevitables	16

¿Qué tolerancias deberán concederse por demoras inevitables?

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- R. M. Barnes, *Motion and Time Study*, 7th Ed., Wiley, New York.
- B. W. Niebel, *Motion and Time Study*, 9th Ed., Irwin, Homewood, IL.
- G. Kanawaty (Ed.), *Introduction to Work Study*, 4th. Ed., International Labor Office, Geneva.
- D. W. Krager, *Advanced Work Measurement*, Industrial Press, New York.

5

PRONÓSTICOS Y PLANEACIÓN DE LA CAPACIDAD DE MANTENIMIENTO

5.1 INTRODUCCIÓN

Los pronósticos y la planeación de la capacidad de mantenimiento son dos funciones importantes para el diseño de un sistema de mantenimiento eficaz. Los pronósticos del mantenimiento comprenden la estimación y predicción de la carga de mantenimiento. La carga de mantenimiento pone en marcha todo el sistema de mantenimiento y consta de dos categorías principales. La primera categoría es el mantenimiento programado y planeado, que está compuesto de: 1) mantenimiento de rutina y preventivo; 2) reparaciones generales programadas que implican el cierre y paro de la planta; 3) mantenimiento correctivo que implica determinar las causas de una repetición de las descomposturas y un rendimiento por debajo del estándar como resultado de un mal funcionamiento por diseño; y 4) reparación general programada, reparación o construcción de equipo no cubiertos en el punto 2. La segunda categoría es la carga del mantenimiento de emergencia o correctivo. Esta categoría depende principalmente del patrón de fallas y es una fuente importante de incertidumbre en el proceso de planeación. La suma de la carga de mantenimiento para las dos categorías es una variable aleatoria, y es el factor principal en la determinación de la capacidad de mantenimiento.

La planeación a largo plazo de la capacidad de mantenimiento implica determinar los recursos de mantenimiento necesarios para satisfacer la carga de mantenimiento a fin de alcanzar los objetivos de la organización como disponibilidad, confiabilidad, tasas de calidad y fechas de entrega. Un elemento esencial en la planeación de la capacidad es la determinación de las

habilidades de los trabajadores, el número exacto de los diversos tipos de trabajadores, el nivel sano de trabajos pendientes, la capacidad de tiempo extra y el mantenimiento por contrato. La asignación óptima de los recursos de mantenimiento para satisfacer una carga de trabajo aleatoria y variable es un problema complejo y desafiante. Las técnicas de planeación de la capacidad desempeñan funciones muy importantes en el manejo de este complejo problema.

En este capítulo se presentan las técnicas para el pronóstico de la carga de mantenimiento y planeación de la capacidad. La sección 5.2 presenta una breve introducción a los pronósticos. La sección 5.3 describe la técnica de los pronósticos cualitativos. La sección 5.4 presenta varios modelos de pronósticos cuantitativos, incluyendo promedios móviles, análisis de regresión, suavización exponencial y pronósticos estacionales. La sección 5.5 cubre el análisis y medidas de error para probar los modelos de pronósticos. En la sección 5.6 se resume el procedimiento para el pronóstico de la carga de mantenimiento. La sección 5.7 introduce el problema de la planeación de la capacidad en el mantenimiento. En la sección 5.8 se presentan técnicas determinísticas para la planeación de la capacidad. La sección 5.9 resume las técnicas estocásticas para la planeación de la capacidad.

5.2 ASPECTOS PRELIMINARES PARA LOS PRONÓSTICOS

Las técnicas de pronósticos pueden clasificarse como cualitativas y cuantitativas. Los pronósticos cualitativos se basan en la experiencia experta o de ingeniería y en el juicio. Tales técnicas incluyen la analogía histórica, encuestas y el método Delphi. Las técnicas cuantitativas se basan en modelos matemáticos que derivan estimaciones para tendencias futuras a partir de datos históricos. Estos modelos se basan en series de tiempos, como promedios móviles y suavización exponencial, o son de tipo estructural, como los modelos de regresión.

Un modelo de pronósticos se evalúa mediante los siguiente criterios: 1) exactitud; 2) sencillez en los cálculos, datos necesarios para el modelo y requisitos de almacenamiento; y 3) flexibilidad. La exactitud se mide por la precisión con la que el modelo predice valores futuros, y se juzga por la diferencia entre los pronósticos del modelo y los valores observados reales. En general, los requisitos de gran exactitud demandan una relación compleja y, por lo tanto, aumentan la complejidad de los cálculos. La flexibilidad es la capacidad para ajustarse a los cambios de las condiciones. En otras palabras, es una medida de la solidez del modelo de pronóstico. Entre las consideraciones importantes en la selección de la técnica para los pronósticos están: 1) el propósito del pronóstico, 2) el horizonte de tiempo para el pronóstico, y 3) la disponibilidad de los datos para la técnica en particular. Los

siguientes son los pasos para el desarrollo de un modelo de pronósticos cuantitativos:

1. Identificar el aspecto que se va a pronosticar y entender su naturaleza. Definir el propósito del pronóstico y su horizonte de tiempo.
2. Seleccionar y validar los datos disponibles en búsqueda de errores y valores extremos. Identificar datos adicionales necesarios y la metodología para recopilarlos.
3. Emplear los datos disponibles y las técnicas gráficas para evaluar como hipótesis los modelos apropiados. El modelo representa una relación que describe el patrón histórico de los datos o la relación entre una variable dependiente y una independiente.
4. Utilizar la mayor parte de los datos para estimar los parámetros de los modelos. Conservar parte de ellos para probar y validar los modelos. La estimación puede realizarse con un método estadístico apropiado, como el análisis de regresión o la suavización exponencial.
5. Probar y validar los modelos y seleccionar el más apropiado. La simulación y el análisis de errores son herramientas útiles para probar, validar y seleccionar el más apropiado.
6. Monitorear el proceso y el modelo seleccionados para el pronóstico a fin de detectar condiciones fuera de control y encontrar oportunidades para mejorar el desempeño del pronóstico. Se pueden lograr mejoras refinando la estimación de parámetros o cambiando el modelo del pronóstico. El ciclo del proceso de pronósticos se muestra en la figura 5.1, que está en la página siguiente.

5.3 TÉCNICAS PARA PRONÓSTICOS CUALITATIVOS

En ausencia de datos, el analista debe apoyarse en las estimaciones y juicio de los expertos. La función del analista en los pronósticos cualitativos consiste en obtener información del experto de manera sistemática empleando cuestionarios o entrevistas estructuradas. El analista deberá ayudar al experto o a la gerencia a cuantificar su conocimiento. Técnicas como los diagramas de causa y efecto y el método Delphi pueden ser útiles para identificar la relación entre las variables. El analista deberá identificar qué variables influyen en el pronóstico y el impacto de cada una de ellas.

Después de identificar las variables y sus impactos, el siguiente paso consiste en llegar a un acuerdo sobre la magnitud de las variables. Los escenarios del mejor caso, el caso esperado y el peor caso se utilizan generalmente

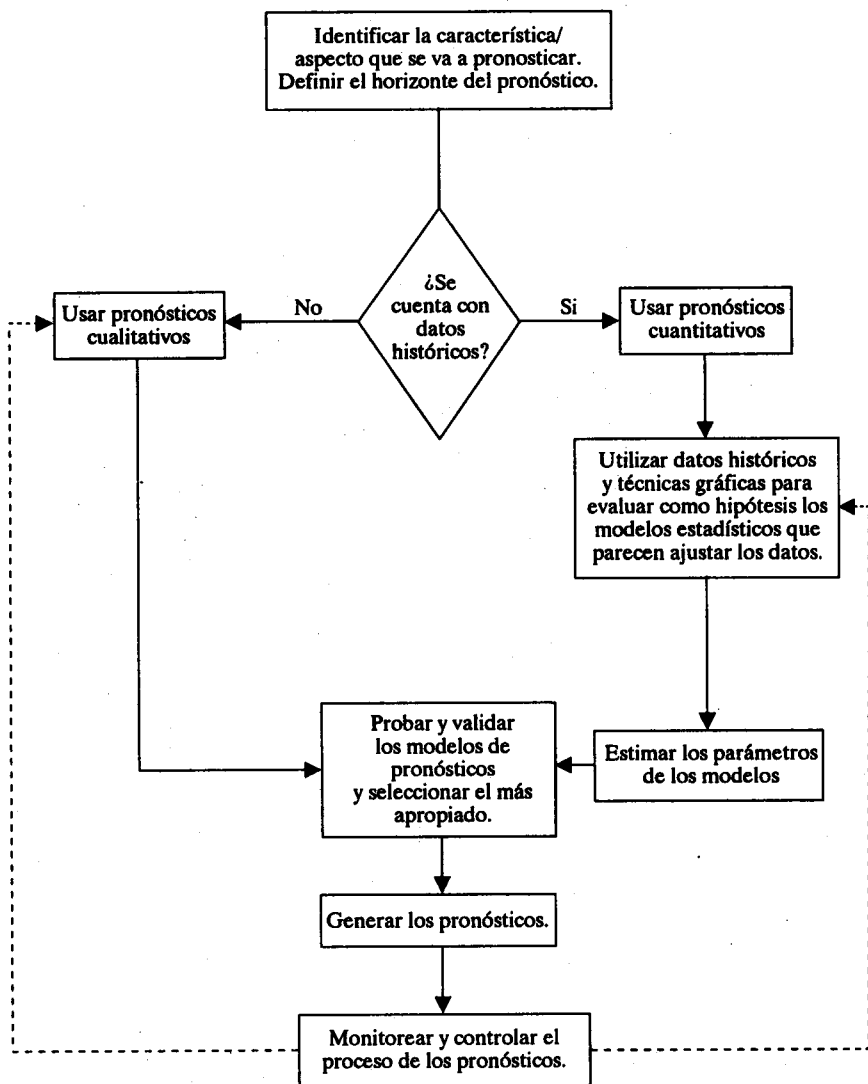


Figura 5.1 Ciclo del proceso de pronósticos.

para estimar la magnitud de las variables. Se puede emplear un enfoque interactivo para presentar argumentos al experto, por ejemplo preguntar por qué su estimación difiere de la estimación promedio, y se le puede pedir al experto que revise y modifique su estimación hasta llegar a un consenso razonable. Cuando ya no es posible mayor reducción en la variación sobre el consenso, el resultado se utiliza como pronóstico.

5.4 TÉCNICAS DE PRONÓSTICOS CUANTITATIVOS

En esta sección se presentan algunas técnicas de pronósticos cuantitativos. Los modelos presentados dependen de la disponibilidad de datos históricos, y se conocen generalmente como modelos estructurales o de series de tiempo. Estos modelos suponen que los valores futuros siguen tendencias históricas o que existe una variable predictora (independiente) que puede proporcionar un modelo o una relación funcional que predice la característica en estudio. Por ejemplo, la edad del equipo puede usarse para predecir el número de horas de mantenimiento requeridas en el equipo. Los modelos que se presentan aquí incluyen el de promedios móviles, el análisis de regresión, la suavización exponencial y los pronósticos estacionales.

5.4.1 Promedio móvil simple

Suponga que la característica en estudio es generada por un proceso constante más un error aleatorio. Un ejemplo de esto podría ser la carga x , ejercida sobre un componente electrónico. Matemáticamente, esto se puede representar como

$$x_t = b + \varepsilon_t$$

en donde b es una constante y ε_t es una variable aleatoria con una media 0 y una varianza σ_ε^2 .

Para pronosticar el valor futuro, necesitamos estimar el parámetro b . Suponga que tenemos las observaciones de serie de tiempos $x_1, x_2, \dots, x_n$. Si se supone que todas las observaciones son igualmente importantes, es decir, de igual peso, y si empleamos el método de mínimos cuadrados (ver el Apéndice A, sección A.9), entonces seleccionamos un valor de b que minimice la suma de los errores al cuadrado denotada por SS_E :

$$SS_E = \sum_{t=1}^n (x_t - b)^2 \quad (5.1)$$

Se realiza la diferenciación de (5.1) con respecto a b y se iguala a 0.

$$\frac{dSS_E}{db} = -2 \sum_{t=1}^n (x_t - b) = 0 \quad (5.2)$$

El estimador de b , $\hat{b}$, está dado como

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.3)$$

que es justamente el promedio de las observaciones con que se cuenta. Este método genera el pronóstico del siguiente período promediando las observaciones reales de los últimos n períodos.

Ejemplo 5.1 La carga de mantenimiento en horas-hombre durante los últimos 6 meses está dada como

Mes	Carga de mantenimiento
1	200
2	300
3	200
4	400
5	500
6	600

Encuentre el pronóstico de la carga para los períodos 7 y 8 utilizando un promedio móvil de tres meses. La carga pronosticada para el mes 7 usando $n = 3$ es

$$\hat{x}_7 = \frac{400 + 500 + 600}{3} = 500$$

No se hizo la observación para x_7 , de manera que si la carga en el mes 7 se estima como 500 como se calculó previamente, el pronóstico para el octavo mes se obtiene como

$$\hat{x}_8 = \frac{500 + 600 + 500}{3} = 533.33$$

5.4.2 Promedio móvil ponderado

Es lógico suponer que las observaciones más recientes deberán tener más impacto en los pronósticos futuros que las observaciones que están más distantes, especialmente cuando los datos no son estables (por ejemplo, si hay cambios considerables). La idea del promedio móvil ponderado es la de dar a cada observación un peso diferente. La relación del pronóstico es

$$\bar{x}_{n+1} = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (5.4)$$

en donde w_i es el peso para la i -ésima observación real. Por lo tanto,

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5.5)$$

Esta fórmula puede obtenerse matemáticamente minimizando la suma de los errores al cuadrado ponderados empleando el mismo procedimiento que en la sección 5.4.1. Los valores de w_i pueden determinarse empíricamente o estimarse con base en la experiencia. Si los valores de w_i se estiman con base en la experiencia, este método combina técnicas cualitativas y cuantitativas para pronosticar.

Ejemplo 5.2 Suponga, para los datos del ejemplo 5.1, que el mes más reciente deberá pesar dos veces más que los meses anteriores. Encuentre los pronósticos para x_7 y x_8 utilizando un promedio móvil de tres períodos.

$$\begin{aligned} w_4 + w_5 + w_6 &= 1 \\ w_6 &= 2w_5 = 2w_4 = 2w \\ 4w &= 1 \\ w &= \frac{1}{4} \quad w_5 = w_4 = 0.25 \quad w_6 = 0.5 \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\hat{x}_7 = 0.25(400) + 0.25(500) + 0.5(600) = 525$$

Suponiendo que la carga para el séptimo mes $x_7 = 525$, el pronóstico para el octavo mes está dado como

$$\hat{x}_8 = 0.25(500) + 0.25(600) + 0.5(525) = 537.5$$

5.4.3 Análisis de regresión

Si existe una variable independiente que pueda predecir una característica (variable dependiente), y si existe una correlación razonable entre las dos variables, entonces puede usarse un modelo de regresión. Por ejemplo, si el costo de mantenimiento para este período $y(t)$ es una función lineal del número de horas de operación en el período anterior $x(t-1)$, entonces el modelo sería

$$y(t) = a + bx(t-1) + \varepsilon_t \quad (5.6)$$

en donde

$y(t)$ = Valor deseado del pronóstico del costo en el período t

$x(t-1)$ = Horas de operación en el período $t-1$

a, b = Parámetros a determinar

ε_t = Una variable aleatoria con media 0 y varianza σ_ε^2

Después de la estimación, el modelo resultante es de la forma:

$$\hat{y}(t) = \hat{a} + \hat{b}x(t-1)$$

Podría ser posible que la variable dependiente fuera una función de más de una variable independiente. En el caso del costo de mantenimiento, podría ser una función lineal de horas de operación en el período anterior $x(t-1)$ y la edad de la planta t . Esto puede expresarse matemáticamente así

$$y(t) = a + bx(t-1) + ct + \varepsilon_t \quad (5.7)$$

en donde a, b, c son parámetros a determinar.

En el caso de una variable, los parámetros a y b pueden determinarse o estimarse encontrando una buena línea de tendencia que ajuste los puntos de datos mediante estimación visual. Los parámetros a y b son la intersección y la pendiente de esta línea. Si se desea más precisión, se emplea un análisis de regresión. El análisis de regresión se refiere al proceso de estimar los parámetros del modelo utilizando el método de mínimos cuadrados. Este método ajusta una línea a las observaciones de manera que se minimice la suma de las distancias verticales al cuadrado con respecto a la línea.

La ecuación básica de una línea recta que muestra una tendencia lineal entre una variable independiente y una variable dependiente $x(t)$ que representa la demanda de trabajo de mantenimiento es

$$x(t) = a + bt + \varepsilon_t \quad (5.8)$$

en donde a es la intersección y b es la pendiente que necesitan estimarse. La estimación de parámetros consiste en estimar a y b . El método de mínimos cuadrados estima b y a en términos de $x(t)$ y $t, t = 1, 2, \dots, n$, como sigue:

$$\hat{b} = \frac{n \sum_{t=1}^n tx(t) - \left(\sum_{t=1}^n t \right) \left(\sum_{t=1}^n x(t) \right)}{n \sum_{t=1}^n t^2 - \left(\sum_{t=1}^n t \right)^2} \quad (5.9)$$

$$\hat{a} = \bar{x} - \hat{b}\bar{t} \quad (5.10)$$

en donde

$$\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^n x(t)}{n} \quad y \quad \bar{t} = \frac{\sum_{t=1}^n t}{n} \quad (5.11)$$

La ecuación resultante que puede emplearse para hacer predicciones es

$$x(t) = \hat{a} + \hat{b}t$$

Si el modelo se toma constante con variación aleatoria, es decir, $x(t) = a + \varepsilon_t$, entonces la estimación para a es el promedio como se obtuvo anteriormente en la sección 5.4.1.

El análisis de regresión se puede generalizar fácilmente para el caso de variables múltiples y una relación polinomial entre variables dependientes e independientes.

Ejemplo 5.3 La carga mensual de mantenimiento en horas-hombre se da en la siguiente tabla. Desarrolle una línea recta que mejor ajuste los datos y pueda usarse para predecir la carga futura de mantenimiento.

Mes t	Carga $x(t)$
1	15
2	20
3	35
4	40
5	55
6	70
7	80

El conjunto de datos y los cálculos intermedios se presentan en la tabla 5.1. La ecuación de una línea recta es

$$x(t) = a + bt$$

TABLA 5.1 Datos para la estimación de parámetros para el modelo de regresión lineal.

	t	$x(t)$	$tx(t)$	t^2
	1	15	15	1
	2	25	50	4
	3	30	90	9
	4	45	180	16
	5	50	250	25
	6	70	420	36
	7	85	595	49
	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>	<u> </u>
Suma de valores	28	320	1600	140

La pendiente de la línea se estima como sigue:

$$\hat{b} = \frac{n \sum_{t=1}^7 tx(t) - \left(\sum_{t=1}^7 t \right) \left(\sum_{t=1}^7 x(t) \right)}{n \sum_{t=1}^7 t^2 - \left(\sum_{t=1}^7 t \right)^2} = \frac{7(1600) - (28)(320)}{7(140) - (28)^2} = 11.43$$

$$\hat{a} = \bar{x}(t) - b\bar{t} = \frac{320}{7} - \frac{(11.43)(28)}{7} = -0.005$$

Por lo tanto, $x(t) = -0.005 + 11.43t$.

La ecuación anterior puede utilizarse para pronosticar cargas futuras. Por ejemplo, la carga en el noveno mes se obtiene sustituyendo 9 en lugar de t en la ecuación, y es igual a 102.82 horas-hombre.

5.4.4 Suavización exponencial

La suavización exponencial es un método de pronósticos sencillo, eficiente, fácil de aplicar y ampliamente utilizado. Asigna pesos a las observaciones de períodos anteriores en una proporción inversa a su edad. Realiza esto de una manera muy ingeniosa en la cual sólo se requieren tres datos para generar el pronóstico del siguiente período. Éstos son: 1) el pronóstico del último período, 2) la observación real del último período, y 3) un factor de suavización, que determina el peso relativo dado a la observación reciente. La ecuación básica que es el corazón de la suavización exponencial es la siguiente:

$$\hat{x}(t) = \alpha x(t-1) + (1-\alpha)\hat{x}(t-1) \quad (5.12)$$

en donde

$\hat{x}(t)$ = Pronóstico para el período t y todos los períodos futuros en el caso de un modelo constante

$x(t-1)$ = Demanda real en el período $t-1$

$\hat{x}(t-1)$ = Valor del pronóstico para $t-1$

α = Constante de suavización, $0 < \alpha < 1$

El enfoque de la suavización exponencial puede emplearse para estimar los parámetros para un modelo constante, un modelo lineal o cualquier forma funcional de polinomio. La estimación de los parámetros para los casos constante y lineal se dan a continuación.

En el caso del modelo constante, o caso de cero crecimiento, el proceso del modelo está dado como

$$x(t) = b + \varepsilon_t \quad (5.13)$$

en donde b es la demanda esperada en cualquier período y ε_t es el componente aleatorio que tiene media 0 y varianza σ_ε^2 . Al final del período $t-1$, tenemos las observaciones $x(1), \dots, x(t-1)$, a partir de las cuales necesitamos estimar b y σ_ε^2 . Este modelo es conocido como suavización exponencial simple o

$$x(t) = \alpha x(t-1) + (1-\alpha)\hat{x}(t-1) \quad (5.14)$$

en donde α se determina mediante experimentación o juicio. Un valor grande de α (cerca de 1) indica la creencia de que la observación actual lleva un peso elevado. En otras palabras, el sistema ha cambiado y las observaciones más recientes se asemejan o reflejan su comportamiento. Por otra parte, los valores pequeños de α indican la creencia de que el pasado aún se asemeja, en gran medida, al sistema.

Si los datos históricos graficados sugieren un crecimiento lineal con el tiempo, el modelo se considera lineal. En dicho caso, la media del proceso cambia linealmente con el tiempo según la siguiente ecuación:

$$x(t) = a + bt + \varepsilon \quad (5.15)$$

en donde la demanda esperada en el tiempo t es una función lineal del tiempo:

$$E(x(t)|t) = a + bt \quad (5.16)$$

Se sabe que el atraso o intervalo (la cantidad en que el pronóstico se desvía del valor más reciente) en el valor de datos más reciente en el caso del modelo lineal es

$$\text{rezago} = \frac{\beta}{\alpha} \text{pendiente} = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) b \quad (5.17)$$

Si aplicamos nuevamente la suavización exponencial (suavización doble), denotada por

$$\hat{x}(t) = \alpha \hat{x}(t-1) + (1-\alpha) \hat{x}(t-1) \quad (5.18)$$

$$\text{rezago} = [x(t-1) - \hat{x}(t-1)] = [\hat{x}(t-1) - \hat{x}(t-1)] = \frac{\beta}{\alpha} b \quad (5.19)$$

en cada período $t-1$, los valores de a y b se actualizan como sigue:

$$\hat{a}(t-1) = x(t-1) = \hat{x}(t-1) + \text{rezago} = 2\hat{x}(t-1) - \hat{\hat{x}}(t-1) \quad (5.20)$$

$$\hat{b}(t-1) = \frac{\alpha}{\beta} [\hat{x}(t-1) - \hat{\hat{x}}(t-1)] \quad (5.21)$$

Las condiciones iniciales para comenzar el proceso son

$$\hat{b}(1) = \frac{x(1) - x(1)}{N-1}$$

$$\hat{a}(1) = x(1)$$

$$\hat{x}(1) = \hat{a}(1) - \hat{b}(1) \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\hat{\hat{x}}(1) = \hat{a}(1) - 2\hat{b}(1) \frac{\beta}{\alpha}$$

Ejemplo 5.4 Considere los datos dados en el ejemplo 5.3 para un ajuste lineal por regresión. Utilizando la suavización exponencial con un modelo de crecimiento lineal y $\alpha = 0.2$, encuentre $\hat{x}(8)$ y $\hat{\hat{x}}(10)$.

$$\alpha = 0.2 \quad \beta = 1 - \alpha = 0.8$$

TABLA 5.2 Suavización exponencial simple y doble.

t	$x(t)$	$\alpha x(t)$	$\beta \hat{x}(t-1)$	$\hat{x}(t)$	$\alpha \hat{x}(t)$	$\beta \hat{x}(t-1)$	$\hat{\hat{x}}(t)$
1	15	—	—	(-31.68)	—	—	(-78.36)
2	25	5.0	-25.34	-20.34	-4.07	-62.69	-66.76
3	30	6	-16.27	-10.27	-2.05	-53.41	-55.46
4	45	9	-8.22	0.78	0.16	-44.37	-44.21
5	50	10	0.62	10.62	2.12	-35.37	-33.25
6	70	14	8.50	22.5	4.5	-26.6	-22.10
7	85	17	18	35	7	-17.68	-10.68

Calculando las condiciones iniciales,

$$\hat{a}(1) = x(1) = 15$$

$$\hat{b}(1) = \frac{x(N) - x(1)}{N - 1} = \frac{85 - 15}{6} = \frac{70}{6} = 11.67$$

$$\hat{x}(1) = 15 - 11.67 \left(\frac{0.8}{0.2} \right) = -31.68$$

$$\hat{\hat{x}}(1) = 15 - 2(11.67) \left(\frac{0.8}{0.2} \right) = -78.36$$

En la tabla 5.2 se presentan la suavización exponencial simple y la suavización exponencial doble.

Las estimaciones para $a(7)$ y $b(7)$ pueden obtenerse usando (5.20) y (5.21), respectivamente,

$$\hat{a}(7) = 2(18) - (-10.67) = 36 + 10.67 = 46.67$$

$$\hat{b}(7) = \frac{0.2}{0.8} [18 - (-10.67)] = \frac{1}{4} [18 - 10.67] = 7.17$$

La predicción para cualquier período después de L unidades a partir del período 7 está dada como

$$\hat{x}(7 + L) = \hat{a}(7) + \hat{b}(7)(L)$$

$$\hat{x}(8) = 46.67 + 7.17 = 53.84$$

$$\hat{x}(10) = a(7) + b(7)(3) = 68.18$$

5.4.5 Pronósticos estacionales

En muchos casos el proceso en estudio podría exhibir características de estacionalidad. Por ejemplo, la demanda de electricidad es elevada durante los meses de verano o la tasa de ausentismo podría ser más elevada al inicio o al fin de la semana. Asimismo, la carga de mantenimiento podría ser mayor en ciertas temporadas debido a condiciones climáticas o de operación. El período apropiado en el que debe buscarse si hay estacionalidad deberá estar determinado por la naturaleza de la operación en estudio. Una forma rápida para determinar si hay estacionalidad y crecimiento consiste en graficar datos históricos.

A continuación se presentan un conjunto de pasos lógicos que deben seguirse cuando se está pronosticando una característica en donde se combinan estacionalidad y crecimiento:

1. Graficar los datos y determinar visualmente características claras de series de tiempo.
2. Determinar el modelo de crecimiento y eliminar de los datos el componente de crecimiento. Una forma de remover de los datos el componente de crecimiento consiste en determinar un período promedio para cada ciclo y dividir cada valor de datos entre el promedio.
3. Determinar si está presente una estacionalidad significativa en los datos al aparecer sin el componente de crecimiento (eliminado el crecimiento). El índice de estacionalidad puede calcularse promediando los datos sin crecimiento a lo largo de las estaciones (períodos que exhiben un comportamiento similar).
4. Remover la estacionalidad de los datos originales y analizar el factor de crecimiento. Una gráfica de datos sin estacionalidad revelará la forma del componente de crecimiento. La eliminación de la estacionalidad se logra dividiendo cada valor de datos entre el índice estacional apropiado.
5. Ajustar los datos mediante algún método apropiado: mínimos cuadrados, regresión, suavización exponencial, etc.

Un pronóstico para el futuro está compuesto de una combinación de tendencias estacionales y de crecimiento. Los pasos anteriores se demuestran en los datos de la tabla 5.3, que muestra el número de horas perdidas debido al ausentismo y a las llegadas tardías en el departamento de mantenimiento durante un período de 4 semanas.

Los datos de la tabla 5.3 exhiben estacionalidad. Es claro que los valores de datos para los lunes y los viernes son elevados. Los datos para los martes, miércoles y jueves son relativamente bajos. Los promedios diarios para cada

TABLA 5.3 Datos estacionales para el número de horas perdidas con cinco estaciones (días) a lo largo del período.

Semana	Días					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio
1	9	3	2	5	16	7
2	11	5	5	9	15	9
3	13	6	7	10	19	11
4	16	8	7	12	22	13

semana exhiben un modelo de crecimiento (7, 9, 11, 13). Para remover el crecimiento (paso 2), los datos para cada día de la semana se dividen entre el promedio diario (por ejemplo, el valor para el lunes de la semana 1 se encuentra dividiendo $9/7 = 1.20$). Esto se realizó en la tabla 5.4. El índice estacional para cada día se obtiene promediando los datos sin crecimiento a lo largo de las 4 semanas. Asimismo, la tabla 5.4 muestra el índice estacional para cada día en el último renglón.

El siguiente paso consiste en eliminar la estacionalidad de los datos y determinar un modelo para el componente de crecimiento. Un método para esto consiste en dividir cada punto de datos entre el índice estacional; luego deberá desarrollarse un modelo de crecimiento para los promedios diarios. Esto se muestra en la tabla 5.5.

Los promedios diarios parecen crecer linealmente. Utilizando la regresión lineal, el parámetro para el componente de crecimiento está dado como

$$\hat{x}(t) = 4.15 + 2.36t \quad (5.22)$$

Para obtener los pronósticos diarios para la quinta y sexta semanas, utilizamos (5.22) para pronosticar el promedio semanal. Luego se multiplica el

TABLA 5.4 Datos estacionales para el número de horas perdidas con cinco estaciones (días) a lo largo del período.

Semana	Días					
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Promedio
1	1.29	0.43	0.29	0.71	2.29	5.01
2	1.22	0.55	0.56	1.0	1.67	5.01
3	1.18	0.55	0.64	0.91	1.73	5.01
4	1.23	0.62	0.54	0.92	1.69	5.0
Total	4.92	2.16	2.03	3.54	7.38	—
Promedio (I_d)	1.23	0.54	0.51	0.89	1.85	5.02

TABLA 5.5 Datos sin estacionalidad.

Semana	Días					Total diario	Promedio
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes		
1	7.32	5.56	3.92	5.62	8.65	31.07	6.21
2	8.94	9.26	9.80	10.11	8.11	46.22	9.24
3	10.57	11.11	13.73	11.24	10.27	56.92	11.38
4	13.01	14.81	13.73	13.48	11.89	66.92	13.38

promedio semanal por el índice estacional diario. Por ejemplo, el pronóstico para el promedio de la quinta semana es

$$x(5) = 4.15 + 2.36(5) = 15.95$$

Para obtener el pronóstico para el lunes de la quinta semana, este valor se multiplica por 1.23, el índice estacional para el lunes I_m . Esto es $(1.23)(15.95) = 19.62$. La tabla 5.6 presenta los pronósticos diarios para las semanas 5 y 6.

Un método alternativo para estimar el componente de crecimiento consiste en totalizar, o promediar, los datos de cada ciclo. Este método conduciría al promedio diario para cada semana y se muestra en la tabla 5.3. Estos datos muestran una tendencia lineal perfecta. El análisis de regresión para los cuatro promedios diarios produciría el modelo

$$\hat{x}(t) = 5.0 + 2t \quad (5.23)$$

La ecuación (5.23) predice los promedios diarios para las semanas 5 y 6 como 15 y 17. El pronóstico diario se obtiene multiplicando el promedio diario de la semana por el índice estacional diario I_d . Los pronósticos diarios se muestran en la tabla 5.7.

Los pronósticos dados en las tablas 5.6 y 5.7 son tanto lógicos como fidedignos. Por lo tanto, es necesario determinar cuál es mejor y cuál deberá

TABLA 5.6 Pronósticos diarios de las semanas 5 y 6 con $x(t) = I_d (4.15 + 2.36t)$.

Semana	Días					Promedio diario
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
5	19.62	8.61	8.13	14.20	29.51	15.95
6	22.52	9.89	9.34	16.29	33.87	18.31

TABLA 5.7 Pronósticos de las semanas 5 y 6 con $x(t) = I_d(5.0 + 2t)$.

Semana	Días					Promedio diario
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
5	18.45	8.10	7.65	13.35	27.75	15
6	20.91	9.18	8.67	15.13	31.45	17

adoptar el tomador de decisiones para fines de planeación. El análisis de errores proporciona un método para tomar esta determinación.

5.5 ANÁLISIS DE ERRORES

El análisis de errores de los pronósticos proporciona un método válido para verificar la eficacia de un modelo de pronósticos. También proporciona una metodología correcta para evaluar y seleccionar de entre varios modelos de pronósticos con los que se cuenta para una situación particular.

El error del pronóstico en el período t es la diferencia entre el valor de datos real $x(t)$ y el valor pronosticado para él

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (5.24)$$

La suma de los errores

$$\sum_{t=1}^N e(t) = \sum_{t=1}^N [x(t) - \hat{x}(t)] \quad (5.25)$$

no es una medida válida de la eficacia de un modelo de pronósticos, pero es una medida de sesgo. La suma de los errores deberá aproximarse a 0 si el modelo se ajusta usando el método de mínimos cuadrados. La suma de los errores tiene la desventaja de que los errores positivos grandes, $e(t)$, pueden ocultar errores negativos grandes. Para eliminar este problema, tomamos ya sea errores absolutos o errores al cuadrado. Las siguientes medidas de error se emplean comúnmente para el análisis de errores y la evaluación de los modelos de pronósticos:

1. Desviación media absoluta (MAD):

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{t=1}^N |x(t) - \hat{x}(t)|}{N} \quad (5.26)$$

2. *Error medio al cuadrado (MSE):*

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^N (x(t) - \hat{x}(t))^2}{N} \quad (5.27)$$

3. *Error porcentual medio absoluto (MAPE):*

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \left[\left| \frac{x(t) - \hat{x}(t)}{N} \right| \right] \quad (5.28)$$

4. *Error porcentual medio al cuadrado (MSPE):*

$$MSPE = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \left[\left(\frac{x(t) - \hat{x}(t)}{x(t)} \right)^2 \right] \quad (5.29)$$

Puede calcularse una de las medidas anteriores para todos los modelos disponibles, y seleccionarse aquél con el valor mínimo. Este método puede aplicarse fácilmente a los dos modelos dados en la sección 5.4. Para mayor información sobre pronósticos, consultar [2, 6].

5.6 PRONÓSTICOS DEL TRABAJO DE MANTENIMIENTO

Antes de llevar a cabo la planeación de la capacidad o de diseñar una nueva organización de mantenimiento, es esencial tener algún pronóstico de la carga de mantenimiento esperada. La carga comprende lo siguiente:

1. *Carga de trabajo de mantenimiento de emergencia.* Ésta puede pronosticarse utilizando las cargas de trabajo reales históricas y las técnicas apropiadas de pronósticos y la experiencia administrativa. Este componente de la carga es aleatorio y puede reducirse contando con un mantenimiento planeado bien diseñado.
2. *Carga de trabajo de mantenimiento preventivo.* Ésta puede pronosticarse utilizando los registros históricos reales junto con los programas recientemente desarrollados de mantenimiento preventivo. Esta carga deberá incluir inspecciones y lubricaciones rutinarias.
3. *Mantenimiento correctivo diferido.* Éste puede pronosticarse con base en los registros históricos y planes futuros.

4. *Pronóstico de las piezas removidas en la reparación general y de la fabricación.* Este pronóstico puede estimarse a partir de registros históricos junto con los planes futuros de mejoras.
5. *Paros totales; carga, descarga y servicio; y modificaciones del diseño.* Esto puede pronosticarse a partir de registros históricos reales y el programa de mantenimiento futuro.

El pronóstico de la carga de mantenimiento de una nueva planta es más difícil y debe apoyarse en la experiencia de plantas similares, plantas de referencia, experiencia administrativa e información de los fabricantes.

Cuando una planta ya está en operación, los errores en los pronósticos y en los estándares de trabajo pueden ocasionar una acumulación de trabajos pendientes. Un método alternativo consiste en realizar un pronóstico examinando la carga de mantenimiento pendiente. La utilidad de calcular la cantidad de trabajos pendientes para el trabajo planeado se ve cuando el pronóstico de la carga se realiza para el trabajo de la próxima semana o mes. En la tabla 5.8 se ilustra esto.

La tabla muestra un promedio anual a la fecha de trabajos de emergencia en el área mecánica de 400 horas y, en el área eléctrica, de 80 horas. Los requerimientos de mantenimiento preventivo para la semana son de 1200 horas de trabajo mecánico y 600 horas de trabajo eléctrico. Hay un número promedio de horas requeridas para el trabajo menor no planeado que se realiza con las órdenes de trabajo que no son de emergencia, pero que son de alta prioridad. Parte del trabajo se inició la semana pasada, pero no se concluyó al final de la semana; se completará esta semana. El trabajo total planeado con prioridad 3 del grupo de órdenes de trabajo pendientes y que espera ser programado —es decir, el trabajo que ha sido planeado y para el que se cuenta con los materiales disponibles— es de 12 000 horas de tipo mecánico y de 900 horas de tipo eléctrico. Finalmente, hay un total de 13 000 horas de trabajo mecánico y eléctrico que está esperando el siguiente paro general de la planta. Esto representa el total de trabajos pendientes

TABLA 5.8 Informe semanal de trabajos pendientes, en horas.

	Mecánico	Eléctrico
Promedio anual a la fecha de "emergencias"	400	80
Nivel de MP de esta semana	1 200	600
Promedio anual a la fecha de trabajos menores no planeados	600	400
	800	40
Trabajo remanente de esta semana		
Total de trabajos pendientes planeados	12 000	900
con prioridad 3	10 000	3 000
Total de trabajos pendientes con paro		

que es relevante para programar el trabajo de mantenimiento de la próxima semana.

5.7 PLANEACIÓN DE LA CAPACIDAD DE MANTENIMIENTO

La planeación de la capacidad de mantenimiento determina el nivel óptimo de recursos (trabajadores, habilidades, refacciones, equipo en inventario y herramientas) requeridos para satisfacer la carga de mantenimiento pronosticada compuesta del pronóstico de la carga futura más los trabajos pendientes de mantenimiento. Los pasos que comprende la planeación de la capacidad pueden resumirse como sigue:

1. Determinar la carga total de mantenimiento.
2. Estimar las refacciones y materiales requeridos para satisfacer la carga.
3. Determinar el equipo y las herramientas necesarios para todos los tipos de trabajo de mantenimiento.
4. Determinar las habilidades y el número de trabajadores de cada especialidad. Se debe poner especial atención a los oficios que requieren múltiples habilidades.
5. Proporcionar planes especiales para equipo altamente computarizado, en caso de que se requiera.

En la planeación de la capacidad de mantenimiento, un aspecto importante que debe determinarse es la mezcla óptima de oficios de entre las fuentes de que dispone la organización. Las fuentes usuales disponibles son las cuadrillas internas de trabajo normal y de tiempo extra y el mantenimiento por contrato. La mejor mezcla de estas fuentes se determina utilizando medidas de costos y disponibilidad.

Las habilidades múltiples ofrecen a los planificadores de la capacidad opciones y alternativas que enriquecen y generan una amplia gama de opciones para determinar la capacidad óptima. Los trabajadores con habilidades múltiples pueden ser utilizados en más de un tipo de trabajo de mantenimiento. Esto generalmente mejora la utilización de la fuerza laboral.

Las técnicas para la planeación de la capacidad pueden dividirse en dos categorías principales: determinísticas y estocásticas. El método determinístico supone que la carga de mantenimiento pronosticada, los tiempos estándar y otras variables aleatorias son constantes fijas. A continuación se determina un plan para disminuir el costo o aumentar la disponibilidad, según sean los objetivos de la organización, el cual puede incluir confiabili-

dad, disponibilidad y costo. En este capítulo se presentarán dos técnicas determinísticas, a saber:

1. El método del *tableau* heurístico.
2. La programación lineal.

El método estocástico modela la carga de mantenimiento, los tiempos estándar, las horas de llegada de los trabajos y otras variables como variables aleatorias, con ciertas distribuciones de probabilidad, y emplea técnicas estadísticas normales para identificar estas distribuciones. A continuación se utiliza un modelo estocástico para determinar la capacidad óptima que satisfaga la carga de mantenimiento. En este capítulo se presentarán las siguientes dos técnicas estocásticas.

1. Modelos de líneas de espera.
2. Simulación estocástica de eventos discretos.

A continuación se da una breve descripción de estas técnicas.

5.8 ENFOQUES DETERMINÍSTICOS PARA LA PLANEACIÓN DE LA CAPACIDAD

En las secciones 5.8.1 y 5.8.2 se presentan dos técnicas determinísticas para la planeación de la capacidad. Estas técnicas son el método del *tableau* heurístico y la programación lineal.

5.8.1 Método del *tableau* heurístico

En la planeación de la capacidad de mantenimiento, el método del *tableau* heurístico deriva de manera intuitiva planes atractivos para determinar una mezcla factible de habilidades u oficios, con base en sólidos principios y guías. El *tableau* se utiliza para evaluar el costo de cada alternativa, seleccionando el plan con el costo mínimo. Algunos de los principios y guías acertados son proporcionar suficientes trabajadores internos para el trabajo de alta prioridad, una proporción razonable entre trabajo de tiempo extra y regular, y una saludable cantidad fija de trabajos pendientes. La siguiente exposición presenta un método que puede adoptarse para determinar los trabajadores y habilidades requeridos para satisfacer la carga pronosticada de mantenimiento mecánico. El mismo método puede aplicarse en otros tipos de carga de mantenimiento como trabajo eléctrico o de instrumentación. Como ejemplo, la carga de trabajo mecánico primero se clasifica en

TABLA 5.9 Datos de muestra para la planeación de la capacidad con el *tableau* heurístico.

Período t	FM_t	B_{t-1}	TM_t	$TM_{1,t}$	$TM_{2,t}$	$RM_{1,t}$	$RM_{2,t}$	$OM_{1,t}$	$OM_{2,t}$	$CM_{1,t}$	$CM_{2,t}$
1	150	100	250	150	100	150	10	—	40	—	—
2	200	50	250	150	100	150	10	—	40	—	—
3	250	50	300	150	150	150	10	—	40	—	—
4	180	100	280	180	100	160	—	20	20	—	—
5	200	80	280	200	80	160	—	40	—	—	—
6	150	80	230	120	110	120	40	—	40	—	—
7	200	30	230	150	80	150	10	—	40	—	—
8	250	30	280	150	130	150	10	—	40	—	—
9	200	80	280	150	130	150	10	—	40	—	—
10	300	80	380	200	180	160	—	40	—	10	110
11	250	70	320	210	110	160	—	40	—	10	—
12	200	60	260	200	60	160	—	40	—	—	—

dos categorías. La categoría está determinada por la destreza que requiere el trabajo y su impacto en la instalación. En este ejemplo se clasifican como trabajo mecánico de categoría 1 y de categoría 2, aunque son posibles otras clasificaciones con base en las destrezas y la prioridad. Antes de presentar el plan de la tabla 5.9, es necesario definir la siguiente notación:

FM_t = Carga total pronosticada de trabajo mecánico

B_{t-1} = Trabajos pendientes de la carga de trabajo mecánico del período $t - 1$

TM_t = Carga total de trabajo mecánico para el período t ;
 $TM_t = FM_t + B_{t-1}$

TM_{it} = Carga total de trabajo mecánico de categoría i en el período t ,
 $i = 1, 2$

RM_{it} = Capacidad regular interna para carga de trabajo mecánico de categoría i en el período t

OM_{it} = Capacidad de tiempo extra para carga de trabajo mecánico de categoría i en el período t

CM_{it} = Capacidad por contratación de trabajo mecánico de categoría i en el período t

El plan se deriva con base en los siguientes principios y guías de sentido común:

1. Todo el trabajo con prioridad es efectuado por trabajadores internos en tiempo regular tanto como sea posible.
2. Si no es posible satisfacer el trabajo de categoría 1 con trabajadores internos en tiempo regular, utilice tiempo extra.
3. No se permiten trabajos pendientes para el trabajo de categoría 1.
4. El nivel de fuerza de trabajo debe determinarse con base en la carga promedio de mantenimiento con una cantidad saludable de trabajos pendientes de categoría 2 en el sistema.
5. El trabajo de categoría 2 puede satisfacerse con tiempo extra o mantenimiento por contrato.
6. La capacidad de tiempo extra es a lo sumo un 25% de la capacidad interna en tiempo regular.
7. El máximo para la cantidad de trabajos pendientes es de 100 horas-hombre. Si la cantidad de trabajo pendiente excede este límite, se

hace uso de subcontratación, y se supone que ésta puede proporcionar tanta capacidad como se necesite.

Si los períodos de la tabla 5.9 se toman como semanas y se toman en cuenta las guías (1-6), en la tabla se muestra un plan flexible para satisfacer la carga de mantenimiento con los recursos disponibles. La columna 2 contiene la carga pronosticada de mantenimiento mecánico y la columna 3 muestra el trabajo pendiente esperado del período anterior. La columna 4 contiene la carga total. Las columnas 5 y 6 presentan las dos categorías de trabajo de mantenimiento. La suma de estas columnas da la columna 4. Las columnas 7 y 8 presentan la cantidad de trabajo que será satisfecha internamente con trabajadores de mantenimiento en tiempo regular. Las columnas 9 y 10 contienen el trabajo que se espera efectuar internamente con trabajadores de mantenimiento en tiempo extra. Las columnas 11 y 12 presentan la cantidad de trabajo de mantenimiento por contrato para ambas categorías de trabajo mecánico. Las horas de todas las columnas son horas estándar.

Cabe mencionar que éste es un plan tentativo; la carga de trabajo realizada puede ser diferente de la carga pronosticada, y podría necesitarse un ajuste al plan en la etapa de ejecución. Se pueden generar diferentes planes con base en las mismas guías, seleccionando el que tenga el costo mínimo. El número requerido de empleados puede basarse en el número de horas estándar en la columna de capacidad interna de tiempo regular, después de conceder una tolerancia por la productividad esperada de los trabajadores.

El método del *tableau* heurístico puede formalizarse mediante un *tableau* similar al que se emplea en la planeación de la producción, con algunas modificaciones. En este *tableau*, las fuentes de suministro de mano de obra se muestran del lado izquierdo del mismo, y la capacidad de cada fuente del lado derecho en la misma fila. La carga de mantenimiento para cada período se muestra en las columnas del *tableau*. El costo de satisfacer la carga con una fuente particular se muestra en la esquina de cada celda en la tabla.

En la planeación de la producción, los productos del período actual pueden mantenerse en inventario para satisfacer períodos de demanda futura; sin embargo, éste no es el caso en la planeación del mantenimiento. En el mantenimiento, el trabajo no terminado se envía al bloque de trabajos pendientes y se realiza en períodos futuros, con un costo adicional para el sistema. También es posible dividir la carga de mantenimiento en cada período por oficios o prioridad, y puede aplicarse el mismo método. La tabla 5.10 muestra un *tableau* para un plan de mantenimiento de tres períodos para una clase de trabajo de mantenimiento, a saber, la carga de trabajo mecánico. La misma tabla puede utilizarse en otros tipos de trabajo. La siguiente notación se emplea en la tabla:

C_r = Costo por hora de trabajo mecánico en tiempo regular

C_o = Costo por hora de trabajo mecánico en tiempo extra

C_s = Costo por hora de subcontratación

B_t = Cantidad de trabajo pendiente en horas-hombre al inicio del período t

CR_t = Capacidad interna de tiempo regular en el período t

CO_t = Capacidad interna de tiempo extra en el período t

CS_t = Capacidad de subcontratación en el período t

FM_t = Carga pronosticada de mantenimiento en el período t

Si el trabajo se envía al bloque de trabajos pendientes durante r períodos y se realiza internamente en el período $r + 1$ con trabajadores en tiempo regular, tendrá un costo de $C_r + r\pi$ por hora. La tabla 5.10 muestra los datos necesarios para un horizonte de planeación de tres períodos. La tabla muestra los costos, capacidades y cargas de mantenimiento. El símbolo ∞ en la celda de costo significa que ese trabajo no puede efectuarse en este período. Por ejemplo, el trabajo en el período 2 no puede hacerse en el período 1.

TABLA 5.10 Datos para el problema de asignación de la capacidad.

Período	Fuentes	Período			Capacidad
		1	2	3	
1	Tiempo regular	C_r	∞	∞	CR_1
	Tiempo extra	C_o	∞	∞	CO_1
	Subcontratación	C_s	∞	∞	CS_1
2	Tiempo regular	$C_r + \pi$	C_r	∞	CR_2
	Tiempo extra	$C_o + \pi$	C_o	∞	CO_2
	Subcontratación	$C_s + \pi$	C_s	∞	CS_2
3	Tiempo regular	$C_r + 2\pi$	$C_r + \pi$	C_r	CR_3
	Tiempo extra	$C_o + 2\pi$	$C_o + \pi$	C_o	CO_3
	Sucontratación	$C_s + 2\pi$	$C_s + \pi$	C_s	CS_3
	Carga de mantenimiento	M_1	M_2	M_3	

Un método heurístico simple de costo mínimo puede usarse para calcular la asignación de carga de mantenimiento a diferentes fuentes de suministro de mano de obra. El método comienza con la celda de costo mínimo y satisface la carga tanto como se puede; luego se pasa al siguiente costo mínimo hasta satisfacer toda la carga. Es muy probable que se alcancen soluciones casi óptimas con el método del costo mínimo. A continuación se presenta un ejemplo para demostrar el método del *tableau*.

Suponga que tenemos tres períodos de tiempo con cargas de mantenimiento de 400, 300 y 500, respectivamente. La capacidad interna de tiempo regular es de 200, 350 y 300 para los períodos 1, 2 y 3, respectivamente. El tiempo extra es a lo sumo un 25% de la capacidad interna. La capacidad de subcontratación es abundante y, técnicamente, no hay límite en esta fuente. El costo de una hora-hombre de trabajo interno se considera de 1 unidad, el tiempo extra por hora-hombre cuesta 50% más que el tiempo regular (es decir, 1.5 unidades), y la subcontratación cuesta 2 unidades. El envío al bloque de trabajos pendientes de una hora-hombre cuesta $\pi = 0.3$. La capacidad de subcontratación puede tomarse como un valor grande y, para fines de demostración, se considera que es de 500 horas-hombre. Los datos y la solución para este ejemplo se muestran en la tabla 5.11.

TABLA 5.11 Datos y solución del ejemplo.

Período	Fuentes	Período			Capacidad
		1	2	3	
1	Tiempo regular	1 200	∞	∞	200
	Tiempo extra	1.5 40	∞	∞	40
	Subcontratación	2 30	∞	∞	500
2	Tiempo regular	1.3 50	1 300	∞	350
	Tiempo extra	1.8 80	1.5	∞	80
	Subcontratación	2.3	2	∞	500
3	Tiempo regular	1.6	1.3	1 300	300
	Tiempo extra	2.1	1.8	1.5 75	75
	Subcontratación	2.6	2.3	2 125	500
	Carga de mantenimiento	400	300	500	

Aplicando el método heurístico de costo mínimo, se obtiene el plan de la tabla 5.11. El plan requiere que se satisfaga la carga de mantenimiento en el período 1 con 200 horas de tiempo regular interno, 40 horas de tiempo extra y 30 horas de subcontratación. Además de las 50 horas de tiempo regular y 80 horas de tiempo extra en el segundo período, el número de horas que se enviaron al bloque de trabajos pendientes del primer período al segundo período es de 130. La carga del segundo período se satisface con 300 horas de tiempo regular interno en el mismo período. La carga del tercer período se satisface con 300 horas de tiempo regular interno, 75 horas de tiempo extra y 125 horas de subcontratación. El costo total (TC) del plan es la suma de los costos en cada celda, que se obtiene multiplicando las horas en la celda por el costo de la hora.

$$\begin{aligned} TC = & 1 * 200 + 1.5 * 40 + 2 * 30 + 1.3 * 50 + 1.8 * 80 + 1 * 300 \\ & + 1 * 300 + 1.5 * 75 + 2 * 125 = 1419.5 \text{ unidades} \end{aligned}$$

5.8.2 Programación lineal y entera para la planeación de la capacidad de mantenimiento

La programación lineal es un modelo matemático que optimiza una función lineal sujeta a desigualdades lineales. El modelo de programación lineal determina los valores óptimos de las variables de decisión que optimizan un objetivo dado como minimizar el costo o maximizar la utilidad. Las variables de decisión son elementos bajo el control del tomador de decisiones, y sus valores determinan la solución del modelo. La función objetivo en la programación lineal corresponde a los criterios mediante los cuales se evalúan las soluciones factibles. Una solución factible es una solución que satisface todas las restricciones del sistema. Una restricción es una condición impuesta al sistema que debe satisfacerse.

En el caso de la planeación de la capacidad de mantenimiento (PCM), las variables de decisión podrían ser el número de horas de diferentes niveles de destrezas y oficios disponibles para mantenimiento en tiempo regular, tiempo extra y por contrato. El objetivo podría ser aumentar al máximo la utilización de los recursos o reducir el costo total. Un ejemplo de una restricción es: la proporción de horas de tiempo extra con respecto a las horas de tiempo regular interno no deberá exceder un cierto porcentaje. En esta sección se proporciona una introducción a la programación lineal mediante un ejemplo hipotético sencillo.

Suponga que se pronostica que la carga de mantenimiento mecánico es de 100 horas-hombre divididas en dos categorías, 60 horas de categoría 1 y 40 horas de categoría 2. La clasificación de categorías se basa en el nivel de destrezas que requiere el trabajo y el impacto que el trabajo tiene en la

instalación. La capacidad en horas-hombre para este trabajo puede proporcionarse a partir de dos niveles de destrezas de trabajadores, es decir, el nivel de destrezas 1 y el nivel de destrezas 2. Ambos tipos de trabajadores pueden realizar los dos tipos de trabajo mecánico, pero con diferente productividad. La productividad del trabajador con destrezas de nivel 1 es de 0.75 y 0.8 para la categoría 1 y para la categoría 2 de trabajo mecánico, respectivamente. La productividad del trabajador con destrezas de nivel 2 es de 0.5 para el trabajo de la categoría 1 y 0.7 para el trabajo de la categoría 2. El costo de 1 hora-hombre del trabajador con nivel de destrezas 1 es de \$30 dólares, y el costo de 1 hora-hombre del trabajador con nivel de destrezas 2 es de \$20 dólares. El objetivo es determinar el número de horas-hombre de cada uno de los niveles de destreza de los trabajadores asignados para realizar la carga (trabajo) de mantenimiento a un costo mínimo.

Antes de establecer las restricciones y el objetivo del modelo, sea x_{ij} el número de horas-hombre de destreza i asignadas para realizar el trabajo mecánico de categoría j , $i = 1, 2$, $j = 1, 2$. La primera restricción es satisfacer la carga para el trabajo mecánico de categoría 1. Esto se plantea matemáticamente como

$$0.75x_{11} + 0.5x_{21} \geq 60 \quad (5.30)$$

La segunda restricción es satisfacer el trabajo mecánico de categoría 2, planteado matemáticamente como

$$0.8x_{12} + 0.7x_{22} \geq 40 \quad (5.31)$$

Las restricciones de no negatividad establecen que las horas-hombre obtenidas de cada nivel de destrezas no deberán ser negativas, planteada matemáticamente como

$$x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22} \geq 0$$

La función objetivo es minimizar la suma del costo de satisfacer la carga requerida con los dos niveles de destrezas. El modelo de programación lineal para determinar la capacidad para el trabajo mecánico es

$$\text{Mín } 30(x_{11} + x_{12}) + 20(x_{21} + x_{22}) \quad (5.32)$$

sujeto a

$$0.75x_{11} + 0.5x_{21} \geq 60$$

$$0.8x_{12} + 0.7x_{22} \geq 40$$

$$x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22} \geq 0$$

La solución del modelo determinará la asignación de horas-hombre de los dos diferentes niveles de destrezas para realizar las dos categorías de trabajo mecánico a un costo mínimo. La solución del programa lineal podría dar valores fraccionarios. Si deseamos obtener la solución en horas enteras, se debe plantear una restricción adicional. Dicha restricción requiere que las variables sean enteros. Al agregar esta restricción, el programa lineal se transforma en un programa entero. En muchas situaciones de la vida real, la solución de la programación lineal a menudo se redondea a la hora más próxima.

La formulación anterior puede emplearse para la planeación de la capacidad de mantenimiento (PCM) con ajuste mínimo. La formulación se dará para planear la capacidad para el trabajo mecánico. El objetivo es determinar el número de horas de los diferentes niveles de destrezas de los oficios mecánicos con que se cuenta de las distintas fuentes para realizar las diferentes categorías de trabajo mecánico. Las fuentes disponibles incluyen tiempo regular interno, tiempo extra y mantenimiento por contrato. El mismo modelo puede ser utilizado para determinar el número de horas que se necesitan de los otros oficios, como el eléctrico, el de instrumentación y el de ingeniería civil. La siguiente notación es necesaria para plantear el modelo de programación lineal:

x_{ijkt} = Número de horas-hombre de oficio mecánico de nivel de destreza i , $i = 1, 2, \dots, I$, de la fuente j , $j = 1, 2, \dots, J$, disponibles para realizar trabajo mecánico de categoría k , $k = 1, 2, \dots, K$, en el período t , $t = 1, 2, \dots, T$

C_{ij} = Costo por hora de oficio mecánico de nivel de destreza i de la fuente j

P_{ijk} = Productividad de un oficio mecánico de nivel de destreza i de la fuente j cuando realiza trabajo mecánico de categoría k

F_{kt} = Carga pronosticada de trabajo mecánico de categoría k en el período t

B_{kt} = Trabajos pendientes de trabajo de categoría k en el período t

UB_k = Límite superior de una cantidad saludable de trabajos pendientes para trabajo de categoría k

LB_k = Límite inferior de una cantidad razonable de trabajos pendientes para trabajo de categoría k

U_{ijt} = Límite superior de la disponibilidad de oficio mecánico de destreza i de la fuente j en el período t

r_{kt} = Costo de enviar al bloque de trabajos pendientes una hora-hombre de trabajo de categoría k en el período t

El modelo de programación lineal para determinar el número requerido de horas-hombre de trabajo mecánico, de diferentes destrezas y fuentes, disponibles para realizar todas las categorías de trabajo mecánico, está formado por una función objetivo y un conjunto de restricciones. La función objetivo es minimizar el costo de la mano de obra y de trabajos pendientes. Las restricciones incluyen las restricciones de equilibrio de trabajo, una proporción razonable entre las horas regulares de mantenimiento interno y de tiempo extra, y los límites sobre la disponibilidad de la mano de obra. El modelo se plantea como

$$\text{Mín } \sum_i \sum_j C_{ij} \left(\sum_k \sum_t x_{ijkt} \right) + \sum_k \sum_t r_{kt} B_{kt} \quad (5.33)$$

sujeto a:

- Restricciones de equilibrio de trabajo

$$\sum_i \sum_j P_{ijk} x_{ijkt} + B_{kt} = F_{kt} + B_{k,t-1} \quad (5.34)$$

- Límite en las horas-hombre de tiempo extra en términos de las horas-hombre de tiempo regular interno (tomado como el 25%); 1 representa horas-hombre de tiempo regular interno y 2 representa las horas-hombre de tiempo extra.

$$x_{i2kt} - 0.25x_{i1kt} \leq 0 \quad (5.35)$$

- Límites en la disponibilidad de horas-hombre

$$\sum_k x_{ijkt} \leq U_{ijt}$$

- Límites inferior y superior de la cantidad de trabajos pendientes en diferentes categorías de trabajo

$$LB_k \leq B_{kt} \leq UB_k \quad (5.36)$$

$i = 1, 2, \dots, I$ (número de habilidades), $j = 1, 2, \dots, J$ (número de fuentes),
 $k = 1, 2, \dots, K$ (número de categorías), $t = 1, \dots, T$ (período de tiempo
 en el horizonte de planeación).

El modelo anterior puede resolverse mediante cualquier algoritmo de programación lineal como el programa de computadora basado en el método simplex en el paquete Linear Interactive and Discrete Optimizer (LINDO) o el que se encuentra en la International Mathematical Software Library (IMSL) o la Optimization Software Library (OSL).

La salida del modelo de programación lineal determinará el número óptimo de horas-hombre de diferentes niveles de destrezas de un oficio específico (mecánico) disponibles para realizar el trabajo de mantenimiento. Con base en el número de horas-hombre de la fuente 1 (internamente), se determinará la cantidad de personal.

La formulación de la programación lineal supone que los parámetros del problema PCM son constantes fijas, lo cual en la realidad no es cierto. A fin de examinar la sensibilidad de la solución obtenida, se debe realizar un análisis estándar de sensibilidad de la programación lineal. El análisis de sensibilidad considera aspectos como lo que pasará con la solución si cambia la demanda, o si se dispone de recursos nuevos y más económicos. Asimismo, la solución completa de la programación lineal, que incluye las variables duales, proporciona información acerca de cuál recurso debe incrementarse si aumenta la demanda de trabajo de mantenimiento. El lector interesado puede consultar a Taha [7] para mayores detalles sobre el tema de las variables duales y el análisis de sensibilidad.

Si se requiere que los oficios y los niveles de destrezas se especifiquen en términos de los empleados que se van a contratar en un departamento de mantenimiento, entonces se redondea la solución de la programación lineal al número entero más próximo de empleados o se reformula el problema como un modelo de programación entera. Esto se realiza de la siguiente manera:

Sean

n_{ijkt} = Número de empleados de oficio mecánico de nivel de destreza i de la fuente j disponibles para realizar la carga de trabajo mecánico de categoría k en el período t

$NH \times S_j$ = Número de horas trabajadas por período de un empleado de la fuente j (S_j es una constante, que generalmente se toma como 1 si un empleado trabaja internamente de tiempo completo, y entre 0 y 1 si un empleado trabaja tiempo parcial o tiempo extra; NH es el número de horas trabajadas por un empleado en tiempo regular internamente por período).

U_{ijt} = Límite superior de la disponibilidad de un empleado de nivel de destreza i de la fuente j en el período t .

C_{ijt} = Salario de un empleado con destrezas i de la fuente j en el período t .

Suponiendo que los períodos son en meses y $NH = 160$, el modelo de programación entera para determinar el número de empleados de oficio mecánico de diferentes destrezas, requeridos para realizar la carga de trabajo mecánico, se plantea como sigue:

$$\text{Mín} \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C_{ijt} n_{ijk} + \sum_k \sum_t r_{kt} B_{kt} \quad (5.37)$$

sujeto a

$$\sum_i \sum_j (160S_j) P_{ijk} n_{ijk} + B_{Rt} = F_{k,t} + B_{k,t-1} \quad (5.38)$$

$$n_{i2k} - 0.25n_{i1k} \leq 0 \quad (5.39)$$

$$n_{ijk} \leq U_{ijt} \quad (5.40)$$

$$LB_R \leq B_{k,t} \leq UB_k \quad (5.41)$$

en donde n_{ijk} es un entero.

Los paquetes que se mencionaron anteriormente en esta sección tienen la capacidad de resolver el modelo de programación entera.

5.9 TÉCNICAS ESTOCÁSTICAS PARA LA PLANEACIÓN DE LA CAPACIDAD

Los modelos de líneas de espera y la simulación estocástica son dos técnicas importantes para la planeación de la capacidad. Los modelos de líneas de espera consideran la situación en donde los clientes llegan a una instalación de servicio, quizá esperan en una cola, son atendidos por un servidor y luego abandonan la instalación. En la planeación de la capacidad de mantenimiento, los clientes pueden tomar la forma de un trabajo de mantenimiento que llega a la unidad de planeación y programación del mantenimiento, en donde el trabajo se planea y se envía a un taller para reparación (que representa la instalación de servicio). Los resultados de la teoría de líneas de

espera nos permiten evaluar el funcionamiento eficaz de tales sistemas bajo diferentes configuraciones. La teoría de líneas de espera ha sido utilizada para determinar la cantidad de personal de mantenimiento. Sin embargo, cuando se emplean modelos de líneas de espera para la planeación de la capacidad, las medidas de eficacia se obtienen para el sistema bajo condiciones de estado estable, que no reflejan el comportamiento transitorio del sistema que se asemeja más estrechamente a las operaciones cotidianas.

La simulación estocástica ofrece una alternativa viable cuando el tomador de decisiones está interesado en una situación transitoria o cuando el sistema bajo consideración es complejo (que es generalmente el caso en los sistemas de mantenimiento). En la simulación estocástica, el sistema de mantenimiento se representa en la computadora y la base para la evaluación del desempeño del sistema la componen experimentos bien diseñados (escenarios). El experimento descrito para la planeación de la capacidad de un sistema de mantenimiento es el de una asignación de cuadrillas de mantenimiento y niveles de destrezas bajo ciertas políticas y procedimientos de mantenimiento. Las medidas de eficacia pueden ser el costo, la utilización de los recursos y la disponibilidad de equipos críticos y equipos grandes.

En esta sección se presentan estos dos métodos estocásticos para la planeación de la capacidad.

5.9.1 Modelos de líneas de espera

Un modelo de líneas de espera puede describirse de la siguiente manera: llegan clientes a una instalación y se colocan en una línea de espera. Un servidor selecciona a un cliente de acuerdo con cierta disciplina de la línea de espera y lo atiende. Al terminar el servicio, el cliente abandona la instalación de servicio. Un modelo de líneas de espera puede representar muchas situaciones de la vida real. Un ejemplo apropiado es la llegada de trabajos de mantenimiento a un taller. Otros ejemplos incluyen la llegada de clientes a un banco o la llegada de llamadas a un número telefónico. Los principales componentes de un sistema de líneas de espera son los clientes y los servidores. La interacción del cliente y el servidor se estima por el tiempo que el servidor pasa atendiendo al cliente. Los clientes ponen en movimiento al sistema y nos interesa su patrón de llegadas o el tiempo entre llegadas, que generalmente se modela como una variable aleatoria. El tiempo de servicio también se modela como una variable aleatoria con una cierta distribución de probabilidad. Otros elementos importantes en el modelo de líneas de espera incluyen: 1) la disciplina de servicio, que se refiere a la forma en que se seleccionan los clientes para el servicio, por ejemplo: primero que entra, primero que se atiende, o alguna otra regla de prioridad; 2) el diseño de la instalación, que se refiere al número de servidores y al diseño de las líneas de espera (en paralelo, en serie, en tándem, en red); 3) el tamaño de la

línea de espera (finito, infinito); 4) el tamaño de la fuente de llegadas (finito, infinito), y 5) el comportamiento humano (hacer trampa, dejar su turno). En resumen, los elementos de un modelo de líneas de espera son los siguientes:

1. Distribución de las llegadas.
2. Distribución del tiempo de servicio.
3. Diseño de la instalación de servicio.
4. Disciplina del servicio.
5. Población de los clientes.
6. Comportamiento humano.

La especificación de los factores anteriores dará como resultado un modelo en particular de líneas de espera. Algunos modelos de líneas de espera tienen resultados de estado estable que dan el número esperado de clientes en el sistema L_s , la longitud esperada de la línea de espera L_q , el tiempo de espera probable en el sistema W_s , y el tiempo de espera probable en la línea de espera W_q . Estos resultados pueden ser utilizados para evaluar el sistema de la línea de espera.

La notación que resume la principal característica de un modelo de líneas de espera en paralelo es $(a/b/c)$, $(d/e/f)$, en donde

a = Distribución de las llegadas

b = Distribución del tiempo de servicio

c = Número de servidores en paralelo

d = Disciplina del servicio

e = Número máximo permitido en el sistema

f = Tamaño de la población de los clientes

Uno de los modelos de líneas de espera más sencillos es el que se designa como $(M/M/C):(GD/\infty/\infty)$, en el que hay C servidores y los tiempos entre llegadas y los tiempos de servicio son exponenciales. Si todos los servidores tienen una distribución exponencial de tiempo de servicio con parámetro μ y si hacemos $\rho = \lambda\mu$, entonces tenemos los siguientes resultados de estado estable:

$$P_0 = \left\{ \sum_{n=0}^{c-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^c}{c!(1 - \rho/c)} \right\}^{-1} \quad (5.42)$$

en donde P_0 es la probabilidad de cero clientes en la línea de espera.

$$L_q = \frac{\rho^{c+1}}{(c-1)!(c-\rho)^2} P_0 \quad (5.43)$$

$$L_s = L_q + \rho \quad (5.44)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (5.45)$$

$$W_s = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (5.46)$$

Si el modelo anterior se utiliza como una aproximación para un departamento de mantenimiento, en el que deseamos determinar el número óptimo de reparadores (servidores), los resultados de estado estable pueden emplearse para evaluar la disponibilidad y la utilización de las máquinas.

Otro modelo de líneas de espera, conocido como el modelo de servicio a máquinas, es aquel en el que tenemos R reparadores dando servicio a un total de K máquinas y, debido a que una máquina descompuesta no puede generar una descompostura mientras está en servicio, la población de llegadas es finita. El número de reparadores R es menor que K . El objetivo es encontrar el valor de R que minimice los costos totales esperados, que constan del costo de la falla y el costo del servicio. Este tipo de modelo se designa como $(M/M/R):(GD/K/K)$, $R < K$.

El modelo es un caso especial del modelo general de líneas de espera. Si λ es la tasa de descomposturas por máquina y hay n máquinas descompuestas, entonces la tasa de llegadas en el sistema está dada por

$$\lambda_n = \begin{cases} (K-n)\lambda & 0 \leq n \leq K \\ 0 & n \geq K \end{cases} \quad (5.47)$$

y la tasa de servicio es

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & 0 \leq n \leq R \\ R\mu & R \leq n \leq K \\ 0 & n > K \end{cases} \quad (5.48)$$

P_n es la probabilidad de n máquinas en el sistema. Los resultados de estado estable para el sistema se derivan como sigue:

$$P_n = \begin{cases} \binom{K}{n} \rho^n P_0 & 0 \leq n \leq R \\ \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{R! R^{n-R}} & R \leq n \leq K \end{cases}$$

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^R \binom{K}{n} \rho^n + \sum_{n=R+1}^K \binom{K}{n} \frac{n! \rho^n}{R! R^{n-R}} \right)^{-1}$$

$$L_q = \sum_{n=R+1}^K (n - R) P_n$$

$$L_s = L_q + (R - \bar{R}) = L_q + \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu}$$

en donde

$$\bar{R} = \text{Número esperado de reparadores ociosos} = \sum_{n=0}^R (R - n) P_n$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \mu = (R - \bar{R}) = \lambda(K - L_s)$$

Si $R = 1$, el modelo produce resultados para un sistema con un solo servidor. Si un sistema de mantenimiento puede representarse con un modelo de líneas de espera como éste, su eficacia puede evaluarse utilizando medidas de estado estable.

5.9.2 Simulación estocástica

Los sistemas de mantenimiento tienen varias características que hacen que la planeación de la capacidad sea una tarea bastante compleja. Estas características son las siguientes:

- El mantenimiento, como una función, interactúa con otras funciones técnicas y de ingeniería de una manera compleja.
- Los factores del mantenimiento dependen fuertemente uno de otro.

- El mantenimiento, como una función, tiene muchos elementos inciertos, incluyendo la demanda de mantenimiento, el tiempo de las llegadas de las solicitudes de trabajo, el contenido de éste, el tiempo para completar el trabajo, las herramientas, el equipo y la disponibilidad de refacciones.
- La complejidad de la planeación de la capacidad de mantenimiento sugiere que la simulación es una de las técnicas más deseables para modelarla.

La simulación estocástica es el proceso de representar un sistema en la computadora y luego emplear experimentos bien diseñados (escenarios) para evaluar su eficacia. Empleando este proceso, se pueden analizar, planear y diseñar sistemas. Law y Kelton [5] mencionan 10 pasos principales para realizar un estudio típico de simulación. En esta sección, estos diez pasos se resumen en 8 pasos, y se describen las relaciones entre ellos.

1. *Propósito de la simulación.* El primer paso hacia un estudio exitoso de simulación es establecer con precisión el propósito del estudio. La simulación ha sido usada en sistemas de mantenimiento para los siguientes fines: determinar el tamaño óptimo de las cuadrillas y la cantidad de personal de mantenimiento, evaluar el efecto de las políticas de mantenimiento en los sistemas de producción, diseñar y planear las operaciones de mantenimiento y determinar los períodos para los paros de la planta.
2. *Modelos de simulación.* El modelo conceptual utilizado en la creación de un estudio de simulación por computadora afectará la exactitud y la eficiencia de la misma. El modelo de simulación deberá contener sólo la información necesaria que capture la esencia del sistema en estudio.
3. *Suposiciones del modelo.* Las suposiciones de un modelo de simulación afectarán el realismo de los resultados de la simulación. También pueden afectar la forma en que se interpretan los resultados. Por lo tanto, cada suposición deberá ser revisada cuidadosamente antes de aplicarla. La disponibilidad de trabajadores, equipo, estándares de trabajo y refacciones son algunas de las suposiciones que se utilizan en los sistemas de mantenimiento.
4. *Exactitud de los datos.* Para un modelo de simulación confiable son esenciales datos exactos y sus distribuciones. Para simular un sistema de mantenimiento, se debe identificar la distribución de las fallas del equipo y de los tiempos de reparación empleando una metodología estadística acertada.

5. *Lenguajes de simulación y computadoras.* Una de las principales tareas en la construcción de un modelo de simulación es convertir el modelo conceptual en un programa de simulación real por computadora. Existen más de 100 programas de software de simulación disponibles para una gran variedad de computadoras. Los lenguajes de computadora como GPSS, SLAM II, SIMAN, SIMSCRIPT II.5 se emplean generalmente en la simulación. En la práctica también se han utilizado otros criterios para clasificar el software para simulación.
6. *Verificación del programa y validación del modelo.* La verificación consiste en probar y revisar el código del programa de computadora para demostrar que funciona según se especificó. La validación asegura que las suposiciones del modelo son realistas y correctas, y que el modelo de simulación representa bastante bien el comportamiento del sistema modelado. Aun cuando este paso es bastante tedioso y consume mucho tiempo, es el paso más importante en los estudios de simulación.
7. *Diseño del experimento.* Otro elemento significativo en cualquier estudio de simulación es el diseño del experimento. Éste comprende lo siguiente:
 - a. Seleccionar los factores experimentales.
 - b. Seleccionar las medidas de eficacia.
 - c. Determinar las condiciones iniciales.
 - d. Determinar las condiciones de estado estable.
 - e. Determinar la duración de una corrida de simulación.
 - f. Determinar el número de repeticiones.
 - g. Aplicar técnicas de reducción de varianza.
8. *Análisis de la salida.* En cualquier estudio de simulación, tiene sus beneficios dedicarle tiempo al análisis de la salida. A fin de verificar la estimación verdadera, probar, validar y decidir sobre los resultados de la salida de una simulación, se deben emplear técnicas estadísticas que aseguren estimaciones confiables del funcionamiento del sistema. Éstas incluyen decidir acerca de la duración de la corrida de simulación, el número de corridas y los intervalos de confianza para las medidas de eficacia estimadas.

Para modelar las operaciones de mantenimiento y la planeación de la capacidad puede emplearse un modelo de servicio a máquinas con distribuciones generales de entrada y distribuciones generales de servicio. Dependiendo de las actividades de mantenimiento y de la carga de mantenimiento pronosticada, el sistema puede dividirse en los tipos de trabajos que requieren diferentes

oficios. Los tipos de oficios incluyen el mecánico (ME), el eléctrico (EE), el de instrumentación (INS), el civil (CI) y el de conserjería (JAN). Se pueden emplear datos históricos para desarrollar una distribución de probabilidad que represente la llegada de trabajos de mantenimiento y el tiempo para completar las reparaciones en un trabajo. El modelo de servicio de máquinas puede modificarse de manera que en lugar de considerar máquinas físicas, se considere que cada tipo de trabajo generado por el sistema es generado por una máquina hipotética. Cada tipo de trabajo (máquina) requiere un trabajador o nivel de destrezas específico. El número de máquinas hipotéticas se determina según los tipos de trabajo generados por el sistema. Tal representación puede utilizarse dentro de un modelo de simulación para determinar el tamaño de las cuadrillas necesarias. La figura 5.2 es una representación esquemática de un modelo que puede simularse para determinar los niveles de personal en un departamento de mantenimiento.

Para implantar un modelo de simulación para la planeación de la capacidad se deben realizar los siguientes pasos prácticos.

1. Realizar un estudio detallado de los requerimientos de mantenimiento de la organización/planta para determinar los tipos de trabajadores de mantenimiento y cuadrillas requeridas, los tipos y el grado crítico del equipo reparado, el mecanismo de falla de cada pieza de equipo y el efecto de una falla en la producción o el servicio que proporciona la organización.
2. Pronosticar la carga de trabajo de mantenimiento y clasificarla según la prioridad.

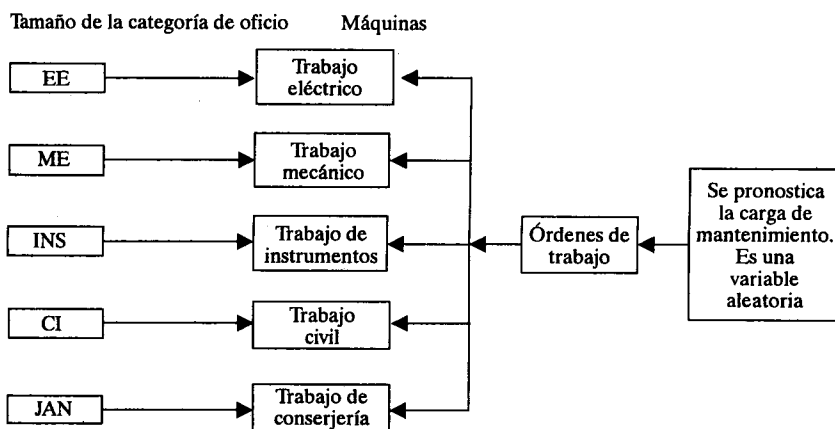


Figura 5.2 Representación de la planeación de la capacidad de mantenimiento en un marco de trabajo de atención a máquinas.

3. Delinear el sistema de órdenes de trabajo existente y definir la lógica de las asignaciones de trabajo (disciplina del sistema).
4. Establecer el modelo pertinente de servicio a las máquinas después de determinar la tasa de fallas de cada máquina, la tasa de servicio y el costo de tener cada máquina fuera de servicio.
5. Desarrollar el software de simulación y verificar y validar el modelo.
6. Después de validar el modelo, realizar corridas de producción y, con base en todas las medidas de funcionamiento, encontrar los niveles óptimos de personal.

5.10 MANTENIMIENTO POR CONTRATO

La subcontratación de las actividades de mantenimiento es común en todo el sector público y en el privado. La premisa es que ciertos aspectos del mantenimiento pueden hacerse tan eficazmente y a un menor costo de lo que podrían realizarse con recursos internos. Una cuestión clave es si la contratación del mantenimiento aumenta o disminuye la ventaja competitiva de la organización. Es difícil ver cómo la subcontratación de los servicios de vigilancia, por ejemplo, dañaría la ventaja competitiva de un negocio, a menos que de alguna manera el personal interno pudiera hacerlo más eficazmente y a un costo considerablemente menor y con menos atención de la dirección que una empresa que se especializa en limpieza de instalaciones. Por otra parte, si el mantenimiento de un camión de remolque en un sitio minero alejado se subcontrata a un garaje o un taller local, es posible que la operación de la mina se vería afectada de manera negativa, independientemente de las tasas competitivas.

En el sector de la petroquímica y refinación de petróleo en Estados Unidos no es raro ver que la mayor parte del trabajo de mantenimiento se subcontrate a una empresa, que se especializa en dicho negocio, en tanto que la ingeniería de confiabilidad y la administración del mantenimiento a menudo se conserva internamente. Los paros de la planta y el mantenimiento de reparación general requieren la subcontratación de un gran segmento de los trabajos pendientes, debido a que por lo común existe un período corto y finito para efectuar todo el trabajo y no hay suficiente capacidad dentro de la organización para llevarlo a cabo.

La subcontratación del mantenimiento durante los períodos pico es más eficaz en la mayoría de los entornos de trabajo cuando se pueden estimar los proyectos o tareas finitos y pueden subcontratarse como un paquete de trabajo, como uno normalmente haría para un proyecto de capital de expansión o modificación. Esto permite que una cuadrilla contratada distinta trabaje conjuntamente fuera de la estructura organizacional cotidiana de la planta o la instalación. El paquete de trabajo especificaría el número y tipos

de trabajadores necesarios y contendría cualquier instrucción requerida. La subcontratación de trabajadores individuales y su integración con el personal interno puede llevar a ineficiencias y conflictos, ya que este personal subcontratado tal vez no conozca las rutinas, el equipo o los procedimientos y normas de trabajo, lo cual reduciría la productividad de toda la cuadrilla. Además, particularmente en un ambiente sindicalizado, la subcontratación de trabajo de rutina sin una extensa comunicación bilateral sobre el tema de la seguridad en el trabajo, puede conducir a menudo a dificultades en las relaciones laborales y a alguna forma de acción laboral, como huelgas y trabajo con retraso.

RESUMEN

En este capítulo se han presentado las técnicas esenciales para pronosticar y planear la capacidad. Los pronósticos son un prerrequisito para la planeación de la capacidad, y ésta es un elemento importante en una organización de mantenimiento y determina su capacidad para desempeñar su misión en una forma eficaz. Las técnicas cubiertas en las secciones de este capítulo sobre pronósticos son promedios móviles, regresión lineal, suavización exponencial y pronósticos estacionales. Los métodos presentados para la planeación de la capacidad son el método del *tableau* heurístico, la programación lineal, los modelos de líneas de espera y la simulación estocástica. La aplicación de las técnicas estocásticas requiere cierta madurez de parte del analista. Para un examen más profundo de las técnicas, ver las referencias [1, 3-5].

EJERCICIOS

- 5.1 El pronóstico de la carga de mantenimiento generada por equipo complejo recientemente desarrollado parece que no se presta a los pronósticos de series de tiempo. ¿Por qué? Sugiera un procedimiento para predecir la carga de mantenimiento para los próximos dos años para este equipo.
- 5.2 En ausencia de datos, tal vez usted tenga que recurrir a los pronósticos cualitativos. Explique cómo podría realizar un pronóstico cualitativo y cómo lo validaría.
- 5.3 ¿Cuándo es posible utilizar una gráfica de control para controlar el proceso de los pronósticos cualitativos? ¿Qué tipo de gráfica(s) de control utilizaría? Explique cómo.

- 5.4 Demuestre que el empleo del método de mínimos cuadrados para estimar la pendiente b y la intersección a del ajuste lineal de una sola variable $x(t) = a + bt$ da por resultado las siguientes estimaciones para b y a ,

$$\hat{b} = \frac{\sum_{t=1}^n tx(t) - \left(\sum_{t=1}^n t\right)\left(\sum_{t=1}^n x(t)\right)}{n \sum_{t=1}^n t^2 - \left(\sum_{t=1}^n t\right)^2}$$

$$\hat{a} = \bar{x}(t) - bt$$

- 5.5 Utilice el método de mínimos cuadrados para estimar los parámetros del modelo cuadrático $x(t) = a + bt + bt^2$.
- 5.6 Derive las ecuaciones simultáneas a y b para el modelo $x(t) = ab^t$ empleando el método de mínimos cuadrados.
- 5.7 Dados los siguientes datos,

t	$x(t)$
1	5
2	4
3	7
4	8
5	7
6	10

pronostique $x(t)$ para los períodos 7 y 8 utilizando un promedio móvil de cinco períodos y el modelo de regresión lineal. ¿Cuál de las predicciones resultantes recomendaría para ser utilizada en este caso? ¿Por qué?

- 5.8 Demuestre analíticamente que la estimación que obtiene de la ecuación básica de suavización exponencial es una función de todas las observaciones anteriores, pero que las más recientes tienen un peso mayor que las más lejanas.
- 5.9 Utilice un modelo lineal y la suavización exponencial para predecir los valores de $x(t)$ para los períodos 7, 8 y 10 para los datos del ejercicio 5.7.
- 5.10 Pruebe que si un conjunto de datos tiene una tendencia libre de ruido con pendiente b , la primera suavización exponencial estará rezagada con respecto al verdadero valor por $(\beta/\alpha)b$, en donde $\beta = 1 - \alpha$.

- 5.11** ¿Cómo determinaría α de manera óptima en el modelo de suavización exponencial?
- 5.12** Considere los siguientes datos trimestrales para la carga de mantenimiento en horas de mano de obra para los últimos 5 años:

Año	Trimestre			
	I	II	III	IV
1	215	120	150	100
2	250	175	75	150
3	300	250	75	165
4	350	275	100	200
5	400	300	125	225

- Determine un índice estacional apropiado para cada trimestre.
 - Elimine la estacionalidad en los datos y ajústelos en un modelo de crecimiento apropiado.
 - Pronostique los valores trimestrales para los años 6 y 7.
- 5.13** Discuta las ventajas y desventajas de los enfoques dados en este capítulo para la planeación de la capacidad.
- 5.14** Suponga que se le pide desarrollar un plan de capacidad para un departamento de mantenimiento. ¿Qué enfoque seleccionaría de entre los presentados en este capítulo? ¿Por qué?
- 5.15** Para los datos de la tabla 5.9, evalúe el costo del plan dado en la tabla si una hora de tiempo regular interno cuesta 10 dólares, una hora de tiempo extra cuesta 15 dólares y una hora-hombre de tiempo de subcontratación cuesta 25 dólares. Además, cada hora-hombre de trabajo pendiente demorado del período t al período $t + 1$ cuesta 5 dólares. Establezca un plan alternativo competitivo en el que pueda tener una mezcla de trabajadores calificados y no calificados. El costo de un trabajador no calificado es de 8 dólares por hora.
- 5.16** Desarrolle un modelo de programación lineal para los datos dados en la tabla 5.9, suponiendo que se cuenta con los trabajadores del ejercicio 5.15.
- 5.17** Explique cómo utilizaría el modelo de servicio a máquinas para determinar la mezcla óptima de trabajadores y destrezas para satisfacer la carga de mantenimiento.
- 5.18** ¿Cuáles son las desventajas de utilizar la programación lineal para la planeación de la capacidad?

- 5.19** Localice una fábrica en su área y estudie sus operaciones y mantenimiento.
- Pronostique su carga de mantenimiento.
 - Utilice el método del *tableau* estructurado para determinar su capacidad en términos solamente de personal.
 - Utilice la programación lineal y entera para planear su capacidad de mantenimiento.
- 5.20** Aplique la simulación estocástica para planear la capacidad de mantenimiento para la fábrica del ejercicio 5.19. ¿Existe alguna diferencia entre los enfoques de los ejercicios 5.19 y 5.20? ¿Por qué esperarías tal diferencia? ¿Cuál es más apropiado para este caso? ¿Por qué?

REFERENCIAS

1. A. Andijani and S. O. Duffuaa, "A Critical Evaluation of Simulation Study in Maintenance," *Proceedings of the First International Conference on Industrial Engineering, Theory and Applications*, Houston.
2. D. D. Bedworth and J. E. Bailey, *Integrated Production Control Systems*, 2nd Ed., Wiley, New York.
3. S. O. Duffuaa and A. A. Andijani, "Stochastic Simulation: An Effective Tool for Modeling Maintenance Systems," Working Paper, Department of Systems Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia.
4. S. O. Duffuaa and A. Raouf, "A Simulation Model for Determining Maintenance Staffing in an Industrial Environment," *Simulation*, Vol. 59, pp. 293-299.
5. A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, New York.
6. D. C. Montgomery and L. A. Johnson, *Forecasting and Time Series Analysis*, McGraw-Hill, New York.
7. H. Taha, *Operations Research: An Introduction*, 5th Ed., Macmillan, New York.

6

PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO

6.1 INTRODUCCIÓN

La planeación es el proceso mediante el cual se determinan los elementos necesarios para realizar una tarea, antes del momento en que se inicie el trabajo. La programación tiene que ver con la hora o el momento específico y el establecimiento de fases o etapas de los trabajos planeados junto con las órdenes para efectuar el trabajo, su monitoreo, control y el reporte de su avance. Es obvio que una buena planeación es un requisito previo para la programación acertada. Sin embargo, para que la planeación sea exitosa es necesaria una retroalimentación de la función de programación. Esta es la razón por la cual, en muchas organizaciones de mantenimiento, ambas funciones son realizadas por la misma persona o unidad. La planeación y la programación del mantenimiento es diferente de la planeación y la programación de la producción en los siguientes aspectos:

- La demanda del trabajo de mantenimiento tiene más variabilidad que el trabajo de producción y la llegada de la demanda es aleatoria por naturaleza.
- Los trabajos de mantenimiento tienen mayor variabilidad entre ellos; incluso los mismos tipos de trabajos difieren grandemente en contexto. Esto ha hecho que sea más difícil desarrollar estándares de trabajo en el área de mantenimiento que en producción; ver el capítulo 4. Para una planeación y programación acertadas son necesarios estándares de tiempos confiables para los trabajos.

- La planeación del mantenimiento requiere coordinación con muchos departamentos de la organización, como el de materiales, operaciones e ingeniería, y en muchas situaciones es una causa importante de atrasos y cuellos de botella.

Por estas razones la planeación y la programación del mantenimiento requieren un tratamiento diferente. La planeación y la programación son los aspectos más importantes de una correcta administración del mantenimiento. Una planeación y programación eficaces contribuyen de manera significativa a lo siguiente:

- reducción en los costos de mantenimiento. Los estudios realizados por varios investigadores, incluyendo Alcan y General Motors, han demostrado que existe un vínculo claro entre el mantenimiento planeado y la reducción de costos.
- mejor utilización de la fuerza de trabajo de mantenimiento al reducir demoras e interrupciones. También proporciona un buen medio para mejorar la coordinación y facilitar la supervisión.
- mejor calidad del trabajo de mantenimiento al adoptar los mejores métodos y procedimientos y asignar a los trabajadores más calificados para el trabajo.

Los principales objetivos de la planeación y la programación incluyen:

- minimizar el tiempo ocioso de los trabajadores de mantenimiento.
- maximizar la utilización eficiente del tiempo de trabajo, el material y el equipo.
- mantener el equipo de operación en un nivel que responda a las necesidades de producción en términos del programa de entregas y de la calidad.

De hecho, todo el mantenimiento deberá planearse y programarse. Sólo el trabajo de emergencia se efectúa sin una planeación previa; sin embargo, incluso en ese caso, el trabajo de emergencia deberá planearse a medida que avanza.

Para fines de planeación, el trabajo de mantenimiento puede clasificarse en las siguientes cinco categorías [8]:

1. *El mantenimiento de rutina y preventivo*, que incluye el mantenimiento periódico, como la lubricación de las máquinas, inspecciones y trabajos menores repetitivos. Este tipo de trabajo se planea y programa por adelantado.

2. *El mantenimiento de emergencia o correctivo* es el proceso de efectuar reparaciones tan pronto como sea posible después del reporte de una falla. El reporte por lo general, se hace por teléfono y va seguido de una orden de trabajo para confirmarlo. Los programas de mantenimiento se interrumpen para proceder a las reparaciones de emergencia o correctivas.
3. *La modificación del diseño* que implica determinar las causas de descomposturas repetidas y eliminar la causa mediante la modificación del diseño.
4. *La reparación general programada que implica el paro de la planta*, se planea y organiza de tal manera que se minimice el paro de la planta.
5. *La reparación general programada, reparaciones y construcción de equipo* que no caen dentro de ninguna de las otras categorías.

Una parte esencial de la planeación y la programación es pronosticar el trabajo futuro y equilibrar la carga de trabajo entre estas categorías. El sistema de administración del mantenimiento debe buscar que más del 90% de trabajo de mantenimiento sea planeado y programado, a fin de obtener los beneficios de la planeación y la programación.

Este capítulo presentará los ingredientes y las técnicas para una planeación y programación eficaces. En la sección 6.2 se presentan los elementos de la planeación, y en la sección 6.3 se describen los ingredientes de una correcta programación. La sección 6.4 presenta la importancia de las prioridades en los trabajos para la programación. La sección 6.5 describe las técnicas de programación, y la sección 6.6 presenta el mantenimiento con paro de la planta.

6.2 PLANEACIÓN

La planeación en el contexto del mantenimiento se refiere al proceso mediante el cual se determinan y preparan todos los elementos requeridos para efectuar una tarea antes de iniciar el trabajo. El proceso de planeación comprende todas las funciones relacionadas con la preparación de la orden de trabajo, la lista de materiales, la requisición de compras, los planos y dibujos necesarios, la hoja de planeación de la mano de obra, los estándares de tiempo y todos los datos necesarios antes de programar y liberar la orden de trabajo. En consecuencia, un procedimiento de planeación eficaz deberá incluir los siguientes pasos:

1. Determinar el contenido de trabajo (puede requerir visitas al sitio).
2. Desarrollar un plan de trabajo. Éste comprende la secuencia de actividades en el trabajo y el establecimiento de los mejores métodos y procedimientos para realizar el trabajo.
3. Establecer el tamaño de la cuadrilla para el trabajo.
4. Planear y solicitar las partes y los materiales.
5. Verificar si se necesitan equipos y herramientas especiales y obtenerlos.
6. Asignar a los trabajadores con las destrezas apropiadas.
7. Revisar los procedimientos de seguridad.
8. Establecer prioridades (de emergencia, urgente, de rutina y programado) para todo el trabajo de mantenimiento.
9. Asignar cuentas de costos.
10. Completar la orden de trabajo.
11. Revisar los trabajos pendientes y desarrollar planes para su control.
12. Predecir la carga de mantenimiento utilizando una técnica eficaz de pronósticos.

La orden de trabajo de mantenimiento generalmente no proporciona suficiente espacio para señalar los detalles de la planeación para reparaciones extensas, reparaciones generales o grandes proyectos de mantenimiento. En tales casos, en donde el trabajo de mantenimiento (proyecto) es grande y requiere más de 20 horas, es útil llenar una hoja de planeación de mantenimiento (figura 6.1). Tales hojas resultaron ser útiles en la planeación del mantenimiento de los vagones de carga de ferrocarril al llegar al área de vagones de carga para su mantenimiento preventivo programado cada 6 meses. En la hoja de planeación del mantenimiento el trabajo se descompone en elementos. Para cada elemento se determinan el tamaño de la cuadrilla y el tiempo estándar. A continuación se transfiere el contenido de la hoja de planeación a una o más órdenes de trabajo. Al llenar la hoja de planeación o la orden de trabajo, el planificador deberá utilizar toda la experiencia disponible en el departamento de mantenimiento. Así pues, deberán realizarse consultas con supervisores, capataces, ingenieros de planta y trabajadores, y deberán estar bien coordinadas. Por lo tanto, la planeación y la programación de un trabajo requiere una persona con las siguientes cualidades:

1. Pleno conocimiento de los métodos de producción empleados en toda la planta.

2. Suficiente experiencia que le permita estimar la mano de obra, los materiales y los equipos necesarios para llenar la orden de trabajo.
3. Excelentes habilidades de comunicación.
4. Conocimiento de las herramientas de planeación y programación.
5. De preferencia, con alguna educación técnica.

La oficina de planeación deberá estar ubicada en un lugar central, y su organización dependerá del tamaño de la compañía.

El proceso de planeación puede dividirse en tres niveles básicos, dependiendo del horizonte de planeación:

1. Planeación a largo plazo (cubre un período de 5 años o más).
2. Planeación a mediano plazo (planes a 1 mes y hasta 1 año).
3. Planeación a corto plazo (planes diarios y semanales).

Para la planeación a largo y mediano plazos, el planificador necesita utilizar los siguientes métodos:

1. Técnicas acertadas de pronósticos para estimar la carga de mantenimiento.
2. Tiempos estándar confiables para los trabajos a fin de estimar los requerimientos de personal.
3. Herramientas para la planeación agregada, como programación lineal, para determinar los requerimientos de recursos.

Las técnicas anteriores se presentaron en el capítulo 5 y son necesarias para especificar los niveles requeridos de personal. El plan a largo plazo cubre un período de 3 a 5 años y establece planes para actividades futuras y mejoras a largo plazo.

El plan a mediano plazo cubre un período de 1 mes a 1 año. Este plan especifica cómo operará la fuerza de trabajo de mantenimiento y proporciona detalles para reparaciones generales mayores, trabajos de construcción, planes de mantenimiento preventivo, paros de la planta y planeación de vacaciones. Este plan equilibra la necesidad de personal a lo largo del período cubierto y estima las refacciones requeridas y la adquisición de materiales.

La planeación a corto plazo se refiere a períodos de 1 día a 1 semana. Se concentra en la determinación de todos los elementos necesarios para realizar tareas industriales por adelantado. El planificador tiene que seguir los pasos del 1 al 12 dados al principio de esta sección.

6.3 PROGRAMACIÓN

La programación del mantenimiento es el proceso mediante el cual se acoplan los trabajos con los recursos y se les asigna una secuencia para ser ejecutados en ciertos puntos del tiempo. Un programa confiable debe tomar en consideración lo siguiente:

1. Una clasificación de prioridades de trabajos que refleje la urgencia y el grado crítico del trabajo.
2. Si todos los materiales necesarios para la orden de trabajo están en la planta (si no, la orden de trabajo no debe programarse).
3. El programa maestro de producción y estrecha coordinación con la función de operaciones.
4. Estimaciones realistas y lo que probablemente sucederá, y no lo que el programador desea.
5. Flexibilidad en el programa (el programador debe entender que se necesita flexibilidad, especialmente en el mantenimiento; el programa se revisa y actualiza con frecuencia).

El programa de mantenimiento puede prepararse en tres niveles, dependiendo de su horizonte: 1) el programa a largo plazo o maestro, que cubre un período de 3 meses a 1 año; 2) el programa semanal que cubre 1 semana; y 3) el programa diario que cubre el trabajo que debe completarse cada día.

El programa a largo plazo se basa en las órdenes de trabajo de mantenimiento existentes, incluyendo las órdenes de trabajo en blanco, los trabajos pendientes, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento de emergencia anticipado. Debe equilibrar la demanda a largo plazo de trabajo de mantenimiento con los recursos disponibles. Con base en el programa a largo plazo se pueden identificar los requerimientos de refacciones y materiales y solicitarse por adelantado. El programa a largo plazo generalmente está sujeto a revisión y actualización para reflejar cambios en los planes y el trabajo de mantenimiento realizado.

El programa de mantenimiento semanal se genera a partir del programa a largo plazo y toma en cuenta los programas actuales de operaciones y consideraciones económicas. El programa semanal deberá permitir que se cuente con 10% a 15% de la fuerza laboral para trabajos de emergencia. El planificador deberá proporcionar el programa para la semana actual y la siguiente, tomando en consideración los trabajos pendientes. A las órdenes de trabajo programadas para la semana actual se les asigna una secuencia con base en su prioridad. El análisis de la ruta crítica y la programación entera son técnicas que pueden utilizarse para generar un

programa. En la mayoría de las compañías pequeñas y medianas, la programación se realiza con base en reglas heurísticas y en la experiencia.

El programa diario se elabora a partir del programa semanal y generalmente se prepara el día anterior. Este programa con frecuencia es interrumpido para efectuar mantenimiento de emergencia. Las prioridades establecidas se utilizan para programar los trabajos. En algunas organizaciones, el programa se entrega al supervisor del área, quien asigna el trabajo según las prioridades establecidas.

6.3.1 Elementos de una programación acertada

La planeación del trabajo de mantenimiento es un requisito previo de la programación correcta. En todos los tipos de trabajos de mantenimiento, los siguientes requerimientos son necesarios para una programación eficaz:

1. Órdenes de trabajo escritas que se derivan de un proceso de planeación bien concebido. Las órdenes de trabajo deberán explicar con precisión el trabajo que se va a realizar, los métodos a seguir, los técnicos por especialidad necesarios, las refacciones que se necesitan y la prioridad.
2. Estándares de tiempo que se basan en las técnicas de medición del trabajo como se explicó en el capítulo 4.
3. Información acerca de la disponibilidad de técnicos por especialidad para cada turno.
4. Existencias de refacciones e información para su reabastecimiento.
5. Información sobre la disponibilidad de equipo y herramientas especiales, necesarios para el trabajo de mantenimiento.
6. Acceso al programa de producción de la planta y conocimiento del momento en que las instalaciones estarán disponibles para servicio, sin interrupción del programa de producción.
7. Prioridades bien definidas para el trabajo de mantenimiento. Estas prioridades deben desarrollarse con una estrecha coordinación entre mantenimiento y producción.
8. Información acerca de los trabajos ya programados pero que se han atrasado con respecto al programa (trabajos pendientes).

El procedimiento de programación deberá incluir los siguientes pasos como se describe en [4].

1. Clasificar las órdenes de trabajo pendientes por especialidad.
2. Ordenar las órdenes por prioridad.
3. Compilar una lista de trabajos completados y restantes.
4. Considerar la duración de los trabajos, su ubicación, distancia de traslado y la posibilidad de combinar trabajos en la misma área.
5. Programar trabajos de oficios múltiples para iniciarlos al comienzo de cada turno.
6. Emitir un programa diario (excepto para los proyectos y trabajo de construcción).
7. Autorizar a un supervisor para que asigne los trabajos (encargarse de su despacho).

Estos elementos proporcionan al programador los requerimientos y los procedimientos para desarrollar un programa de mantenimiento.

En el caso de trabajos grandes o proyectos de mantenimiento, especialmente de los trabajos de mantenimiento con paros generales, el programador puede utilizar las técnicas cuantitativas disponibles para generar el programa y equilibrar los requerimientos de mano de obra. Estas técnicas incluyen el método de la ruta crítica (CPM), la técnica para evaluación y revisión de programas (PERT), la programación entera y la programación estocástica. Estos métodos se presentan en secciones posteriores de este capítulo. A continuación se describe la función de las prioridades en la programación del mantenimiento, junto con una metodología para desarrollar prioridades de trabajos.

6.4 SISTEMA DE PRIORIDADES PARA LOS TRABAJOS DE MANTENIMIENTO

El sistema de prioridades para los trabajos de mantenimiento tiene un impacto tremendo en la programación del mantenimiento. Las prioridades se establecen para asegurar que se programe primero el trabajo más crítico. El desarrollo de un sistema de prioridades debe estar bien coordinado con el personal de operaciones, quien comúnmente asigna una mayor prioridad al trabajo de mantenimiento de lo que se justifica. Esta tendencia somete a un esfuerzo a los recursos de mantenimiento y podría conducir a una utilización de recursos inferior a la óptima. Asimismo, el sistema de prioridades deberá ser dinámico y debe actualizarse periódicamente para reflejar los cambios en las estrategias de operación o mantenimiento. Los sistemas de prioridades normalmente incluyen de tres a diez niveles. La mayoría de las organizaciones adoptan prioridades de cuatro o tres niveles. La tabla 6.1

TABLA 6.1 Prioridades del trabajo de mantenimiento.

Prioridad		Marco de tiempo en que debe comenzar el trabajo	Tipo de trabajo
Código	Nombre		
1	Emergencia	El trabajo debe comenzar inmediatamente	Trabajo que tiene un efecto inmediato en la seguridad, el ambiente, la calidad o que parará la operación
2	Urgente	El trabajo debe comenzar dentro de las próximas 24 horas	Trabajo que probablemente tendrá un impacto en la seguridad, el ambiente, la calidad o que podrá parar la operación
3	Normal	El trabajo debe comenzar dentro de las próximas 48 horas	Trabajo que probablemente tendrá un impacto en la producción dentro de una semana
4	Programado	Según está programado	Mantenimiento preventivo y de rutina; todo el trabajo programado
5	Aplazable	El trabajo debe comenzar cuando se cuente con los recursos o en el período de un paro	Trabajo que no tiene un impacto inmediato en la seguridad, la salud, el ambiente o las operaciones de producción

proporciona una clasificación de los niveles de prioridades y los trabajos que son candidatos para su inclusión en cada clase.

6.5 TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN

El objetivo final de la programación es construir una gráfica de tiempo que muestre el momento de inicio y terminación para cada trabajo (actividad), la interdependencia entre los trabajos y los trabajos críticos que requieren atención especial y monitoreo eficaz.

En el pasado, la programación de los trabajos en un proyecto se basaba en técnicas heurísticas, y la primera herramienta de programación que se conoció fue la gráfica de Gantt, creada por Henry L. Gantt durante la Segunda Guerra Mundial. La gráfica de Gantt es una gráfica de barras que especifica el momento de inicio y terminación de cada actividad en una escala

de tiempo horizontal. Su principal desventaja es que no muestra las interdependencias entre los diferentes trabajos. La gráfica de Gantt puede modificarse para mostrar las interdependencias, anotando acontecimientos importantes en cada línea de tiempo de los trabajos. Dichos acontecimientos indican períodos de tiempo claves en la duración de cada trabajo. Las líneas sólidas muestran las interrelaciones entre estos acontecimientos importantes. Así, estos acontecimientos indican las interdependencias entre los trabajos. El momento de inicio del trabajo y el punto de terminación requerido son acontecimientos importantes obvios para cualquier trabajo. Otros acontecimientos importantes son puntos significativos dentro de un trabajo, como el punto en el cual es posible el inicio de otros trabajos. Las figuras 6.2 y 6.3 muestran ejemplos de estas gráficas.

Las técnicas de planeación y programación de proyectos han evolucionado a lo largo del tiempo y en la actualidad se utilizan ampliamente dos importantes técnicas analíticas para la planeación y programación. Éstas son el método de la ruta crítica (CPM) y la técnica para revisión y evaluación de proyectos (PERT). El CPM fue desarrollado primero por E. I. du Pont de Nemours and Company como una aplicación a los proyectos de construcción y posteriormente fue ampliada por Mauchly Associates. El PERT fue desarrollado por la Marina de Estados Unidos para la programación de

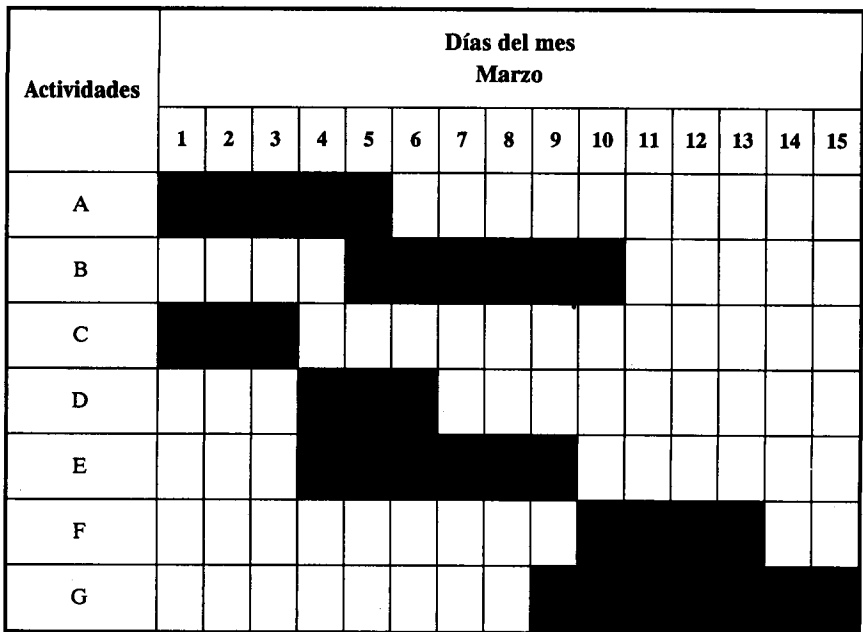


Figura 6.2 Gráfica de Gantt.

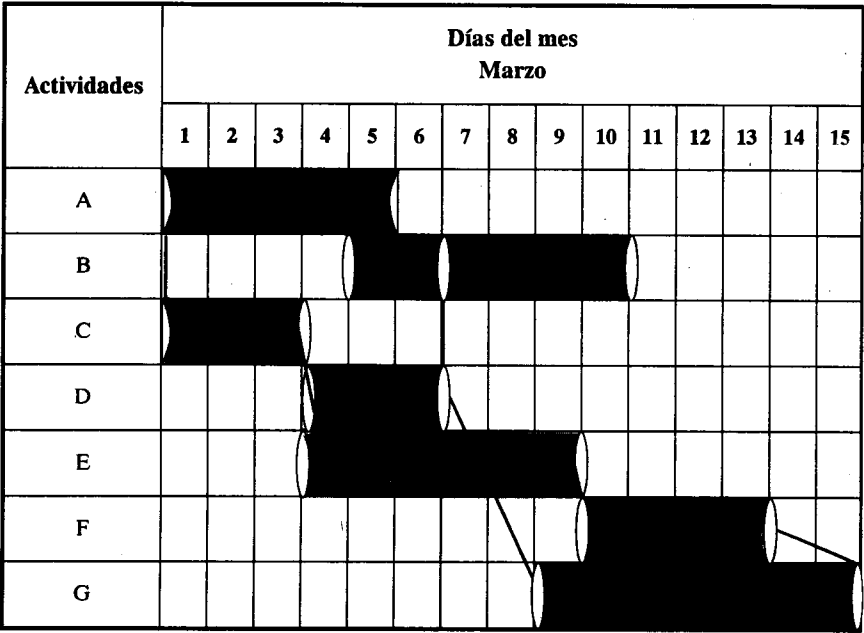


Figura 6.3 Gráfica de Gantt con acontecimientos importantes.

proyectos de investigación y desarrollo. Otros modelos matemáticos de programación útiles para la programación son la programación entera y la programación estocástica.

6.5.1 Enfoques de programación matemática para la programación del mantenimiento

La programación matemática, un término acuñado por Dorfman, se refiere a un grupo de modelos de investigación de operaciones. En forma general, la formulación de la programación matemática es como sigue:

Minimizar $f(x)$
Sujeto a $x \in X$

en donde X es un conjunto factible de puntos definidos por un conjunto de restricciones. En otras palabras, la programación matemática encuentra una $x \in X$ factible (que satisface las restricciones) y optimiza la función objetivo dada. La función objetivo y las restricciones podrían tomar cualquier forma, como lineal, cuadrática o una forma general funcional, no lineal, dependiendo del problema. Dependiendo de la forma del conjunto X y de la

función objetivo, podría resultar alguno de los siguientes modelos de programación matemática:

1. Programación de redes.
2. Programación lineal.
3. Programación cuadrática.
4. Programación no lineal.
5. Programación estocástica.

En términos de la programación del mantenimiento, el conjunto X representa todos los programas factibles. Un programa está compuesto de puntos en X cuyas coordenadas representan el tiempo para que se efectúe cada trabajo. La función objetivo podría ser minimizar el tiempo ocioso de la fuerza de trabajo, minimizar los trabajos pendientes o maximizar la utilización de recursos.

En la programación del mantenimiento, algunas restricciones importantes son las siguientes:

1. Disponibilidad de trabajadores.
2. Disponibilidad de equipo y herramientas.
3. Disponibilidad de refacciones.

Estas restricciones también podrían reflejarse en los elementos físicos y de planeación de los trabajos de mantenimiento, como los siguientes:

1. Requerimientos del trabajo.
2. Secuencia de operaciones para cada trabajo.
3. Relaciones de precedencia.
4. Equipo para terminación del trabajo

Además, algunas de las restricciones o los objetivos podrían ser determinísticos o estocásticos por naturaleza. Algunos de los modelos de programación matemática mencionados antes se han aplicado más extensamente que otros a la programación del mantenimiento. Estos son los modelos de redes y los de programación entera. Los modelos de redes incluyen tanto el método de la ruta crítica (CPM) como la técnica de revisión y evaluación de programas (PERT). En las siguientes secciones se presentarán con detalle los modelos de redes y la técnica de programación entera y se resaltaré el empleo de la programación estocástica.

6.5.2 Método de la ruta crítica

La aplicación del CPM y el PERT producirá un programa que especifica el momento de inicio y terminación de cada trabajo. Un requisito previo para la aplicación de ambos métodos es la representación del proyecto como un diagrama de red, que muestre las interdependencias y relaciones de precedencia entre las actividades del proyecto. El PERT y el CPM no se prestan para la programación de trabajos pequeños, cotidianos e independientes, en un departamento de mantenimiento; sin embargo, son muy útiles en la planeación y programación de trabajos grandes (20 horas-hombre o más) que constan de muchas actividades. Ejemplos de tales trabajos son la reparación general de maquinaria y la coordinación del paro de la planta y las actividades de mantenimiento.

Los siguientes son los pasos para la aplicación del CPM:

1. Desarrollar el diagrama de red del proyecto. Ésta es una representación del trabajo en términos de sus actividades, mostrando todas las relaciones de precedencia entre las actividades.
2. Realizar los cálculos del CPM para identificar los trabajos críticos (estos son los trabajos en las rutas críticas) y los trabajos no críticos (que son trabajos con flotación).
3. Realizar el acortamiento del proyecto (determinar los tiempos mínimos para cada trabajo) para reducir la duración del proyecto e investigar las ventajas y desventajas en costos.
4. Nivelar los recursos a fin de asegurar requerimientos uniformes de fuerza laboral para minimizar la contratación, el despido o los tiempos extras.

6.5.2.1. Representación del diagrama de red El diagrama de red permite que la representación de un proyecto (un trabajo grande) se vea como un sistema integrado. La interacción y las relaciones de precedencia pueden verse fácilmente y evaluarse en términos de su impacto en otros trabajos. En este tipo de red, una flecha se utiliza para representar una actividad (un trabajo) y un nodo representa un evento. Un evento es un punto en el tiempo que significa el inicio o terminación de una actividad.

La dirección de la flecha indica la dirección de avance en el proyecto. Las actividades que se originan de un cierto nodo no pueden iniciarse hasta que se hayan completado las actividades que terminan en este nodo. La figura 6.4a muestra una representación típica de una actividad (i, j) , su nodo de punto de inicio i , su nodo de terminación j , y su duración como se muestra junto a la flecha. La figura 6.4b muestra que la actividad $(1, 2)$ debe completarse antes de iniciar las actividades $(2, 3)$ y $(2, 4)$.

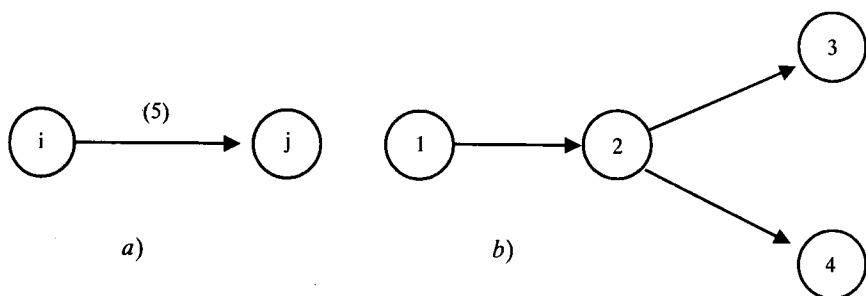


Figura 6.4 Representación de actividades.

Las siguientes son las reglas para construir un diagrama de red para un proyecto:

1. Cada actividad se representa por una y sólo una flecha en la red.
2. No se pueden representar dos actividades con los mismos nodos de inicio y terminación. En ciertas circunstancias, esto puede requerir la creación de actividades ficticias para adherirse a esta regla. Una actividad ficticia es una actividad con duración cero.
3. Para desarrollar una representación correcta de red del proyecto que muestre las relaciones de precedencia correctas, se deben contestar las siguientes preguntas cuando se agrega una actividad a la red:
 - a. ¿Qué actividades deben completarse inmediatamente antes de esta actividad?
 - b. ¿Qué actividades deben iniciar inmediatamente después de esta actividad?
 - c. ¿Qué actividades deben ocurrir simultáneamente con esta actividad?

Para más información acerca de los diagramas de redes para proyectos, consultar Taha [7].

El diagrama de red de un proyecto se demostrará mediante un ejemplo de mantenimiento. La tabla 6.2 muestra los datos para la reparación general de un rodamiento en un vagón de carga de un tren. Los datos muestran las relaciones de la duración normal/acortada y de precedencia y costo normal/reducido para cada actividad. El término de duración acortada se refiere al tiempo mínimo en el que puede realizarse el trabajo y más allá del cual no puede lograrse reducción en la duración del trabajo. En esta duración,

TABLA 6.2 Datos normales y reducidos del CPM para la reparación general del rodamiento.

Trabajo (Actividad)	Descripción	Tiempo (minutos)		Costos (\$)		Relación de precedencia inmediata
		Normal	Reducido	Normal	Reducido	
A	Desmantelamiento	50	30	100	150	0
B	Reparación de las gargantas del travesaño	67	50	120	150	A
C	Reparación de los brazos de detención de rotación del marco lateral	90	60	150	200	A
D	Verificación de los bloques de fricción y todos los muelles	35	25	50	75	A
E	Reparación de las cuñas de detención de rotación del travesaño	80	25	140	170	B
F	Reparación de los platos de desgaste de la columna del marco lateral	55	40	100	130	C
G	Reparación del pivote del travesaño	210	150	250	300	E
H	Ensamble	65	45	120	150	D, F, y G
I	Pintura	40	30	80	100	H

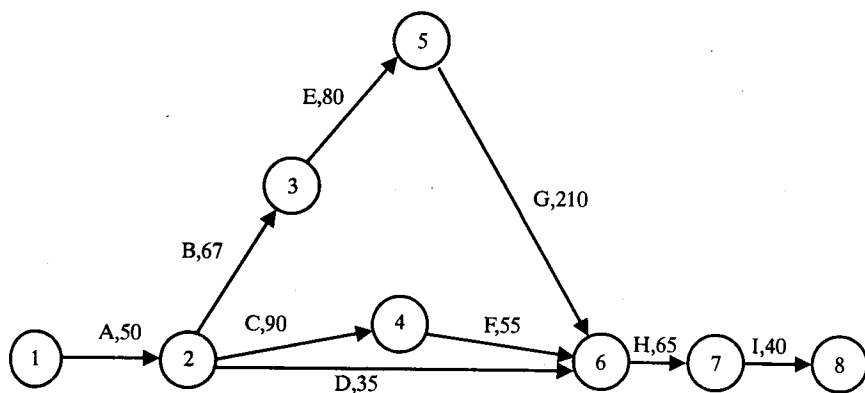


Figura 6.5 Diagrama de red para los datos de la reparación general del rodamiento de la tabla 6.2.

cualquier aumento de recursos para este trabajo aumentará el costo sin reducir la duración.

Si se siguen las reglas especificadas anteriormente para la construcción de un diagrama de red, se obtiene la figura 6.5 como sigue: observamos que el trabajo A es el único trabajo que comienza en el tiempo 0 en el nodo 1. El trabajo A puede ser seguido por los trabajos B, C y D; sin embargo, el trabajo E no puede iniciarse hasta que el trabajo B se haya completado. Por lo tanto, los trabajos B, C y D se originan del nodo 2. El trabajo B va seguido del trabajo E, que emana del nodo 3. El trabajo F se origina del nodo 4 después de que se ha completado el trabajo C y así sucesivamente.

6.5.2.2 Cálculo de la ruta crítica La aplicación del CPM y del PERT distinguirá los trabajos críticos de los no críticos. Los trabajos críticos son aquellos que causarán una demora en la terminación de todo el proyecto si ocurre una demora en su tiempo de inicio. Un trabajo es no crítico si la diferencia entre su tiempo de inicio más pronto y su tiempo de terminación más tardío es mayor que su duración. Estos trabajos ofrecen flexibilidad para elegir el tiempo de inicio y pueden trabajarse intermitentemente dentro del marco de tiempo permisible. Esto se conoce como *holgura* o *flotación*. Los trabajos críticos deben vigilarse cuidadosamente y adherirse a sus programas especificados; sin embargo, los trabajos no críticos pueden utilizarse para nivelar los recursos gracias a la holgura disponible.

Una ruta crítica es una cadena de trabajos críticos (actividades) que conectan el nodo de inicio (evento) con el último (final) nodo del diagrama de red. El cálculo de la ruta crítica incluye dos fases. La primera fase es la ruta de avance, en donde el cálculo comienza con el nodo de inicio y avanza hacia adelante hasta el último nodo del proyecto. En cada nodo, se calcula un

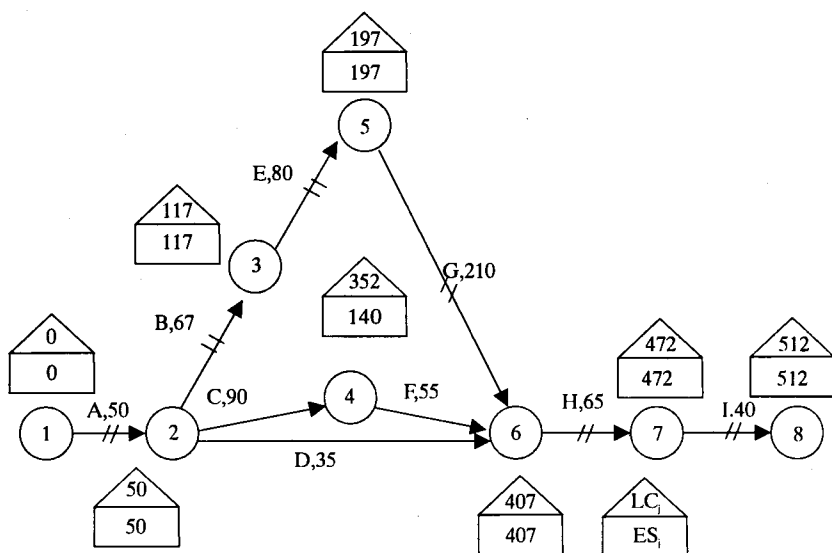


Figura 6.6 Resultados del cálculo de la ruta crítica.

número que representa el tiempo más pronto para la ocurrencia del evento (nodo). Este número, que es un tiempo, es el tiempo más pronto de inicio (ES) para todos los trabajos (actividades) que emanan de este nodo. La segunda fase, la ruta de regreso, comienza el cálculo desde el nodo final y avanza hacia atrás hasta el nodo de inicio. En esta ruta se calcula un número que representa el tiempo más tardío de ocurrencia del evento sin que se demore el proyecto. Este número representa el tiempo más tardío de terminación (LC) de todas las actividades que entran a este nodo. En la figura 6.6 los tiempos más pronto de inicio se muestran como cuadrados y los tiempos más tardíos de terminación se muestran como triángulos junto a cada nodo. La fórmula para calcular estos tiempos se da posteriormente. Las variables que se utilizan en el cálculo se definen como sigue:

D_{ij} = Duración del trabajo (i, j)

ES_i = Tiempo más pronto de inicio de todas las actividades que emanan del nodo i

ES_0 = [Tiempo más pronto de inicio en el nodo inicial (nodo 0)]

LC_i = Tiempo más tardío de terminación para todas las actividades que entran al nodo i

LC_n = ES_n , en donde n es el nodo final

$ES_j = \max\{ES_i + D_{ij}\}$ para todas las actividades (i, j) en el diagrama de red

$LC_i = \min\{LC_j - D_{ij}\}$ para todas las actividades (i, j) en el diagrama

La ruta de avance para el diagrama de red de la reparación del rodamiento es como sigue:

$$ES_1 = 0$$

$$ES_2 = ES_1 + D_{12} = 0 + 50 = 50$$

$$ES_3 = ES_2 + D_{23} = 50 + 67 = 117$$

$$ES_4 = ES_2 + D_{24} = 50 + 90 = 140$$

$$ES_5 = ES_3 + D_{35} = 117 + 80 = 197$$

$$ES_6 = \max[ES_2 + D_{26}, ES_4 + D_{46}, ES_5 + D_{56}]$$

$$= \max[50 + 35, 140 + 55, 197 + 210] = 407$$

$$ES_7 = ES_6 + D_{67} = 407 + 65 = 472$$

$$ES_8 = ES_7 + D_{78} = 472 + 40 = 512$$

La ruta de regreso es como sigue:

$$LC_8 = 512$$

$$LC_7 = LC_8 - D_{78} = 512 - 40 = 472$$

$$LC_6 = LC_7 - D_{67} = 472 - 65 = 407$$

$$LC_5 = LC_6 - D_{56} = 407 - 210 = 197$$

$$LC_4 = LC_6 - D_{46} = 407 - 55 = 352$$

$$LC_3 = LC_5 - D_{35} = 197 - 80 = 117$$

$$LC_2 = \min[LC_3 - D_{23}, LC_4 - D_{24}, LC_6 - D_{26}]$$

$$= \min[117 - 67, 352 - 90, 407 - 35] = 50$$

$$LC_1 = LC_2 - D_{12} = 50 - 50 = 0$$

Los resultados de las rutas de avance y de regreso se muestran en la figura 6.6.

La ruta crítica puede identificarse a partir de estos cálculos. Una actividad (i, j) se encuentra en la ruta crítica si satisface las siguientes condiciones:

$$ES_i = LC_i$$

$$ES_j = LC_j$$

$$ES_j - ES_i = LC_j - LC_i = D_{ij}$$

TABLA 6.3 Cálculos del método de la ruta crítica.

Trabajo (Actividad) (i, j)	Duración D_{ij} Minutos	Inicio más pronto ES_i	Terminación más pronta EC_j	Inicio más tardío LS_j	Terminación más tardía LC_j	Flotación total TF_{ij}	Flotación libre FF_{ij}	Actividades críticas
(1, 2)	50	0	50	0	50	0	0	*
(2, 3)	67	50	117	50	117	0	0	*
(2, 4)	90	50	140	262	352	212	0	-
(2, 6)	35	50	85	372	407	322	322	-
(3, 5)	80	117	197	117	197	0	0	*
(4, 6)	55	140	195	352	402	212	212	-
(5, 6)	210	197	407	197	407	0	0	*
(6, 7)	65	407	473	407	472	0	0	*
(7, 8)	40	472	512	472	512	0	0	*

LS_j = Tiempo más tardío de inicio para la actividad (i, j) = $LC_j - D_{ij}$

ES_j = Tiempo más pronto de terminación para la actividad (i, j) = $ES_i - D_{ij}$

Nota: No siempre es cierto que $FF_{ij} = TF_{ij}$.

En otras palabras, una actividad (i, j) se encuentra en la ruta crítica si no hay tiempo de holgura o flotación entre el tiempo de inicio (terminación) más pronto y el tiempo de inicio (terminación) más tardío de la actividad. La ruta crítica para el ejemplo de la reparación general del rodamiento se muestra en la figura 6.6 mediante las flechas que tienen dos trazos sobre de ellas. Consta de las actividades (trabajos) (1, 2), (2, 3), (3, 5), (5, 6), (6, 7) y (7, 8). Las actividades no críticas son (2, 4), (2, 6) y (4, 6), es decir, los trabajos C, D y F.

El resultado final de los cálculos del CPM deberá proporcionar un programa para todas las actividades que nivelan los recursos. Las actividades críticas deben programarse a su tiempo de inicio más pronto, ya que estos trabajos no tienen holgura. Las actividades no críticas proporcionan flexibilidad en la programación y nivelación de los recursos. Cada actividad no crítica tiene dos tipos de flotación: flotación total (TF_{ij}) y flotación libre (FF_{ij}), que se definen como sigue:

$$TF_{ij} = LC_j - ES_i - D_{ij}$$

$$FF_{ij} = ES_j - ES_i - D_{ij}$$

La flotación libre supone que todas las actividades empiezan tan pronto como es posible. Los cálculos de la ruta crítica con la flotación para las actividades no críticas se muestran en la tabla 6.3. Esta tabla incluye toda la información necesaria para desarrollar una gráfica de tiempo que muestre los programas para todas las actividades.

La construcción de la gráfica de tiempo debe hacerse tomando en consideración los recursos disponibles y debe aprovechar plenamente el cálculo del CPM. En algunas circunstancias, tal vez no sea posible programar muchas actividades simultáneamente debido a limitaciones de personal y equipo. La flotación total para las actividades no críticas puede utilizarse para nivelar los recursos y minimizar los requerimientos máximos de recursos. Estas actividades pueden cambiarse o moverse hacia atrás o hacia adelante entre los límites máximos permisibles y programarse en el tiempo apropiado que nivele los recursos y mantenga una fuerza de trabajo y equipo uniformes. Para mayores detalles sobre la programación de proyectos, consultar Phillips y Taha [5, 7].

Además de la nivelación de recursos, el CPM comprende el acortamiento del proyecto. En el acortamiento del proyecto, la duración de una o más actividades críticas se acorta en una forma óptima y se prepara una curva para mostrar el compromiso entre el tiempo y el costo. Esto le permitirá a la gerencia evaluar la duración del proyecto con el costo resultante. La programación de redes puede emplearse para realizar acortamiento en una forma óptima.

6.5.3 Técnica de revisión y evaluación de programas (PERT)

El CPM no incorpora consideraciones de incertidumbre o costos directos en la programación de proyectos. El PERT considera el aspecto de la incertidumbre suponiendo que la estimación de tiempo para la duración de la actividad (i, j) se basa en tres valores diferentes:

O_{ij} = Tiempo optimista, que es el tiempo requerido si la ejecución se desarrolla extremadamente bien

P_{ij} = Tiempo pesimista, que es el tiempo requerido bajo las peores condiciones

m_{ij} = Tiempo más probable, que es el tiempo requerido bajo condiciones normales

Suponiendo una distribución beta, la media D y la varianza V para el tiempo de duración de la actividad están dadas por

$$\bar{D}_{ij} = \frac{O_{ij} + P_{ij} + 4m_{ij}}{6}$$

$$V_{ij} = \left(\frac{b_{ij} - a_{ij}}{6} \right)^2$$

Suponga que las actividades de la red son independientes y sea X_i el tiempo de ocurrencia del evento del nodo i . X_i es una variable aleatoria y es la suma de la duración de las actividades en la ruta P desde el nodo de inicio hasta el nodo i . Si hay más de una ruta, la situación es bastante compleja; sin embargo, en este caso se toma la ruta con la mayor incertidumbre, según se vea reflejado por su varianza. X_i es la suma de las variables aleatorias independientes y, por el teorema del límite central, la distribución de X_i es aproximadamente normal con una media $E(X_i)$ y una varianza $\text{Var}(X_i)$, en donde

$$E(X_i) = \sum_{(i,j) \in R} \bar{D}_{ij}$$

$$\text{Var}(X_i) = \sum_{(i,j) \in P} V_{ij}$$

Empleando la suposición anterior, podemos calcular la probabilidad con la que puede terminarse un proyecto. Si el programa de la ocurrencia del nodo i es TS_i , entonces

$$\begin{aligned}\Pr[X_i \leq TS_i] &= \Pr\left[\frac{X_i - E(X_i)}{\sqrt{\text{Var}(X_i)}} \leq \frac{TS_i - E(X_i)}{\sqrt{\text{Var}(X_i)}}\right] \\ &= \Pr[Z \leq Z_i] = \Phi(Z_i)\end{aligned}$$

en donde Φ es la función de distribución de la distribución normal estándar.

6.5.4 Enfoques de la programación entera y estocástica para la programación del mantenimiento

El modelo de la programación entera puede plantearse como

$$\text{Mín} \sum_{j=1}^{n_1} c_j x_j \quad (6.1)$$

sujeto a

$$Ax \leq b \quad x_j = 0 \text{ ó } 1$$

en donde $A = (a_{ij})$ es $m_1 \times n_1$, $b = (b_j)$ es $m_1 \times 1$, y $C = (c_j)$ es $1 \times n_1$ son vectores. A , C y b son constantes conocidas. La matriz, A , representa los coeficientes de las restricciones como las horas requeridas de cada destreza para los trabajos, b representa las destrezas disponibles y c_j representa los valores de costos o castigos por los trabajos no terminados. Entonces los valores x_j proporcionan los tiempos en que se programan los trabajos.

Los modelos de la programación entera son apropiados si se conocen por adelantado todos los detalles acerca del sistema de mantenimiento (es decir, el sistema de mantenimiento es determinístico), el cual, a su vez, hace que c_j , A y b sean constantes conocidas. Sin embargo, los sistemas de mantenimiento son estocásticos por naturaleza, debido a que el sistema de mantenimiento tiene muchos elementos estocásticos que no son conocidos por adelantado y en el mejor de los casos sólo pueden predecirse. Esto muestra que el problema de la programación del mantenimiento debe tener parámetros tanto determinísticos como estocásticos, así como restricciones estocásticas que resultan de emergencias anticipadas inciertas.

Existen generalmente dos formas de atacar este problema. Una de ellas es anticipable, a saber, tratar de esperar lo que sucederá en el futuro y planear para él. La otra es adaptable, lo que significa esperar a que algo se necesite y luego actuar en la forma correspondiente. Cada enfoque tiene sus ventajas y desventajas.

Los modelos de programación estocástica con recurso son aquellos que combinan tanto las estrategias anticipables como las adaptables en un modelo,

en un intento por lograr un equilibrio entre las ventajas a largo plazo del método anticipable y las ventajas a corto plazo del método adaptable. Esto se traduce en un compromiso entre la inversión de capital y la operación a corto plazo, entre el costo de mantener una fuerza de trabajo que varía lentamente y el costo de contratar, despidos temporales y tiempo extra de una fuerza de trabajo que cambia rápidamente.

La programación estocástica con recurso es una formulación que maneja eventos futuros inciertos. El modelo de programación estocástica con recurso simple (SR) se plantea como sigue:

$$\text{Máx } cx + E[\inf q^+ y^+ + q^- y^- | y^+ - y^- = R - Tx, y^+, y^- \geq 0] \quad (6.2)$$

sujeto a

$$Ax \leq b \quad x \geq 0$$

en donde R es un vector de variables aleatorias con una función de distribución conocida y E es el operador de expectación e “inf” significa ínfimo, A es $m_1 \times n_1$, b es $m_1 \times 1$, c es $1 \times n_1$, q^+ es $1 \times m_2$, q^- es $1 \times m_2$ y T es $m_2 \times n_1$ son matrices dadas. Otra forma de plantear el modelo SR es como sigue:

$$\text{Máx } cx + E[\inf q^+ y^+ + q^- y^-] \quad (6.3)$$

sujeto a

$$Ax \leq b \quad Tx + y^+ - y^- = R \quad x \geq 0 \quad y^+, y^- \geq 0$$

Las restricciones determinísticas, $Ax \leq b$, representan las restricciones para los trabajos por hacer, como se explicó en el modelo de programación entera, y el segundo conjunto de restricciones representa el componente estocástico del modelo. Las formulaciones anteriores para la programación entera y estocástica se dan en formas generales. Para mayores detalles acerca de ambos modelos, consultar Duffuaa y Al-Sultan [1, 2, 3].

Para implantar los métodos de la programación matemática, se deben aplicar los siguientes pasos para preparar el modelo y resolverlo:

1. Decidir sobre el objetivo que se va a utilizar. En el siguiente ejemplo, el objetivo seleccionado consiste en disminuir el número de trabajos no terminados. A los trabajos se les asigna una prioridad según su importancia. Esto ha sido decidido por el grado crítico del trabajo para la planta. En el caso estocástico, necesitamos estimar la probabilidad de las llegadas de los trabajos en cada horizonte.

2. Formular las restricciones del modelo. Éstas incluyen restricciones sobre la disponibilidad de los trabajadores, balances de destrezas por hora y restricciones de selección. El último conjunto de restricciones se refiere al trabajo que hay que seleccionar y la hora de su programación. En el caso estocástico, tal vez se necesite contar con mano de obra de reserva para trabajos anticipados. Esto debe reflejarse en las restricciones y la función objetivo.
3. Si el gerente (coordinador) de mantenimiento está interesado sólo en la programación de los trabajos en existencia, el modelo apropiado es el programa entero determinístico. En caso de que el gerente enfrente elementos de incertidumbre y desee trabajadores de reserva para trabajos anticipados, el modelo apropiado es el estocástico. La complejidad de estos modelos depende del tipo de planta y su tamaño.
4. Dependiendo del modelo formulado, existen paquetes de software para resolver modelos de programación matemática. Ejemplos de éstos son el Linear Interactive and Discrete Optimizer (LINDO), el General Integer and Nonlinear Optimizer (GINO) y el Optimization Software Library (OSL).
5. Los resultados de los modelos producirán programas que pueden implantarse. Sin embargo, para investigar la sensibilidad de los resultados ante los parámetros del modelo, se puede recurrir a técnicas como el análisis de sensibilidad.

6.5.4.1 Formulación del modelo de programación entera

Descripción del problema

Existe una demanda por 8 puestos de trabajo, que han sido planeados y cuyos requerimientos de horario y calificación de dominio del oficio son:

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5
Puesto 1:	p	e	e		
Puesto 2:	p	e	m	m	m
Puesto 3:	e	p			
Puesto 4:	m	m	p		
Puesto 5:	e	p			
Puesto 6:	p	p	m		
Puesto 7:	e	m			
Puesto 8:	m	e	p		

La clave correspondiente es: p = plomero, e = electricista, m = mecánico, que se designan con la calificación 1, 2 y 3 en la formulación del modelo. En cualquier tiempo dado, están disponibles para trabajar 2 plomeros, 1 electricista y 1 mecánico.

Problema: Encontrar un programa de inicio de labores para cada puesto de tal manera que se termine con el mayor número de trabajos en un turno de ocho horas con la mano de obra disponible.

Formulación del modelo

Primero se describe la demanda de trabajo como un conjunto de valores, h_{ijt} , donde i = calificación, j = puesto y t = hora en el trabajo. Así, los valores de h_{ijt} según las demandas establecidas se dan en la tabla siguiente:

Descripción del puesto

Calificación 1	Calificación 2	Calificación 3	Puesto
$h_{111}=1$ $h_{112}=0$ $h_{113}=0$	$h_{211}=0$ $h_{212}=1$ $h_{213}=1$	$h_{311}=0$ $h_{312}=0$ $h_{313}=0$	1 pee 122
$h_{121}=1$ $h_{122}=0$ $h_{123}=0$ $h_{124}=0$ $h_{125}=0$	$h_{221}=0$ $h_{222}=1$ $h_{223}=0$ $h_{224}=0$ $h_{225}=0$	$h_{321}=0$ $h_{322}=0$ $h_{323}=1$ $h_{324}=1$ $h_{325}=1$	2 pemmm 12333
$h_{131}=0$ $h_{132}=1$	$h_{231}=1$ $h_{232}=0$	$h_{331}=0$ $h_{332}=0$	3 ep, 21
$h_{141}=0$ $h_{142}=0$ $h_{143}=1$	$h_{241}=0$ $h_{242}=0$ $h_{243}=0$	$h_{341}=1$ $h_{342}=1$ $h_{343}=0$	4 mmp 331
$h_{151}=0$ $h_{152}=1$	$h_{251}=1$ $h_{252}=0$	$h_{351}=0$ $h_{352}=0$	5 ep, 21
$h_{161}=1$ $h_{162}=1$ $h_{163}=0$	$h_{261}=0$ $h_{262}=0$ $h_{263}=0$	$h_{361}=0$ $h_{362}=0$ $h_{363}=1$	6 ppm 113
$h_{171}=0$ $h_{172}=0$	$h_{271}=1$ $h_{272}=0$	$h_{371}=0$ $h_{372}=1$	7 em, 23
$h_{181}=0$ $h_{182}=0$ $h_{183}=1$	$h_{281}=0$ $h_{282}=1$ $h_{283}=0$	$h_{381}=1$ $h_{382}=0$ $h_{383}=0$	8 mep 321

Equilibrio trabajos-horas

Después, si se quiere que cada trabajo que se empiece se termine dentro del horizonte de 8 horas (turno), se deben limitar los tiempos de inicio de cada trabajo. Un trabajo debe empezar cuando muy tarde θ_j horas antes de que termine el turno (θ_j = duración del trabajo en horas). Esto queda expresado por las siguientes restricciones:

$$Y_{ji} = 0 \quad 1 = H - \theta_j + 2, \dots, H$$

Trabajo	θ_j	$1 = H - \theta_j + 2, \dots, H$	Restricciones
1	3	7, 8	$Y_{177} = 0, Y_{188} = 0$
2	5	5, 6, 7, 8	$Y_{255} = 0, Y_{266} = 0, Y_{277} = 0, Y_{288} = 0$
3	2	8	$Y_{388} = 0$
4	3	7, 8	$Y_{477} = 0, Y_{488} = 0$
5	2	8	$Y_{588} = 0$
6	3	7, 8	$Y_{677} = 0, Y_{688} = 0$
7	2	8	$Y_{788} = 0$
8	3	7, 8	$Y_{877} = 0, Y_{888} = 0$

donde Y_{jkl} = valor binario: 1 si el trabajo se programa para iniciarse a la hora "k". 0 si no se programa. "1" = hora de inicio del trabajo "j". Interesa encontrar la hora de inicio de cada trabajo. Esto es, las Y cuyos segundos y terceros subíndices sean iguales (tiempo de reloj = tiempo de inicio). El conjunto de restricciones proporciona una parte de la solución. Esto es, los Y cuyas Y deben ser cero para que la situación de no trabajo pase al final del turno.

Equilibrio calificaciones-horas

En cualquier tiempo dado, la calificación de dominio del oficio que se usa en cada uno de los trabajos no debe exceder la disponibilidad de calificaciones. Esta restricción se expresa mediante la siguiente desigualdad para cada calificación y hora de inicio:

$$\sum_{\text{jobs}} h_{\text{skill, job, time\_into\_job}} Y_{\text{job, clock\_time, starting\_time}} \geq S_{\text{skill, clock\_hour}}$$

donde skill = calificación, job = trabajo, time into job = tiempo en el trabajo, clock time = tiempo del reloj, starting time = tiempo de inicio, clock hour = hora del reloj. Sustituyendo, la ecuación se amplía al siguiente conjunto de restricciones. (Como ya se hizo antes, se limita el alcance y el modelo a la hora de inicio de cada Y donde el segundo y tercer subíndices son iguales.)

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 1)

$$h_{111} Y_{111} + h_{121} Y_{211} + h_{131} Y_{311} + h_{141} Y_{411} + h_{151} Y_{511} + h_{161} Y_{611} + h_{171} Y_{711} + h_{181} Y_{811} \leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 1)

$$h_{211} Y_{111} + h_{221} Y_{211} + h_{231} Y_{311} + h_{241} Y_{411} + h_{251} Y_{511} + h_{261} Y_{611} + h_{271} Y_{711} + h_{281} Y_{811} \leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 1)

$$h_{311} Y_{111} + h_{321} Y_{211} + h_{331} Y_{311} + h_{341} Y_{411} + h_{351} Y_{511} + h_{361} Y_{611} + h_{371} Y_{711} + h_{381} Y_{811} \leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 2)

$$h_{111} Y_{122} + h_{121} Y_{222} + h_{131} Y_{322} + h_{141} Y_{422} + h_{151} Y_{522} + h_{161} Y_{622} + h_{171} Y_{722} + h_{181} Y_{822} \leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 2)

$$h_{211}Y_{122}+h_{221}Y_{222}+h_{231}Y_{322}+h_{241}Y_{422}+h_{251}Y_{522}+h_{261}Y_{622}+h_{271}Y_{722}+h_{281}Y_{822}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 2)

$$h_{311}Y_{122}+h_{321}Y_{222}+h_{331}Y_{322}+h_{341}Y_{422}+h_{351}Y_{522}+h_{361}Y_{622}+h_{371}Y_{722}+h_{381}Y_{822}\leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 3)

$$h_{111}Y_{133}+h_{121}Y_{233}+h_{131}Y_{333}+h_{141}Y_{433}+h_{151}Y_{533}+h_{161}Y_{633}+h_{171}Y_{733}+h_{181}Y_{833}\leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 3)

$$h_{211}Y_{133}+h_{221}Y_{233}+h_{231}Y_{333}+h_{241}Y_{433}+h_{251}Y_{533}+h_{261}Y_{633}+h_{271}Y_{733}+h_{281}Y_{833}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 3)

$$h_{311}Y_{133}+h_{321}Y_{233}+h_{331}Y_{333}+h_{341}Y_{433}+h_{351}Y_{533}+h_{361}Y_{633}+h_{371}Y_{733}+h_{381}Y_{833}\leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 4)

$$h_{111}Y_{144}+h_{121}Y_{244}+h_{131}Y_{344}+h_{141}Y_{444}+h_{151}Y_{544}+h_{161}Y_{644}+h_{171}Y_{744}+h_{181}Y_{844}\leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 4)

$$h_{211}Y_{144}+h_{221}Y_{244}+h_{231}Y_{344}+h_{241}Y_{444}+h_{251}Y_{544}+h_{261}Y_{644}+h_{271}Y_{744}+h_{281}Y_{844}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 4)

$$h_{311}Y_{144}+h_{321}Y_{244}+h_{331}Y_{344}+h_{341}Y_{444}+h_{351}Y_{544}+h_{361}Y_{644}+h_{371}Y_{744}+h_{381}Y_{844}\leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 5)

$$h_{111}Y_{155}+h_{121}Y_{255}+h_{131}Y_{355}+h_{141}Y_{455}+h_{151}Y_{555}+h_{161}Y_{655}+h_{171}Y_{755}+h_{181}Y_{855}\leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 5)

$$h_{211}Y_{155}+h_{221}Y_{255}+h_{231}Y_{355}+h_{241}Y_{455}+h_{251}Y_{555}+h_{261}Y_{655}+h_{271}Y_{755}+h_{281}Y_{855}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 5)

$$h_{311}Y_{155}+h_{321}Y_{255}+h_{331}Y_{355}+h_{341}Y_{455}+h_{351}Y_{555}+h_{361}Y_{655}+h_{371}Y_{755}+h_{381}Y_{855}\leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 6)

$$h_{111}Y_{166}+h_{121}Y_{266}+h_{131}Y_{366}+h_{141}Y_{466}+h_{151}Y_{566}+h_{161}Y_{666}+h_{171}Y_{766}+h_{181}Y_{866}\leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 6)

$$h_{211}Y_{166}+h_{221}Y_{266}+h_{231}Y_{366}+h_{241}Y_{466}+h_{251}Y_{566}+h_{261}Y_{666}+h_{271}Y_{766}+h_{281}Y_{866}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 6)

$$h_{311}Y_{166}+h_{321}Y_{266}+h_{331}Y_{366}+h_{341}Y_{466}+h_{351}Y_{566}+h_{361}Y_{666}+h_{371}Y_{766}+h_{381}Y_{866}\leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 7)

$$h_{111}Y_{177}+h_{121}Y_{277}+h_{131}Y_{377}+h_{141}Y_{477}+h_{151}Y_{577}+h_{161}Y_{677}+h_{171}Y_{777}+h_{181}Y_{877}\leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 7)

$$h_{211}Y_{177}+h_{221}Y_{277}+h_{231}Y_{377}+h_{241}Y_{477}+h_{251}Y_{577}+h_{261}Y_{677}+h_{271}Y_{777}+h_{281}Y_{877}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 7)

$$h_{311}Y_{177}+h_{321}Y_{277}+h_{331}Y_{377}+h_{341}Y_{477}+h_{351}Y_{577}+h_{361}Y_{677}+h_{371}Y_{777}+h_{381}Y_{877}\leq 1$$

(Calificaciones = 1, Tiempo del reloj = 8)

$$h_{111}Y_{188}+h_{121}Y_{288}+h_{131}Y_{388}+h_{141}Y_{488}+h_{151}Y_{588}+h_{161}Y_{688}+h_{171}Y_{788}+h_{181}Y_{888}\leq 2$$

(Calificaciones = 2, Tiempo del reloj = 8)

$$h_{211}Y_{188}+h_{221}Y_{288}+h_{231}Y_{388}+h_{241}Y_{488}+h_{251}Y_{588}+h_{261}Y_{688}+h_{271}Y_{788}+h_{281}Y_{888}\leq 1$$

(Calificaciones = 3, Tiempo del reloj = 8)

$$h_{311}Y_{188} + h_{321}Y_{288} + h_{331}Y_{388} + h_{341}Y_{488} + h_{351}Y_{588} + h_{361}Y_{688} + h_{371}Y_{788} + h_{381}Y_{888} \leq 1$$

Ecuaciones de selección

Cada trabajo puede efectuarse una vez y sólo una vez.

$$\sum_{\text{times}} Y_{jll} = 1$$

para cada trabajo. Sustituyendo, se amplía a las siguientes restricciones

$$\begin{aligned} Y_{111} + Y_{122} + Y_{133} + Y_{144} + Y_{155} + Y_{166} + Y_{177} + Y_{188} &= 1 \\ Y_{211} + Y_{222} + Y_{233} + Y_{244} + Y_{255} + Y_{266} + Y_{277} + Y_{288} &= 1 \\ Y_{311} + Y_{322} + Y_{333} + Y_{344} + Y_{355} + Y_{366} + Y_{377} + Y_{388} &= 1 \\ Y_{411} + Y_{422} + Y_{433} + Y_{444} + Y_{455} + Y_{466} + Y_{477} + Y_{488} &= 1 \\ Y_{511} + Y_{522} + Y_{533} + Y_{544} + Y_{555} + Y_{566} + Y_{577} + Y_{588} &= 1 \\ Y_{611} + Y_{622} + Y_{633} + Y_{644} + Y_{655} + Y_{666} + Y_{677} + Y_{688} &= 1 \\ Y_{711} + Y_{722} + Y_{733} + Y_{744} + Y_{755} + Y_{766} + Y_{777} + Y_{788} &= 1 \\ Y_{811} + Y_{822} + Y_{833} + Y_{844} + Y_{855} + Y_{866} + Y_{877} + Y_{888} &= 1 \end{aligned}$$

Función objetivo

El objetivo de este problema es maximizar el número de trabajos que pueden hacerse en un turno de 8 horas con los recursos disponibles. En otras palabras, se pretende maximizar el número de tiempos de inicio (que cumplen con las restricciones). Esto se expresa como:

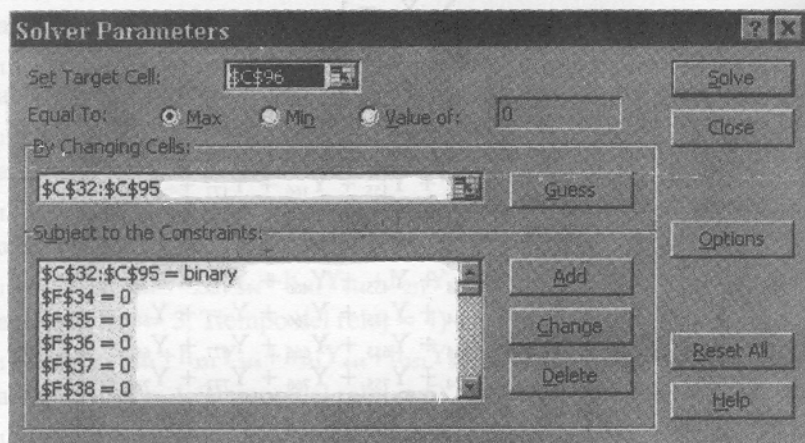
$$\text{Máx} \sum_j \sum_l Y_{jll}$$

$$\text{Maximizar } Y_{111} + Y_{122} + \dots + Y_{188} + Y_{211} + Y_{222} + \dots + Y_{888}$$

Representación del modelo y su solución con una hoja de cálculo

El modelo de programación entera en la forma en que ha sido formulado en las páginas precedentes puede ser representado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, donde se ejecuta usando la función de optimización "Solver". Oprimiendo 'tools, Solver', aparece en pantalla la ventana de diálogo correspondiente. Se completa la ventana dando la referencia de las celdas apropiadas en la hoja de cálculo (que aparecen después de la ventana de diálogo). La solución óptima es la columna de valores a la derecha de la columna de Y_{jll} . Cada expresión que se usa como restricción se agrupa en las tres columnas de restricciones de equilibrio trabajos-horas, restricciones de

equilibrio de calificaciones-horas y ecuaciones de selección. Cada celda en estas tres columnas es referida al área de la ventana de diálogo denominada "Subject to the Constraints:" donde se debe especificar en forma apropiada la igualdad, desigualdad o restricción binaria requerida por el modelo (ver el modelo siguiente).



Trabajo	1	2	3	4	5	6	7	8	
Calificaciones/ horas	122	12333	21	331	21	113	23	321	
Theta	3	5	2	3	2	3	2	3	
Calificaciones	P	E	M						
	1	2	3						
Horizonte	8								
Horas	1	2	3	4	5	6	7	8	
Trabajo	h111	1	h211	0	h311	0			
Descripción	h112	0	h212	1	h312	0			
	h113	0	h213	1	h313	0			
	h121	1	h221	0	h321	0			
	h122	0	h222	1	h322	0			
	h123	0	h223	0	h323	1			
	h124	0	h224	0	h324	1			
	h125	0	h225	0	h325	1			
	h131	0	h231	1	h331	0			
	h132	1	h232	0	h332	0			

	h141	0	h241	0	h341	1			
	h142	0	h242	0	h342	1			
	h143	1	h243	0	h343	0			
	h151	0	h251	1	h351	0			
	h152	1	h252	0	h352	0			
	h161	1	h261	0	h361	0			
	h162	1	h262	0	h362	0			
	h163	0	h263	0	h363	1			
	h171	0	h271	1	h371	0			
	h172	0	h272	0	h372	1			
	h173	0	h273	0	h373	1			
	h181	0	h281	1	h381	0			
	h182	1	h282	0	h382	0			
Y sub jill	Y111	0		Restricc. equilibrio		Restricc. equilibrio		Ecuaciones	
	Y122	0		trabajo-hora		calificación-hora		de selección	
	Y133	0		Y177	0	sk1cl1	0	1	1
	Y144	0		Y188	0	sk2cl1	0	2	1
	Y155	0		Y255	0	sk3cl1	0	3	1
	Y166	1		Y266	0	sk1cl2	0	4	1
	Y177	0		Y277	0	sk2cl2	4E-07	5	1
	Y188	0		Y288	0	sk3cl2	0	6	1
	Y111	0		Y388	0	sk1cl3	0	7	1
	Y222	0		Y477	0	sk2cl3	0	8	1
	Y233	0		Y488	0	sk3cl3	0		
	Y244	1		Y588	0	sk1cl4	1		
	Y255	0		Y677	0	sk2cl4	1		
	Y266	0		Y688	0	sk3cl4	0		
	Y277	0		Y788	0	sk1cl5	0		
	Y288	0		Y877	0	sk2cl5	1		
	Y311	0		Y888	0	sk3cl5	0		
	Y322	0				sk1cl6	2		
	Y333	0				sk2cl6	1		
	Y344	1				sk3cl6	1		
	Y355	4E-07				sk1cl7	0		
	Y366	0				sk2cl7	1		
	Y377	0				sk3cl7	0		
	Y388	0				sk1cl8	0		
	Y411	0				sk2cl8	0		

	Y422	0				sk3cl8	0		
	Y433	0							
	Y444	0							
	Y455	0							

6.6 MANTENIMIENTO CON PARO DE LA PLANTA

El mantenimiento con paro de la planta es un mantenimiento periódico en el que las plantas se paran para permitir inspecciones, reparaciones, reemplazos y reparaciones generales que sólo pueden efectuarse cuando los activos (instalaciones de la planta) se dejan fuera de servicio. Durante el mantenimiento con paro de la planta, se realizarán los siguientes tipos de trabajo:

1. Trabajo sobre un equipo que no puede hacerse a menos que se pare toda la planta.
2. Trabajo que puede hacerse mientras el equipo está en operación, pero que requiere un período de mantenimiento largo y un gran número de personal de mantenimiento.
3. Trabajo para corregir defectos que se señalaron durante la operación pero que no pudieron ser reparados.

El concepto de suspensión de operaciones de la planta se originó en las industrias de procesos y es un acontecimiento importante en la industria petroquímica.

El objetivo general del mantenimiento con paro de la planta es hacer que todo el equipo opere de manera correcta y segura a fin de aumentar al máximo la capacidad de producción. De manera específica, los siguientes son los objetivos del mantenimiento con paro de la planta:

1. Expandir o modificar los activos para obtener los ingresos proyectados mediante el incremento de la capacidad de producción, reducción al mínimo del costo de operación y reducción del tiempo muerto.
2. Minimizar los riesgos para los empleados en el área inmediata que rodea al equipo de operación.
3. Alcanzar las cifras del presupuesto y asegurar que se alcance la vida económica pronosticada de los activos.
4. Modificar el equipo de operación para cumplir los requisitos legales u otra regulación gubernamental.

El mantenimiento con paro de la planta es un evento que exige todos los elementos de un sistema de mantenimiento eficaz: organización, planeación, programación, informes, costos y mejora continua. En las siguientes secciones se describen brevemente estos elementos.

6.6.1 Planeación del mantenimiento con paro de la planta

La planeación del mantenimiento con paro de la planta deberá comenzar de 6 a 8 meses antes de iniciar el trabajo real. El proceso de planeación se deriva de los objetivos planteados previamente y, para cada objetivo, se formula un objetivo operativo correspondiente, que se acopla con un conjunto de tareas de mantenimiento para lograr los objetivos del mantenimiento con paro de la planta.

El primer objetivo se logra a través de los siguientes dos objetivos de operaciones:

- Evitar la falta de disponibilidad de producción.
- Reducir el tiempo muerto.

Estos objetivos de operaciones se alcanzan mediante las siguientes tareas:

1. Eliminar los cuellos de botella de los equipos y de los sistemas para asegurar la cantidad y la calidad de los productos.
2. Reemplazar los componentes y los materiales que puedan ocasionar un rendimiento no deseado. En las plantas petroquímicas, la acción correspondiente sería reemplazar o rellenar los catalizadores y químicos.
3. Renovar o modificar hasta una condición permanente los estándares, el equipo y los sistemas que están en servicio temporal.
4. Efectuar una reparación general o reemplazar las piezas de equipo y maquinaria específicos cuya vida mecánica puede predecirse, especialmente aquellas máquinas cuya reparación general sólo puede efectuarse bajo la supervisión estrecha de un especialista.

El segundo objetivo se relaciona con el riesgo y la seguridad, que pueden alcanzarse mediante el siguiente objetivo de operaciones:

- Preservación y mejora de la seguridad y la contaminación.

Este objetivo de operaciones se alcanza mediante las siguientes tareas:

1. Asegurar que los sistemas de paro de emergencia o entrecierre de seguridad estén en su mejor condición.
2. Asegurar que los sistemas de fallas y alivio, especialmente aquellos que restablecen las válvulas de alivio de presión, estén en la mejor condición de operación.
3. Inspeccionar y probar los dispositivos y el equipo para el control de la contaminación y la seguridad.

El tercer objetivo se centra en el logro de las cifras del presupuesto y de costos y puede alcanzarse mediante el siguiente objetivo de operaciones:

- Predicción de mantenimiento futuro y de la falla inminente de componentes o deterioro dependiente del tiempo.

Estos objetivos de operación pueden alcanzarse mediante las siguientes tareas:

1. Inspeccionar el equipo especificado y recopilar datos técnicos para predecir la falla inminente de componentes.
2. Desarrollar un programa eficaz de mantenimiento basado en las condiciones, y emplear técnicas que pronostiquen las condiciones actuales del equipo.
3. Utilizar las últimas técnicas analíticas de predicción, como el análisis de tendencias y el análisis de series de tiempo.

El cuarto objetivo tiene que ver con el cumplimiento de los requisitos legales, como la regulación ambiental y las normas internacionales de calidad (por ejemplo, ISO 9000 e ISO 14000). Este objetivo puede alcanzarse mediante el siguiente objetivo de operaciones:

- Vincular los procedimientos y prácticas de mantenimiento con los requisitos legales, la regulación ambiental y las normas de calidad.

Este objetivo de operaciones puede alcanzarse mediante las siguientes tareas:

1. Revisar los últimos requisitos legales, la nueva regulación ambiental y los planes de la compañía para adoptar nuevas normas de aseguramiento de calidad.
2. Identificar el equipo que viola las normas durante su operación.

TABLA 6.4 Guías para la planeación del mantenimiento con paro de la planta.

<i>Equipo estacionario</i>		
Categoría	Elemento de trabajo	Volumen de trabajo
A, D	Inspección y limpieza de reactores, recipientes y columnas.	Eliminación del 100% de los cuellos de botella de los equipos, 100% del equipo en búsqueda de depósitos de capas de óxido, corrosión y otros defectos mecánicos anticipados (3).
A	Inspección y limpieza de tanques de almacenamiento.	Sólo tanques seleccionados que requieran trabajos dentro de los tanques.
A, D	Inspección y limpieza de intercambiadores de calor.	100% del equipo para eliminación de cuellos de botella, el 100% o una selección de calderas, precalentadores y enfriadores en búsqueda de depósitos de capas de óxido, corrosión y otros defectos mecánicos anticipados, excepto el equipo con refacciones (1)(3).
B	Inspección del sistema de alivio.	100% del equipo que muestre fallas de funcionamiento, equipo seleccionado con válvulas de seguridad extremadamente importantes. Equipo seleccionado de válvulas de respiro y otros sistemas de alivio de presión (1).
A, D	Inspección, limpieza y reparación de las tuberías, válvulas y accesorios.	100% de la tubería bajo servicios temporales, 100% de la tubería en búsqueda de defectos en válvulas, depósitos de capas de óxido, corrosión y otros defectos mecánicos anticipados, tubería seleccionada, materiales especiales y recubrimientos aplicados (3).
A, D	Inspección y limpieza del equipo unitario.	El 100% o una selección de equipo unitario en búsqueda de depósitos de capas de óxido, corrosión y otros defectos mecánicos anticipados, excepto el equipo con refacciones (1)(2)(3).
<i>Equipo móvil</i>		
Categoría	Elemento de trabajo	Volumen de trabajo
A, D	Inspección de compresores centrífugos.	100% de los compresores centrífugos, compresores de aire a baja presión y turbinas para reparaciones generales completas o parciales, excepto el equipo con refacciones (1)(2)(3).
A	Inspección de compresores reciprocantes.	100% de los compresores reciprocantes sin refacciones, o equipo seleccionado con refacciones, para reparaciones generales completas o parciales considerando el tiempo de vida de las piezas (1)(2)(3).
A, D	Inspección de bombas.	Bombas seleccionadas, especiales y manufacturadas, para reparaciones generales completas o parciales (1)(2)(3).

TABLA 6.5 Requerimientos de trabajo y fuerza laboral.

	Fuerza laboral			Costo (RS)		
	Planta	Contratista	Total	Personal de fuerza laboral	Material	Total
1. Mecánico	23	155	178	1 250 000	550 000	1 800 000
2. Instrumentista/ analizador	9	19	28	385 000	43 000	428 000
3. Eléctrico	6	12	18	127 320	28 000	155 320
4. Computación	2	—	2	—	—	—
Gran total	40	186	226	1 762 320	621 000	2 383 320

RS = Riyal Saudita.

3.75 RS = 1 (dólar norteamericano).

3. Desarrollar e implantar modificaciones al equipo y procedimientos que faciliten el cumplimiento de los requisitos, las regulaciones y las normas de calidad.

Todos los conjuntos de tareas anteriores determinarán el volumen de trabajo de mantenimiento durante el período de mantenimiento con paro de la planta. Sin embargo, deberá tenerse cuidado para determinar el trabajo esencial a fin de no realizar gastos excesivos durante este período.

La tabla 6.4 proporciona un ejemplo del tipo de trabajo estimado para una planta petroquímica para equipo estacionario y móvil. Esta tabla se utiliza para estimar la fuerza laboral requerida y el costo. En la tabla 6.5 se muestra un ejemplo de dicha estimación.

6.6.2 Programa del mantenimiento con paro de la planta

El programa para el mantenimiento con paro de la planta deberá tomar en cuenta lo siguiente:

1. Limitaciones legales o contractuales.
2. Programa de operaciones.
3. Naturaleza del proceso.
4. Suficiente tiempo de entrega para preparar un plan general, solicitar los materiales y asegurar contar con el personal adecuado.
5. Programa de operaciones de otras industrias relacionadas.

A continuación, se debe desarrollar el programa global de mantenimiento con paro de la planta. Con fines de planeación, monitoreo y control se debe preparar un programa detallado para grandes trabajos utilizando el análisis de la ruta crítica. El resultado debe ser una gráfica de barras para cada tamaño de trabajo.

Un programa de dos turnos por día debe extraerse a partir del programa maestro. Por cada turno, deberá sostenerse una reunión para revisar el avance y planear acciones apropiadas, en caso de que el plan diario se encuentre atrasado.

6.6.3 Informe del mantenimiento con paro de la planta

Los informes del mantenimiento con paro de la planta constan de los siguientes:

1. Un informe del avance diario, empleado principalmente para monitoreo y control.
2. Un informe del mantenimiento con paro de la planta que detalle todos los trabajos realizados en diferentes áreas, y que proporcione hechos y cifras del mantenimiento.
3. Informe de costos del mantenimiento con paro de la planta, que constata del costo de materiales, costo de los empleados y servicios contratados.

Los informes de las partidas 2 y 3 se emplean con fines de mejoras.

RESUMEN

En este capítulo se estudiaron la planeación y la programación del mantenimiento. El proceso de planeación es un requisito previo para la programación. Se explicaron los elementos de una planeación eficaz, seguido de una descripción de la programación. Se presentaron varias técnicas para la programación. Éstas incluyen el CPM, el PERT y la programación entera. El CPM es útil para la programación de proyectos o cuando el trabajo de mantenimiento es grande y tiene muchas actividades. La programación entera es útil para generar un programa a largo plazo, como los que se preparan para las unidades generadoras de electricidad en una compañía grande. Se presentó un método sistemático para el mantenimiento con paro de la planta, junto con algunos ejemplos específicos de tareas que deben realizarse en este tipo de mantenimiento.

APÉNDICE

Función objetivo

Maximizar

$$\begin{aligned}
 &Y_{111} + Y_{122} + Y_{133} + Y_{144} + Y_{155} + Y_{166} + Y_{211} + Y_{222} + Y_{233} \\
 &\quad + Y_{244} + Y_{311} + Y_{322} + Y_{333} + Y_{344} + Y_{355} + Y_{366} + Y_{377} + Y_{411} \\
 &\quad + Y_{422} + Y_{433} + Y_{444} + Y_{455} + Y_{466} + Y_{511} + Y_{522} + Y_{533} + Y_{544} \\
 &\quad + Y_{555} + Y_{566} + Y_{577} + Y_{611} + Y_{622} + Y_{633} + Y_{644} + Y_{655} \\
 &\quad + Y_{666} + Y_{711} + Y_{722} + Y_{733} + Y_{744} + Y_{755} + Y_{766} + Y_{777} \\
 &\quad + Y_{822} + Y_{811} + Y_{822} + Y_{833} + Y_{844} + Y_{855} + Y_{866}
 \end{aligned}$$

Sujeto a

Ecuaciones de selección

$$\begin{aligned}
 &Y_{111} + Y_{122} + Y_{133} + Y_{144} + Y_{155} + Y_{166} = 1 \\
 &\quad \quad \quad + Y_{211} + Y_{222} + Y_{233} + Y_{244} = 1 \\
 &Y_{311} + Y_{322} + Y_{333} + Y_{344} + Y_{355} + Y_{366} + Y_{377} = 1 \\
 &\quad \quad \quad + Y_{411} + Y_{422} + Y_{433} + Y_{444} + Y_{455} + Y_{466} = 1 \\
 &Y_{511} + Y_{522} + Y_{533} + Y_{544} + Y_{555} + Y_{566} + Y_{577} = 1 \\
 &\quad \quad \quad + Y_{611} + Y_{622} + Y_{633} + Y_{644} + Y_{655} + Y_{666} = 1
 \end{aligned}$$

Restricciones del balance de destrezas-horas

$$\begin{aligned}
 &Y_{711} + Y_{722} + Y_{733} + Y_{744} + Y_{755} + Y_{766} + Y_{777} \leq 1 \\
 &Y_{111} + Y_{811} + Y_{822} + Y_{833} + Y_{844} + Y_{855} + Y_{866} \leq 1 \\
 &\quad \quad \quad Y_{211} + Y_{611} \leq 2 \\
 &\quad \quad \quad Y_{122} + Y_{222} + Y_{311} + Y_{511} + Y_{611} + Y_{622} \leq 2 \\
 &Y_{133} + Y_{233} + Y_{322} + Y_{411} = Y_{522} + Y_{622} + Y_{633} + Y_{811} \leq 2 \\
 &Y_{144} + Y_{244} + Y_{333} + Y_{422} = Y_{533} + Y_{633} + Y_{644} + Y_{822} \leq 2 \\
 &\quad \quad \quad Y_{155} + Y_{344} + Y_{433} + Y_{544} = Y_{644} + Y_{655} + Y_{833} \leq 2 \\
 &Y_{166} + Y_{355} + Y_{444} + Y_{555} = Y_{655} + Y_{666} + Y_{844} \leq 2 \\
 &\quad \quad \quad Y_{366} + Y_{455} + Y_{566} + Y_{666} + Y_{855} \leq 2 \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad Y_{377} + Y_{466} + Y_{577} + Y_{866} \leq 2 \\
 &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad Y_{311} + Y_{511} + Y_{711} \leq 2 \\
 &\quad \quad \quad Y_{111} + Y_{211} + Y_{322} + Y_{522} + Y_{722} + Y_{811} \leq 1 \\
 &Y_{111} + Y_{122} + Y_{222} + Y_{333} = Y_{533} + Y_{733} + Y_{822} \leq 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y_{122} + Y_{133} + Y_{233} + Y_{344} &= Y_{544} + Y_{744} + Y_{833} \leq 1 \\
Y_{133} + Y_{144} + Y_{244} + Y_{355} &= Y_{555} + Y_{755} + Y_{844} \leq 1 \\
Y_{144} + Y_{155} + Y_{366} + Y_{566} &= Y_{766} + Y_{855} \leq 1 \\
Y_{155} + Y_{166} + Y_{377} + Y_{577} + Y_{777} + Y_{866} &\leq 1 \\
Y_{166} &\leq 1 \\
Y_{411} + Y_{811} &\leq 1 \\
Y_{411} + Y_{422} + Y_{711} + Y_{822} &\leq 1 \\
Y_{211} + Y_{422} + Y_{433} + Y_{611} + Y_{722} + Y_{833} &\leq 1 \\
Y_{211} + Y_{222} + Y_{433} + Y_{444} + Y_{622} + Y_{733} + Y_{844} &\leq 1 \\
Y_{211} + Y_{222} + Y_{233} + Y_{444} + Y_{455} + Y_{633} + Y_{744} + Y_{855} &\leq 1 \\
Y_{222} + Y_{233} + Y_{244} + Y_{455} + Y_{466} + Y_{644} + Y_{755} + Y_{866} &\leq 1 \\
Y_{233} + Y_{244} + Y_{466} + Y_{655} + Y_{766} &\leq 1 \\
Y_{244} + Y_{666} + Y_{777} &\leq 1
\end{aligned}$$

en donde Y_{ij} son variables cero-uno.

EJERCICIOS

- 6.1 ¿Cuáles son los objetivos de la planeación y la programación del mantenimiento?
- 6.2 Señale los elementos de un procedimiento eficaz para la planeación.
- 6.3 Mencione cuatro herramientas y métodos que podría utilizar el planificador para una planeación eficaz.
- 6.4 ¿Cuáles son los elementos que debe tomar en consideración un programa confiable?
- 6.5 ¿Cuáles son los elementos de una programación acertada?
- 6.6 Mencione tres técnicas que puede utilizar para optimizar el proceso de programación del mantenimiento.
- 6.7 Mencione tres beneficios del método de la ruta crítica (CPM).
- 6.8 Mencione las deficiencias del CPM.
- 6.9 Dados los elementos de un trabajo importante de mantenimiento en la siguiente tabla:

Número	Trabajo	Tiempo normal	Tiempo reducido	Costo normal	Costo reducido	Trabajos que preceden al mantenimiento	Número de trabajadores necesarios para el mantenimiento
1	A	5	4	10	15	0	2
2	B	7	5	15	20	0	3
3	C	8	5	20	25	B	3
4	D	5	4	15	25	C, A	2
5	E	10	6	40	50	0	5
6	F	7	5	15	25	E, D	3
7	G	12	8	30	40	B	5
8	H	5	4	10	20	F, G	4

- a. Desarrolle el diagrama de red para el trabajo.
 - b. Programe los trabajos de manera que el nivel de personal sea tan uniforme como sea posible.
 - c. Presente el programa en una gráfica de Gantt.
- 6.10** Extienda el modelo de la programación entera incorporando la disponibilidad de equipo especial. Demuestre el modelo extendido mediante un ejemplo.

REFERENCIAS

- [1] S. O. Duffuaa and K. S. Al-Sultan, "A Mathematical Model for Effective Maintenance Planning and Scheduling," *Proceedings of the Second Scientific Symposium on Maintenance Planning and Operations, Riyadh*, pp. 184-193.
- [2] S. O. Duffuaa and K. S. Al-Sultan, "Mathematical Programming Approaches for the Management of Maintenance Planning and Scheduling," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp 163-176.
- [3] S. O. Duffuaa and K. S. Al-Sultan, "A Stochastic Programming Model for Scheduling Maintenance Personnel," Working Paper, Department of Systems Engineering, College of Computer Sciences and Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia.
- [4] E. H. Hartman, "Maintenance Productivity: Why It Is So Low and How to Improve It," in *Maintenance Management* (E. Hartman, Ed.), Industrial Engineering and Management Press, Atlanta.

- [5] J. J. Moder, C.C. Phillips and E. W. Davis, *Project Management with CPM, PERT, and Precedence Diagramming*, 3rd Ed., Van Nostrand-Reinhold, New York.
- [6] S. M. Roberts and L. F. Escudero, "Minimum Problem-Size Formulation for the Scheduling of Plant Maintenance Personnel," *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 39, No. 3, pp. 345-362.
- [7] H. Taha, *Operations Research: An Introduction*, 5th Ed., Macmillan, New York.
- [8] B. M. Worrall and B. Mert, "Application of Dynamic Scheduling Rules in Maintenance Planning and Scheduling," *Proceedings of the Fifth International Conference on Production Research*, pp. 260-264.

7

CONTROL DE LOS MATERIALES DEL MANTENIMIENTO

7.1 INTRODUCCIÓN

Los gerentes y los ingenieros de mantenimiento se ocupan de conservar las plantas y la maquinaria en condiciones de operación satisfactorias. Para minimizar las reparaciones de emergencia se realiza un mantenimiento preventivo del equipo. La ocurrencia de reparaciones no planeadas puede reducirse investigando la causa de la descompostura y modificando el programa del mantenimiento preventivo. Para minimizar el tiempo muerto, es esencial que estén disponibles el personal y los materiales y refacciones necesarios.

Los gerentes no sólo tienen que minimizar el tiempo muerto sino también controlar de manera eficaz los costos de mantenimiento. Los costos totales de mantenimiento generalmente comprenden: 1) el costo de la mano de obra de mantenimiento, 2) el costo de los materiales y refacciones requeridos, y 3) el costo del tiempo muerto en producción cuando ocurren descomposturas. El costo 2 por lo común se considera de la misma magnitud que el costo 1.

Un costo crítico del mantenimiento es la inversión en refacciones y materiales. Si la inversión se vuelve excesiva, los resultados son elevados costos de capital y altos costos de mantenimiento. Por otra parte, si no se cuenta con las refacciones y materiales necesarios para la reparación y servicio del equipo, el costo del tiempo muerto se incrementará enormemente. Se requieren esfuerzos para equilibrar el costo de mantener en existencia materiales y refacciones de mantenimiento y el costo del tiempo muerto a fin de lograr un sistema eficaz de control de los materiales de mantenimiento.

Este capítulo describe los enfoques para el desarrollo de un sistema de control de materiales de mantenimiento que proporcione el nivel requerido de mantenimiento en una forma económica. En la sección 7.2 se presenta una breve descripción de los componentes del almacén de mantenimiento. Los principales componentes del costo de materiales se dan en la sección 7.3. En la sección 7.4 se examinan los elementos del procedimiento para el control del almacén de mantenimiento. En la sección 7.5 se proporcionan políticas eficaces para pedidos, seguidas, en la sección 7.6, de políticas para los pedidos de refacciones con base en un análisis de características de las fallas. La sección 7.7 describe los procedimientos para la clasificación de refacciones con base en un análisis de su grado crítico.

7.2 COMPONENTES DEL ALMACÉN DE MANTENIMIENTO

Un almacén de mantenimiento típico, entre otras categorías de almacenes, almacena refacciones, existencias para un mantenimiento normal y herramientas. Éstas se examinan en las siguientes secciones.

7.2.1 Refacciones

Las refacciones se almacenan a fin de minimizar el tiempo muerto del equipo. Las refacciones pueden subdividirse en las siguientes categorías:

1. Piezas relativamente caras.
2. Piezas especializadas para emplearse en un número limitado de máquinas.
3. Refacciones que tienen tiempos de entrega mayores que la demanda normal.
4. Refacciones que tienen una rotación lenta.
5. Refacciones críticas, cuya falta de disponibilidad podría causar un costoso tiempo muerto o tener un efecto negativo en la seguridad.

Las refacciones se almacenan sólo cuando los riesgos de no contar con ellas sobrepasan el costo total de tenerlas en existencia durante un período predicho. Se presenta posteriormente en este capítulo, un método para calcular este intervalo y la cantidad.

7.2.2 Existencias del mantenimiento normal

Esta categoría comprende los elementos que no tienen un uso especializado, pero que tienen un requerimiento definido y una rotación corta.

Ejemplos de esta categoría son los rodamientos que se utilizan comúnmente, tuberías y accesorios, cables eléctricos, interruptores, madera, madera contrachapada, pernos, varillas para soldar, etc. Las decisiones acerca de qué cantidad debe tenerse en existencia y cuándo ordenar en el caso de las existencias de mantenimiento normal, pueden manejarse de una manera más rutinaria que en el caso de las refacciones.

7.2.3 Herramientas

Esta categoría generalmente comprende herramientas de propósito especial, que se entregan en préstamo siempre que se necesitan.

7.3 COSTOS DE LOS MATERIALES DE MANTENIMIENTO

Para ejercer un control eficaz de costos sobre las operaciones de mantenimiento, se deben llevar registros con relación al costo del artículo, el costo de tener el artículo en inventario y el costo del artículo en el momento de su salida.

7.3.1 Costo del artículo

El costo del artículo comprende la suma pagada al proveedor, incluyendo el flete.

7.3.2 Costo de tener en inventario el artículo

El costo de tener en inventario el artículo a veces se estima como un porcentaje del valor en dólares, expresado como una fracción decimal. Normalmente, este porcentaje varía entre 15% y 20% del costo del artículo por año.

7.3.3 Costo del artículo en el momento de su salida

El costo de un artículo en el momento de su salida puede estimarse considerando los siguientes costos:

1. El costo del espacio e instalaciones auxiliares por metro cuadrado de áreas de almacenamiento.
2. Costos del capital invertido, que se considera que cae entre el interés del banco y el rendimiento esperado si se hiciera una inversión equivalente.

3. Costo de desperdicio y deterioro causado por el almacenamiento y hurto arbitrario, normalmente el 10% para la mayoría de los artículos en inventario.
4. Costo debido a la inflación, estimado en 1% mensual del costo de compra mientras el artículo está en inventario.

El costo de un artículo en el momento de su salida puede estimarse utilizando la siguiente fórmula:

$$I = I_C + I_F + (I_F - C_I) + k_1 TC_I + k_2 C_I \quad (7.1)$$

en donde

I = Costo del artículo en el momento de su salida

I_C = Costo de tenerlo en inventario

C_I = Costo del artículo (valor actual)

I_F = Costo del artículo (valor futuro)

k_1 = Tasa de inflación mensual mientras el artículo está en existencia

k_2 = Porcentaje del costo concedido por desperdicio, deterioro, etc.

T = Tiempo, en meses, que el artículo estuvo en existencia

El I_C puede estimarse como sigue:

$$I_C = \frac{F_s \times b}{N \times K}$$

en donde

F_s = Costo del área en piso por metro cuadrado

b = Tamaño del contenedor, en metros cuadrados

N = Número promedio de artículos almacenados en el contenedor

K = Recíproco de la fracción del año en que el artículo está en existencia

El I_F puede calcularse como

$$I_F = C_I (1+i)^n \quad (7.2)$$

en donde

i = Tasa de interés

n = Número de períodos de interés

Ejemplo 7.1

Tamaño del recipiente	0.25 m ²
Número de artículos por recipiente	100
Costo del área en piso	\$60/m ²
Precio del artículo	\$5.40
Tasa de inflación	8% mensual
Tiempo promedio en inventario	4 meses

$$IC = \frac{0.25 \times 60}{100 \times 3} = \$0.05$$

$$IF = 5.40(1 + 0.08)^4 = \$7.35$$

$$I = 0.05 + 7.35 + (7.35 - 5.40) + 0.08 \times 4 \times 5.40 + 0 = \$11.03$$

7.4 PROCEDIMIENTO PARA EL CONTROL DEL ALMACÉN DE MANTENIMIENTO

Algunos de los elementos importantes del control sistemático de los almacenes de mantenimiento son: 1) la requisición, 2) el registro del inventario, 3) los artículos por almacenar, 4) los puntos de reorden, y 5) las cantidades de la orden.

7.4.1 Requisición

Los procedimientos de la requisición son un paso esencial para retirar material de un almacén de mantenimiento. Entre otros usos, estos procedimientos forman la base sistemática para la contabilidad de costos y el control de inventarios.

7.4.2 Control de inventarios

La mayoría de los procedimientos de control hacen uso de registros continuos de inventario en los que se agregan las recepciones y se restan los retiros. Esto ayuda a establecer la tasa de demanda de los artículos.

7.4.3 Artículos para almacenar

Es una práctica usual que las piezas y los materiales para el mantenimiento de rutina siempre deberán estar disponibles. Las piezas para las reparaciones generales y el mantenimiento no rutinario deberán ser controlables, de manera que se haga el mejor uso de la inversión de capital en refacciones. La clasificación del inventario de la manera menos costosa puede lograrse con el análisis ABC.

7.4.4 Análisis ABC

El análisis ABC se basa en la ley de Pareto, que establece que los artículos significativos de un grupo generalmente constituyen sólo una pequeña porción del número total de artículos de dicho grupo. Aplicando esta ley a la administración de inventarios, se podrá ver que una porción importante del valor de inventario (es decir, del 70% al 80%) normalmente comprenderá casi el 10% del número de artículos que se tienen en existencia. Esto se demuestra en la figura 7.1.

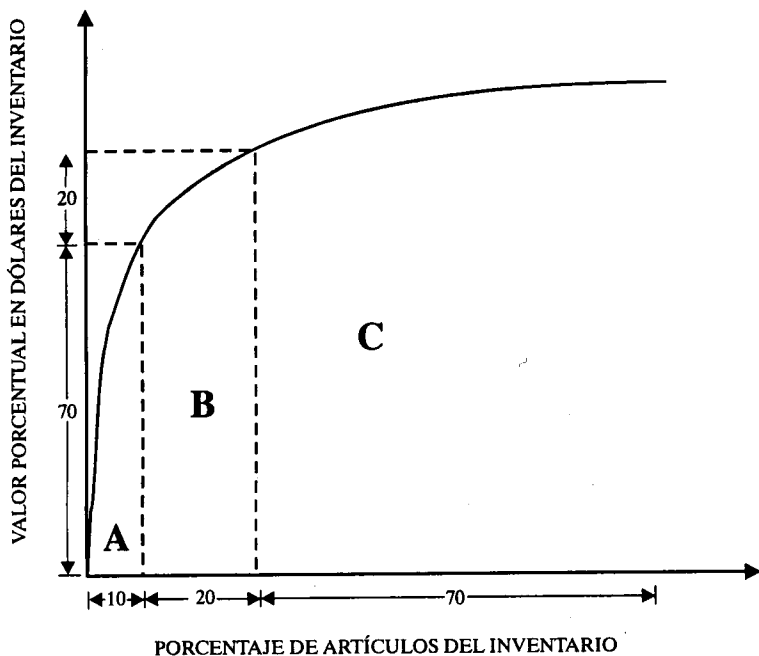


Figura 7.1 Diagrama de Pareto.

Un procedimiento paso a paso para construir un diagrama de Pareto es como sigue:

1. Seleccione un período apropiado de tiempo, generalmente un año, para la administración de inventarios.
2. Calcule el costo de cada artículo usado en el período seleccionado como porcentaje del costo total de los artículos del inventario.
3. Ordene los artículos en orden descendente de porcentaje del costo de dicho artículo con relación al costo del inventario total, comenzando con los artículos que más contribuyen al costo.
4. Elabore una gráfica con el porcentaje de artículos usados en el eje X y el porcentaje de su costo en el eje Y.
5. Los artículos de la clase A son aproximadamente del 10% al 20% de los artículos totales, pero representan del 60% al 80% del costo total.
6. Los artículos de la clase B son aproximadamente del 20% al 30% de los artículos totales y representan del 20% al 30% del costo total.
7. Los artículos de la clase C son aproximadamente del 60% al 80% de los artículos totales, pero representan del 10% al 20% del costo total.

Se recomienda que los artículos de clase A, que tienen una elevada inversión de capital, se soliciten con base en los cálculos de las cantidades más económicas del pedido o tamaños de lote económico. Los artículos de esta clase requieren un control estrecho. Teniendo en mente el alto costo de estos artículos, generalmente se mantiene una cantidad mínima de existencias de seguridad.

Los artículos que caen en la clase B pueden solicitarse en cantidades más grandes que los artículos de la clase A y, de manera similar, se pueden mantener existencias de seguridad más grandes.

Los artículos que pertenecen a la clase C ascienden a un 10% de la inversión del inventario total. Éstos requieren un control mínimo y se pueden mantener existencias de seguridad hasta para 6 meses.

7.5 SISTEMAS DE INVENTARIOS

Una forma práctica de establecer un sistema de inventarios consiste en dar seguimiento a cada artículo que se entrega y colocar un pedido por existencias adicionales cuando los inventarios alcanzan un nivel predeterminado. La orden se fija en un tamaño que ha sido predeterminado. La figura 7.2

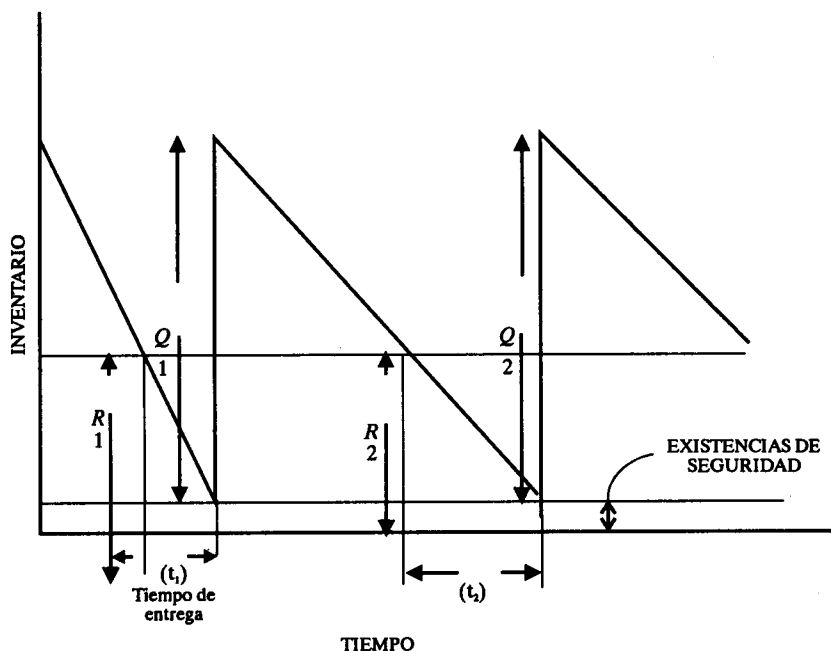


Figura 7.2 Sistema de inventarios Q/R .

ilustra dicho sistema. En este sistema, la demanda es conocida y es constante. El inventario se va agotando uniformemente hasta que se alcanza un nivel R_1 (nivel de reorden). En R_1 , se coloca un pedido por una cantidad Q_1 . Se supone que estas cantidades llegarán después de un tiempo fijo y conocido, que generalmente se denomina tiempo de entrega. El patrón de demanda se repite entonces y, en el punto R_2 , se ordena la cantidad Q_2 . En tal sistema, $R_1 = R_2$ y $Q_1 = Q_2$. Este tipo de sistema es bastante adecuado para la mayoría de los artículos clase B y todos los artículos de clase C del inventario.

7.5.1 Tamaño de lote económico

El principal objetivo en el control de inventarios es encontrar el costo mínimo de operación de un sistema de inventarios y minimizar el costo global, que se denomina cantidad económica del pedido, o tamaño de lote económico. Todos los costos pertinentes que se consideran significativos se incorporan en el sistema de planeación. Éstos incluyen el costo del artículo, los costos de abastecimiento y los costos de mantener inventario. Se aplica la siguiente relación:

$$\text{Costo total anual} = \text{Costo del artículo} + \text{Costos de abastecimiento} \\ + \text{Costos de mantener inventario}$$

Cada uno de los costos de la ecuación puede establecerse en términos de la cantidad del pedido y el punto de reorden para una situación de inventario dada. Un modelo sencillo en el que se consideran dos componentes importantes del costo—costos de abastecimiento y costos de mantener el inventario— se ilustran en la figura 7.3. Debido a que el costo del artículo se considera constante, éste no se incluye en dicha ilustración.

Los costos anuales de mantener el inventario aumentan con un valor mayor de la cantidad del pedido Q . Los valores grandes de Q dan por resultado niveles grandes de inventario y, en consecuencia, costos grandes de mantener el inventario. Asimismo, cuando Q aumenta, se deben hacer menos pedidos durante el año, lo que da por resultado menores costos de abastecimiento. Los costos totales son la suma de esos dos costos. Esto se muestra como una curva en la figura 7.3. La cantidad óptima del pedido es el punto en el que los costos anuales son un mínimo. Este punto se indica mediante Q^* en la figura 7.3.

Se puede formular un modelo para determinar Q^* con base en las suposiciones que se dan al inicio de la página siguiente.

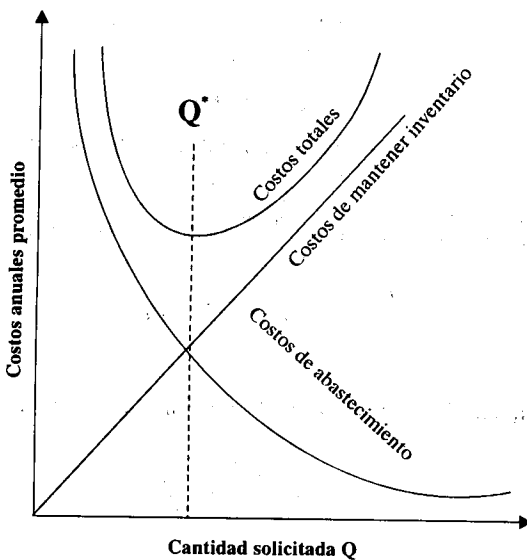


Figura 7.3 Modelos de costos de inventarios.

1. La demanda es uniforme y conocida.
2. El costo del artículo no varía con el tamaño del pedido; es decir, no se aplica descuento para pedidos grandes.
3. Los pedidos completos se entregan en el mismo tiempo.
4. El tiempo de entrega es conocido, de manera que se puede programar un pedido para que llegue cuando se agote el inventario.
5. El costo de hacer y recibir un pedido es el mismo independientemente del tamaño del pedido.
6. El costo de mantener inventario es una función lineal del número de artículos en existencia.

El modelo minimiza la siguiente función de costos:

$$TC = CD + S \frac{D}{Q} + I_c \frac{Q}{2} \quad (7.3)$$

en donde

TC = Costo total anual

C = Costo del artículo

D = Demanda anual

S = Costo de ordenar

Q = Cantidad ordenada

I_c = Costo de mantener el inventario

Obteniendo las derivadas parciales de TC con respecto a Q ,

$$\frac{\partial TC}{\partial Q} = 0 + (-SDQ^{-2}) + \frac{I_c}{2} \quad (7.4)$$

Haciendo la primera derivada igual a 0 y resolviendo para Q , tenemos

$$0 = \frac{-SD}{Q^2} + \frac{I_c}{2}$$

$$\frac{SD}{Q^2} = \frac{I_c}{2}$$

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{I_c}} \quad (7.5)$$

Aunque el modelo está sobresimplificado, aún sigue siendo utilizado por muchas organizaciones con un éxito razonable. Para mayores detalles acerca del tamaño del lote económico, consultar las referencias [1, 2].

7.5.2 Nivel de reorden

En el modelo anterior, Q^* se calcula bajo la suposición de una tasa de demanda determinística. El nivel (punto) de reorden corresponde al número de artículos en el inventario en el que deberá emitirse una orden. Se establece tomando en consideración el consumo durante el tiempo de entrega, de manera que se reciba un nuevo pedido cuando el nivel de un inventario llegue a 0. En tal caso, la regla de operación sería hacer un pedido cuando el inventario existente llegue al nivel de reorden R . Si

D_L = Demanda durante el tiempo de entrega

d_t = Tasa de la demanda (demanda por unidad de tiempo)

t_i = Tiempo de entrega

entonces

$$DL = t_i d_t$$

Ejemplo 7.2

Demanda anual	180 unidades
Costo/artículo	8.00 dólares
Costo de hacer un pedido	9.00 dólares
Cargos anuales de mantener el inventario	15% del costo del artículo

Entonces

$$Q^* = \sqrt{\frac{(2)(180)(9)}{0.15(8)}} = \sqrt{\frac{3240}{1.2}} \cong 52$$

En el caso de que el tiempo de entrega sea de 10 días, la política sería ordenar 52 unidades cuando el inventario existente llegue a $10(180/365) = 5$ unidades si R se toma como la demanda promedio durante el tiempo de entrega.

7.5.3 Existencias de seguridad

Las existencias de seguridad son la cantidad promedio de existencias actuales cuando llegan las órdenes de reabastecimiento. Se puede considerar como el inventario restante que existe a lo largo del año. Se usa generalmente cuando la demanda de artículos es una variable aleatoria y, por lo tanto, el inventario puede llegar a su nivel de reorden antes o después de lo esperado. Así, el tiempo entre reabastecimientos consecutivos ya no es constante. No hay riesgo de faltante de existencias con fluctuaciones en la demanda entre el tiempo de máximo inventario y el tiempo en que el inventario llega al nivel de reorden. El riesgo ocurre después de que se ha llegado al punto de reorden. La demanda durante el tiempo de entrega puede que resulte ser menor que, igual a, o mayor que el punto de reorden. Tal vez sean necesarias existencias de seguridad para prevenir faltantes de existencia durante el período del tiempo de entrega.

Un enfoque para determinar las existencias de seguridad consiste en utilizar el concepto de nivel de servicio. El nivel de servicio es el porcentaje del tiempo que un artículo particular se encontrará en existencia cuando se solicite. La relación entre el nivel de servicio y la probabilidad de faltante de existencias se expresa como sigue:

$$\text{Nivel de servicio} = 1 - \text{Probabilidad de faltante de existencias}$$

Para determinar las existencias de seguridad empleando el concepto de nivel de servicio, es necesario conocer la distribución de probabilidad de la demanda durante el tiempo de entrega. Ésta puede obtenerse empleando datos históricos y la metodología del Apéndice A, sección A.8. A continuación se muestra cómo calcular las existencias de seguridad empleando el concepto del nivel de servicio.

Ejemplo 7.3 La demanda durante el tiempo de entrega de un cierto tipo de rodamiento está distribuida normalmente con una media de 150 unidades y una desviación estándar de 5 unidades. El gerente de mantenimiento desea aplicar una política en la que el rodamiento sólo falte el 1% del tiempo cuando se solicite. Calcule la cantidad de existencias de seguridad que debe mantenerse.

$$\begin{aligned} \text{Demanda esperada durante el tiempo de entrega} &= \mu = 150 \text{ unidades} \\ \text{Desviación estándar} &= \sigma = 5 \text{ unidades} \end{aligned}$$

Haciendo

$$\begin{aligned} R &= \text{Demanda media} + \text{Existencias de seguridad} \Rightarrow \\ \text{Existencias de seguridad} &= R - \mu \end{aligned}$$

y

$$Z = \frac{R - \mu}{\sigma}$$

en donde Z puede obtenerse de las tablas de la distribución normal estándar

$$Z = 2.33 \text{ para un } 99\% \text{ de nivel de servicio} \Rightarrow 2.33 = \frac{R - \mu}{5}$$

$$\Rightarrow \text{Existencias de seguridad} = R - \mu = 11.65$$

Redondeando hasta el entero más próximo se obtiene una existencia de seguridad de 12 unidades.

Por lo tanto, la orden de reabastecimiento deberá hacerse cuando el inventario sea $R = 162$ ($150 + 12$) unidades, en lugar de 150, para alcanzar el nivel deseado de servicio.

7.5.4 Política eficaz para hacer pedidos

Los gerentes de mantenimiento deben tomar dos decisiones básicas para la política de inventarios: cuándo reordenar y cuánto reordenar. Existen básicamente dos políticas para reordenar. La primera se basa en un nivel específico de inventario (número de artículos), por debajo del cual se reordena un artículo del inventario. La segunda es una política de revisión periódica en la que se ordena un artículo periódicamente en vez de hacerlo según un nivel específico de inventario. La cantidad que debe ordenarse se conoce como la cantidad del pedido. El nivel de inventario que determina el momento de reordenar y la cantidad se seleccionan con base en consideraciones económicas.

Una política para reordenar bien conocida es la política (s, S) , también conocida como la política (mín, máx). En esta política se hace un pedido de tamaño Q_0 cuando el nivel de inventario llega a $s = R$ (nivel de reorden). La cantidad ordenada se espera que llegará cuando el nivel del inventario entre al nivel de las existencias de seguridad. Una buena elección de Q_0 es la cantidad económica del pedido o tamaño de lote económico (EOQ). Esta política se emplea por lo común para los artículos de clase A y algunos artículos de clase B.

Una política alterna es la política de dos recipientes, que se adopta generalmente para los artículos baratos y de rápido movimiento. En esta política, los artículos se conservan en la fábrica o en el taller de mantenimiento en dos recipientes de igual tamaño. Se retiran artículos de un recipiente hasta que éste se agota. Luego se coloca una etiqueta roja a este recipiente para indicar que está vacío y necesita llenarse, y después se abre el segundo

recipiente para su uso. El tamaño del recipiente corresponde a la demanda promedio durante el tiempo de entrega más una existencia de seguridad.

7.6 POLÍTICAS DE ORDENAMIENTO PARA REPARACIONES

La tasa de fallas de una pieza de equipo o de sus componentes varía estadísticamente durante su ciclo de vida. Esta relación por lo general muestra un patrón definido, denominado la curva de la tina de baño. La figura 7.4 ilustra una curva típica de tina de baño. Los términos empleados en la figura se definen como sigue:

1. *Mortalidad infantil.* Fallas tempranas debido a material defectuoso o a un procesamiento defectuoso.
2. *Tasa constante de fallas.* Fallas aleatorias que tienen una tasa constante de fallas.
3. *Fallas por desgaste.* Fallas debidas a la edad, fatiga, etc.

La eficacia de un mantenimiento preventivo o planeado disminuye durante el período de fallas aleatorias, que es el período más largo en la vida de servicio de una pieza de equipo. La falla de componentes da lugar a una falla del equipo. Para tener los componentes para reparar el equipo durante el período aleatorio de fallas, se deben vincular los datos de fallas de los componentes y la política de ordenamiento de las piezas.

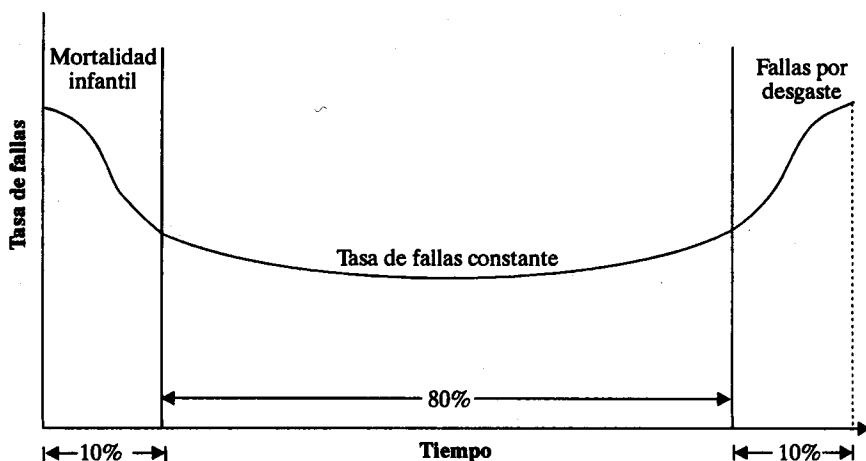


Figura 7.4 Curva típica de tina de baño.

En la primera parte de este capítulo se empleó el análisis ABC del inventario de acuerdo con su costo para desarrollar las políticas para el control del inventario. Sin embargo, las refacciones también deben evaluarse en términos de su grado crítico, de manera que se reduzcan los paros costosos haciendo que los componentes críticos estén disponibles cuando se necesiten. En la siguiente sección se presenta un método para determinar Q^* con base en la tasa de fallas, junto con el grado crítico de los componentes.

7.6.1 Vínculo de la demanda y la tasa de fallas

La falla de componentes generalmente provoca la falla del equipo. Para evitar tiempo muerto debido a la falta de disponibilidad de refacciones, se debe estimar el número de refacciones necesarias para una operación uniforme del equipo durante un período deseado, y las refacciones deberán estar disponibles cuando ocurra una demanda de las mismas.

7.6.2 Estimación de las unidades de refacciones necesarias para el reemplazo en caso de fallas

Se pueden emplear enfoques gráficos y analíticos para estimar el número de refacciones necesarias para un nivel de servicio deseado.

7.6.2.1 Enfoque gráfico El enfoque gráfico es apropiado cuando se dispone de poblaciones grandes de equipo y datos de fallas. Este enfoque se explica con la ayuda de un ejemplo en el que se supone que unas bombas de tipo similar dejan de funcionar debido a una falla de un rodamiento que está siendo considerado para tenerlo en inventario. La tabla 7.1 muestra el tiempo de operación entre fallas de ocho bombas que se utilizan en una planta (los datos se presentan por orden de falla).

TABLA 7.1 Fallas de bombas.

Bomba	Tiempo de operación	Bomba	Tiempo de operación
7	1250	6	1250
8	1450	1	1000
1	1000	2	1450
4	1500	5	700
6	1000	4	1250
2	1250	5	1000
3	700	3	700
7	600	8	600
8	500	1	1000

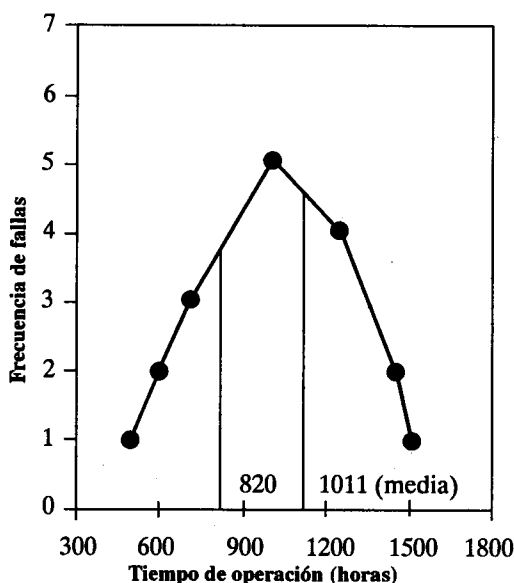


Figura 7.5 Gráfica de los datos de la tabla 7.1.

Estos datos se grafican en la figura 7.5 con el tiempo de operación entre fallas en el eje X y la frecuencia de fallas en el eje Y . La media es de 1011 horas, por lo que se supone que el 50% de las bombas fallan para este tiempo. Si la gerencia desea que el 80% de las bombas estén operando, entonces deberán mantenerse en inventario, en el nivel de servicio deseado, suficientes refacciones de los componentes que hacen que las bombas fallen. Los datos muestran que puede esperarse que fallen el 20% de las bombas para 820 horas. El número de refacciones necesarias para este nivel de servicio puede calcularse a partir de las horas de operación por semana proveyendo uno por bomba por cada 820 horas de trabajo de bombeo. Esta información se emplea para programar un mantenimiento planeado o preventivo, para alcanzar un nivel deseado de servicio y tener componentes disponibles cuando se necesiten.

7.6.2.2 Enfoque analítico El primer paso del enfoque analítico consiste en identificar la tasa de fallas de piezas específicas. El siguiente ejemplo ilustra un método para estimar el número de piezas necesarias. La ecuación (7.6) se obtuvo de Sheikh *et al.* [3].

Ejemplo 7.4 Considere una pieza que ha fallado 20 veces durante 10^6 horas de operación de un equipo en particular. Estime el número de piezas

necesarias para un año de operación uniforme con un nivel de confianza de 95%.

El número de piezas necesarias N para una operación uniforme puede estimarse utilizando la siguiente fórmula:

$$N = \frac{t}{\bar{T}} + \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \times Z \quad (7.6)$$

en donde

t = Operación, en horas

$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$, en donde λ representa las fallas por hora

$Z = 1.65$ para un nivel de confianza de 95% y 2.33 para un nivel de confianza de 99%

Por lo tanto,

$$t = (8 \times 5 \times 52) = 2080 \text{ horas}$$

$$\lambda = \frac{200}{10^6} = 0.002 \text{ fallas por hora}$$

Entonces

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.002} = 500$$

Así

$$\begin{aligned} N &= \frac{t}{\bar{T}} + \sqrt{\frac{t}{\bar{T}}} \times Z \quad (Z = 1.65 \text{ para } 95\% \text{ de nivel de confianza}) \\ &= \frac{2080}{500} + \sqrt{\frac{2080}{500}} \times 1.65 \\ &= 4.16 + \sqrt{4.16 \times 1.65} \\ &= 4.16 + 2.62 \cong 7^* \end{aligned}$$

Éste es el consumo anual estimado.

*Esto se basa en la suposición de que el tiempo entre fallas es exponencial y que el modo de falla del componente se debe a deformación o fricción. Para mayores detalles, consultar Sheikh *et al.* [3].

7.7 CLASIFICACIÓN DE LAS REFACCIONES

Las refacciones necesitan evaluarse en términos de su costo y su grado crítico. Ya se estudió el análisis ABC de acuerdo con su costo. El grado crítico también puede analizarse usando los siguientes criterios:

1. *Altamente crítico, C_A .* Las piezas que son absolutamente esenciales para la operación del equipo.
2. *Moderadamente crítico, C_B .* Piezas que tendrán un efecto de ligero a moderado en la operación del equipo si no están disponibles.
3. *Bajo grado crítico, C_C .* Piezas que no son absolutamente esenciales para la operación del equipo.

7.7.1 Estrategias de pedidos de refacciones con base en su clasificación

Las clasificaciones según el costo y el grado crítico pueden agruparse como se muestra en la tabla 7.2.

TABLA 7.2 Análisis de grado crítico^a

Costo	Grado crítico		
	C_A	C_B	C_C
<i>A</i>	1	1	2
<i>B</i>	1	2	2
<i>C</i>	3	3	3

^aLas entradas indican la estrategia que se va a utilizar para ordenar partes en este grupo.

7.7.2 Agrupamiento de refacciones de acuerdo con su grado crítico y costo

Para ordenar refacciones para cada grupo, se sugieren las siguientes estrategias.

7.7.2.1 Estrategia de pedidos 1 Para las piezas agrupadas como clase 1, mantenga una cantidad dada de artículos. Los niveles de existencias iniciales pueden estimarse como se muestra en la sección 7.6.1. Siempre que ocurra una falla, obtenga un artículo(s) para reemplazar el que se consumió para reparación/reemplazo. Es una práctica común agregar una unidad adicional en la

adquisición inicial y utilizar un nivel de servicio del 99%, que corresponde a $Z = 2.33$ de la tabla de la distribución normal estándar.

7.7.2.2. Estrategia de pedidos 2 Para las piezas agrupadas como clase 2, puede utilizarse el modelo estándar EOQ y mantener una existencia de seguridad para compensar la demanda durante el tiempo de entrega.

7.7.2.3 Estrategia de pedidos 3 Los artículos de este grupo son de bajo costo y tienen un nivel variable de grado crítico. En los casos en que las piezas pueden almacenarse durante cierto tiempo sin sufrir daño y cuando las piezas no se puedan obtener con facilidad en el mercado, calcule el requerimiento N para un período considerablemente mayor que el indicado empleando los métodos de la sección 7.6.1. De manera alterna, la estrategia de pedidos 2 también puede emplearse para esta clase.

RESUMEN

El control de los materiales de mantenimiento es sólo una de las formas en que pueden reducirse los costos totales del mantenimiento. Se dio una explicación de los componentes de los almacenes de mantenimiento de manera que puedan aplicarse eficazmente las funciones de control. Se explicó la estimación del costo de materiales de mantenimiento a fin de poder tomar medidas para reducir los costos de operación. También se examinaron los sistemas de inventarios y el vínculo entre la falla de las piezas y las estrategias de pedidos.

EJERCICIOS

- 7.1** Las siguientes refacciones se mantienen en inventario en una planta. Su tasa de consumo anual y su precio unitario se muestran a continuación.

Número de refacción	Consumo anual (Unidades)	Costo por unidad
S01	5 000	17
S02	17 000	51
S03	6 000	17
S04	4 000	75
S05	11 000	200
S06	60 000	9
S07	12 000	60
S08	28 000	50
S09	4 000	18
S10	3 000	25

Clasifíquelas como artículos de clase A, B o C. Sugiera después una política para el control de cada clase.

- 7.2 Una compañía de taxis mantiene baterías de automóvil como refacciones para su flotilla de taxis que se están haciendo viejos. Compra las baterías a 14 dólares cada una y el costo de hacer un pedido es de 11 dólares. La compañía usa aproximadamente 12 000 baterías al año a una tasa uniforme. La compañía opera 5 días a la semana durante 52 semanas al año, con excepción de 6 días festivos nacionales. El tiempo de entrega de los pedidos es de 4 días. El costo de mantener el inventario es el 24% del costo del artículo al año. Determine el tamaño del lote económico (EOQ) y el nivel de reorden. ¿Cuál es el costo total de mantener inventario y hacer pedidos de acuerdo con el EOQ?
- 7.3 Resuelva el ejemplo presentado para el método gráfico (sección 7.6.2.1), pero con un nivel de servicio mejorado de 95%. Compare su resultado con el del texto.
- 7.4 Resuelva el ejercicio anterior empleando un método analítico. ¿Cuántos componentes se necesitan cada año para un tiempo de operación promedio entre fallas de 1011 horas con un nivel de confianza de 95% ($Z = 1.65$ para 95% de nivel de confianza).

REFERENCIAS

1. D. D. Bedworth and J. E. Bailey, *Integrated Production Control Systems*, Wiley, New York.
2. A. C. Hax and D. Candea, *Production and Inventory Management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
3. A. K. Sheikh, F. L. Callom and S. G. Mustafa, "Strategies in Spare Parts Management Using Reliability Engineering Approach," *Engineering Cost and Production Economics*, Vol. 21. pp. 51-57.

8

CONTROL DE LA CALIDAD DEL MANTENIMIENTO

8.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un sistema acertado de control de la calidad del mantenimiento es esencial para asegurar reparaciones de alta calidad, estándares exactos, máxima disponibilidad, extensión del ciclo de vida del equipo y tasas eficientes de producción del equipo. El control de calidad como un sistema integrado se ha practicado con mayor intensidad en las operaciones de producción y manufactura que en el mantenimiento. Aunque se ha comprendido el papel del mantenimiento en la rentabilidad a largo plazo de una organización, los aspectos relacionados con la calidad de los productos del mantenimiento no han sido adecuadamente formulados. Entre las posibles razones están las siguientes:

1. Los productos del departamento de mantenimiento son difíciles de definir y medir.
2. Falta el enfoque del cliente en el mantenimiento en comparación con la producción.
3. Una gran parte del mantenimiento no es repetitivo.
4. Las condiciones de trabajo varían más en el trabajo de mantenimiento que en el de la producción.
5. El mantenimiento ha sido considerado tradicionalmente como un mal necesario y, a lo sumo, como un sistema secundario impulsado por la producción. Este punto de vista ha conducido a la asignación de una baja prioridad a la mejora de las actividades de mantenimiento.

La calidad de los productos del mantenimiento tiene un enlace directo con la calidad del producto y la capacidad de la compañía para cumplir con los programas de entrega. En general, el equipo que no ha recibido un mantenimiento regular o cuyo mantenimiento ha sido inadecuado fallará periódicamente o experimentará pérdidas de velocidad o una menor precisión y, en consecuencia, tenderá a generar productos defectuosos. Con demasiada frecuencia, dicho equipo genera procesos de manufactura fuera de control. Un proceso que está fuera de control o que tiene una pobre capacidad genera productos defectuosos, lo que representa menor rentabilidad y un mayor descontento del cliente.

Una organización clara de la función de control de calidad y la especificación de su papel (responsabilidades) en el sistema de mantenimiento deben ser enfatizados por la alta dirección de la organización. Las responsabilidades incluyen el desarrollo de procedimientos de prueba e inspección, documentación, seguimiento, análisis de deficiencias e identificación de las necesidades de capacitación a partir del análisis de los informes de calidad.

Los gerentes de mantenimiento y los ingenieros necesitan estar conscientes de la importancia de controlar la calidad de los productos del mantenimiento. El establecimiento de normas de pruebas e inspección en el mantenimiento y de niveles aceptables de calidad deberán ser desarrollados para todo el trabajo de mantenimiento. La documentación de los procedimientos de mantenimiento y los informes de inspección pueden ofrecer enormes oportunidades para la mejora de la calidad del mantenimiento. Estas oportunidades pueden hacerse realidad mediante la mejora continua de los procedimientos y la identificación de necesidades de capacitación para mejorar las habilidades técnicas de los trabajadores de mantenimiento.

Debido a que las actividades de mantenimiento no son repetitivas, no se pueden recopilar cantidades grandes de observaciones para dichas actividades para efectos de análisis estadísticos. En el caso de tales actividades, las técnicas de control de procesos ofrecen herramientas valiosas para mejorar los procesos de mantenimiento.

Las organizaciones deberán esforzarse por vincular sus actividades de mantenimiento con la calidad de sus productos y servicios. Además, deberán crear un punto de atención central en sus clientes internos. Esto les proporcionará la dirección y las metas para mejorar sus procesos de mantenimiento.

Este capítulo presenta los elementos del control de calidad en el mantenimiento. La sección 8.2 presenta las responsabilidades de la división de control de calidad dentro del departamento de mantenimiento, y en la sección 8.3 se describen los programas de inspección y pruebas. La sección 8.4 presenta el empleo del control estadístico de procesos en el mantenimiento. La sección 8.5 proporciona un programa para mejorar los trabajos de mantenimiento. La sección 8.6 presenta los círculos de calidad en el mantenimiento, y la sección 8.7 describe el enlace entre el

mantenimiento y la calidad de los productos y servicios que proporciona una organización.

8.2 RESPONSABILIDADES DE CONTROL DE CALIDAD

Lograr la calidad en el mantenimiento y los objetivos de confiabilidad son responsabilidad del personal de mantenimiento. El esfuerzo combinado y la dedicación del personal de control de calidad, los supervisores de mantenimiento, los capataces y los técnicos son esenciales para garantizar un mantenimiento de alta calidad y una confiabilidad del equipo. Esta unidad o función de control de calidad (CC) es responsable de asegurar la calidad de los productos del mantenimiento y la mejora del proceso de mantenimiento. De manera específica, las responsabilidades de CC incluyen las siguientes:

1. Realizar inspecciones de las acciones, los procedimientos, el equipo y las instalaciones de mantenimiento.
2. Conservar y mejorar los documentos, los procedimientos y las normas de mantenimiento.
3. Asegurar que todas las unidades estén conscientes y sean expertas en los procedimientos y normas de mantenimiento.
4. Mantener un alto nivel de conocimiento experto manteniéndose al día con la literatura referente a los procedimientos y registros de mantenimiento.
5. Hacer aportaciones a la capacitación del personal de mantenimiento.
6. Realizar análisis de deficiencias y estudios de mejora de procesos empleando diversas herramientas para el control estadístico de procesos.
7. Asegurar que los trabajadores se apeguen a todos los procedimientos técnicos y administrativos cuando realicen el trabajo real de mantenimiento.
8. Revisar los estándares de tiempo de los trabajos para evaluar si son adecuados.
9. Revisar la calidad y disponibilidad de los materiales y refacciones para asegurar su disponibilidad y calidad.
10. Realizar auditorías para evaluar la situación actual del mantenimiento y prescribir remedios para las áreas con deficiencias.
11. Establecer la certificación y autorización del personal que realiza tareas críticas altamente especializadas.

12. Desarrollar procedimientos para las inspecciones de nuevos equipos y probar el equipo antes de aceptarlo de los proveedores.

En resumen, el personal de control de calidad del mantenimiento es responsable de asegurar que se cumplan los objetivos de calidad de los recursos, procedimientos y normas utilizados en el proceso de mantenimiento. Además, realiza inspecciones de los trabajos de mantenimiento y pruebas de los equipos antes de su aceptación u operación.

El personal de CC debe ser tan independiente como sea posible y no ser una extensión de la fuerza de trabajo. Asimismo, no realizará inspecciones de producción, ya que tales inspecciones pueden asignarse a inspectores de producción o supervisores del taller. El personal de la unidad de control de calidad debe estar formado por técnicos o ingenieros altamente calificados, con una extensa capacitación en áreas como mejora de la productividad, control estadístico de procesos, mejora de procesos, planeación y programación, y medición del trabajo.

En las organizaciones grandes, como las compañías de aerolíneas, las fuerzas armadas y las compañías de ferrocarriles, es necesario contar con una división de control de calidad dentro del departamento de mantenimiento. Esta división informa directamente al gerente de mantenimiento. En las organizaciones de tamaño mediano, una pequeña unidad podrá encargarse del trabajo; sin embargo, en organizaciones pequeñas, uno o dos inspectores adjuntos a la oficina del gerente o a la unidad de planeación pueden realizar la función de control de calidad.

La división de control de calidad deberá desarrollar una visión clara y una filosofía sobre la administración de la calidad. Un ejemplo de dicha filosofía, similar a la adoptada por el ejército de Estados Unidos, se plantea como sigue [4]:

La calidad del producto depende grandemente de la habilidad y la actitud del reparador, la eficacia del supervisor y el grado de cumplimiento de las normas y las instrucciones de los procedimientos. La calidad no puede inspeccionarse en un artículo: debe ser incorporada por el reparador individual durante el proceso del taller. La calidad del trabajo realizado es responsabilidad del reparador y el personal de supervisión. En la calidad influye directamente la habilidad, actitud y motivación del personal de mantenimiento que realiza el trabajo. Es inherente al proceso del trabajo que cada reparador verifique su labor para determinar que se cumplan las especificaciones de calidad.

8.3 PROGRAMAS DE INSPECCIÓN Y VERIFICACIÓN

La división de control de calidad es responsable de desarrollar y conservar registros de inspección. La división de CC deberá clasificar los diferentes tipos

de inspecciones que realiza. Estas inspecciones se clasifican comúnmente de la siguiente manera:

1. *Inspección de aceptación.* Este tipo de inspección se realiza para asegurar que el equipo esté en conformidad con las normas. Generalmente se realiza sobre equipo nuevo.
2. *Inspección de verificación de la calidad.* Este tipo de inspección se realiza después de una tarea de inspección o reparación para verificar si ésta se realizó de acuerdo con las especificaciones.
3. *Inspección documental o de archivo.* Ésta se realiza para revisar la norma y evaluar su grado de aplicación.
4. *Inspección de actividades.* Esta inspección se realiza para investigar si las unidades de mantenimiento se están apegando a los procedimientos y a las normas.

Estos cuatro tipos de inspecciones son realizadas por el personal de CC. Hay otros tipos de inspecciones que son realizadas por los supervisores de producción de mantenimiento. Éstas incluyen inspecciones realizadas por los supervisores para asegurar que el material o la calidad del trabajo cumple las normas prescritas.

La figura central en la mayoría de los programas de control de calidad del mantenimiento es el inspector técnico. Éste es el individuo al que se le ha asignado la responsabilidad de evitar que se empleen técnicas deficientes de trabajo y superar las deficiencias de la organización o reducir el reemplazo innecesario de componentes que todavía pueden dar un buen servicio. En consecuencia, la habilidad del inspector para diagnosticar debe ser satisfactoria para un programa de CC con éxito. Las decisiones del inspector son críticas y pueden llevar a una catástrofe, especialmente en la industria de la aviación.

8.4 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS EN EL MANTENIMIENTO

El control estadístico de procesos (CEP) consiste en el empleo de técnicas con base estadística para evaluar un proceso o sus productos para alcanzar o mantener un estado de control. Esta definición es lo suficientemente amplia para incluir a todos los métodos con base estadística, desde la recopilación de datos e histogramas hasta técnicas complejas como el diseño de experimentos. Aun cuando no existe una lista única de estos métodos estadísticos (herramientas de calidad), hay un acuerdo general sobre las siguientes siete

herramientas [3], todas las cuales requieren la recopilación de datos como primer paso.

1. Lista de verificación.
2. Histograma.
3. Diagrama de causa y efecto (espina de pescado).
4. Diagrama de Pareto (también conocido como análisis ABC).
5. Gráfica de control.
6. Diagrama de dispersión.
7. Análisis de modo y efecto de fallas (AMEF).

8.4.1 Recopilación de datos

El enfoque científico para la solución de problemas y la utilización de las herramientas anteriores requieren que se cuente con datos correctos. Se debe tener mucho cuidado en recopilar los datos correctos con el método correcto. Las siguientes guías son útiles para evitar que se repita el proceso de recopilación de datos y demorar el análisis y la mejora de procesos:

1. Planear todo el proceso de recopilación de datos al principio.
2. Aclarar el propósito de la recopilación de datos.
3. Especificar claramente los datos que se necesitan.
4. Emplear las técnicas correctas de muestreo.
5. Diseñar por adelantado las listas de verificación necesarias.

La recopilación de datos debe ser un proceso continuo y estar incorporada en el sistema de información disponible. Ejemplos de los datos necesarios en el caso de la administración e ingeniería del mantenimiento son el tiempo muerto del equipo, la productividad de la mano de obra, los costos de mantenimiento, los costos de materiales e inventarios, las fallas y reparaciones del equipo, los tiempos de terminación de los trabajos y los trabajos pendientes.

8.4.2 Lista de verificación

Una lista de verificación es un conjunto de instrucciones sencillas empleadas en la recopilación de datos, de manera que los datos puedan compilarse, usarse con facilidad y analizarse automáticamente. Existen muchas formas de listas de verificación. Algunas de ellas son pasos sencillos para realizar tareas de

Marque la columna que indique la condición de la unidad											
Número de componentes principales	Artículo	Buena condición	Requiere limpieza	Requiere ajuste	Requiere lubricación	Examinar la vibración	Examinar el calor	Suelto	Requiere reparación general	Requiere reemplazo	Ver comentarios adicionales
1	Motor eléctrico										
	1.1 Rodamiento										
	1.2 Base y pernos										
	1.3 Temperatura										
	1.4 Vibración										
	1.5 Ruido										
2	Cople										
	2.1 Alineación										
	2.2 Lubricación										
3	Generador										
	3.1 Todos los motores eléctricos										
	3.2 Armadura										
	3.3 Escobillas										
	3.4 Rotor										

Figura 8.1 Lista de verificación de inspección de mantenimiento preventivo para un conjunto típico motor-generador.

inspección de mantenimiento (figura 8.1), en tanto que otras podrían ser parte de un esquema amplio de auditoría. Una lista de verificación puede utilizarse en mantenimiento para lo siguiente:

1. Recopilar datos para desarrollar histogramas.
2. Realizar tareas de mantenimiento.
3. Prepararse antes de los trabajos de mantenimiento y para la limpieza después éstos.
4. Revisión de refacciones.
5. Planeación de los trabajos de mantenimiento.
6. Equipo de inspección.
7. Auditoría de un departamento de mantenimiento.

No.	Operación principal del proceso	Tareas	Hora de inicio	Hora de terminación	Tiempo de interrupciones** no regulares
1.	Revisar el alcance del trabajo	1.1 Revisar el trabajo			
2.	Preparación, verificar carrera	2.1 Verificar			
		2.2 Brazo de cola			
		2.3 Descanso uniforme			
		2.4 Verificar carrera			
3.	Maquinado previo	3.1 Premaquinado			
		3.2 Limpieza a vapor			
4.*	Plasma o rocío de HVOF	4.1 Precalentamiento en horno			
		4.2 Reparación de cuñas			
		4.3 Pulido			
		4.4 Precalentamiento con pistola			
		4.5 Rociado			
		4.6 Enfriamiento			
5.*	Rocío de escobillas	5.1 Preparación			
		5.2 Recubrimiento			
		5.3 Maquinado final			
6.*	Rocío del metal	6.1 Precalentamiento			
		6.2 Rociado			
		6.3 Maquinado final			
7.	Esmerilado	7.1 Esmerillar			
8.	Rastreo de prueba	8.1 Esmerillar			
		8.2 Bruñido			
		8.3 Medición y fotografía			

* = Sólo uno de 4, 5 ó 6 es aplicable.

** = Una interrupción no regular se refiere a una asignación o consulta sobre un trabajo diferente, cambio de turno, o interrupción durante la noche. Las interrupciones regulares incluyen café, té, baño y consultas con el supervisor y personal técnico.

Figura 8.2 Lista de verificación para estandarizar el proceso de reparación de una flecha.

8. Verificación de las causas de artículos defectuosos.
9. Diagnóstico de defectos de las máquinas.
10. Recopilación de datos para muestreo de trabajo.

En las figuras 8.1 a 8.4 se dan algunos ejemplos de listas de verificación.

8.4.3 Histograma

Un histograma es una representación gráfica de la frecuencia de ocurrencias contra puntos de datos o una clase que representa un conjunto de datos. Es una imagen gráfica de la distribución de frecuencias. El histograma ayuda a visualizar la distribución de los datos, su forma y su dispersión. Un uso

Médico: _____			Fecha: _____
Paciente: _____			Edad: _____
Encierre en un círculo la prueba requerida	Prueba	Resultado	Valores normales
1.	Urea N		7-50 Mg/dL
2.	Glucosa		60-100 Mg/dL
3.	Ácido úrico		2-7 Mg/dL
4.	Creatinina		0.05-1.5 Mg/dL
5.	Amilasa		45-200 Mg/dL
6.	Sodio		136-144 mEq/L
7.	Potasio		4-4.5 mEq/L
8.	Cloruro		95-105 mEq/L
9.	CO ₂		23-30 mM/L
10.	Calcio		8.5-10.4 Mg/dL
11.	Colesterol		128-200 Mg/dL
12.	Triglicéridos		33-210 Mg/dL
13.	Dehidrogenasa láctica		65-115 Mg/dL
14.	Lipoproteína de alta densidad		
15.	Fosfatos de ácido		Menos de 1.0 U.I.
16.	Seroproteína		6-8 GM/dL
17.	Seroalbúmina		3.5-5.0 GM/dL
18.	Seroglobulina		23-35 GM/dL

Mg/dL = miligramo por decilitro

mM/L = milimol por litro

GM/dL = gramos por decilitro

N = Nitrógeno

CO₂ = Bióxido de carbono

m eq/L = miliequivalente por litro

U.I. = Unidad internacional

Figura 8.3 Lista de verificación para diagnóstico de sangre.

Hoja de verificación de muestreo de trabajo			
Verificador: _____		Objeto de la verificación _____	
Fecha: _____		Estado climatológico: _____	
Método: _____			
Elemento	Verificaciones	Total	%
Procesamiento	## ## // -----	300	60%
Planeación	## ## // -----	125	25%
Transporte	## // -----	50	10%
Descompostura	## ## /	20	4%
Otros	## //	5	1%
Total		500	100%

Figura 8.4 Hoja de verificación de muestreo de trabajo.

TABLA 8.1 Tiempo muerto de la esmeriladora, en horas, durante los últimos tres meses.

1, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 2, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, 1, 1, $\frac{3}{4}$, 3, 1, $\frac{3}{4}$
1, $\frac{3}{4}$, 2, 8, 3, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, 8, 4, 7, 10, $\frac{3}{4}$
2, $\frac{1}{2}$, 1, $\frac{1}{2}$, 30, 1, 2, 1, 50, 6, 3, 3
5, 4, 6, 5, 72, 2, 4, 2, 3

TABLA 8.2 Distribución de frecuencias de los datos de tiempo muerto de la tabla 8.1.

Duración de la descompostura	Frecuencia	Frecuencia relativa
$0 < t \leq 1$	20	44.44
$1 < t \leq 2$	6	13.33
$2 < t \leq 3$	5	11.11
$3 < t \leq 4$	3	6.67
$4 < t \leq 5$	2	4.45
$5 < t \leq 6$	2	4.45
$6 < t \leq 7$	1	2.22
$t \geq 8$	6	13.33
Total	<u>45</u>	<u>100.00</u>

principal de los histogramas es identificar la distribución de los datos. Se puede utilizar para estimar los seis puntos que se enlistan enseguida:

1. La carga de mantenimiento.
2. La confiabilidad del proveedor de refacciones.
3. La distribución del tiempo hasta la falla del equipo.
4. Distribución de los tiempos de reparación.
5. Distribución de los trabajos pendientes.
6. Cambios en la distribución del tiempo muerto.

En resumen, un histograma puede usarse para identificar la distribución de actividades importantes. Cualquier software estadístico, como el Statgraphics o el Statistical Analysis Software (SAS), ofrece las capacidades para calcular distribuciones de frecuencia y elaborar histogramas. A continuación se presenta un ejemplo del empleo de histogramas en mantenimiento.

Suponga que se descubre que una máquina esmeriladora para el acabado de partes mecánicas se descompone repetidamente. El efecto de estas descomposturas recurrentes ocasiona serios problemas, como demoras en la producción, entregas tardías a los clientes, menor productividad y altas tasas de productos defectuosos [13]. Los informes diarios del taller muestran las horas trabajadas y las cantidades producidas, e indican el tiempo muerto de la esmeriladora al no cumplir con los planes de producción. Estos informes diarios muestran el tiempo de la descompostura de la esmeriladora y la hora en que se volvió a trabajar después de ser reparada. Los datos para el tiempo muerto se dan en la tabla 8.1. En la tabla 8.2 se presenta una distribución de frecuencias de los datos de la tabla 8.1. En la figura 8.5 se muestra un histograma del tiempo muerto utilizando las clases de la tabla 8.2.

El histograma muestra lo siguiente:

1. Se requirieron más de 8 horas entre el paro y el inicio de la producción en seis ocasiones.
2. La mayoría de los paros no fueron muy largos.
3. La moda del tiempo muerto es de $\frac{1}{2}$ hora.

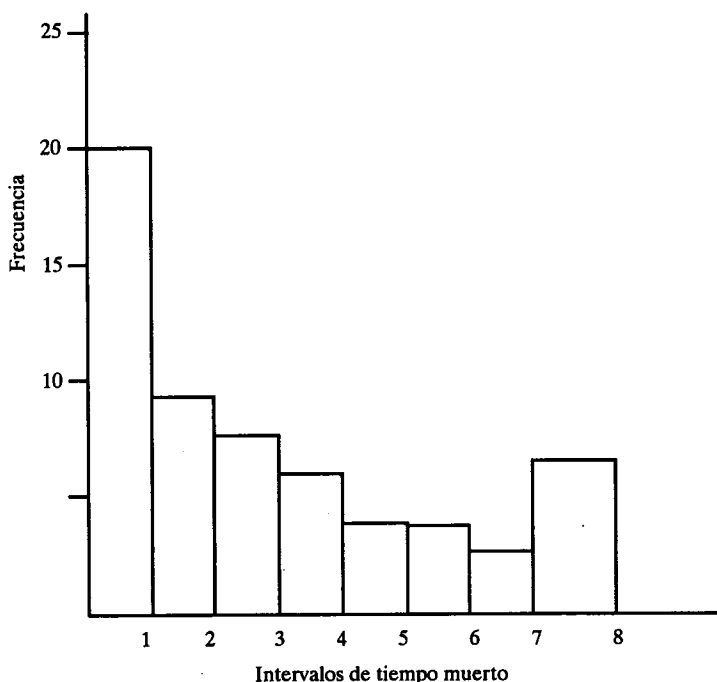


Figura 8.5 Histograma de los datos de la tabla 8.2.

El siguiente paso en la mejora de la calidad del mantenimiento consiste en identificar las causas de las descomposturas. Un método valioso para ello es el diagrama de causa y efecto.

8.4.4 Diagrama de causa y efecto (espina de pescado)

Un diagrama de causa y efecto (DCE) puede utilizarse como herramienta para identificar las razones de una eficacia por debajo de la norma en mantenimiento. El diagrama de causa y efecto, también conocido como diagrama de espina de pescado, ha sido utilizado extensamente en el control de los procesos de producción. Es útil para clasificar las causas y organizar relaciones mutuas. El efecto se considera por lo general como la característica de calidad que necesita mejora, y las causas son los factores de influencia. El DCE puede utilizarse en la administración e ingeniería del mantenimiento para identificar las causas de:

1. Baja productividad de los trabajadores.
2. Excesivo tiempo muerto.
3. Descomposturas recurrentes.
4. Repetición de trabajos.
5. Excesivo ausentismo.
6. Trabajos pendientes.
7. Excesivos errores en el registro de los datos.

Los pasos para construir el DCE se plantearán y demostrarán para el caso de la esmeriladora presentado anteriormente.

Paso 1. Decida sobre la característica de la calidad y el efecto a estudiar. Éste es generalmente un fenómeno (efecto) que necesita mejorarse y controlarse. En nuestro caso es el tiempo muerto de la esmeriladora.

Paso 2. Escriba el efecto del lado derecho. Dibuje una flecha amplia de izquierda a derecha (figura 8.6).

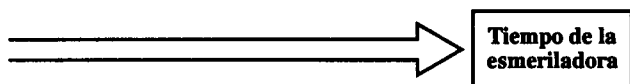


Figura 8.6

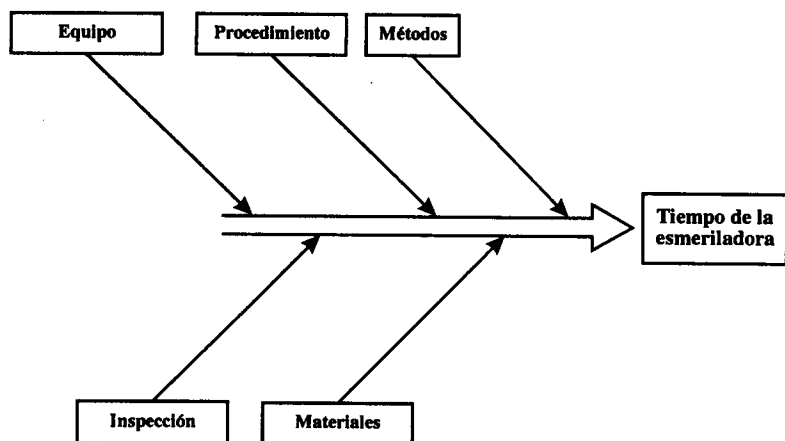


Figura 8.7

Paso 3. Escriba los principales factores que pudieran estar ocasionando el tiempo muerto de la esmeriladora, dirigiendo una rama en forma de flecha a la flecha principal (figura 8.7). Agrupe las principales causas posibles en categorías como materiales, equipo, métodos de trabajo y métodos de medición. Cada categoría formará una rama como en la figura 8.7

Paso 4. Escriba en cada una de las ramas los factores detallados que pudieran ser considerados como las causas (figura 8.8).

Paso 5. Revise el diagrama para asegurarse de que se han incluido todas las causas y que se ilustraron adecuadamente las relaciones en el diagrama.

Después de examinar el registro, se descubrió que los tipos más frecuentes de descomposturas eran los siguientes:

1. Rotación no uniforme.
2. No gira.
3. Aumento en la temperatura del refrigerante.
4. El polvo del esmerilado no se elimina.
5. Fugas de refrigerante.
6. Otros.

Además, las causas fundamentales de las descomposturas (es decir, tiempo muerto) incluían las que se enlistan en la página siguiente:

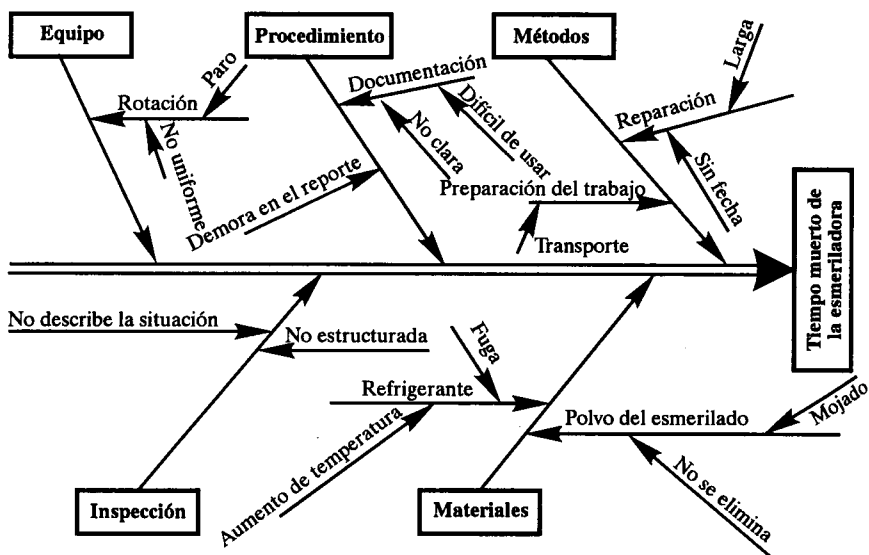


Figura 8.8 Diagrama completo de causa y efecto para el tiempo muerto de la esmeriladora.

1. Falta de procedimientos de inspección para detectar las fallas.
2. Largas demoras en la comunicación de la falla.
3. Ausencia de un procedimiento estándar para planear los trabajos.
4. Largos tiempos de reparación.
5. Descomposturas excesivas.

Una opción para reducir el tiempo muerto consiste en desarrollar procedimientos eficaces para la detección de fallas y el informe de las mismas. Otro método consiste en eliminar las descomposturas. El segundo método parece ser mejor. La pregunta es: ¿Cuáles descomposturas deberán eliminarse? Es natural eliminar las descomposturas que se presentan más frecuentemente y, en consecuencia, reducir el tiempo para reportarlas y repararlas. Un método alterno consiste en eliminar la descompostura que ocasiona el mayor tiempo muerto, si los datos están disponibles. Una técnica común que se utiliza para asignar prioridades a las opciones es la gráfica de Pareto, también conocida como análisis ABC. La siguiente sección explica esta técnica y la emplea para identificar la descompostura más frecuente.

8.4.5 Gráfica de Pareto (análisis ABC)

Una gráfica de Pareto* es simplemente una distribución de frecuencias de datos de atributos acomodados por orden de frecuencia. Su propósito es separar los pocos vitales de los muchos triviales. También ayuda a establecer prioridades acerca de cuál curso de acción es más benéfico. Por ejemplo, en la ingeniería de mantenimiento hay muchos factores que podrían mejorarse, incluyendo la productividad de los trabajadores, el tiempo de operación del equipo, la tasa de calidad del equipo, la disponibilidad de las refacciones, etc. Es imposible tener los recursos para mejorar todos estos factores. Una gráfica de Pareto puede ser útil para identificar los factores importantes por mejorar y, como resultado de ello, pueden establecerse prioridades acerca de cuál factor mejorar.

La gráfica indica cuál factor mejorar primeramente a fin de eliminar defectos y lograr la mayor mejora posible. Categoriza los factores en tres clases. La clase A generalmente contiene alrededor del 20% de los factores (causas) que están ocasionando del 75% al 80% de los problemas. La clase B contiene alrededor del 20% de los factores que ocasionan del 15% al 20% de los problemas. El resto de los factores (que son muchos) están en la clase C.

La construcción de una gráfica de Pareto es como sigue:

Paso 1. Dividir los datos en partidas o clases que se utilizarán en la gráfica.

Paso 2. Establecer el horizonte de tiempo para la gráfica.

Paso 3. Determinar la frecuencia de cada partida o clase. Clasificarlas de acuerdo a su frecuencia en orden descendente.

Paso 4. Graficar la partida o clase contra la frecuencia, comenzando con la frecuencia más grande y continuando en orden descendente. En la misma gráfica se puede graficar la frecuencia acumulada contra la partida o la clase.

Para más detalles acerca de la construcción de una gráfica de Pareto, ver [6, 9].

La gráfica puede utilizarse para el ejemplo de las descomposturas de la esmeriladora que se presentó antes. Suponga que la meta es identificar las descomposturas más comunes. Examine las órdenes de trabajo de las 45 descomposturas dadas en la tabla 8.1. La distribución de frecuencias se muestra en la figura 8.9. En otras aplicaciones de mantenimiento, las gráficas de Pareto se utilizan para identificar las que se enlistan en la página siguiente.

* El nombre de gráfica de Pareto se deriva del economista italiano Vilfredo Pareto (1846-1923), quien estudió la distribución de los ingresos empleando esta gráfica. Los ingenieros de calidad utilizan esta gráfica para identificar causas de defectos.

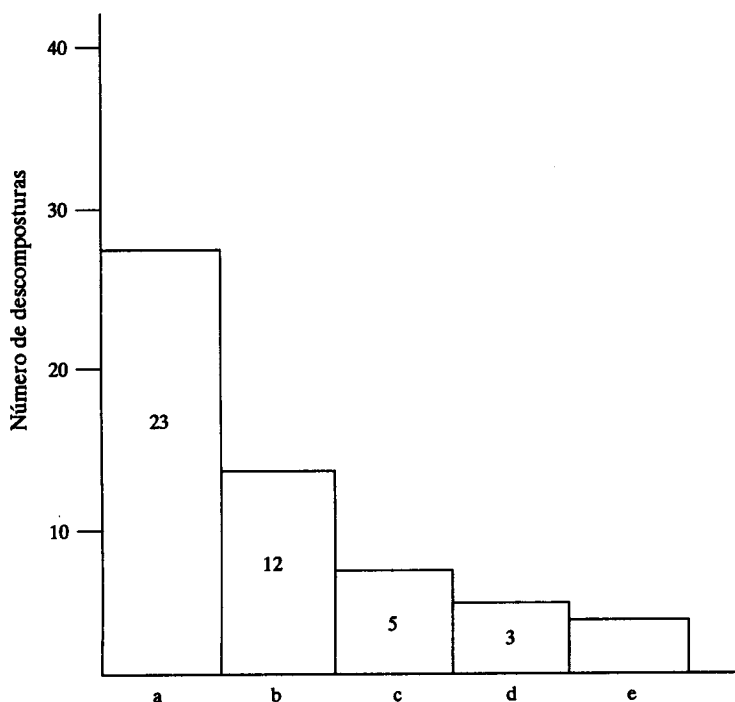


Figura 8.9 Gráfica de Pareto para las descomposturas de la esmeriladora: a) el polvo del esmerilado no se elimina; b) aumento en la temperatura del refrigerante; c) rotación no uniforme; d) no gira; e) otras.

1. Factores que menoscaban la productividad.
2. Trabajadores que ocasionen los mayores trabajos pendientes.
3. Refacciones que ocasionan la mayoría de las demoras.
4. Las refacciones más costosas.
5. Las descomposturas que ocasionan el mayor tiempo muerto.

8.4.6 Gráficas de control

Las gráficas de control son importantes en el control estadístico de procesos y se utilizan extensamente en el control de calidad. Las gráficas de control pueden aplicarse para mejorar las actividades de mantenimiento, y difieren de las otras técnicas que se describieron antes. Las técnicas anteriores son estáticas, en tanto que las gráficas de control son dinámicas, pues permiten

la observación de un proceso a lo largo del tiempo. La construcción de las gráficas de control se explica en los capítulos 2 y 4.

Las gráficas de control pueden utilizarse para monitorear la calidad de los siguientes aspectos:

1. Trabajos pendientes mensuales.
2. Tiempo muerto del equipo principal.
3. Disponibilidad del equipo.
4. Tasa de calidad del equipo.
5. Número de descomposturas.

Además, las gráficas de control pueden usarse para evaluar la adecuación de las normas de mantenimiento y vigilar el desgaste de las herramientas. En este último caso, se ha desarrollado una gráfica con un rango móvil para determinar tanto la región de falla de la herramienta como el momento esperado de la falla. Las gráficas de control se han utilizado para establecer un punto de comienzo para el mantenimiento basado en las condiciones. En esta aplicación se establece una gráfica de control con base en mediciones de control y los límites de control captan la vibración normal de la máquina y pueden emplearse para dar seguimiento a las fallas.

8.4.7 Diagrama de dispersión

El diagrama de dispersión es una representación gráfica de la correlación entre dos variables. Se utiliza generalmente para estudiar la relación entre causas y efectos. Por lo tanto, es un complemento del diagrama de causa y efecto que se mencionó con anterioridad. En general, puede aplicarse para realizar los siguientes análisis:

- Análisis de tendencias.
- Correlación o análisis de patrones.

Particularmente en el mantenimiento, puede utilizarse para encontrar lo siguiente:

1. Correlación entre el mantenimiento preventivo y la tasa de calidad.
2. Correlación entre el nivel de capacitación y los trabajos pendientes.
3. Correlación entre el nivel de capacitación y la repetición de trabajos.
4. Correlación entre el nivel de vibración y la tasa de calidad.

5. Correlación entre el mantenimiento preventivo y el tiempo muerto.
6. Tendencia del tiempo muerto.
7. Tendencia del costo de mantenimiento.
8. Tendencia de la productividad de los trabajadores.
9. Tendencia de los trabajos pendientes.
10. Tendencia de la disponibilidad del equipo.

8.4.8 Análisis del modo de fallas y efectos

El análisis del modo de falla y efectos (AMFE) es una técnica empleada para cuantificar y clasificar las fallas críticas en el diseño del producto o el proceso [2, 12]. Comprende la identificación de todas las características funcionales y secundarias. Así, para cada característica, el AMFE identifica una lista de las fallas potenciales y su impacto en el desempeño global del producto. Asimismo, se estima la probabilidad y la severidad de la falla (problema).

Un sistema o producto dado se divide en sus piezas o componentes básicos. A continuación, para cada componente o pieza, el analista podría preguntar cómo fallaría, la probabilidad de la falla y el efecto en la función del producto o el sistema. En un ensamble electrónico, por ejemplo, las piezas incluyen una resistencia, un capacitor, un dispositivo analógico, etc. Se identificará el modo de falla de cada pieza y se determinará su efecto en la función del producto. El objetivo es eliminar la amenaza a la integridad del producto o reducirla al mínimo.

Esta técnica se ha aplicado con éxito en el diseño del producto en la industria automotriz y en la selección de factores críticos para el diseño de experimentos en la ingeniería de calidad. Tiene un gran potencial de utilización y aplicación en el mantenimiento, especialmente para evaluar el efecto de los modos de falla en las fallas funcionales cuando se diseña un programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC). Puede aplicarse para seleccionar una modificación de diseño de un sistema que actualmente esté en operación.

8.5 CONTROL DE CALIDAD DE LOS TRABAJOS DE MANTENIMIENTO

El trabajo de mantenimiento difiere del trabajo de producción ya que en su mayor parte es un trabajo no repetitivo y tiene mayor variabilidad. En el caso de trabajos no repetitivos y ocasionales no se pueden recopilar suficientes datos para utilizar eficazmente las herramientas del CEP. En estos

casos, es esencial controlar el proceso de mantenimiento mediante el control de sus entradas.

Como se muestra en la figura 8.10, un proceso es una secuencia de pasos (operaciones) que transforma un conjunto de entradas o insumos en un conjunto de salidas o productos; también tiene un mecanismo de retroalimentación. Las principales entradas al proceso de mantenimiento son las siguientes:

1. Procedimientos y normas de mantenimiento.
2. Personal.
3. Materiales y refacciones.
4. Equipo y herramientas.

Estas cuatro entradas son críticas para la calidad del trabajo de mantenimiento. El elemento clave para la calidad del trabajo de mantenimiento es desarrollar normas de calidad para trabajos críticos, no repetitivos. Así, si un trabajo no cumple la norma, se emplea un diagrama de causa y efecto para investigar las causas fundamentales del trabajo que está por debajo de la norma. La figura 8.11 muestra los pasos para controlar y mejorar la calidad del trabajo de mantenimiento. Los pasos de dicha figura son los primeros para identificar la causa de una baja calidad (en términos del cumplimiento de las especificaciones y los estándares de tiempo), y deben ir acompañados de investigaciones adicionales empleando diagramas de causa y efecto para otras entradas a los trabajos de mantenimiento. La figura 8.12 proporciona un ejemplo de este análisis en caso de que se sospeche que los procedimientos y las normas sean la causa más probable de una calidad en el trabajo por debajo de la norma. La siguiente sección se concentra en los principales factores que afectan la calidad del trabajo de mantenimiento y se proporciona un procedimiento para evaluar su impacto.

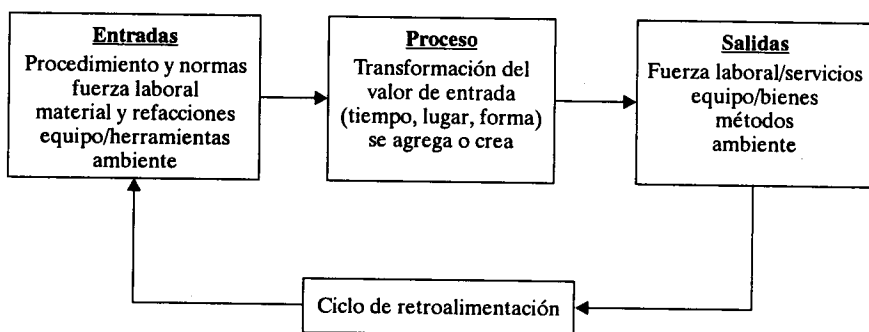


Figura 8.10 Un proceso con ciclo de retroalimentación.

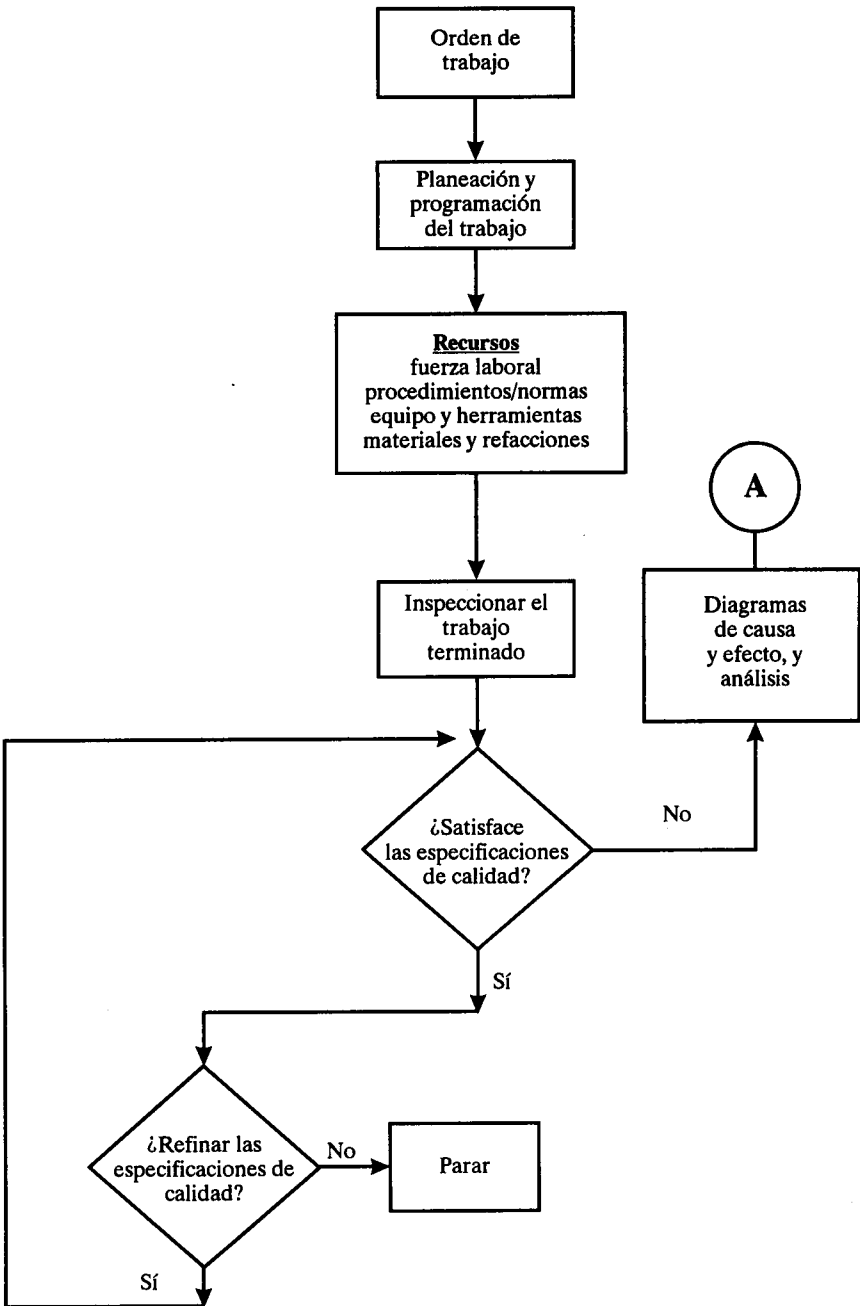


Figura 8.11 Pasos para mejorar y controlar la calidad del trabajo de mantenimiento.

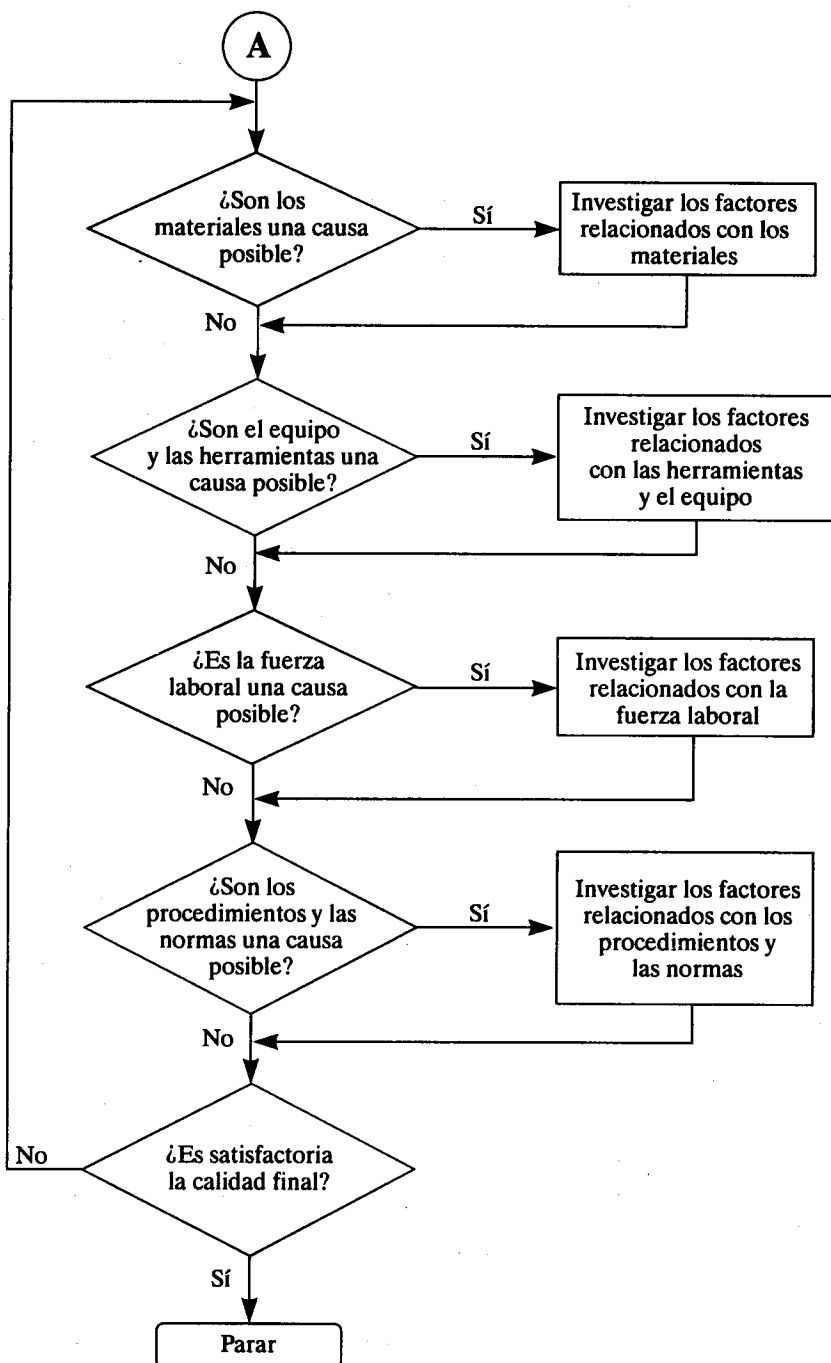


Figura 8.11 Continuación.

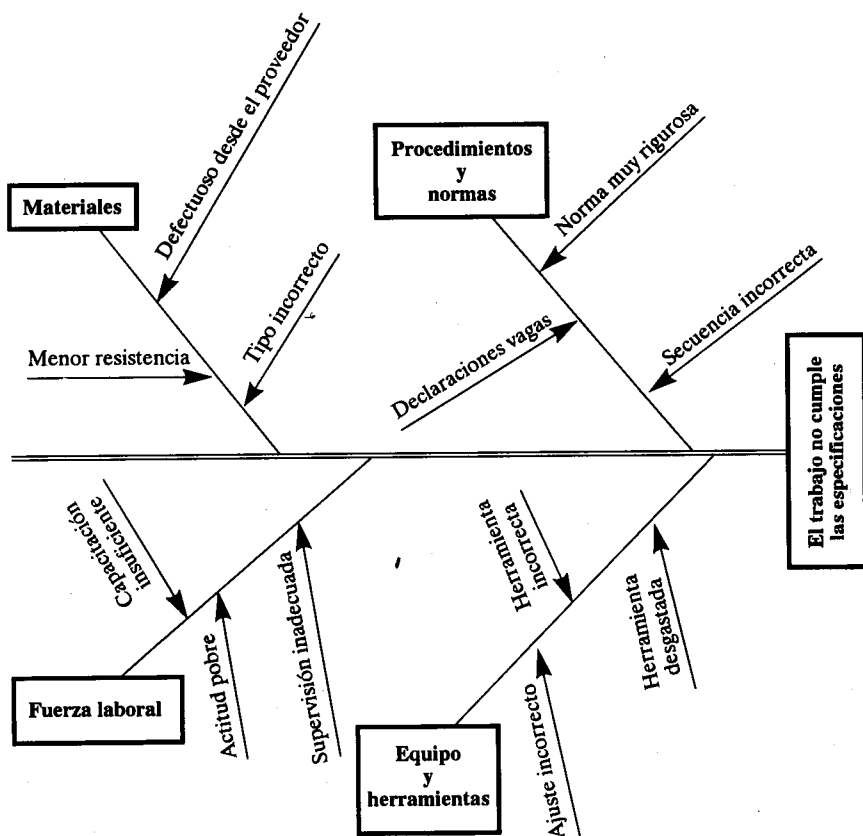


Figura 8.12 Diagrama de causa y efecto para investigar los trabajos que no están en conformidad con las normas.

8.5.1 Factores relacionados con los procedimientos y las normas

Los procedimientos y las normas se prescriben para controlar el trabajo y asegurar su uniformidad y calidad. Para asegurar la calidad, las normas deben ser precisas, medibles y reflejar los requerimientos del cliente (aquí la operación es considerada como un cliente interno). Un procedimiento deberá ser claro, lógico y estar bien documentado a fin de poder implantarse. Los siguientes son los principales factores que afectan la eficacia de los procedimientos y las normas:

1. Calidad del procedimiento (su habilidad para satisfacer los requerimientos del cliente).
2. Documentación de los procedimientos y las normas.

3. Adecuación de las normas para el ambiente de trabajo.
4. Mecanismo para la mejora de los procedimientos y las normas.

La calidad de un procedimiento se evalúa con base en su capacidad para alcanzar sus objetivos. Los subfactores utilizados para evaluar cualquier procedimiento incluyen: claridad de los objetivos, estructura lógica, claridad del procedimiento, sencillez, facilidad de uso, alcance, especificación de responsabilidades, computarización, documentación y mecanismo para mejora continua. Las normas se evalúan probando su adecuación.

8.5.2 Factores relacionados con el personal

El papel del personal calificado es esencial para un mantenimiento de alta calidad. El técnico calificado desempeña una función clave en el mantenimiento. Los siguientes son los factores más importantes que deben vigilarse a fin de mejorar la calidad del trabajo de mantenimiento: tamaño de la fuerza de trabajo, nivel de destrezas, capacitación, motivación, actitud, ambiente de trabajo, y formación y experiencia.

8.5.3 Factores relacionados con los materiales

La disponibilidad de materiales de calidad y en cantidades correctas en el momento correcto contribuyen a la calidad del trabajo de mantenimiento. Los factores que afectan la disponibilidad y la calidad del material incluyen normas y especificaciones correctas, políticas para el control de materiales, presupuesto, políticas y procedimientos de compras, y manejo y despliegue de materiales. Estos factores constituyen la base del análisis de causa y efecto para investigar el impacto de los materiales y las refacciones en la calidad del trabajo de mantenimiento.

8.5.4 Factores relacionados con las herramientas y el equipo

La disponibilidad de equipo y herramientas para realizar mantenimiento de producción puede ser un factor limitante en algunas circunstancias. Por ejemplo, la exactitud de los instrumentos de calibración y precisión podría tener un impacto significativo en la calidad de los trabajos de mantenimiento. Los factores que afectan la disponibilidad del equipo y herramientas correctos incluyen el presupuesto, la prontitud operativa, la capacitación, la compatibilidad y el número disponible. Estos factores podrían constituir una lista inicial para una sesión de lluvia de ideas sobre el impacto de la disponibilidad del equipo y las herramientas en la calidad del trabajo de mantenimiento.

8.6 CÍRCULOS DE CALIDAD

Los círculos de calidad son grupos pequeños de empleados que realizan de manera voluntaria actividades de control de calidad dentro de sus talleres. Además, estos grupos deben ser una parte integral de las actividades de control de calidad en toda la compañía (CCTC). Los círculos de calidad comenzaron primeramente en Japón en 1962 y han sido utilizados en muchos países fuera de Japón, incluyendo Estados Unidos y países europeos. Los conceptos básicos detrás de las actividades de los círculos de calidad, dentro del marco de trabajo de un esfuerzo de control de calidad en toda la compañía, son los siguientes:

1. Contribuir a la mejora y desarrollo de la empresa.
2. Respetar al ser humano y mejorar la calidad de vida.
3. Mejorar las aptitudes humanas hasta su máxima capacidad y desarrollar el potencial industrial.

Estos objetivos se alcanzan mediante:

1. Realizar actividades de control de calidad dentro del taller del círculo. Las actividades del círculo abarcan a todos los departamentos de la compañía, incluyendo producción, mantenimiento y actividades de servicio.
2. Esforzarse por alcanzar un autodesarrollo. Esto implica que los miembros del círculo de calidad deben estudiar e intentar desarrollar dentro de ellos mismos la habilidad para resolver problemas.
3. Participar en el esfuerzo hacia un desarrollo mutuo y el diálogo entre los círculos de calidad presentando estudios de casos en la conferencia de círculos de calidad.

Los círculos de calidad pueden desempeñar una función positiva para mejorar la calidad de las actividades de mantenimiento. El siguiente ejemplo demuestra el papel de los círculos de calidad en el mantenimiento. Este ejemplo informa del estudio de un caso con éxito realizado por un círculo de calidad en Kimitsu Works, una planta acerera en Kimitsu, Japón, para mejorar los dispositivos para mantenimiento de equipo a fin de que pudieran ser utilizados con mayor eficacia y amplitud para diagnosticar fallas en las máquinas. Conforme las máquinas y otros equipos se hacen más grandes y complejos, es imposible dar un mantenimiento eficaz al equipo simplemente "sintiendo" el trabajo y con un método de prueba y error. Además, la necesidad de reducir las fallas y los problemas del equipo requieren que el diagnóstico del equipo se realice en forma científica para producir valores

cuantificables. La compañía tiene 53 verificadores de máquinas (VM) que se compraron para ayudar a un diagnóstico eficaz; sin embargo, estos verificadores no se usaban plenamente. Un estudio descubrió que los VM estaban siendo utilizados a una tasa del 30%. Se pensaba que la mejora de la tasa de utilización conduciría a un diagnóstico más eficaz de las máquinas, reduciendo de esta forma las fallas y problemas de los equipos. El propósito del estudio de este caso era mejorar la utilización, por lo que se estableció una meta del 80% de utilización.

La encuesta que se realizó también preguntaba acerca de las razones por las cuales los trabajadores no estaban utilizando los verificadores de máquinas. Se construyó una gráfica de Pareto para identificar las causas (razones) principales por las que no se utilizaban los verificadores. Se identificaron las siguientes tres causas: 1) las instrucciones para el uso de los verificadores eran inconsistentes, 2) los trabajadores no sabían cómo usar los verificadores, y 3) los criterios de evaluación eran difíciles de usar.

El círculo de calidad realizó una lluvia de ideas sobre las tres principales causas, ideó un plan para mejorar la utilización y distribuyó las responsabilidades para ejecutarlo. El plan incluía el desarrollo de un nuevo dispositivo de evaluación, amable con el usuario, y el establecimiento de un grupo núcleo para estudiar la teoría y práctica del uso de los verificadores de máquinas, a fin de convertirse en líderes en sesiones de capacitación para el uso de los verificadores. Para una descripción detallada de este caso, referirse a [8].

8.7 VÍNCULO DEL MANTENIMIENTO CON LA CALIDAD

El mantenimiento puede contribuir de manera significativa a mejorar y mantener productos de calidad; por ejemplo, la capacidad de una máquina herramienta en su mejor condición producirá más del 99% de piezas dentro de las tolerancias aceptadas. La figura 8.13a ilustra la distribución de las características de calidad del producto. Después de que la máquina ha estado en servicio durante algún tiempo y se ha presentado desgaste en algunos de los componentes de la máquina, habrá mayor traqueteo y vibración. La distribución de las características de calidad tendrá mayor variación y se producirán más piezas fuera de las especificaciones. Además, más piezas tendrán algunas características de calidad particulares alejadas del valor meta de dichas características. La nueva distribución se muestra en la figura 8.13b. En términos generales, un proceso fuera de control genera productos defectuosos y, en consecuencia, aumenta los costos de producción, lo cual se refleja en una menor rentabilidad, que pone en peligro la supervivencia de la organización.

El mantenimiento predictivo y el mantenimiento basado en las condiciones emplean una estrategia de mantenimiento de ciclo cerrado en la que se

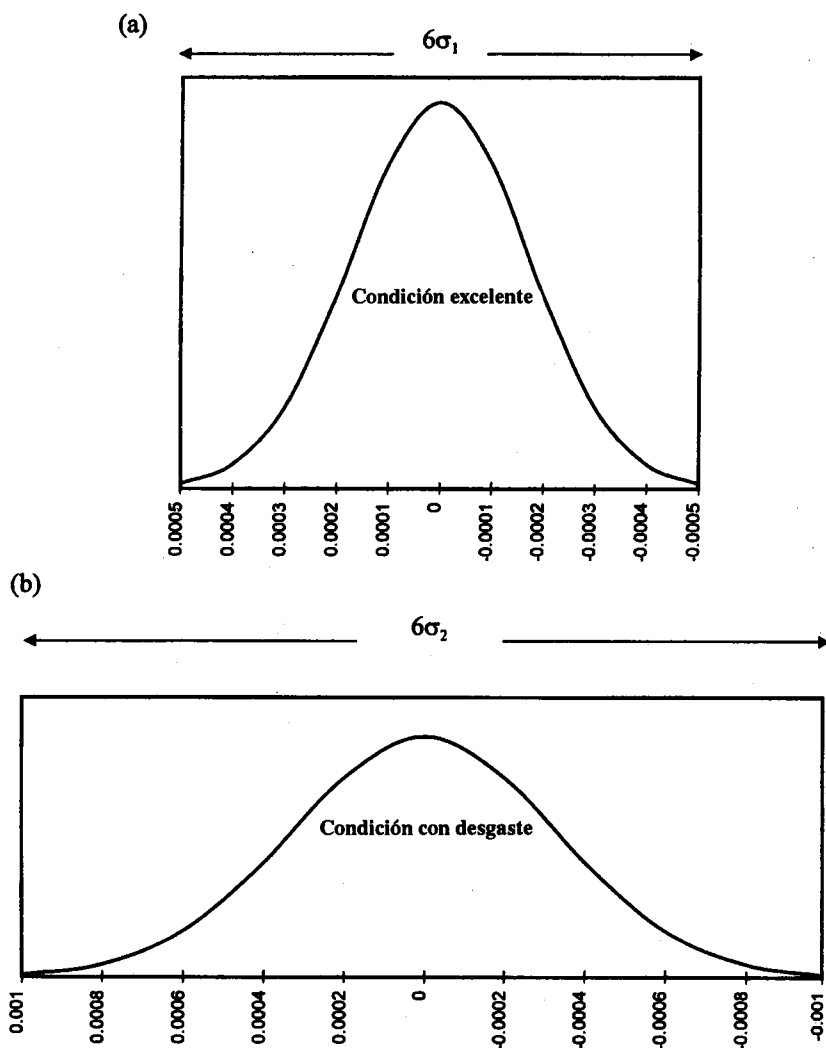


Figura 8.13 Distribución de una característica de la calidad del producto para una máquina nueva y con desgaste.

obtiene información del equipo y se utiliza para tomar decisiones para el mantenimiento planeado. La decisión de mantenimiento generalmente se basa en el empleo de un umbral, el cual, una vez alcanzado, significa que debe realizarse mantenimiento [12]. Tal estrategia asegurará una alta calidad del producto, especialmente si el umbral se elige de tal manera que el

equipo no se deteriore hasta un grado en el que se generen productos defectuosos o casi defectuosos.

Los argumentos anteriores demuestran el fuerte vínculo entre el mantenimiento del equipo y la calidad de los productos. La filosofía del mantenimiento productivo total (MPT) [10] también ha identificado este vínculo. Para alcanzar una eficacia global del equipo, el MPT trata de mantener bajas las pérdidas de equipo minimizando sus fallas, el tiempo muerto por preparación y ajuste, el trabajo en vacío y paros menores, la reducción de la velocidad, los defectos del proceso y el bajo rendimiento. Todas estas pérdidas están relacionadas directa o indirectamente con la calidad. Por ejemplo, un equipo que está fallando tiende a producir piezas defectuosas antes de llegar a una falla completa. La preparación y los ajustes generalmente se hacen para encontrar los estados óptimos de los parámetros. Esto implica que los ajustes se llevan a cabo porque el equipo no está operando en condiciones óptimas y, en consecuencia, se espera que se generen productos defectuosos. Asimismo, en la etapa de preparación y ajuste, se producen productos defectuosos hasta que se encuentra el ajuste óptimo. El trabajo en vacío, los paros menores y una velocidad reducida a menudo producen defectos, debido a que muchos parámetros del producto son una función de la velocidad. Por ejemplo, el acabado superficial en el maquinado es una función de la velocidad. Para mayor información sobre el MPT y la relación entre la eficacia global del equipo y la calidad, ver el capítulo 13.

El mantenimiento es un sistema que opera en paralelo con la función de producción. La principal salida de la producción es el producto deseado con un cierto nivel de calidad, que es definida por el cliente. Conforme continúa el proceso de producción, se genera una salida secundaria, a saber, la demanda de mantenimiento, que es una entrada al proceso de mantenimiento.

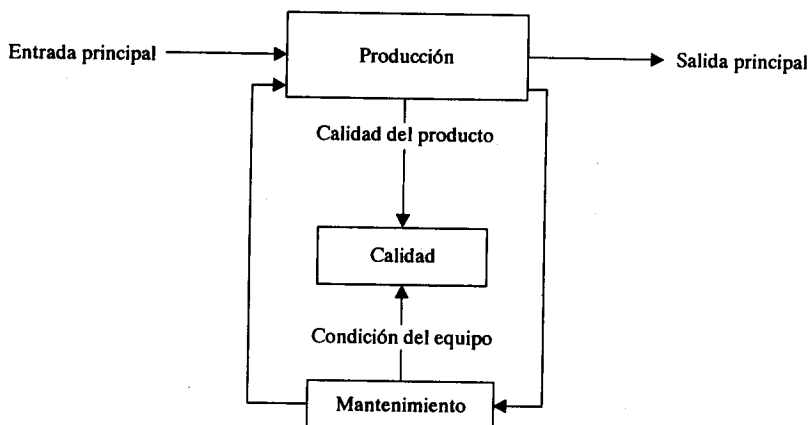


Figura 8.14 Relaciones entre producción, calidad y mantenimiento.

La salida del mantenimiento es un equipo en condiciones de dar servicio. Un equipo con un buen mantenimiento aumenta la capacidad de producción y representa una entrada secundaria a producción. Por lo tanto, el mantenimiento afecta la producción al aumentar la capacidad de producción y controlar la calidad y la cantidad de la salida. La relación y los enlaces entre producción, calidad y mantenimiento han sido estudiados con detalle en [1], en donde se describió un marco de trabajo para modelar esta relación empleando el mantenimiento imperfecto y los métodos de Taguchi. La figura 8.14 ilustra las relaciones entre producción, calidad y mantenimiento.

RESUMEN

En este capítulo se presentaron diferentes métodos para el control de calidad del mantenimiento y la mejora del proceso. Los beneficios con el empleo de herramientas para el control estadístico de procesos para mejorar todos los aspectos del proceso de mantenimiento se recalcaron a lo largo de todo el capítulo. Se proporcionaron ejemplos que demuestran el empleo de estas herramientas en el mantenimiento, y se describió el vínculo entre el mantenimiento y la calidad. La integración y la utilización de estas herramientas y la disponibilidad de datos exactos son importantes para lograr una mejora. El sistema de información gerencial para el mantenimiento deberá incluir los datos necesarios para el control de calidad del mantenimiento, que puede requerir la fusión del sistema de información gerencial para el mantenimiento con el sistema de información de calidad.

EJERCICIOS

- 8.1 ¿Cuáles son las razones para no formalizar la calidad del mantenimiento?
- 8.2 ¿Cuál es la producción de la función de mantenimiento y cómo se mide?
- 8.3 Haga una lista de las responsabilidades del control de calidad en el mantenimiento.
- 8.4 ¿Cuáles son los tipos de inspecciones que realiza el control de calidad en el mantenimiento?
- 8.5 Haga una lista de cinco posibles usos de las listas de verificación en el mantenimiento.
- 8.6 Haga una lista de seis posibles usos de los histogramas en el mantenimiento.

- 8.7 Visite una organización de su área y recopile algunos datos sobre una actividad de mantenimiento. Utilice los datos para demostrar el empleo de las gráficas de control en el mantenimiento.
- 8.8 ¿Cuál es el papel que puede desempeñar el AMFE para mejorar la calidad en el mantenimiento?
- 8.9 Visite una organización de su área e identifique un trabajo de mantenimiento por debajo de la norma debido a los materiales. Utilice un diagrama de causa y efecto para obtener las posibles causas fundamentales de este problema.
- 8.10 Proporcione dos ejemplos para demostrar el vínculo entre la calidad y el mantenimiento.

REFERENCIAS

1. M. Ben Daya and S. O. Duffuaa, "Maintenance and Quality: The Missing Link," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 20-26.
2. M. Ben Daya and A. Raouf, "A Revised Failure Mode and Effects Analysis Model," *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 13, No. 1, pp. 43-47.
3. S. O. Duffuaa and M. Ben Daya, "Improving Maintenance Quality Using SPC Tools," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 25-33.
4. J. R. Everly, "Maintenance Quality Control: A Critical Appraisal," Technical Report, U. S. Army War College, Carlisle Barracks, PA.
5. International Business Machines, *Statistical Analysis Software*, IBM, New York.
6. K. Ishikawa, *Guide to Quality Control*, Asian Productivity Organization, Tokio.
7. S. C. Leonard, "Improving Maintenance Reliability," *Hydrocarbon Processing*, Vol. 162.
8. T. Masuda and H. Taniguchi, "Working for Better Equipment Maintenance," in *Quality Control Circles at Work* (K. Ishikawa, Ed.), Asian Productivity Press, Tokio.
9. D. C. Montgomery, *Statistical Quality Control*, 2nd Ed., Wiley, New York.
10. S. Nakajima, *Introduction to TPM*, Productivity Press, Norwalk, CT.

11. R. H. Osuri, S. Chatterjee and S. Chandrashekhar, "On Line Monitoring of Tool Wear in End Milling Using Acoustic Environment," *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 7, pp. 1339-1353.
12. G. S. Peace, *Taguchi Methods: A Hands-On Approach to Quality Engineering*, Addison-Wesley, New York.
13. I. Yoshinori, "Reducing Equipment Trouble," *The Association for Overseas Scholarship*, No. 110, pp. 26-31.

9

PRODUCTIVIDAD DE LOS SISTEMAS DE MANTENIMIENTO

9.1 INTRODUCCIÓN

La *productividad* se define como las salidas por unidad de entrada, o productos por unidad de insumos. En un sistema de mantenimiento, las salidas se refieren a la capacidad productiva sostenible del equipo que está recibiendo mantenimiento, y las entradas incluyen los recursos requeridos para sostener dicha capacidad. Debido a que no es práctica una razón de productividad para el mantenimiento, se requieren listas distintas de medidas de las entradas, medidas de las salidas y medidas dentro del sistema de mantenimiento.

En este capítulo se presentan varias medidas para realizar la medición de la eficacia y eficiencia del mantenimiento. En la sección 9.2 se presenta un conjunto de medidas para las entradas que son principalmente medidas de costos. La sección 9.3 describe un conjunto de medidas para las salidas, que incluyen la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad. A continuación, en la sección 9.4, se explica un conjunto de otras medidas dentro del sistema. Además, en la sección 9.5 se definen varios índices de mantenimiento, que proporcionan medidas con relación a la administración, eficacia y productividad del mantenimiento. En la sección 9.6 se presentan comparaciones de las medidas, y en la sección 9.7 se presenta el análisis de tendencias como una técnica para investigar el comportamiento del sistema

9.2 MEDIDAS DE ENTRADA

Algunos de los factores importantes que se relacionan directamente con el costo de llevar a cabo el mantenimiento son los siguientes:

- *Mano de obra.* Este factor incluye todos los costos asociados con los oficios, los aprendices, la mano de obra semicalificada de apoyo, y el personal de vigilancia y de piso empleado directamente por el departamento de mantenimiento. Estos costos también incluyen el tiempo extra, la capacitación, las prestaciones y varios costos obligatorios o reglamentarios.
- *Materiales.* Este factor comprende las piezas compradas, refacciones, suministros, artículos de oficina, ropa protectora, suministros de taller y químicos usados directamente para actividades de reparación y mantenimiento. También puede incluir gastos generales de materiales directos aplicados al precio de salida de los almacenes de mantenimiento, como transporte, almacenamiento, manejo, embarque y entrega de piezas internas.
- *Contratos.* Este factor abarca el costo de tareas específicas de mantenimiento, proyectos u órdenes de trabajo contratadas por tiempo o por proyecto, como el mantenimiento de instalaciones, reparación general de calderas o renovación de máquinas. Cada categoría de trabajo se caracteriza por un contrato específico. Además, en esta categoría debe incluirse el costo del personal contratado temporal o permanentemente.
- *Servicio del taller.* En las instalaciones y plantas grandes, por lo general existe un servicio de taller central que proporciona servicios especializados. Estos talleres a menudo cobran una tarifa por hora, calculada para órdenes de trabajo específicas o proyectos dirigidos por el área solicitante. Esta tarifa por hora comúnmente incorpora todos los gastos generales del taller, incluyendo los costos de supervisión y de operación del edificio y el equipo.
- *Rentas de equipo.* Este factor incluye el costo de la renta de todo el equipo móvil y estacionario, como grúas, remolques, retroexcavadoras, arietes hidráulicos, etc.
- *Contenedor de herramientas.* Comprende el costo de herramientas manuales especializadas y herramientas especiales, como llaves neumáticas, cables de cadena para elevación, esmeriladoras de mano, sopletes de acetileno, etc., que no están incluidas en los materiales (almacenes) o en los servicios de taller.
- *Gastos generales de mantenimiento.* Este factor puede incluir todos los niveles de administración de mantenimiento y supervisión, así como la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad, planificadores, programadores, coordinadores de materiales, empleados de oficina, y soporte para entrada de datos y sistemas computarizados para la administración del mantenimiento. También puede incluir cualquier costo de taller no incluido en los servicios de taller.

- *Gastos generales de la compañía o la planta.* Este factor normalmente incluye una proporción de todos los gastos generales de administración y ejecutivos de la compañía, incluyendo la depreciación.

Junto con los costos de las categorías anteriores de medidas de entrada, tal vez haya medidas específicas no relacionadas con costos para cada una de ellas. Por ejemplo, cuando se consideran los materiales, varias estadísticas son útiles para el control de inventarios:

- Inversión en inventario o valor por clase o categoría.
- Rotación del inventario, definida como la proporción de salidas totales anuales divididas entre la cantidad en existencia al final del año.
- Nivel de servicio, definido como el porcentaje de órdenes surtidas según se solicitaron.
- Faltantes, definidos como el número de órdenes que no pudieron surtir por los almacenes durante un período específico.
- Obsolescencia del inventario, definida como el porcentaje de unidades de almacenamiento (SKU) que no han salido en un período de 24 meses.

9.3 MEDIDAS DE SALIDA

Las medidas de salida describen por qué existe la administración del mantenimiento e incluyen las siguientes medidas:

- *Disponibilidad.* Esta es una medida de tiempo de operación o, de manera alterna, una medida de la duración del tiempo muerto, definido como: $(\text{tiempo programado} - \text{todas las demoras}) / \text{tiempo programado}$.
- *Confiabilidad y tiempo medio entre fallas (MTBF).* Esta es una medida de la frecuencia de una falla, definida como $\text{tiempo de operación} / \text{número de fallas}$.
- *Tiempo medio para la reparación (MTTR).* Esta es una medida del tiempo que dura la reparación, definido como $\text{tiempo muerto por reparación} / \text{número de fallas}$. La mantenibilidad es la probabilidad de realizar la reparación en un tiempo dado o en el MTTR.
- *Tasa del proceso.* Esta es una medida del tiempo del ciclo del equipo en el proceso, definida como el tiempo ideal del ciclo/tiempo real del ciclo o, de manera alterna, la tasa real de rendimiento/la tasa ideal de rendimiento. Con esta medida, a menudo es más fácil definir el

“ideal” como el límite superior de control estadístico para el proceso particular.

- *Tasa de calidad.* Ésta es una medida de la precisión del proceso o del equipo, definida como: (rendimiento total menos rechazos netos)/rendimiento total. Los rechazos netos incluyen la pérdida por productos reciclados, rechazados, descartados o degradados.
- *Eficacia global del equipo.* Es el producto de la disponibilidad, la tasa del proceso y la tasa de calidad. Es una medida que abarca varias funciones, ya que varios departamentos o funciones pueden tener un impacto en los resultados.

La siguiente exposición demuestra la estimación de estas medidas de salida y su impacto en la capacidad productiva. Considere un equipo de producción, con la historia de operación y mantenimiento que se describe en la figura 9.1, durante un período de 1 mes. En este escenario, el programa de producción demanda una operación continua a lo largo del mes; sin embargo, el equipo no está disponible para producir a lo largo de dicho período.

La disponibilidad es una medida de la duración de la operación programada que se logra o, de manera inversa, una medida de la duración de la falla o tiempo muerto y está dada por

$$A = \frac{S - d}{S} \times 100\% \quad (9.1)$$

en donde

A = Disponibilidad

S = Tiempo de producción programado

d = Tiempo muerto, en días.

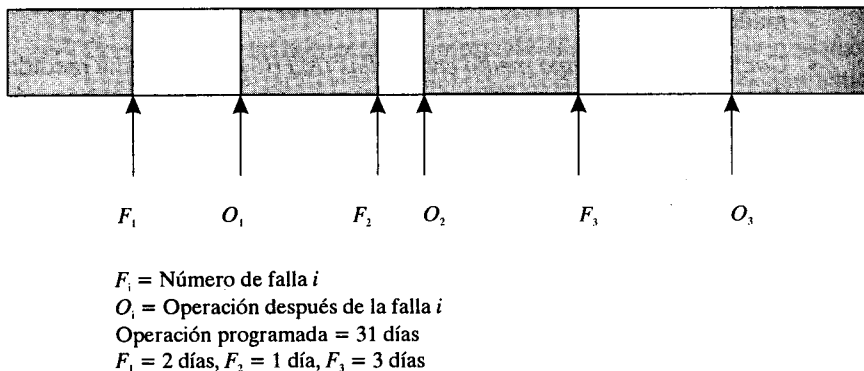


Figura 9.1 Medidas del mantenimiento.

$$A = \frac{31 - 6}{31} \times 100\% = 80.6\%$$

En este ejemplo,

$$I_d = 100\% - A = 100 - 80.6 = 19.4\%$$

en donde I_d es el porcentaje de tiempo muerto.

La mayoría de los ambientes de operación son sensibles a la frecuencia de las fallas. En esos casos, debido a los aspectos asociados de producción y calidad, un paro por dos días es preferible a cuatro paros de medio día cada uno. Por lo tanto, se requiere una medida de la frecuencia de fallas:

$$\text{Tiempo medio entre fallas} = \text{MTBF} = \frac{S - d}{f} \quad (9.2)$$

en donde f es el número de fallas. En este ejemplo,

$$\text{MTBF} = \frac{31 - 6}{3} = 8.33 \text{ días}$$

Una vez que ha fallado un equipo o componente, normalmente es crítico minimizar el tiempo de reparación. La medida del tiempo de reparación es MTTR. La mantenibilidad es la probabilidad de que el equipo sea reparado dentro del MTTR.

$$\text{Tiempo medio para la reparación} = \text{MTTR} = \frac{df}{f} \quad (9.3)$$

en donde df corresponde a las demoras de tiempo muerto por las fallas. Para el ejemplo anterior,

$$\text{MTTR} = \frac{6}{3} = 2 \text{ días}$$

En este ejemplo, el equipo no se consideraría confiable (MTBF = 8.3 días, MTTR = 2 días), aunque la disponibilidad a un 80.6% no se consideraría particularmente inusual.

Deberán considerarse medidas adicionales para describir completamente la capacidad productiva y la idoneidad de un sistema de operación. Considere el siguiente escenario:

Se requiere que un horno de cemento opere 300 días al año, produciendo a una tasa de 1200 toneladas por día de 24 horas. A lo largo del año, su rendimiento ha sido como sigue:

- Tiempo de operación programada, 300 días
- Número de descomposturas, 6
- Demoras por descomposturas, 180 horas
- Tiempo de mantenimiento preventivo, 80 horas
- Paros debido a falta de alimentación, 120 horas
- Retardos del proceso, 60 horas a una tasa de 80%
- Retardos por alimentación húmeda, 40 horas a una tasa de 60%
- Producción total rechazada, 2000 toneladas
- Producción de segunda calidad, 3000 toneladas a un valor del 50%

Cuando se revisa la capacidad de producción de la planta, el tiempo programado entre el tiempo del calendario es una medida de su utilización:

$$\begin{aligned}\text{Utilización} &= \frac{\text{Tiempo programado}}{\text{Tiempo de calendario}} \\ &= \frac{300}{365} = 82.2\% \quad (9.4)\end{aligned}$$

La medida de disponibilidad de esta planta se calcula como

$$\begin{aligned}\text{Disponibilidad} &= \frac{300 - (180 + 80 + 120) / 24}{300} \times 100\% \\ &= 94.7\%\end{aligned}$$

Conforme los sistemas de producción y mantenimiento se han hecho más complejos con un mayor grado de integración, se ha vuelto útil medir todas las demoras y pérdidas con un enfoque consistente, independientemente de si el departamento de operaciones o de mantenimiento ha tenido siempre la responsabilidad de su corrección.

En este ejemplo la capacidad de producción ha sido disminuida debido a que el horno fue operado a velocidades menores durante un total de 100

horas, dando como resultado problemas de proceso y alimentación. El equipo a menudo no puede ser operado a su tasa requerida debido a procedimientos inadecuados de operación, actividades de mantenimiento o problemas de diseño.

La tasa de proceso en este ejemplo es

$$\begin{aligned}
 \text{Tasa del proceso} &= \frac{\text{Tiempo ideal del ciclo}}{\text{Tiempo real del ciclo}} \times 100\% \\
 \text{o, PR} &= \frac{\text{Tasa real de rendimiento de operación}}{\text{Tasa ideal de rendimiento de operación}} \\
 &= \frac{(300 - 380 / 24) \times 1200 - (60 / 24 \times 0.2 \times 1200) - (40 / 24 \times 0.4 \times 1200)}{(300 - 380 / 24) \times 1200} \\
 &= \frac{284.167 \times 1200 - 2.5 \times 0.2 \times 1200 - 1.67 \times 0.4 \times 1200}{284.2 \times 1200} \\
 &= \frac{341\,000 - 600 - 800}{341\,040} \\
 &= \frac{339\,600}{341\,040} \\
 &= 99.6\%
 \end{aligned}$$

Finalmente, aun cuando se elaboraron productos, no todos pudieron venderse, lo cual redujo nuevamente la capacidad productiva:

$$\begin{aligned}
 \text{Tasa de calidad} = \text{QR} &= \frac{\text{Total producido} - \text{Rechazo degradado}}{\text{Total producido}} \times 100\% \\
 &= \frac{339\,600 - (2000 + 3000)}{339\,600} \times 100\% \\
 &= \frac{334\,600}{339\,600} \times 100\% \\
 &= 98.5\%
 \end{aligned}$$

(9.6)

Una medida verdadera de la eficacia global del equipo (OEE) del horno es

$$\begin{aligned}
 \text{OEE} &= A \times \text{PR} \times \text{QR} \\
 &= 0.9470 \times 0.996 \times 0.985 \times 100\% \\
 &= 92.9\%
 \end{aligned}
 \tag{9.7}$$

La capacidad de producción del equipo debe reflejar la utilización del horno y puede obtenerse como sigue:

$$\begin{aligned}
 \text{Capacidad productiva} &= \text{OEE} \times \text{Utilización} \\
 &= 0.929 \times 0.822 \times 100\% \\
 &= 76.4\%
 \end{aligned}
 \tag{9.8}$$

Por lo tanto, el horno tiene una capacidad adicional de 23.6% que puede alcanzarse administrando el programa de producción de la planta, las demoras, su velocidad y la calidad del producto.

9.4 MEDIDAS DENTRO DEL SISTEMA

Aunque la productividad sólo considera las entradas y las salidas, el impacto de cualquiera de éstas requiere una comprensión clara del sistema mismo y de cómo las medidas de productividad se relacionan con las medidas del sistema.

- *Distribución del trabajo.* Es el porcentaje de horas de mano de obra dedicadas a las diversas categorías de trabajo, como planeado, no planeado, urgente, reparaciones menores, órdenes permanentes, indirecto (por ejemplo, reuniones, capacitación), preventivo, predictivo, correctivo planeado, reparación general importante o trabajo con paro.
- *Demoras.* Es el tiempo consumido por los trabajadores en espera de instrucciones, de piezas y de otros trabajadores. También incluye el tiempo para desplazarse, interrupciones personales, y tiempos de inicio y terminación.
- *Cumplimiento.* Son medidas para dar seguimiento al cumplimiento de varios planes y programas, e incluyen la cobertura de MP, cumplimiento del programa de MP, cumplimiento del programa de trabajo correctivo planeado, solicitudes de trabajo generadas a partir de rutinas de MP, y cumplimiento del programa de mantenimiento con paro.

- *Trabajos pendientes.* Es la cantidad de trabajo planeado pero que aún no se ha programado o completado, calculado generalmente por especialidad (mecánico, eléctrico), por planta o área del taller, por turno o por cuadrilla específica.
- *Estado de las órdenes de trabajo.* Ésta es una medida del número de órdenes de trabajo o solicitudes de trabajo en cada estado de terminación: recibidas por el departamento de mantenimiento, aprobadas, planeadas, en espera de materiales, programadas, asignadas, en progreso o completadas.
- *Análisis de fallas.* Ésta es una actividad que da seguimiento a las iniciativas de mejora, como el número de análisis de causas fundamentales de descomposturas emprendidos y completados, el número de rutinas de MP desarrolladas, salidas de garantías y similares.

Las secciones anteriores proporcionan una definición general de los factores importantes que deberán considerarse en la evaluación de la eficacia y productividad de un sistema de mantenimiento. La siguiente sección ofrece un conjunto de índices útiles que miden la eficacia de estos factores.

9.5 ÍNDICES DE MANTENIMIENTO

Existen varios índices que miden la eficacia del mantenimiento. Son útiles en la preparación de informes y brindan una cuantificación razonable del rendimiento de algunas áreas claves. Estos índices deben integrarse al sistema computarizado de la administración del mantenimiento, y el sistema los debe proporcionar automáticamente cuando se le soliciten. En términos generales, estos índices pueden clasificarse en dos categorías. En la primera están los índices económicos (de costos) que permiten el seguimiento de la evolución de los resultados internos y cierta comparación del mantenimiento entre diferentes plantas. Los índices de la segunda categoría son de tipo técnico, y proporcionan al gerente de mantenimiento los medios para dar seguimiento a la eficacia técnica de las instalaciones. Niebel [3] asignó estos índices a tres clases que están relacionadas y reflejan los objetivos del mantenimiento. Estas clases son la administración del mantenimiento, la eficacia del mantenimiento y los costos del mantenimiento. La siguiente lista de índices debe adaptarse a cada organización antes de su uso.

9.5.1 Administración del mantenimiento

1. Horas subcontratadas por mes

$$\% = \frac{\text{Horas subcontratadas totales trabajadas}}{\text{Horas totales trabajadas}} \times 100$$

2. Horas de tiempo extra por mes

$$\% = \frac{\text{Horas de tiempo extra totales trabajadas}}{\text{Horas totales trabajadas}} \times 100$$

3. Nivel de actividad de los trabajadores

$$\% = \frac{\text{Horas estándar ganadas}}{\text{Tiempo de reloj total}} \times 100$$

4. Trabajos pendientes actuales (en cuadrilla-semanas)

$$\text{Cuadrilla - semanas} = \frac{\text{Trabajo programado listo para liberarse (en horas - hombre)}}{\text{Una cuadrilla - semana (en horas - hombre)}}$$

5. Trabajos pendientes totales (en cuadrilla-semanas)

$$\text{Cuadrilla - semanas} = \frac{\text{Horas de mano de obra de trabajo totales en espera de ejecución}}{\text{Una cuadrilla - semana (en horas - hombre)}}$$

6. Productividad de los trabajadores por mes

$$\% = \frac{\text{Horas estándar}}{\text{Horas totales trabajadas}} \times 100$$

7. Utilización de los trabajadores

$$\% = \frac{\text{Horas consumidas en trabajo productivo}}{\text{Horas totales programadas para trabajo}} \times 100$$

8. Índice de productividad compuesta (CPI) de los trabajadores

$$\text{CPI} = \text{Productividad} * \text{Utilización}$$

9. Órdenes de trabajo planeadas y programadas diariamente

$$\% = \frac{\text{Órdenes de trabajo planeadas y programadas}}{\text{Órdenes de trabajo totales ejecutadas}} \times 100$$

10. Horas programadas contra horas trabajadas según el programa

$$\% = \frac{\text{Horas trabajadas según el programa}}{\text{Horas totales programadas}} \times 100$$

11. Horas programadas contra horas trabajadas

$$\% = \frac{\text{Horas programadas}}{\text{Horas totales trabajadas}} \times 100$$

12. Mantenimiento preventivo y predictivo efectuado según el programa

$$\% = \frac{\text{Horas - hombre totales de mantenimiento preventivo y predictivo ejecutado}}{\text{Horas - hombre totales de mantenimiento preventivo y predictivo programado}} \times 100$$

13. Cobertura de mantenimiento predictivo y preventivo

$$\% = \frac{\text{Horas - hombre totales de mantenimiento predictivo y preventivo}}{\text{Horas - hombre totales trabajadas}} \times 100$$

9.5.2 Eficacia del mantenimiento

1. Eficacia global del equipo (OEE)

$$OEE = A \times S \times Q$$

en donde

A = Indicador de disponibilidad

S = Indicador de velocidad

Q = Indicador de calidad

2. Disponibilidad

$$A = \frac{\text{Tiempo de producción planeado} - \text{Tiempo muerto no planeado}}{\text{Tiempo de producción planeado}}$$

3. Velocidad

$$S = \frac{\text{Cantidad real de producción}}{\text{Cantidad planeada de producción}}$$

4. Calidad

$$Q = \frac{\text{Cantidad real de producción} - \text{Cantidad no aceptada}}{\text{Cantidad real}}$$

5. Porcentaje de horas brutas de operación

$$\% = \frac{\text{Número de horas brutas de operación}}{\text{Número de horas brutas de operación} + \text{Tiempo muerto por mantenimiento}} \times 100$$

6. Número de fallas en el sistema (NFS)

$$\text{NFS} = \frac{\text{Número de paros en producción}}{\text{Número de horas brutas de operación}}$$

7. Tiempo muerto del equipo ocasionado por descomposturas

$$\% = \frac{\text{Tiempo muerto causado por descomposturas}}{\text{Tiempo muerto total}} \times 100$$

8. Horas-hombre de emergencia

$$\% = \frac{\text{Horas - hombre consumidas en trabajos de emergencia}}{\text{Horas totales trabajadas en mantenimiento directo}} \times 100$$

9. Horas-hombre de emergencia y todas las demás no programadas

$$\% = \frac{\text{Horas - hombre en trabajos de emergencia y no programados}}{\text{Horas - hombre totales trabajadas en mantenimiento}} \times 100$$

10. Evaluación del mantenimiento predictivo y preventivo

$$\% = \frac{\text{Trabajos resultantes de inspecciones}}{\text{Inspecciones completadas}} \times 100$$

9.5.3 Costos de mantenimiento

1. Costo de mantenimiento en relación con el valor agregado de producción

$$\% = \frac{\text{Costo directo de mantenimiento}}{\text{Valor agregado de producción}} \times 100$$

El costo directo de mantenimiento comprende el costo de la fuerza laboral, el costo de los materiales (refacciones, lubricantes, etc.) y el costo del trabajo subcontratado y sobrecargas. El valor agregado de producción es el costo de producción menos el costo de los materiales.

2. Costo de mantenimiento por unidad de producción

$$\text{Costo por unidad} = \frac{\text{Costo total de mantenimiento}}{\text{Unidades totales producidas}}$$

3. Componente de fuerza laboral en el costo de mantenimiento

$$\% = \frac{\text{Fuerza laboral total en mantenimiento}}{\text{Costo total de mantenimiento directo}} \times 100$$

4. Costo de mantenimiento subcontratado

$$\% = \frac{\text{Costo de subcontratación (fuerza laboral)}}{\text{Costo directo de mantenimiento}} \times 100$$

5. Proporción de costo de mano de obra con respecto al costo de materiales de mantenimiento

$$\text{Proporción} = \frac{\text{Costo total de mano de obra de mantenimiento}}{\text{Costo total de materiales de mantenimiento}}$$

6. Costo de hora de mantenimiento

$$\text{\$} = \frac{\text{Costo total de mantenimiento}}{\text{Horas - hombre totales trabajadas}}$$

7. Costo de supervisión como porcentaje del costo total de mantenimiento

$$\% = \frac{\text{Costo total de supervisión}}{\text{Costo total de mantenimiento}} \times 100$$

8. Avance en los efectos de reducción de costos

Índice =

$$\frac{\% \text{ de horas - hombre de mantenimiento consumidas en trabajos programados}}{\text{Costo de mantenimiento / Unidad de producción}}$$

9. Costo de mantenimiento preventivo (MP) relacionado con el mantenimiento correctivo

$$\% = \frac{\text{Costo total de MP (incluyendo las pérdidas de producción)}}{\text{Costo total de descomposturas}} \times 100$$

10. Tasa de rotación de inventario por año

$$\text{Tasa} = \frac{\text{Costo de consumo anual}}{\text{Inversión promedio en inventario}}$$

11. Costo de refacciones y materiales con respecto al costo de mantenimiento

$$\% = \frac{\text{Salidas y compras totales del almacén}}{\text{Costo total de mantenimiento directo}} \times 100$$

12. Proporción del valor de las existencias con respecto al valor del equipo de producción

$$\text{Proporción} = \frac{\text{Valor promedio de las existencias}}{\text{Valor de reemplazo del equipo de producción}}$$

9.6 COMPARACIONES DE MEDIDAS

Las organizaciones desarrollan medidas de productividad con base en los objetivos específicos que se persiguen en períodos particulares de la historia de la corporación. Por ejemplo, si una operación de una mina tiene un problema específico con fallas mecánicas en su flotilla de carros de transporte, se define una medida de disponibilidad que refleja este problema. Como resultado de esto, la disponibilidad puede definirse como tiempo de calendario menos las demoras por las fallas mecánicas, dividido entre el tiempo de calendario. Esta medida es útil para esta operación de la mina, pero no puede compararse directamente con las medidas históricas basadas en una definición que podría haber incluido todas las demoras por mantenimiento, ni con otras compañías mineras o la industria minera en general, que podrían utilizar el tiempo programado en lugar del tiempo de calendario.

Deberá definirse una medida que pueda compararse con datos externos, que sea clara y se entienda fácilmente, que utilice datos que se puedan obtener de manera sencilla y que tenga un amplio consenso de que mide con precisión la característica bajo consideración.

Anteriormente se estudiaron las medidas de entrada, de salida y del sistema. Muchas de estas medidas pueden compararse entre organizaciones similares, siempre y cuando se aplique una definición rigurosa. Algunas de las medidas que con frecuencia se comparan en el mantenimiento implican las proporciones a largo plazo y estratégicas de los costos, mano de obra y materiales:

- Costo total de mantenimiento por valor de reemplazo de los activos a los que se les ha dado mantenimiento.
- Costo de refacciones y materiales en inventario por valor de reemplazo de los activos a los que se les ha dado mantenimiento.
- Costo de refacciones y materiales en inventario por número de trabajadores de mantenimiento.

- Trabajadores de mantenimiento por total de mano de obra directa en operaciones.
- Trabajadores de mantenimiento por supervisor de primera línea.
- Número de niveles en la organización que participan directamente en mantenimiento.
- Trabajadores de mantenimiento por personal de apoyo (empleados administrativos, planificadores, ingenieros, programadores, etc.).
- Costo de capacitación por trabajador de mantenimiento.

En las comparaciones siempre deben tenerse presentes las diferencias en el entorno de operación, como el entorno político y reglamentario, la cultura del país y la compañía, la lejanía geográfica, el sector industrial, la edad de los activos y el uso de la tecnología.

9.7 ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para ejercer un control eficaz sobre la administración del mantenimiento, se puede graficar periódicamente un breve análisis de los costos de mantenimiento, el número de descomposturas y los cambios en el MTTR para evaluar las tendencias de dichos índices. Esto ayudará a aplicar una acción correctiva. La gráfica de tendencia exhibe los datos con relación al tiempo o la secuencia, y es útil para detectar tendencias o impactos en el sistema. Una variante más útil de la gráfica de tendencia es la gráfica de control que se estudió en el capítulo 8.

RESUMEN

En este capítulo se presentaron varias medidas para evaluar la productividad del mantenimiento. Éstas incluyeron las medidas de las entradas y de las salidas. También se presentaron varios índices que proporcionan medidas cuantitativas para la administración del sistema, la eficacia de los costos y la eficiencia del sistema. El análisis de tendencias se proporciona como una técnica para monitorear estos índices. Para más información acerca de la productividad en el mantenimiento, ver [1, 2, 3].

EJERCICIOS

- 9.1 Defina el término tiempo medio entre fallas (MTBF) y sugiera dos fórmulas para calcularlo.

9.2 Una planta de acero se programó para operar 330 días el año pasado. Tuvo ocho descomposturas no programadas, que dieron por resultado 240 horas de tiempo muerto. La planta tuvo 96 horas de mantenimiento preventivo durante estos 330 días. La planta se paró durante 120 horas debido a falta de alimentación. El proceso estuvo lento durante 60 horas a una tasa del 80% y una alimentación húmeda redujo la velocidad del proceso durante 48 horas a una tasa del 50%. La tasa de producción a una capacidad del 100% fue de 1000 toneladas por 24 horas. En este período, se rechazaron 3000 toneladas y 5000 toneladas fueron clasificadas como producto de segunda calidad y se vendieron a un 50% de su valor.

- a. Calcule la disponibilidad de la planta, A .
- b. Calcule la tasa del proceso, PR.
- c. Calcule la tasa de calidad, QR.
- d. Calcule la eficacia global del equipo, OEE.
- e. Calcule la capacidad productiva.

A fin de mejorar la capacidad productiva, ¿en qué factor deberá concentrarse la gerencia? ¿Por qué?

REFERENCIAS

1. J. D. Campbell, *Uptime Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Productivity Press, Portland, OR.
2. L. Mann, *Maintenance Management*, 2nd Ed., Lexington Books, Lexington, MA.
3. B. W. Niebel, *Engineering Maintenance Management*, 2nd Ed., Dekker, New York.

10

SISTEMAS COMPUTARIZADOS PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO

10.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de las organizaciones del mantenimiento es maximizar el tiempo de operación en la forma más eficaz en costos. Para lograr este objetivo, las siguientes estrategias deben especificarse claramente:

1. Estrategias de mantenimiento eficaces derivadas de las condiciones e historia del equipo.
2. Técnicas eficientes para planear y programar las órdenes de trabajo y la utilización de los recursos.
3. Monitoreo de las actividades de mantenimiento, recopilación de datos e informes del desempeño para apoyar la mejora continua.

Estas tres actividades requieren información acerca del equipo, los trabajadores, las órdenes de trabajo, los trabajos, los estándares de trabajo, los programas de producción y la naturaleza de las operaciones en la organización. La cantidad de información que se recopila, procesa y utiliza para toma de decisiones es enorme, por lo que se necesita un enfoque sistemático para la administración de la información. Además, la complejidad y las incertidumbres presentes en el proceso del mantenimiento y la ingeniería y la cantidad de información manejada en un sistema típico de mantenimiento requieren el apoyo de la computadora. Un soporte apropiado de computación proporciona los medios para una respuesta rápida y oportuna.

Un sistema computarizado para la administración del mantenimiento (SCAM) es básicamente un sistema de información adaptado para dar servicio al mantenimiento. Un SCAM ayuda en el proceso de recopilación de datos, registro, almacenamiento, actualización, procesamiento, comunicación y pronósticos. Es esencial para la planeación, programación y control de las actividades de mantenimiento. Mediante informes eficaces, un SCAM puede proporcionar a los gerentes y a los ingenieros de mantenimiento la información necesaria para una toma de decisiones acertada para controlar y mejorar el proceso de mantenimiento.

La mayoría de las organizaciones tienen hoy en día algún tipo de soporte computarizado para el mantenimiento, pero tal vez no han sabido cosechar todos los beneficios de un SCAM por las siguientes razones:

- En muchos casos, el sistema no satisface los requerimientos del mantenimiento.
- El sistema no es amigable con el usuario.
- Los planificadores e ingenieros de mantenimiento no están bien capacitados en el empleo del SCAM.
- Los informes del SCAM no se utilizan para mejorar el mantenimiento.

En el proceso del desarrollo de un sistema dentro de la compañía, o al elegir uno de entre los cientos de paquetes comerciales disponibles, los puntos anteriores deben ser considerados cuidadosamente. Para información adicional sobre este tema, ver [7].

Este capítulo presenta los elementos de un SCAM eficaz y describe un procedimiento sistemático para su evaluación. La sección 10.2 presenta un panorama de un SCAM. La sección 10.3 describe los módulos básicos de un SCAM y presenta diagramas de flujo para el diseño e implantación de estos módulos. En dicha sección también se ofrece material sobre informes eficaces para mantenimiento mediante el SCAM. La sección 10.4 describe un procedimiento para la evaluación de un SCAM que puede utilizarse como guía en la calificación de estos sistemas. La sección 10.5 da un vistazo al desarrollo futuro de los sistemas computarizados para el mantenimiento.

10.2 PANORAMA DE LOS SISTEMAS COMPUTARIZADOS PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO

El éxito de un SCAM puede medirse por su capacidad para apoyar el proceso del mantenimiento. Para un SCAM eficaz son esenciales dos elementos importantes: 1) su capacidad para apoyar las principales actividades en el proceso del mantenimiento, y 2) la capacidad de configuración del

software y el hardware en términos de su confiabilidad, facilidad de uso, calidad de la información y procesamiento oportuno.

Un SCAM puede estar centralizado en las pequeñas organizaciones, o completamente descentralizado y distribuido en las organizaciones grandes. Puede correr en computadoras grandes (mainframes), microcomputadoras, estaciones de trabajo y computadoras personales. Además, puede ser un sistema independiente o parte de una red en un ambiente cliente-servidor. Una red de área local (LAN) típica puede tener varias terminales localizadas remotamente, con quizás 15 o más usuarios y varias impresoras. El software puede funcionar mediante menús o con ventanas. Un SCAM típico está enlazado con los sistemas de inventarios, nóminas, compras y contabilidad. La experiencia ha demostrado que la confiabilidad del sistema, su oportunidad y facilidad de uso mejoran la utilización de un SCAM y aumentan sus beneficios para la organización [1, 10].

En términos de apoyo al proceso del mantenimiento, un SCAM generalmente incluye las siguientes funciones:

- Identificación del equipo y lista de materiales.
- Mantenimiento preventivo.
- Administración de las órdenes de trabajo.
- Planeación y programación.
- Control de inventarios y compras.
- Mano de obra y estándares de trabajo.
- Historia del equipo.
- Costos y presupuestos.
- Informes de desempeño.
- Informes de calidad.

En el proceso de diseño de un SCAM, generalmente se agrupan en un módulo una o más de las funciones anteriores. En este capítulo se presenta el diseño de un SCAM para apoyo de las funciones anteriores. Consta de los siguientes cinco módulos:

1. Administración de equipo.
2. Control de órdenes de trabajo.
3. Administración de las especialidades en mantenimiento.
4. Abastecimiento y control de materiales.
5. Informes de desempeño.

10.3 MÓDULOS DEL SCAM

En la figura 10.1 se muestra la estructura de un SCAM. Está compuesto de los cinco módulos anteriores, que interactúan entre sí para apoyar el

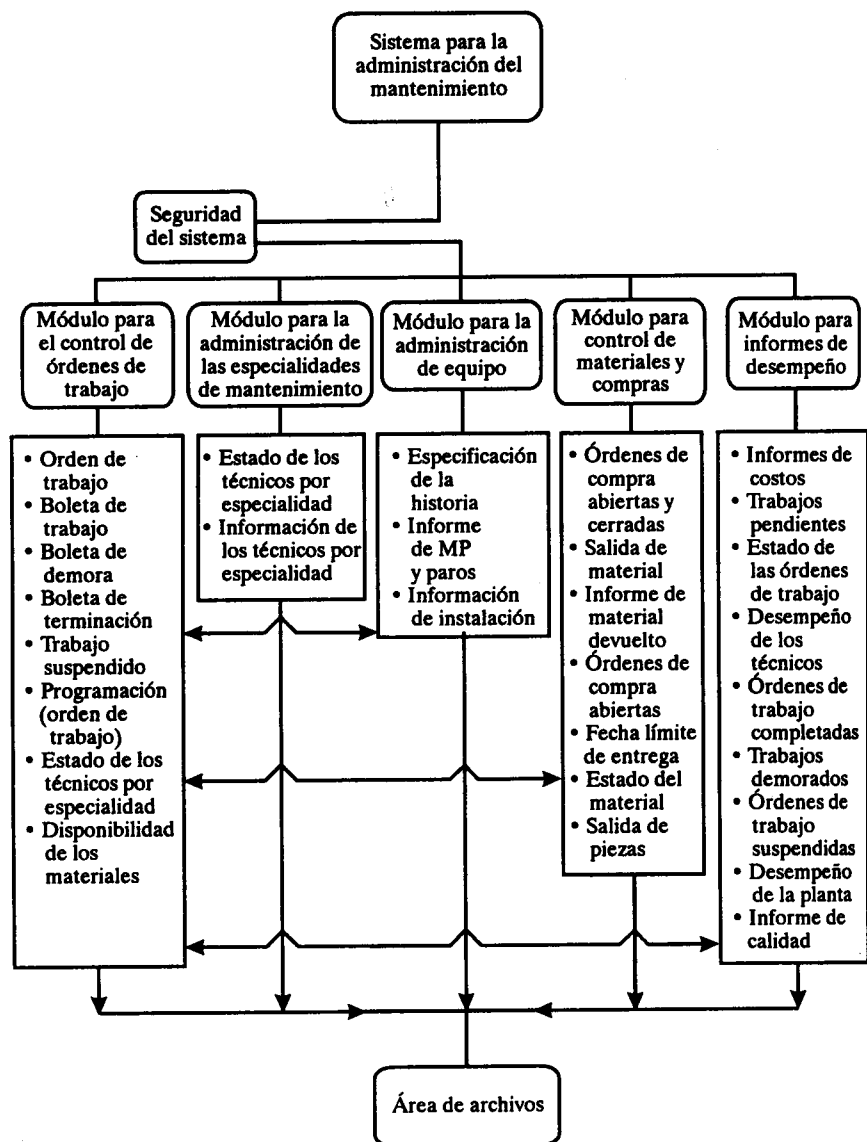


Figura 10.1 Estructura del sistema computarizado para la administración del mantenimiento.

proceso de mantenimiento. Además de la estructura básica que se presenta en la figura 10.1, el SCAM cuenta con sistemas de seguridad y creación de archivos. Una estructura similar a la que se muestra en la figura 10.1 ha sido desarrollada y probada en computadoras personales.

10.3.1 Módulo para la administración del equipo

Este módulo proporciona información acerca de la identificación del equipo, ubicación, fecha de instalación, estado, información técnica, historia del

Archivo de equipo	
Equipo No.: <u>234567890122</u>	Número de serie: <u>3JKJDF888875</u>
Instal. en: <u>11/11/95</u>	
Ubicación del equipo: <u>SKDF 883</u>	Costo del equipo: <u>878698.44</u>
Nombre del equipo: <u>Máquina cortadora</u>	
Especificación:	<u>Voltaje → 220/ubicación fija/área 3 m²/</u> <u>cambio de aceite después de 720 horas de uso/Trabajo máximo</u> <u>18 horas/día</u>
Clave del equipo: <u>2</u>	
Fecha de MP: <u>12/12/96</u>	Fecha de paro: <u>11/11/93</u> Estado (operación/parado): <u>operación</u>
Clave del equipo: 1 = serv, 2 = produc. 3 = sist. de manejo 4 = instal. 5 = otros	
Plan de MP del equipo:	
Herramientas necesarias en el MP:	
Procedimiento de seguridad en el MP:	

Figura 10.2 Archivo de equipo.

equipo y programa de mantenimiento preventivo, herramientas especiales y procedimientos de seguridad. Se puede almacenar información adicional acerca de las especificaciones del programa de lubricación, aceite de lubricación y método de aplicación, estándares de trabajo e historia de reparaciones.

Este módulo da seguimiento a la lubricación del equipo y al mantenimiento preventivo. Interactúa con la planeación y control de órdenes de trabajo para generar las órdenes de trabajo necesarias. La figura 10.2 muestra la página superior de un archivo de historia del equipo. La información disponible en este archivo puede utilizarse para tomar decisiones con relación al reemplazo del equipo.

10.3.2 Módulo de control de órdenes de trabajo

El módulo de control de órdenes de trabajo automatiza el proceso de generación de dichas órdenes. Este módulo es el corazón del SCAM, ya que es responsable de la ejecución del sistema de órdenes de trabajo, el cual, a su vez, es el corazón del control del mantenimiento. La orden de trabajo sirve para las siguientes funciones:

1. Documentar el proceso de solicitudes de trabajo y autorizar el trabajo por realizar.
2. Planear, monitorear y controlar el trabajo real.
3. Recopilar datos acerca del desempeño y costos del mantenimiento.
4. Proporcionar información necesaria para retroalimentación y mejora continua.

La orden de trabajo requiere dos tipos de información. El primer tipo se utiliza para planear y programar y el segundo para identificación.

Los detalles del diseño de las órdenes de trabajo, su función y flujo de información se presentaron en el capítulo 2. La figura 10.3 muestra el diagrama de flujo para el módulo de control de las órdenes de trabajo. Este módulo inicializa la orden de trabajo suministrando la información necesaria con relación a los nuevos trabajos. Las categorías de información son las siguientes:

- Número de la orden de trabajo.
- Fecha.
- Definición del problema y herramientas necesarias.
- Número de equipo, plan de trabajo y ubicación.
- Horas-hombre estimadas y costos estimados.

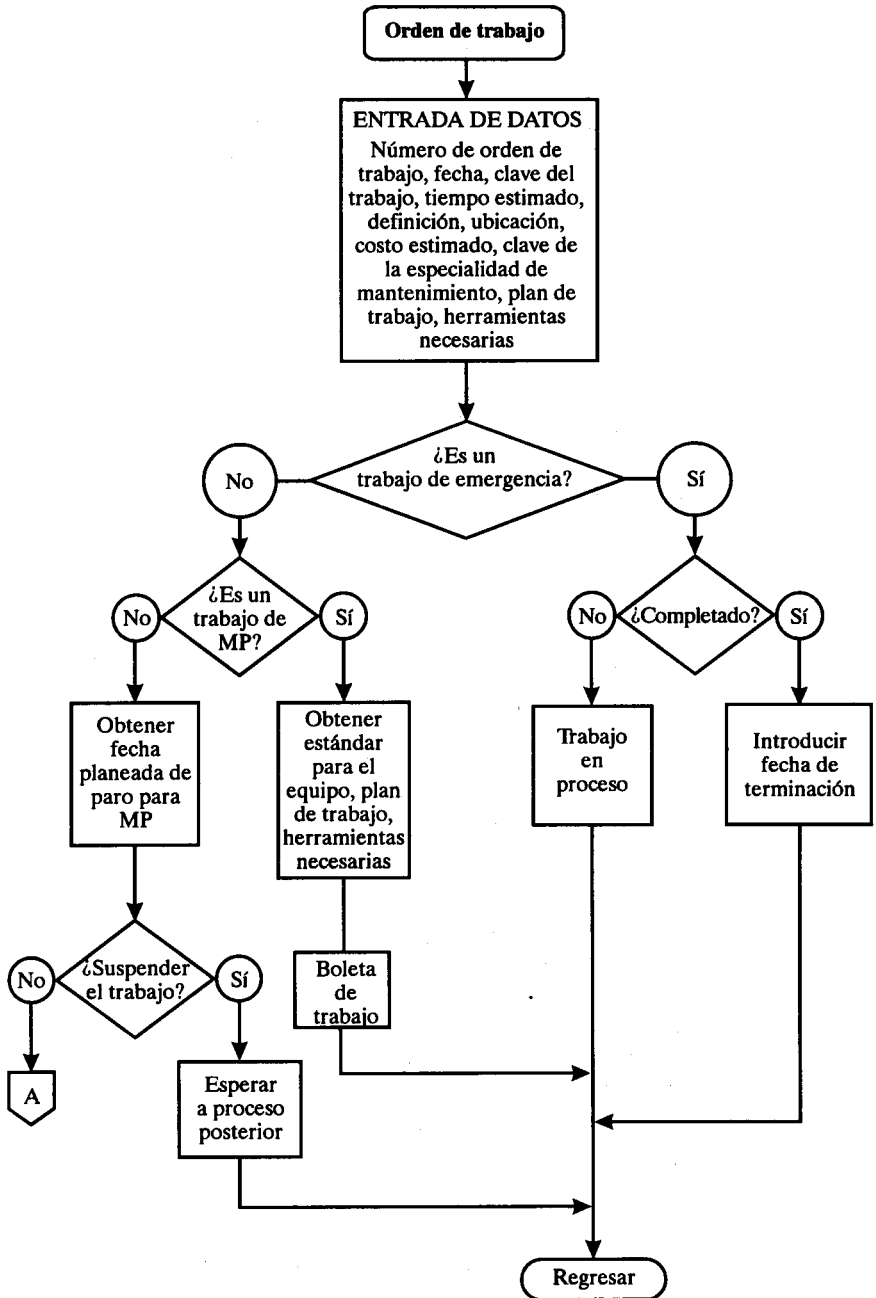


Figura 10.3 Diagrama de flujo para el control de órdenes de trabajo.

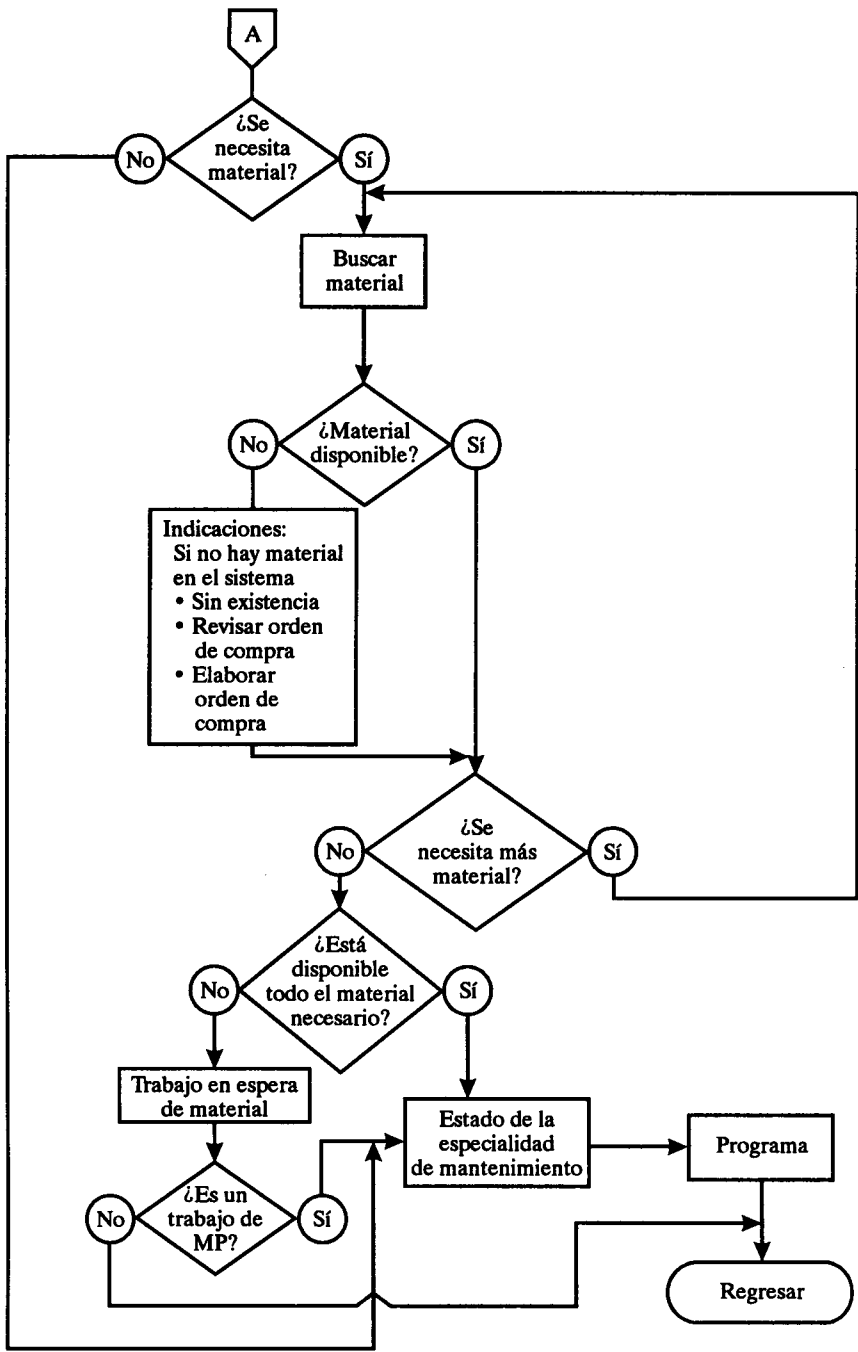


Figura 10.3 Diagrama de flujo para el control de órdenes de trabajo (continuación).

TABLA 10.1 Claves de trabajos y trabajadores.

Clave del trabajo		Clave del trabajador	
Clave	Definición	Clave	Definición
A	Emergencia	1	Mecánico
B	Rutina	2	Electricista
C	Mantenimiento preventivo	3	Soldador
D	Con paro	4	Plomero
E	Otros	6	Carpintero

- Clave del trabajador.
- Materiales.

La tabla 10.1 ilustra la prioridad del trabajo y las claves de los trabajadores que podrían utilizarse en el módulo de control de las órdenes de trabajo. Este módulo ayuda en el proceso de planeación y programación. El primer paso para cada orden de trabajo es su planeación. Luego, después de planear un grupo de órdenes de trabajo, éstas se programan. Es necesario contar con un algoritmo que forme parte del módulo de control de órdenes de trabajo. La mayoría de los sistemas carecen de esta característica. La descripción de un algoritmo de este tipo se da en el capítulo 6. Para cada orden de trabajo completada se genera un informe. Este informe proporciona una indicación del flujo de trabajo y puede ser utilizado en un diagrama de flujo del desempeño del trabajo.

10.3.3 Módulo de administración de las especialidades de mantenimiento

Este módulo lleva un seguimiento del estado de las especialidades de mantenimiento a fin de proporcionar al planificador/programador la información necesaria para programar las órdenes de trabajo. El planificador/programador, al ejecutar el módulo de control de las órdenes de trabajo, necesita interactuar con este módulo para determinar la disponibilidad de trabajadores. En la figura 10.4 se presenta un informe del estado de las especialidades de mantenimiento como ejemplo de dicha información. La figura 10.5 muestra un archivo de personal para un trabajador individual.

10.3.4 Módulo de suministro y control de materiales

La planeación de los requerimientos de materiales y el control de inventarios son decisivos para el funcionamiento global del sistema de manteni-

INFORME DE ESTADO DE LOS TÉCNICOS POR ESPECIALIDAD DE MANTENIMIENTO							
CLAVE DE LA ESPECIALIDAD	EMPL. NORMALES	-HORAS -HORAS	PERSONAL NO DISPONIBLE			PERSONAL DISP/HORA	HORAS PROGRAMADAS
			MED	VAC	ASIGN		
MEC	3	24	1	1	0	1/8	10
ELEC	4	32	1	1	1	1/8	0
SOLD	0	0	0	0	0	0/0	0
PLOM	0	0	0	0	0	0/0	0
PINT	0	0	0	0	0	0/0	0
CARP	0	0	0	0	0	0/0	0

Figura 10.4 Informe del estado de las especialidades de mantenimiento.

ARCHIVO DE TÉCNICOS	
NOMBRE: <u>XXXXXXXX</u>	Fecha: <u>11/11/95</u>
ESPECIALIDAD No.: <u>11111</u>	SALARIO: <u>xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx</u>
PUESTO: <u>Ing. Industrial</u>	CLAVE DE LA ESPECIALIDAD: <u>X</u>
DIRECCIÓN/OBSERVACIONES: _____	
ESTADO DE LA ESPECIALIDAD: <u>1</u>	
ESTADO → 1 = Asignación, 2 = Vacaciones, 3 = Médico, 4 = En servicio	

Figura 10.5 Archivo personal de técnicos por especialidad.

miento. Un SCAM debe ofrecer un control eficaz de inventarios y suministro de materiales.

En el proceso de planeación de una orden de trabajo, el planificador identifica las refacciones y materiales que se requerirán. A continuación verifica que se cuente con la cantidad requerida de refacciones y materiales antes de abrir la orden de trabajo. La disponibilidad de las refacciones y los materiales es decisiva para una planeación, programación y control sin contratiempos del trabajo de mantenimiento. Los detalles de los métodos para el control del inventario y las refacciones se presentaron en el capítulo 7.

El sistema debe tener la capacidad de clasificar las refacciones de acuerdo con su uso y costo. Deberá hacerse un análisis ABC de todas las existencias y almacenes de mantenimiento en el libro mayor. Este tipo de análisis ayuda a identificar los artículos de clase A, que son el 15% de todos los artículos que comparten el mayor costo del inventario (70% a 80% del costo de todos los artículos). Los artículos de clase A deberán controlarse eficazmente mediante un sistema de control perpetuo por computadora. Deberán mantenerse los niveles máximo y mínimo para tales artículos y deberá emplearse un tamaño de lote económico para su reabastecimiento.

Tales módulos para el abastecimiento pueden proporcionar información acerca de los artículos críticos y verificación de las existencias cuando se necesite. Dichos módulos normalmente están enlazados con el sistema de compras a fin de iniciar las requisiciones de compras. Las funciones básicas del módulo que se muestran en las figuras 10.6 y 10.7 son las siguientes:

- Indicar la disponibilidad de los materiales.
- Proporcionar información sobre los materiales solicitados y su estado.
- Borrar las órdenes de compra abiertas.
- Realizar ajustes en el inventario.
- Iniciar las órdenes de compra.
- Buscar órdenes de compra que estén en espera de material y cambiar su estado a la llegada del material.

10.3.5 Módulo de informes de desempeño

Este módulo del SCAM interactúa con todos los demás módulos para monitorear las actividades de mantenimiento, y proporciona diversos tipos de informes de costos y desempeño. El módulo puede adaptarse para generar todos los informes necesarios. En cualquier caso, generalmente se proporcionan los siguientes informes que se mencionan en la página 314.

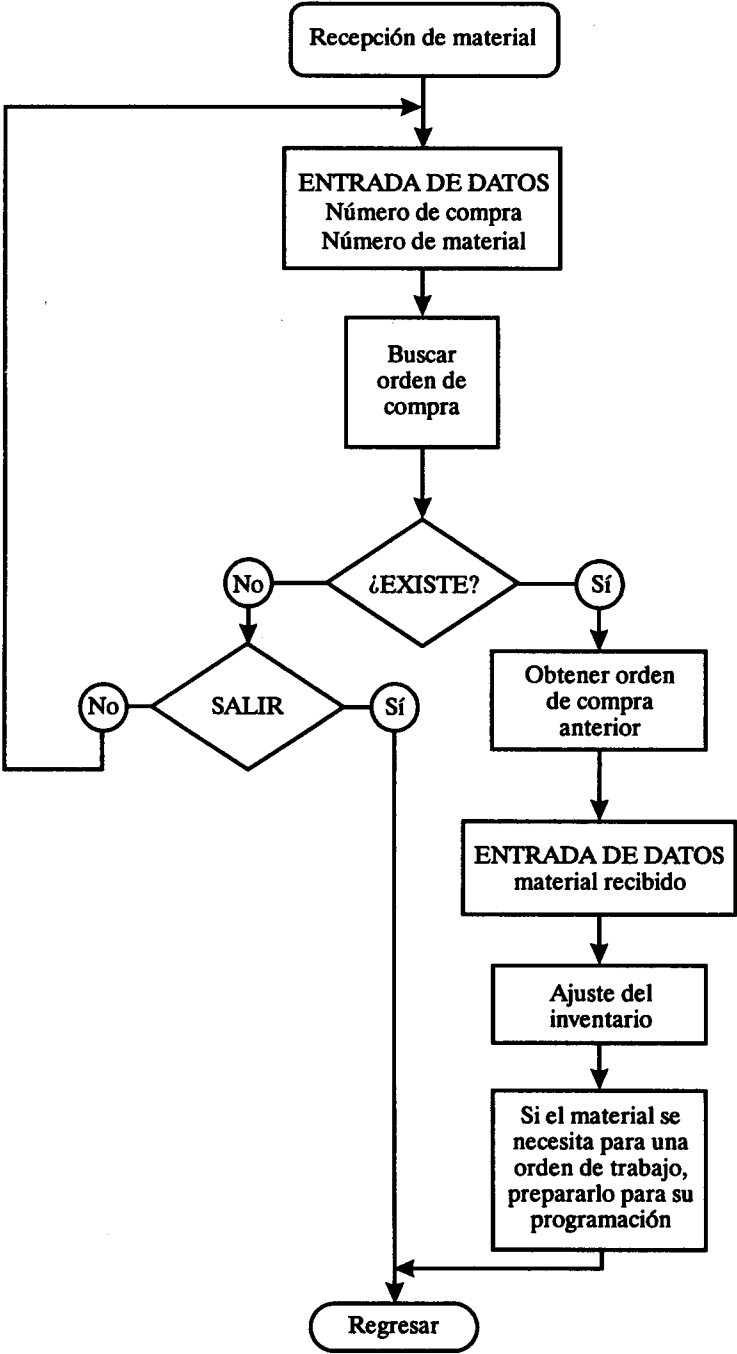


Figura 10.6 Diagrama de flujo para el material recibido.

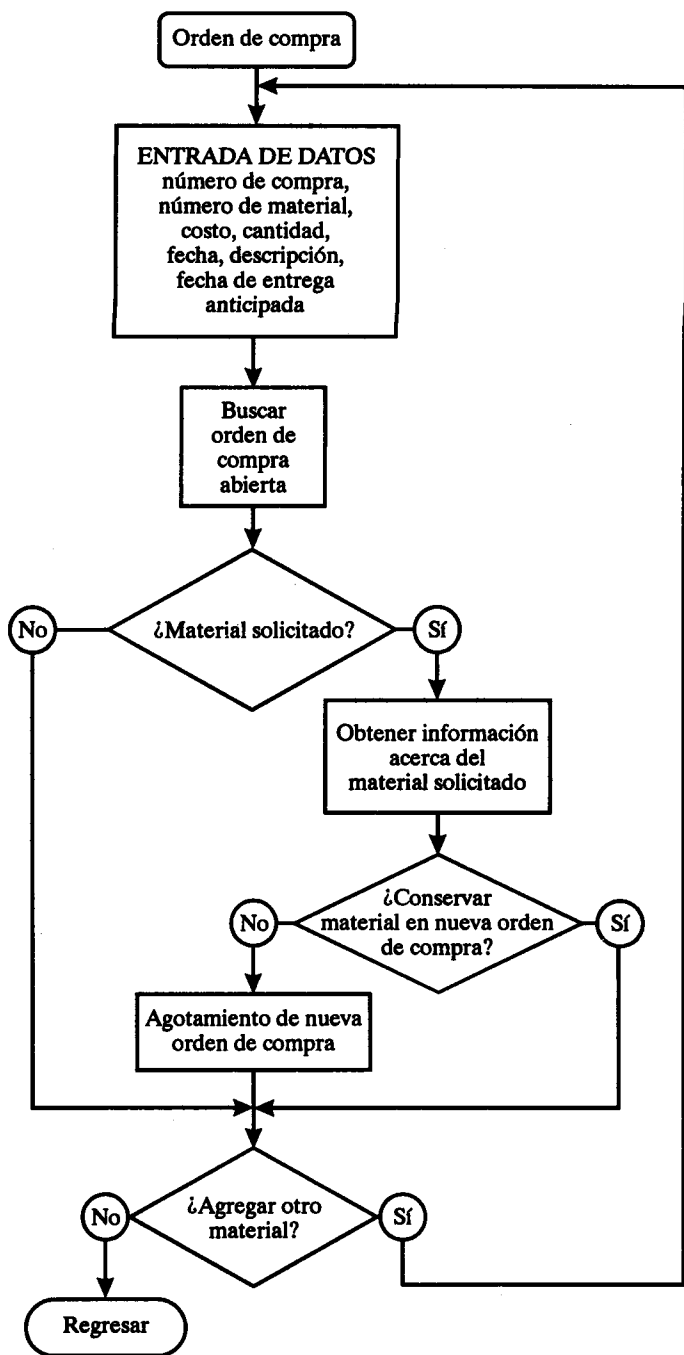


Figura 10.7 Diagrama de flujo para la orden de compra.

1. *Informes de costos.* El sistema proporciona detalles acerca de los costos de mantenimiento. Los costos pueden prepararse por equipo o por centro de costos en donde se encuentra el equipo. Los costos incluyen mano de obra, refacciones, materiales y costos de la instalación.
2. *Órdenes de trabajo completadas.* Este es un resumen de las órdenes de trabajo completadas durante un período específico.
3. *Informe de trabajos pendientes.* Es un resumen de las órdenes de trabajo en el bloque de trabajos pendientes de mantenimiento. Las órdenes de trabajo pueden clasificarse de acuerdo con la razón por la que están pendientes, que podría ser refacciones, trabajadores u otras razones técnicas.
4. *Informe del estado de las órdenes de trabajo.* Éste incluye el avance de todas las órdenes de trabajo.
5. *Informe del desempeño de los trabajadores.* Este informe incluye un resumen de la productividad de los trabajadores.
6. *Distribución del trabajo de mantenimiento por prioridad.* Este informe incluye el trabajo realizado, clasificado por prioridad.
7. *Informe de horas estimadas contra horas reales.* Este informe compara las horas reales contra las horas estimadas.
8. *Informe de disponibilidad de la planta.* Este informe proporciona información acerca de la disponibilidad del equipo.
9. *Informe de confiabilidad de la planta.* Éste brinda información sobre la confiabilidad del equipo principal y sobre el tiempo medio entre fallas.
10. *Informe de calidad.* Proporciona información acerca de los trabajos repetidos, los trabajos por debajo de la norma y los registros de capacitación.

Un SCAM puede generar otros informes, incluyendo demoras de órdenes de trabajo, trabajos suspendidos, y tendencias en la utilización de los trabajadores, entre otros.

La salida del SCAM deberá utilizarse con fines de mejora. Los informes generados por el SCAM pueden ser una entrada útil para el informe mensual de mantenimiento sobre cualquier análisis de deficiencias.

10.3.6 Informes de mantenimiento

El SCAM facilita la preparación de informes para la gerencia. Estos informes ayudan a la gerencia a tomar acciones para mejorar el estado de avance del

mantenimiento. Los informes deberán basarse en datos reales y presentarse en forma resumida y gráfica. Los indicadores estadísticos y el análisis de tendencias deberán ser una parte integral de tales informes. Los siguientes principios generales pueden utilizarse para evaluar la calidad de los informes:

1. El informe deberá ser conciso y estar basado en datos reales. Las cifras de costos estándar y los presupuestos deberán utilizarse para establecer referencias básicas.
2. Algunos informes periódicos deberán presentarse en forma gráfica y compararse con períodos anteriores para mostrar tendencias.
3. Deberá estar disponible información importante, como tiempo muerto del equipo, pérdidas de equipo, porcentaje de trabajo de mantenimiento programado, informes de trabajos pendientes e informes de calidad del mantenimiento.
4. El SCAM deberá ser capaz de proporcionar la mayoría de estos informes.
5. Los informes deben prepararse en coordinación estrecha con los departamentos involucrados, quienes también deberán proporcionar su interpretación del contenido de los informes.
6. La gerencia de mantenimiento deberá proporcionar retroalimentación sobre los informes y tomar medidas para corregir cualquier falla.

El departamento de mantenimiento deberá contar con un sistema de informes regulares. La mayoría de los departamentos de mantenimiento tienen lo que se conoce como el informe mensual de mantenimiento. El contenido de dicho informe deberá reflejar el estado del mantenimiento y normalmente incluirá lo siguiente:

1. Un resumen de los principales logros y problemas.
2. Un resumen del trabajo de mantenimiento realizado. Éste debe ser un resumen de las órdenes de trabajo ejecutadas en términos de su número y horas-hombre, y presentarse de preferencia en forma tabular o gráfica y compararse con las cifras de los últimos tres meses para mostrar tendencias.
3. Una lista de los costos de mantenimiento por centro de costos o equipos importantes, comparados con los de los últimos tres meses para mostrar tendencias.
4. Informe de trabajos pendientes en términos de horas-hombre, presentado en forma de gráfica o tabla, y comparado con las cifras de los

últimos tres meses. Los trabajos pendientes también deberán clasificarse según sus causas.

5. Informe de inspección del MP. Presenta una lista de todas las órdenes de trabajo iniciadas para mantenimiento preventivo. Debe incluir el trabajo de MP demorado.
6. Tiempo muerto del equipo principal.
7. Porcentaje del mantenimiento programado que se ha cambiado a un estado de no programado.
8. Informe de trabajos abiertos. El estado semanal de todas las órdenes de trabajo abiertas.
9. Informes de eficiencia que comparan las horas estimadas contra las horas reales.
10. Informe de materiales y abastecimientos. Una breve descripción del consumo de materiales y refacciones y su costo.
11. Presupuesto mensual de mantenimiento y su variación.
12. El informe mensual de mantenimiento deberá prepararse antes del final del quinto día del siguiente mes y entregarse al ejecutivo directamente responsable del mantenimiento (por ejemplo, el director de mantenimiento).
13. El ejecutivo (por ejemplo, el director de mantenimiento) deberá proporcionar retroalimentación sobre el informe antes del vigésimo día del siguiente mes. Se sugiere que la retroalimentación se presente en una reunión con todos los gerentes de mantenimiento para examinar los aspectos sobresalientes del informe y recomendar posibles acciones de mejora en caso de ser necesario.

10.4 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS COMPUTARIZADOS PARA LA ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO

El procedimiento descrito en esta sección puede usarse para evaluar sistemas computarizados "comerciales" para la administración del mantenimiento disponibles en el mercado o como una guía para el desarrollo de un SCAM actualizado. Se ha reportado en [2] que existen más de 200 sistemas computarizados para la administración del mantenimiento disponibles en el mercado. La selección de un SCAM apropiado no es una tarea fácil. El marco de trabajo que se da en esta sección depende de la capacidad funcional del sistema. Las funciones básicas del sistema mostrado en la figura 10.8 se utilizarán como patrón de referencia. Sean $i = 1, \dots, n$ las funciones o

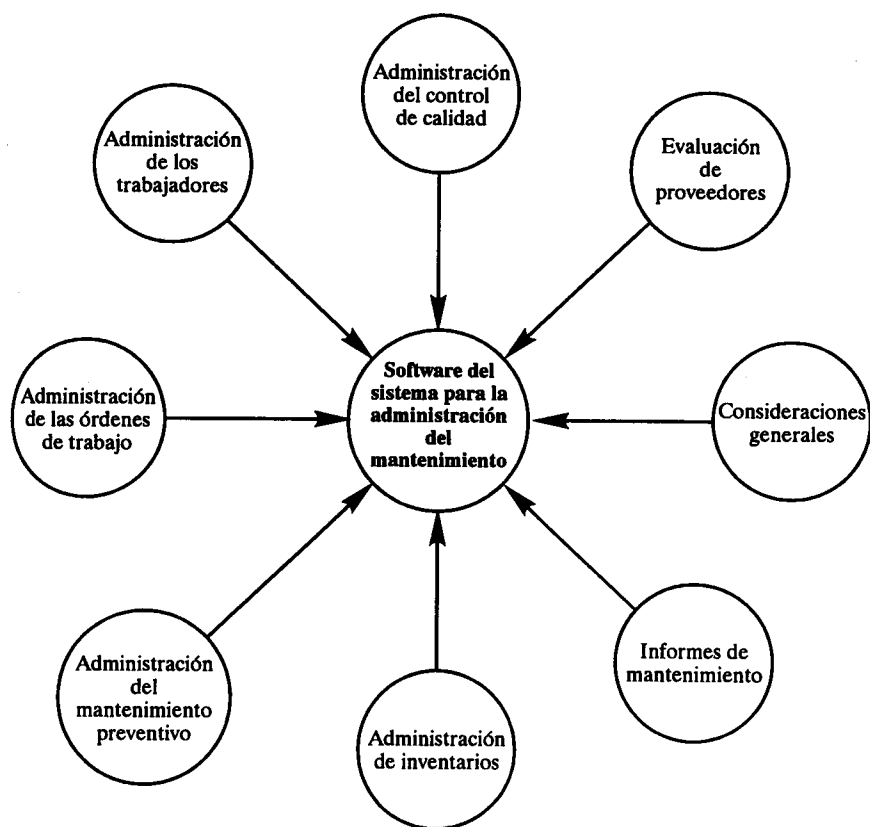


Figura 10.8 Funciones de los sistemas computarizados para la administración del mantenimiento.

requerimientos específicos deseados en un sistema computarizado para la administración del mantenimiento para la utilización que se pretende. Estas funciones son la administración de las órdenes de trabajo, la administración del mantenimiento preventivo, la administración de las especialidades de mantenimiento, la administración del inventario, los informes de la administración del mantenimiento, la evaluación de proveedores, la administración del control de calidad y aspectos generales [5, 6]. Sean $W_1, W_2, \dots, W_n$ los pesos respectivos o la importancia relativa de estas funciones de acuerdo con el uso que se les piensa dar. Para cada una de estas n funciones, sean $j = 1, \dots, m$ las características principales que el sistema deberá ofrecer para su uso eficaz. La disponibilidad o eficacia de estas características puede variar de un sistema a otro. De manera similar, tal vez no sean igualmente importantes para todos los usuarios. Sean $b_1, b_2, \dots, b_m$ los pesos relativos de

TABLA 10.2 Pesos de las funciones del SCAM.

Función	Peso de entre 100 (W_i)
Administración de órdenes de trabajo	25
Administración del mantenimiento preventivo	15
Administración de inventarios	15
Administración del control de calidad	15
Informes de mantenimiento	10
Evaluación de proveedores	10
Consideraciones generales	10

estas m características. Para comparar o seleccionar un software apropiado, asigne una calificación, en una escala de 0 a 10, a cada una de las características con base en su disponibilidad, eficacia, etc. Sea S_{ij} la calificación de entre 10 posibles calificaciones para la característica i de la función j . Así, la calificación total para una función puede calcularse como

$$A_i = W_i \sum_{j=1}^m b_j S_{ij}$$

La calificación compuesta (CS) para un SCAM es

$$CS = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \left[W_i \sum_{j=1}^m b_j S_{ij} \right]$$

La calificación compuesta puede calcularse para todos los sistemas disponibles para la administración del mantenimiento, y el que tenga la máxima CS será preferido sobre los demás.

El peso de cada función W_i o la importancia relativa de cada función puede determinarse empleando el método del proceso jerárquico analítico (PJA) o algún otro método basado en la estadística, como el método Delphi [3]. En el capítulo 12 se explica el método PJA, y se utiliza para la determinación de pesos. La tabla 10.2 proporciona valores sugeridos para el peso de cada función. Las tablas 10.3 a la 10.9 proporcionan las características necesarias de las funciones que se esperan de un SCAM. Estas tablas pueden usarse fácilmente para calcular la calificación compuesta para cualquier SCAM. Además, ofrecen un marco de trabajo básico y pueden modificarse para adaptarse a diferentes organizaciones. En las siguientes tablas, los valores de $b_j, j = 1, \dots, m$, se toman como unos.

TABLA 10.3 Características de la administración de las órdenes de trabajo.

Número	Características del sistema	Calificación
1	Se pueden producir órdenes de trabajo para mantenimiento correctivo.	
2	Se pueden producir órdenes de trabajo para mantenimiento preventivo.	
3	Da seguimiento automáticamente a los costos de mano de obra.	
4	Da seguimiento automáticamente a los costos de materiales.	
5	La orden de trabajo emplea códigos de prioridad.	
6	La orden de trabajo emplea códigos de estado.	
7	Clasifica los trabajos pendientes por trabajador y prioridad.	
8	Produce una lista de órdenes de trabajo activas.	
9	Mantiene una historia activa del equipo.	
10	Permite la entrada manual de estimaciones de costo de órdenes de trabajo.	
11	Produce una lista de órdenes de trabajo listas para programación.	
12	Proporciona cálculos de capacidad neta para compensar las interrupciones de trabajo.	
13	Permite una planeación compleja como la de trabajadores, materiales, herramientas, etc.	
14	Proporciona algoritmos eficaces para programación.	

Calcular la calificación total

$$A_1 = W_1 \sum_{j=1}^{14} S_{1j}$$

10.5 EVOLUCIÓN DE LOS SCAM PARA UN MANTENIMIENTO EFICAZ

Los elementos de un SCAM eficaz se presentaron en la sección 10.2. Además, en la sección anterior se describió un marco de trabajo para evaluar un SCAM existente. Las capacidades del SCAM necesitan mejorarse y ampliarse para reflejar los avances recientes en la elaboración de modelos matemáticos y estadísticos. Las siguientes características necesitan agregarse a los elementos del SCAM:

1. Control eficaz sobre la programación del mantenimiento, incluyendo reglas heurísticas de programación, algoritmos heurísticos y técnicas de programación matemática [4].

TABLA 10.4 Características de la administración del mantenimiento preventivo.

Número	Características del sistema	Calificación
1	El sistema programará el MP por fecha del calendario.	
2	Permite más de una orden de MP por equipo.	
3	Imprime órdenes de trabajo individuales de MP.	
4	Proporciona una descripción detallada de las tareas de MP por realizar.	
5	Imprime un pronóstico de la carga de trabajo de MP para cualquier semana o semanas dadas.	
6	Permite tiempo de adelanto o atraso para programar la orden de trabajo de MP.	
7	Permite un listado detallado de las tareas de MP por realizar.	
8	Produce un informe de órdenes de trabajo de MP vencidas.	
9	Proyecta el impacto de la carga de trabajo de MP en el programa semanal.	
10	Produce un informe de los resultados de inspección del MP.	

Calcular la calificación total

$$A_2 = W_2 \sum_{i=1}^{10} S_{2i}$$

2. Características de modelado, como simulación de los sistemas de mantenimiento [5].
3. Capacidades para toma de decisiones y pronósticos

Los siguientes módulos del SCAM necesitan ampliarse a fin de incorporar estas tres características:

1. Administración del equipo.
2. Control de órdenes de trabajo.
3. Informes de desempeño.

El módulo para la administración del equipo deberá incluir datos sobre patrones de llegadas de trabajos, historia del equipo, modelos de confiabilidad y rutinas de mantenimiento predictivo. Asimismo, varios paquetes estadísticos (por ejemplo, Statgraphics [9]) deberán ser una parte integral del módulo a fin de desarrollar las distribuciones estadísticas necesarias para la programación estocástica y los modelos de simulación [4, 5].

El módulo de control de órdenes de trabajo deberá ampliarse para proporcionar los datos requeridos para diferentes modelos de programación y simulación estocástica. Los datos incluyen información acerca de los

TABLA 10.5 Características de la administración de inventarios.

Número	Características del sistema	Calificación
1	Produce un informe de reorden del inventario.	
2	Mantiene información de precios unitarios para todas las refacciones.	
3	Identifica la ubicación de los contenedores de todas las refacciones.	
4	Produce un informe de todas las órdenes de trabajo que están en espera de material.	
5	Anexa los costos de todos los materiales a la orden de trabajo.	
6	Mantiene un registro histórico del consumo de todos los artículos de los almacenes.	
7	Mantiene el tamaño de lote económico para reordenar existencias.	
8	Mantiene el registro de las cantidades máximas y mínimas de las existencias.	
9	Produce un informe del costo del inventario en existencia.	
10	Produce un catálogo completo de existencias en el almacén.	
11	Produce información en línea del inventario de piezas.	
12	Permite introducir nuevamente los materiales no utilizados al inventario de los almacenes.	

Calcular la calificación total

$$A_3 = W_3 \sum_{i=1}^{12} S_{3j}$$

TABLA 10.6 Características de la administración del control de calidad.

Número	Características del sistema	Calificación
1	Están disponibles las técnicas estadísticas utilizadas.	
2	El sistema mantiene registros de capacitación en calidad.	
3	El sistema mantiene los registros de calidad.	
4	El sistema mantiene un registro de quejas de los clientes.	
5	Datos disponibles para análisis de fallas en calidad.	
6	Capaz de rastrear los datos que corresponden a la calidad.	

Calcular la calificación total

$$A_4 = W_4 \sum_{i=1}^6 S_{4j}$$

TABLA 10.7 Características de los informes de mantenimiento.

Número	Características del sistema	Calificación
1	Produce informes de control diarios.	
2	Produce un informe de historia del equipo.	
3	Produce informes gerenciales en forma mensual.	
4	Puede producir informes gerenciales cuando se soliciten.	
5	Produce informes que dan seguimiento a los trabajos pendientes del sistema por especialidad.	
6	Produce informes de análisis de fallas.	
7	Produce informes de empleo de trabajadores.	
8	Produce informes cuando se rebasa el presupuesto.	
9	Informes de todas las órdenes de trabajo no completadas por prioridad.	
10	Capaz de realizar análisis estadísticos y de tendencias.	

$$\text{Calcular la calificación total } A_5 = W_5 \sum_{i=1}^{10} S_{5j}$$

TABLA 10.8 Características de la evaluación de proveedores.

Número	Características del sistema	Calificación
1	El proveedor puede proporcionar soporte para la instalación.	
2	El proveedor tiene un programa de instalación con documentación.	
3	El proveedor proporcionará una lista de referencias de instalación.	
4	Los proveedores proporcionarán guía durante la entrada de datos.	
5	El proveedor tiene un consultor de mantenimiento para proporcionar asistencia sobre los formatos de los datos para su entrada al sistema.	
6	El proveedor proporciona documentación de instalación, manuales de usuario y manuales de capacitación.	
7	El software puede autoinstalarse.	
8	El proveedor puede proporcionar capacitación en el lugar o en sus instalaciones.	
9	El proveedor ofrece mejoras planeadas y un programa de apoyo para su software actual y futuro.	

$$\text{Calcular la calificación total } A_6 = W_6 \sum_{i=1}^9 S_{6j}$$

TABLA 10.9 Características de las consideraciones generales.

Número	Características del sistema	Calificación
1	El sistema es amigable con el usuario.	
2	El sistema funciona a través de menús.	
3	El sistema funciona en línea y está integrado.	
4	El sistema tiene un programa de apoyo permanente.	
5	El sistema mantiene registros históricos hasta que son dados de baja del sistema.	
6	El sistema cuenta con contraseñas de seguridad y protección de claves.	
7	El sistema corre en hardware que ya se encuentra en el sitio.	
8	El sistema requiere la compra de hardware especial.	
Calcular la calificación total		$A_7 = W_7 \sum_{i=1}^8 S_{7i}$

estándares de trabajo y trabajos típicos. Este proceso requiere una vigilancia continua debido a los factores dinámicos que están presentes en el proceso. Los modelos de programación deberán ser parte del subsistema de control de órdenes de trabajo. Por lo tanto, el módulo de control de órdenes de trabajo debe incluir generadores de matrices e informes además de las subrutinas de optimización, como el Linear Interactive and Discrete Optimizer (LINDO), el Generalized Interactive Nonlinear Optimizer (GINO) y el Optimization Software Library (OSL) [4].

Las medidas de desempeño necesitan ampliarse para incluir medidas que relacionen el efecto de las políticas de mantenimiento en la producción y en los servicios. Proponemos que los modelos de simulación sean parte del subsistema de medidas de desempeño. Este subsistema debe incluir un lenguaje de simulación de propósito especial como el Simulation Language for Alternative Modeling (SLAM), el SIMSCRIPT o el SIMAN [5].

Las rutinas estadísticas proporcionarán capacidades para pronósticos y estimación de funciones de distribución, que se utilizarán en el modelo estocástico. El generador de matrices generará el modelo de optimización y lo entregará al optimizador, el cual proporciona los programas óptimos. A continuación, el generador de informes tomará la salida del optimizador y desarrollará un programa comprensible para los supervisores. El SCAM puede ampliarse para incluir capacidades de toma de decisiones. Un ejemplo de esto es la capacidad para detener la ejecución de trabajos de baja prioridad ante la llegada de trabajos de emergencia. Asimismo, deberá tener la capacidad de revisar las prioridades de los trabajos dependiendo de la historia pasada.

Si las capacidades sugeridas en el último párrafo se incorporan en el sistema de información gerencial para el mantenimiento, éste se convierte más en un sistema para apoyo a las decisiones (SAD) o un sistema experto (SE).

RESUMEN

En este capítulo se examinaron los elementos básicos de un SCAM. Se mostraron diagramas de flujo para presentar los componentes de cada módulo del sistema. El éxito de un SCAM se mide por su capacidad para dar apoyo al mantenimiento y proporcionar información oportuna para una toma de decisiones eficaz. El SCAM debe tener la mayoría de los índices claves para el desempeño del mantenimiento a fin de cuantificar el estado del mantenimiento. La salida del SCAM ayudará a elaborar el informe mensual de mantenimiento sobre el que la gerencia deberá proporcionar una retroalimentación inmediata. Además, se describió un procedimiento sistemático para evaluar al SCAM, y se describieron las direcciones y tendencias futuras para el desarrollo del SCAM.

EJERCICIOS

- 10.1 ¿Qué es un sistema computarizado para la administración del mantenimiento (SCAM)?
- 10.2 Elabore una lista de los módulos posibles en un sistema computarizado para la administración del mantenimiento.
- 10.3 ¿Cuáles son las funciones del módulo de control de órdenes de trabajo?
- 10.4 ¿Cuál es el papel del módulo de administración del equipo?
- 10.5 ¿Qué información puede obtenerse del módulo de administración del equipo?
- 10.6 ¿Cómo deberá reportarse el costo del mantenimiento?
- 10.7 Seleccione una organización y utilice el proceso jerárquico analítico (PJA) para determinar el peso dado a cada función, proporcionado por un sistema computarizado para la administración del mantenimiento.
- 10.8 Visite una organización de su área y evalúe su sistema computarizado para la administración del mantenimiento.

- 10.9** Identifique las necesidades de capacitación de una organización que pudiera desear la implantación de un SCAM similar al que se describió en este capítulo.

REFERENCIAS

1. K. Bagadia, *Microcomputer-Aided Maintenance Management* (E. Hartmann, Ed.), Industrial Engineering and Management Press, Atlanta.
2. J. D. Campbell, *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Productivity Press, Portland, OR.
3. N. Dalkay y A. Helmers, "Experimental Application of the Delphi Method to the Use of the Experts," *Management Science*, Vol. 9, No. 3, pp. 458-467.
4. S. O. Duffuaa and K. S. Al-Sultan, "Mathematical Programming Approaches for the Management of Maintenance Planning and Scheduling," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3, No. 3.
5. S. O. Duffuaa and A. A. Andijani, "Stochastic Simulation: An Effective Tool for Modeling Maintenance Systems" Working Paper, Department of Systems Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia.
6. B. W. Niebel, *Engineering Maintenance Management*, 2nd Ed., Dekker, New York.
7. A. Raouf, Z. Ali and S. O. Duffuaa, "Evaluating a Computerized Maintenance Management System," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 13, No. 3, pp. 38-48.
8. A. Raouf, Y. A. Al-Jumah and S.O. Duffuaa, "A Personal Computer-Based Maintenance Management Expert System for Hospitals," *Journal of Medical Systems*, Vol. 14, No. 3.
9. Statgraphics Corp., "Statgraphics+, Version 7".
10. T. Wireman, *Computerized Maintenance Management System*, Industrial Press, New York.

11

CAPACITACIÓN EN MANTENIMIENTO

11.1 INTRODUCCIÓN

La actividad de mantenimiento se considera una función que incluye las acciones necesarias para mantener funcionando los equipos e instalaciones en los niveles deseados. Entre todos los factores necesarios, los programas de capacitación en mantenimiento son los más importantes. Es imperativo que el personal de mantenimiento adquiera la tecnología y las habilidades requeridas que le permitan desarrollar todo su potencial.

Los trabajadores de mantenimiento por lo general se concentran en una especialidad, y tienen más libertad de acción que los trabajadores de producción. Requieren una extensa capacitación y experiencia para estar plenamente calificados. El hecho de que el mantenimiento es dinámico, pues continuamente están surgiendo nuevas deficiencias en los equipos mientras los problemas viejos están en proceso de ser corregidos, junto con el hecho de que la industria está introduciendo nuevos equipos basados en la tecnología más reciente, hacen imperativo que se planee, realice y evalúe la capacitación de los trabajadores de mantenimiento.

Se hacen esfuerzos para asignar a los trabajadores apropiados a diferentes funciones, de manera que cada trabajador esté plenamente familiarizado con sus funciones. En realidad, los trabajadores disponibles nunca están totalmente calificados, debido a menudo a la falta de capacitación. Los trabajadores necesitan ser capacitados, aunque la pregunta es: ¿Qué tanto y en qué áreas?

Este capítulo describe las destrezas y niveles de las mismas, los tipos de capacitación, un marco de trabajo para el desarrollo de programas adecuados de capacitación y los medios para evaluar la eficacia de tales programas. La sección 11.2 cubre los niveles de destrezas, y la sección 11.3 las actividades de la capacitación en mantenimiento.

11.2 DESTREZA

La destreza puede definirse como la habilidad de un trabajador para realizar su propio trabajo. Las destrezas que requieren los trabajadores de mantenimiento son bastante diferentes de las habilidades que necesitan los trabajadores de producción. La figura 11.1 muestra un modelo conceptual del desempeño humano.

El trabajo de producción es de rutina y, como tal, requiere menos información para procesar que el trabajo de mantenimiento. El trabajo de mantenimiento presenta diferentes niveles de procesamiento de información y toma de decisiones. El desempeño de los trabajadores de mantenimiento puede mejorarse mediante una combinación de motivación y capacitación.

11.2.1 Niveles de destrezas

Es necesario identificar los niveles de destrezas que tienen los trabajadores antes de poder implantar un programa de capacitación. Existen cuatro niveles de destrezas:

Nivel 1. La persona carece de conocimiento teórico y habilidad práctica.

Nivel 2. La persona está familiarizada con la teoría pero carece de capacitación práctica.

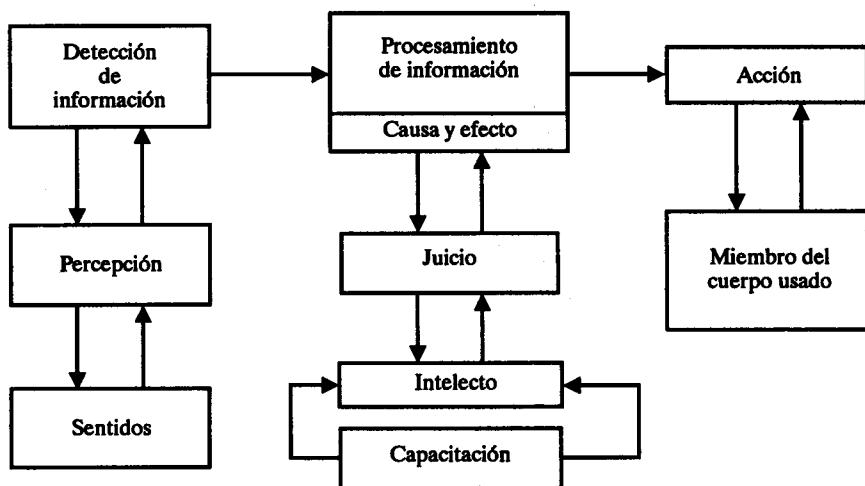


Figura 11.1 Modelo conceptual del desempeño humano.

Nivel 3. La persona posee experiencia práctica pero carece de conceptos teóricos.

Nivel 4. La persona está familiarizada adecuadamente con los aspectos teóricos y tiene competencia práctica.

Un buen programa de capacitación deberá estar diseñado a la medida para adaptarse a diversos niveles de destrezas. Para que la capacitación sea eficaz, debe tenerse el debido cuidado en programar la capacitación apropiada en el momento adecuado.

11.3 ACTIVIDADES DE LA CAPACITACIÓN EN MANTENIMIENTO

Las actividades de la capacitación en mantenimiento pueden considerarse bajo la forma de un ciclo, como se muestra en la figura 11.2.

11.3.1 Política de capacitación

La mayoría de las compañías dan a sus trabajadores alguna forma de capacitación. El programa de capacitación existente debe revisarse periódica-

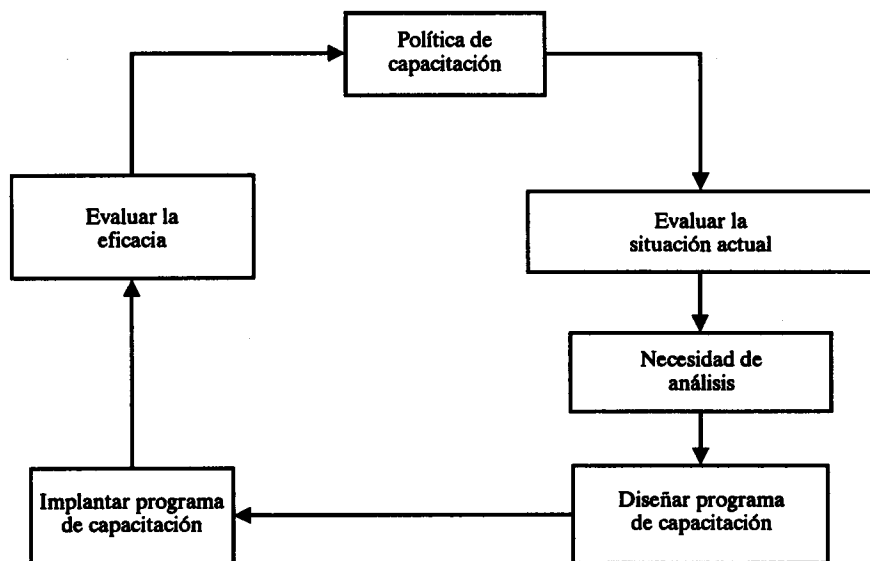


Figura 11.2 Actividades de la capacitación en mantenimiento.

mente para vigilar sus efectos en la mejora de las habilidades de los trabajadores de mantenimiento. La mira deberá estar en el desarrollo de un programa de capacitación que mejore las condiciones existentes. Aspectos como la capacitación de trabajadores con habilidades múltiples, la impartición de destrezas especiales mediante una combinación de conferencias y capacitación en el trabajo, etc., deben plantearse claramente en la política básica. En las metas de la compañía se planteará de manera explícita el desarrollo de los trabajadores de mantenimiento para que sean competentes con el equipo y la formación de recursos humanos que satisfagan los requerimientos a largo plazo. Deben delinearse con claridad las prioridades para capacitar al personal que trabaje con el equipo, al personal que trabaje en la administración y, finalmente, crear un sistema para el desarrollo de habilidades.

La política deberá establecer claramente la visión, los objetivos a largo plazo del programa de capacitación y las prioridades de la organización en la capacitación. Deberá desarrollarse un mecanismo eficaz para alcanzar los objetivos del programa.

11.3.2 Evaluación de la situación actual

Los equipos más complejos y automatizados han aumentado la necesidad de asegurar la calidad de los productos, un bajo consumo de energía y seguridad en la operación. Un sistema de capacitación bien diseñado es esencial a fin de lograr estos objetivos.

Los profesionales del mantenimiento generalmente deberán ser capaces de realizar las siguientes actividades. Ésta de ninguna manera es una lista exhaustiva de tales actividades.

1. Evaluar si el equipo está operando normalmente.
2. Diagnosticar las causas de las anomalías y restablecer las operaciones normales.
3. Mejorar la confiabilidad del equipo y minimizar las anomalías y las fallas.
4. Minimizar los costos relacionados.
5. Efectuar el trabajo con el nivel requerido de calidad y seguridad.

Teniendo en mente las funciones por realizar, debe levantarse un inventario de las destrezas que posee el personal de mantenimiento. Esto ayudará a desarrollar el programa de capacitación. Para levantar el inventario de destrezas, es esencial preparar una lista de las tareas típicas que el trabajador realiza en su máquina, así como las tareas potenciales futuras por realizar. En la

FORMA PARA INVENTARIO DE TRABAJADOR-DESTREZAS

Nombre del equipo: _____

FECHA: _____

UBICACIÓN: _____

Nombre del asesor: _____

Clasificación del trabajo		Trabajador # 1 (nombre)		Trabajador # 2 (nombre)		Trabajador # 3 (nombre)		Trabajador # 4 (nombre)		Necesidad Total	
		Nivel de destreza	Adición	Nivel de destreza	Adición	Nivel de destreza	Adición	Nivel de destreza	Adición		
Operación del equipo	4	3	1	3	1	3	1	3	1		4
Rastreo de anomalías del malfuncionamiento del equipo	4	3	1	3	1	3	1	3	1		4
Diagnóstico del equipo	4	3	1	3	1	3	1	3	1		4
Seguridad	4	2	2	3	1	4	0	2	2		5
Conocimientos fundamentales	3	2	1	3	0	3	0	2	1		2
Total			6		4		3		6		9

Figura 11.3 Forma para el inventario trabajador-destrezas.

figura 11.3 se muestra un ejemplo de una forma para el inventario de trabajador-destrezas. En esta forma se indican las tareas típicas que se van a realizar en el equipo, junto con las tareas potenciales futuras. También se indican los niveles de destrezas requeridos para cada tarea.

En la misma forma se anota el nombre del trabajador y sus niveles actuales de destrezas. Estos últimos generalmente los proporciona el supervisor, y pueden determinarse entrevistando al trabajador. La forma completada puede analizarse para estimar los requerimientos de capacitación de manera cuantificable. Esta forma permite la clasificación de los requerimientos de capacitación relacionados con las tareas y la identificación de necesidades adicionales de capacitación.

11.3.3 Análisis de necesidades

Es esencial que un trabajador posea las destrezas necesarias para realizar una tarea dada, aunque esto no es suficiente para realizar la tarea adecuadamente. Se sabe que factores como motivación, disponibilidad de las herramientas necesarias, etc., afectan el desempeño de los trabajadores.

Para identificar las deficiencias en el desempeño de los trabajadores, así como para señalar las causas de estas deficiencias y para determinar soluciones apropiadas se realiza un análisis de necesidades.

Este proceso generalmente se basa en los siguientes cinco pasos:

- Identificar el desempeño deseado.
- Identificar las desviaciones entre el desempeño esperado y el real.
- Identificar las causas fundamentales de la(s) deficiencia(s).
- Identificar soluciones apropiadas.
- Seleccionar y aplicar las soluciones apropiadas.

11.3.3.1 *Desempeño deseado* El desempeño deseado en un trabajador se conoce y está predeterminado. Generalmente comprende, aunque no está limitado a, lo siguiente:

- Detección de anomalías en el equipo.
- Corrección de las anomalías.
- Mantenimiento del equipo.

11.3.3.2 *Desviaciones entre el desempeño real y el esperado* La diferencia entre el desempeño esperado y el real puede juzgarse por los retrabajos que un trabajador de mantenimiento tiene que hacer, la calidad del equipo, el producto, etcétera.

11.3.3.3 *Causa(s) fundamental(es)* Las causas de deficiencias en el desempeño generalmente cae en alguna de las siguientes categorías:

- ***Factor de conocimiento y de destrezas.*** Los trabajadores tal vez no sean capaces de realizar sus trabajos debido a que no poseen el conocimiento y las destrezas requeridos.
- ***Factores organizacionales.*** Los trabajadores tal vez sepan cómo realizar sus trabajos, pero carezcan de las herramientas, referencias y equipos requeridos.
- ***Factores motivacionales.*** Los trabajadores tal vez conozcan el trabajo, tengan todo lo que necesitan, pero carezcan de la motivación para realizar el trabajo al nivel de las normas requeridas.

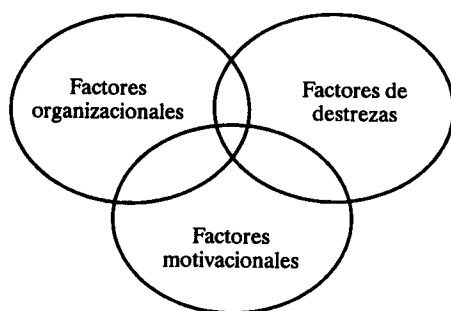


Figura 11.4 Interacción de los factores que ocasionan deficiencias en el desempeño.

Las posibles interacciones de todos estos factores se muestran en la figura 11.4. Al determinar las causas fundamentales, se debe tener presente su interacción.

11.3.3.4 Soluciones apropiadas La identificación de las causas fundamentales de las deficiencias en el desempeño conduce a su solución. Además de la capacitación, los siguientes aspectos deben examinarse como causas probables de deficiencias en el desempeño:

- Estándares de trabajo.
- Herramientas y equipo.
- Incentivos necesarios.

11.3.3.5 Selección Después de identificar las soluciones apropiadas, éstas deberán aplicarse. La capacitación comúnmente se descuida y pospone. Para evitar esto, deberá formalizarse un programa adecuado de capacitación.

11.3.4 Diseño de un programa de capacitación

En la actualidad está aumentando día con día el empleo de robots, máquinas de control numérico y sistemas de manufactura flexible por parte de la industria. El mantenimiento de este equipo complejo plantea un reto al grupo de mantenimiento y también aumenta la demanda de personal con habilidades múltiples. Los ingenieros y los técnicos, además de los trabajadores de mantenimiento, también deben ser capacitados. Es deseable que las compañías desarrollen la competencia en el manejo de los equipos en todos los niveles. Para desarrollar tal competencia, se debe construir un programa de capacitación que avance paso a paso desde las habilidades elementales,

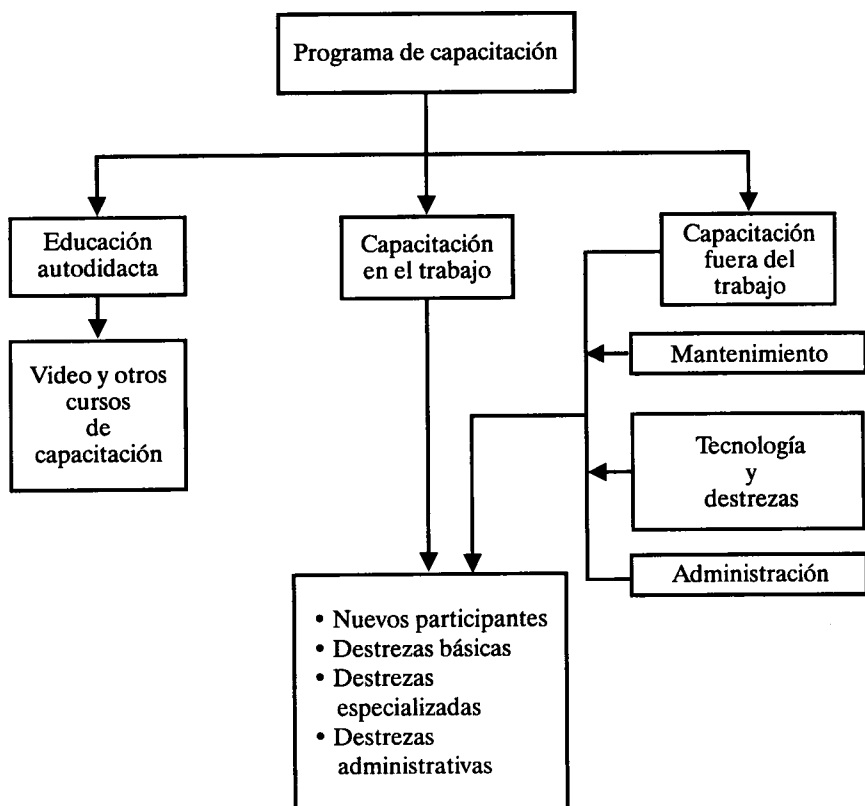


Figura 11.5 Bosquejo de un programa de capacitación.

pasando por las básicas e intermedias, hasta las avanzadas. En la figura 11.5 se muestra un bosquejo de un programa de capacitación.

Es deseable que cada compañía diseñe su propio sistema particular que se adapte a su equipo. En el pasado las compañías generalmente han descuidado la capacitación en el mantenimiento del equipo. Se debe dar la atención debida a la mejora de las habilidades en el mantenimiento desde el nivel básico hacia arriba. Los métodos de instrucción adoptados por las compañías influyen en el ritmo de aprendizaje y retención de la información de la capacitación por parte del personal que está siendo entrenado.

11.3.5 Implantación del programa de capacitación

Se debe desarrollar un plan de estudios para la capacitación. Al desarrollar dicho plan, hay que dar la atención debida al equipo que tiene la compañía,

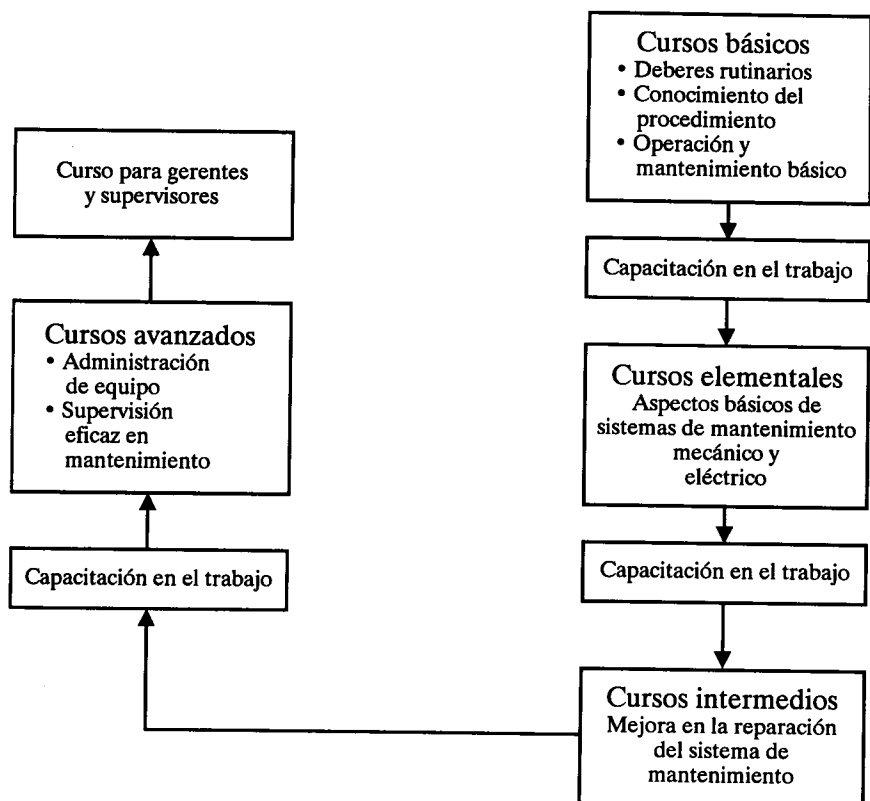


Figura 11.6 Sistema típico de capacitación en mantenimiento.

los niveles de destrezas requeridos para su mantenimiento, los temas específicos a enseñar y la cantidad de tiempo que debe dedicarse a la enseñanza de estos temas. Un sistema típico de capacitación en mantenimiento puede incluir los cursos y la capacitación en el trabajo que se muestran en la figura 11.6.

11.3.6 Evaluación de la eficacia

La eficacia de cualquier programa de capacitación deberá evaluarse periódicamente. Durante esta evaluación, se deberá observar el avance de los individuos en el desarrollo de habilidades. Las revisiones periódicas de las destrezas, el sistema de capacitación, los procesos de capacitación y el plan de estudios son ingredientes esenciales para la mejora continua. Para este fin puede utilizarse la forma del inventario de trabajador-destrezas. Esta

forma proporciona información acerca de las destrezas adicionales que necesita cada trabajador y también las destrezas totales adicionales de todos los trabajadores con respecto al mantenimiento de un equipo en particular. Los datos obtenidos antes del comienzo de un programa de capacitación pueden compararse con los datos recopilados después de terminado el programa. Se pueden examinar los porcentajes de avance para ver si se ha alcanzado la meta. Esto podría requerir que se examine todo el programa en caso de que no se logre la meta deseada. De manera similar, las tasas de trabajos repetidos de cada trabajador antes y después de la capacitación proporcionarán una idea de la eficacia del programa de capacitación.

RESUMEN

Se proporcionó una breve descripción de la capacitación. Cada organización debe desarrollar su propio programa de capacitación. Se describieron los niveles de destrezas en términos generales y éstos deben ser especificados por cada compañía para cada uno de sus equipos. Se describió el ciclo de la capacitación en mantenimiento y se explicaron los pasos de este ciclo. Se proporcionó un marco de trabajo para el desarrollo de un programa de capacitación y su implantación. Se describieron brevemente los medios para evaluar la eficacia de los programas de capacitación, junto con mejora continua.

EJERCICIOS

- 11.1 Defina el término destreza. ¿Cuáles son los niveles de destrezas posibles en un departamento típico de mantenimiento?
- 11.2 Elabore un diagrama de flujo del ciclo de las actividades de capacitación en el mantenimiento.
- 11.3 ¿Cómo realizaría un análisis de necesidades para identificar las necesidades de capacitación en el mantenimiento?
- 11.4 ¿Cuáles son los factores clave que influyen en el desempeño de un trabajador?
- 11.5 Explique cómo procedería en el diseño de un programa de capacitación para mantenimiento.
- 11.6 ¿Cómo evaluaría la eficacia de un programa de capacitación en mantenimiento?
- 11.7 Visite una organización de su área y evalúe su programa actual de capacitación en mantenimiento. ¿Cómo podría mejorarse?

BIBLIOGRAFÍA SELECCIONADA

- R. W. Baily, *Human Performance Engineering*, 2nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- E. H. Hartmann, *Successfully Installing TPM*, TPM Press, Allison Park, PA.
- B. W. Niebel, *Engineering Maintenance Management*, 2nd Ed., Dekker, New York.
- W. H. Weiss, "Performance Based Training," *Plant Engineering*, Vol. 35, No. 10, pp. 90-92.

12

AUDITORÍA DEL MANTENIMIENTO Y MEJORA CONTINUA DE LOS SISTEMAS DE MANTENIMIENTO

12.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de mantenimiento desempeñan una función clave para apoyar a los sistemas de producción (servicios) y contribuir al logro de los objetivos de la organización. Para que el sistema de mantenimiento pueda desempeñar su papel, todos sus factores y componentes deben estar bien diseñados, optimizados, y ser evaluados y mejorados continuamente. Los factores incluyen: personal y políticas de la organización, capacitación, motivación, control gerencial, instalaciones, almacenes y material, mantenimiento preventivo e historia del equipo, y sistema de información.

En este capítulo se presenta un programa paso a paso de mejora continua para los sistemas de mantenimiento. La meta del programa es lograr y establecer un sistema de mantenimiento productivo, basado en la mejora de los factores anteriores. El punto inicial en el diseño de un programa de mejora es evaluar el estado actual del sistema. Esta evaluación se realiza mediante un esquema de auditoría, que consta de dos pasos. El primer paso es la calificación de los factores esenciales del sistema de mantenimiento. El paso 2 consiste en obtener una calificación de auditoría. Para obtener una calificación de auditoría [índice de auditoría de mantenimiento (IAM)], debe determinarse el peso de cada factor o su contribución al sistema de mantenimiento. El proceso jerárquico analítico (PJA) proporciona una metodología útil para determinar el peso de cada factor. Combinando los pasos 1 y 2 se puede obtener una calificación de auditoría o IAM. Después de

auditar el sistema, el tercer paso del programa de mejora consiste en determinar los principales factores no productivos del sistema. Para este fin se hace uso del análisis ABC. Después de la identificación de los factores cruciales no productivos del sistema, debe realizarse un análisis de causa y efecto para identificar las posibles acciones correctivas. Después de identificar éstas y de aplicarlas, puede repetirse el programa para volver a evaluar el sistema. Para probar si ha habido una mejora significativa se recomienda el empleo de pruebas de hipótesis estadísticas. En la figura 12.1 se presenta el plan completo. El objetivo de este capítulo es presentar en detalle los pasos del plan y demostrar su utilización mediante el estudio de un caso.

El resto del capítulo está organizado de la siguiente manera: la sección 12.2 presenta los factores en el esquema de calificaciones, y la sección 12.3 describe la metodología para evaluar el peso (importancia) de cada factor en el esquema de calificaciones. En la sección 12.4 se describe el análisis ABC y su utilización para identificar los factores cruciales no productivos del sistema. La sección 12.5 presenta un análisis de causas fundamentales para identificar las principales causas de los factores deficientes, y la sección 12.6 demuestra la aplicación del programa de mejora en una planta del tipo de procesos.

12.2 FACTORES EN EL ESQUEMA DE CALIFICACIONES DE AUDITORÍA

En esta sección se describen los factores más importantes que influyen en la productividad del mantenimiento. Estos factores constituyen la base para el programa de auditoría. Se describen brevemente la importancia y el impacto de cada factor en la productividad del sistema de mantenimiento. En el esquema de calificaciones, cada factor se califica en una escala de 0 a 10, siendo 10 la mayor calificación. La calificación se efectúa examinando el estado de cada factor en el sistema de mantenimiento. Un enfoque común consiste en elaborar un conjunto de preguntas acerca de cada factor y luego dar una calificación al factor a partir de las respuestas a estas preguntas. Para obtener la calificación para cada factor se puede emplear un enfoque similar a los que aparecen en [1, 2, 5, 7 9]. A continuación se examinan los principales factores que se emplean en un esquema de auditoría.

12.2.1 Organización y personal

Las organizaciones se diseñan para facilitar la ejecución de los planes de mantenimiento. Explican detalladamente las responsabilidades, la cadena de mando y el tramo de control. El flujo de información y la habilidad para llevar a cabo los planes especificados están fuertemente afectados por la

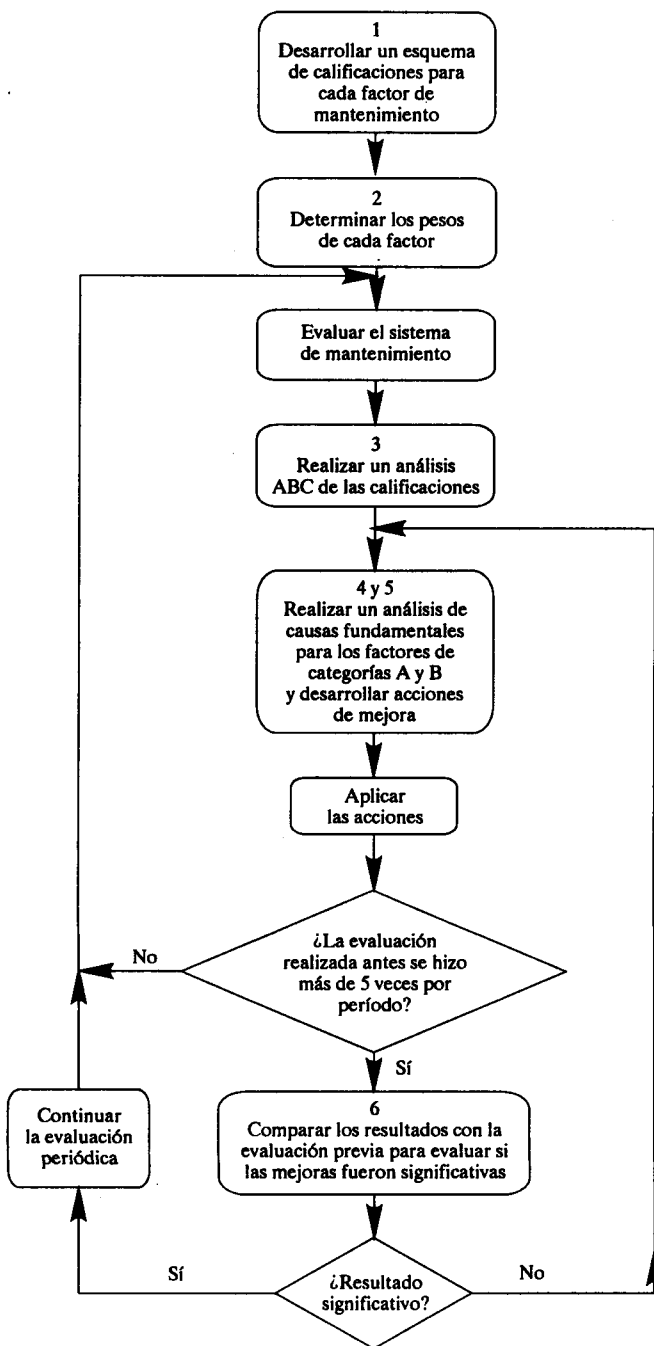


Figura 12.1 Plan de mejora continua para los sistemas de mantenimiento.

estructura de la organización. La importancia de este factor surge de la necesidad de contar con una estructura organizacional bien diseñada y un tramo de control eficaz. La necesidad de descripciones de puestos adecuadas y un organigrama se reconocerán durante el proceso de calificación de cada factor.

12.2.2 Productividad de la mano de obra

La productividad de la mano de obra se define como la proporción de las horas estándar de trabajo sobre el número real de horas trabajadas. Este factor se centra en la productividad de los trabajadores. En el proceso de calificación de este factor, la gerencia puede identificar a los trabajadores con baja productividad y establecer las razones de la misma. Puede requerirse capacitación o trabajadores altamente calificados para mejorar la productividad del sistema de mantenimiento.

12.2.3 Capacitación gerencial

Este factor evalúa la necesidad de una capacitación gerencial, especialmente en estándares de trabajo, herramientas de planeación y técnicas para mejorar la productividad.

12.2.4 Capacitación del planificador

Una planeación y programación correctas de los trabajos de mantenimiento tienen un gran impacto en la productividad de un sistema de mantenimiento. El planificador desempeña una función importante en la planeación y programación de los trabajos de mantenimiento, por lo cual debe capacitarse adecuadamente.

12.2.5 Capacitación de los técnicos

La capacitación es una importante función de apoyo para el sistema de mantenimiento. Este factor tiene un impacto directo en la organización y en el personal. Se debe establecer un programa de capacitación bien definido para cada trabajador. El programa deberá actualizarse cada año para reflejar las necesidades de la organización.

12.2.6 Motivación

La productividad del sistema de mantenimiento depende grandemente de la fuerza laboral. La productividad y la calidad en el desempeño de un

individuo se ven afectadas significativamente por su estado de ánimo. En consecuencia, un elevado estado de ánimo y la motivación son importantes para mejorar la productividad. Al examinar este factor deben investigarse aspectos como la tasa de rotación y la seguridad en el trabajo.

12.2.7 Administración y control del presupuesto

En este factor se consideran aspectos como la necesidad de informes para el control del presupuesto y el funcionamiento del equipo. Los informes de tiempo muerto del equipo y trabajos pendientes son buenos indicadores de la eficacia de un sistema de mantenimiento.

12.2.8 Planeación y programación de las órdenes de trabajo

El sistema de órdenes de trabajo es el corazón de cualquier sistema de control de mantenimiento, y es una herramienta necesaria para la planeación y programación eficaces. Este factor hace énfasis en la necesidad de órdenes de trabajo escritas y la planeación y programación correctas de los trabajos. La planeación y la programación son la columna vertebral de cualquier sistema de mantenimiento. Además, este factor considera la calidad de los trabajos de mantenimiento.

12.2.9 Instalaciones

Este factor considera el efecto de una distribución de planta apropiada en los talleres de mantenimiento, y un buen arreglo y cuidado sobre la productividad de un sistema de mantenimiento. También se encarga de la disponibilidad de las herramientas y equipos necesarios.

12.2.10 Control de almacenes, materiales y herramientas

Este factor se encarga de los procedimientos para el control del inventario y las herramientas. Hace énfasis en la necesidad de un sistema de inventarios actualizado y de políticas y procedimientos claros para la administración de las herramientas. La disponibilidad de refacciones y la administración de las existencias para trabajo son esenciales en un sistema de mantenimiento productivo.

12.2.11 Mantenimiento preventivo e historia del equipo

El mantenimiento preventivo es un elemento importante de cualquier estrategia de mantenimiento. Es la acción que se emprende para prevenir las

fallas y proporcionar los medios para controlar el tiempo muerto y la planeación y programación del mantenimiento. Los datos históricos sobre las fallas del equipo son la columna vertebral de cualquier mantenimiento preventivo basado en la estadística. Este factor se refleja fuertemente en la capacidad del mantenimiento para impedir fallas inesperadas. La calificación de este factor identificará la necesidad de mejorar el programa de mantenimiento preventivo.

12.2.12 Ingeniería y monitoreo de las condiciones

Este factor hace énfasis en la necesidad de emplear rutinas de diagnóstico y establecer un programa de mantenimiento basado en las condiciones (MBC), que es esencial para el mantenimiento predictivo.

12.2.13 Medición del trabajo e incentivos

Este factor se ocupa del establecimiento de tiempos estándar para los trabajos típicos. Los tiempos estándar son esenciales para planear y controlar el trabajo de mantenimiento. Además, pueden utilizarse para evaluar la productividad. La calificación de este factor identificará la necesidad de establecer tiempos estándar de mantenimiento o revisar y actualizar los existentes.

12.2.14 Sistema de información

Un sistema de información es una herramienta para una administración y control adecuados. Debe diseñarse de tal manera que satisfaga los requerimientos de la administración del mantenimiento. Tiene un impacto significativo en el sistema de mantenimiento. Deberá contener todos los subsistemas necesarios que proporcionen información sobre equipo, carga de trabajo y control de refacciones, además de un sistema de informes oportunos.

Una alta calificación de los catorce factores anteriores es necesaria para un sistema de mantenimiento productivo. Un factor deficiente o uno con una baja calificación reducirá la eficacia global del sistema de mantenimiento. La contribución de todos los factores en la productividad del mantenimiento no es igual. Algunos factores contribuyen más que otros a la productividad del sistema de mantenimiento. Para obtener una calificación global que combine todos los factores en una sola medida de productividad, es necesario un peso para cada factor. A continuación se presenta una metodología para evaluar el peso de cada factor.

12.3 PROCESO JERÁRQUICO ANALÍTICO PARA DETERMINAR EL PESO DE LOS FACTORES

Un problema clásico en la teoría de las decisiones es la determinación de los pesos para un conjunto de factores (actividades) u objetivos que contribuyen a una meta común. La necesidad surge en dos situaciones. La primera es cuando se requiere un juicio acerca de la importancia de un factor para un proceso. La segunda es cuando se necesita la combinación de varios objetivos. Existen cuatro métodos de la ciencia administrativa para hacer evaluaciones de valor y beneficio, a saber: clasificación, ordenamiento, evaluación y calificación [5].

La comparación por pares es un método común para asignar factores de peso u ordenamiento. Después se puede emplear un procedimiento de suma para obtener un peso para cada factor. El diagrama de precedencia de Moody es un ejemplo de dicho método en donde se utiliza la comparación por pares y se suma para obtener calificaciones o lugares para los factores [6]. Otro método para asignar pesos es el método Delphi, en donde se encuesta a un grupo de expertos y se emplea una técnica interactiva para obtener calificaciones o pesos para los factores bajo consideración.

Un método bastante conocido para la determinación de pesos, y que está ganando popularidad, es el proceso jerárquico analítico (PJA) [6]. El peso deberá reflejar la contribución de cada factor en el sistema de mantenimiento. En este método se requiere una matriz de comparación por pares de los factores. Las entradas de la matriz indican la fuerza con que un factor domina a otro. El elemento a_{ji} de la matriz se define como la intensidad de la importancia del factor i en comparación con el factor j utilizando la escala de la tabla 12.1. Obviamente,

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

Mediante la escala de la tabla 12.1 se elabora una escala de calificaciones subjetivas a partir de la comparación por pares. Para aplicar el PJA a un problema específico de determinación de pesos, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Obtener una matriz de comparaciones por pares utilizando la escala de la tabla 12.1
2. Encontrar el valor característico (eigenvalor) máximo $\lambda_{\max}$. Si es cercano a n , la dimensión de la matriz, entonces proceder con el paso 3. En caso contrario, revisar la matriz de comparaciones por pares.

TABLA 12.1 Escala de la intensidad de importancia.

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia.	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo.
3	Importancia débil de uno sobre otro.	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
5	Importancia esencial o fuerte.	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
7	Importancia demostrada.	Una actividad está favorecida fuertemente y su dominio se demuestra en la práctica.
9	Importancia absoluta.	La evidencia que favorece a una actividad sobre otra es del más alto orden posible de afirmación.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes.	Cuando se necesita un compromiso.
Recíprocos de los números diferentes de cero anteriores.	Si la actividad i tiene asignado uno de los números diferentes de cero anteriores cuando se compara con la actividad j , la j tiene el valor recíproco cuando se compara con i .	$a_{ji} = 1/a_{ij}$.
Racionales	Razones que surgen de la escala.	Si fuera a forzarse la consistencia obteniendo n valores numéricos para abarcar la matriz.

3. Encontrar el vector característico (eigenvector) correspondiente al máximo valor característico. Este vector proporciona los pesos para cada factor. Los pesos pueden normalizarse para obtener pesos cuya suma dé 1. El método PJA proporciona los medios para evaluar la consistencia de los pesos obtenidos mediante él. Mide la consistencia mediante una razón de consistencia (RC), cuyo valor debe ser 10% o menor:

$$RC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (12.1)$$

El método anterior se emplea en este capítulo para determinar la importancia de los factores de mantenimiento. En la sección 12.6 se presenta un ejemplo que demuestra el empleo del PJA. Para más detalles sobre el PJA, ver [6].

12.4 ANÁLISIS ABC (GRÁFICA DE PARETO)

Esta sección presenta el análisis ABC, o método de la gráfica de Pareto, para identificar los factores más deficientes. El análisis ABC ha sido utilizado con éxito en la administración de inventarios y otras áreas, para concentrar el esfuerzo de la gerencia en las áreas de mayor importancia y, en consecuencia, de mayor efecto. La gráfica de Pareto, o análisis ABC, se trató en los capítulos 7 y 8.

La gráfica obtenida mediante el análisis de Pareto ayudará a clasificar los factores o categorías que representan la mayoría de las frecuencias. Por ejemplo, si los factores son los centros de costos y la frecuencia es el porcentaje del presupuesto total gastado en cada centro, el análisis ABC identificará inmediatamente los factores que son responsables de la mayor parte del costo. En realidad, un análisis ABC divide los factores en tres clases. La primera es la clase A, que contiene aproximadamente del 15% al 20% de los factores y es responsable del 70% al 80% del costo. La clase B contiene aproximadamente del 20% al 25% de los factores y es responsable del 20% al 25% del costo, y la clase C está compuesta por los factores restantes, que son responsables de menos del 5% del costo. Este tipo de análisis ayuda a separar los factores importantes de los menos importantes.

Después de obtener el peso de cada factor, una calificación combinada de auditoría se calcula como sigue:

$$\text{Índice de auditoría de mantenimiento} = \text{MAI} = \frac{\sum_{i=1}^{14} w_i S_i}{\sum_{i=1}^{14} w_i I_i} = \frac{\sum_{i=1}^{14} w_i S_i}{10} \quad (12.2)$$

en donde

w_i = Peso normalizado del factor i

S_i = Calificación del factor i

I_i = Máxima calificación del factor i , es 10 para todos los factores

Para identificar los factores más deficientes y establecer prioridades para la mejora de factores se realiza un análisis ABC con base en la desviación ponderada porcentual con respecto a la calificación ideal ponderada. La desviación ponderada porcentual para el factor i (PWD_i) se calcula como sigue:

$$d_i = wI_i - w_iS_i = W_i(I_i - S_i) \quad (12.3)$$

$$PWD_i = \left[\frac{d_i}{\sum_{i=1}^{14} d_i} \right] \times 100 \quad (12.4)$$

El análisis anterior ayudará a identificar los factores que son responsables de la desviación con respecto a la calificación ideal con base en sus calificaciones e importancia.

12.5 ANÁLISIS DE CAUSAS FUNDAMENTALES Y ACCIÓN CORRECTIVA POSIBLE

Para desarrollar un programa de mejora, es necesario corregir los factores deficientes identificados en el análisis ABC. El análisis de causas fundamentales es una herramienta adecuada para identificar las causas y remediar los factores deficientes.

El análisis de causas fundamentales se refiere al proceso de identificar la causa más básica de una condición no deseable o problema. Se ha aplicado con éxito en el área de la administración de la calidad total. Las técnicas para el análisis de causas fundamentales incluyen las siguientes: análisis de cambios, análisis de barreras, eventos y factores causales, diagramas de árbol y diagramas de causa y efecto. Las técnicas anteriores son muy útiles para identificar las causas básicas a fin de maximizar los esfuerzos. Para una descripción completa del análisis de causas fundamentales, ver [8]. La herramienta más poderosa para el análisis de causas fundamentales es el diagrama de causa y efecto [3]. Es una herramienta formal para aislar las causas reales y fundamentales de un defecto. Los pasos para construir el diagrama se muestran en el capítulo 8 con un ejemplo ilustrativo. A continuación se presentan algunas guías para corregir los factores deficientes.

12.5.1 Organización y personal

Si se encuentra que la organización y el personal muestran deficiencias, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Establecer una proporción adecuada de supervisor-trabajador.
- Establecer una proporción adecuada de planificador-trabajador.
- Elaborar una descripción específica para el trabajo.
- Desarrollar la mejor mezcla entre el mantenimiento centralizado y el mantenimiento por áreas.
- Establecer buenas funciones de apoyo.
- Emplear una política escrita para el control de la mano de obra.

12.5.2 Productividad de la mano de obra

Si la productividad de la mano de obra se clasifica como clase A o B (a partir de la gráfica de Pareto), las siguientes son algunas posibles acciones correctivas:

- Establecer un sistema para recopilar datos sobre el tiempo real consumido en los trabajos por los trabajadores.
- Comparar el tiempo real consumido en la realización de un trabajo con su tiempo estándar.
- En el informe mensual de mantenimiento, calcular el índice de productividad compuesta (IPC) utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CPI} = \frac{\text{Tiempo estándar}}{\text{Tiempo real}} * \text{Utilización}$$

La utilización es el porcentaje del tiempo que los trabajadores están provechosamente ocupados, y puede obtenerse utilizando el muestreo de trabajo.

- Revisar los trabajos pendientes por trabajador.

12.5.3 Capacitación gerencial

Si la capacitación gerencial se clasifica como clase A o B, se debe lanzar y actualizar anualmente un programa de capacitación para la gerencia. El programa deberá incluir capacitación en productividad, administración de proyectos y habilidades de supervisión.

12.5.4 Capacitación del planificador

Las posibles acciones correctivas para la capacitación del planificador, si se clasifica como clase A o B, son las siguientes:

- El planificador deberá ser la persona más experimentada.
- El planificador debe coordinarse con todas las áreas de mantenimiento.
- El planificador debe utilizar técnicas modernas de planeación y programación.
- El planificador debe ser capacitado en nuevos métodos analíticos para la planeación y programación.

12.5.5 Capacitación de los técnicos

Las posibles acciones correctivas para la capacitación de los trabajadores son las siguientes:

- Establecer un programa de capacitación anual para todos los trabajadores.
- Establecer un programa de certificación de los trabajadores.

12.5.6 Motivación

Si la motivación se clasifica como clase A o B, las posibles acciones correctivas son las siguientes:

- Hacer que el trabajador sienta que es parte de la compañía.
- Establecer un excelente sistema de remuneración.
- Reducir la rotación anual y revisar las causas de rotación cada semestre.
- Realizar una encuesta informal para evaluar el estado de ánimo de los empleados.

12.5.7 Administración y control del presupuesto

Si se encuentra que la administración y el control presupuestal están en la clase A o B, las posibles acciones correctivas son:

- Establecer guías para la estimación de costos y del presupuesto.
- Analizar la utilización empleando el porcentaje de tiempo muerto.

- Establecer un informe mensual de mantenimiento.
- Establecer programas de inspección por grupos.
- Emplear el concepto de costeo basado en las actividades para la asignación de costos.

12.5.8 Planeación y programación de las órdenes de trabajo

Si se encuentran deficiencias en la planeación y programación de las órdenes de trabajo y se clasifican como clase A o B, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Diseñar una orden de trabajo sencilla.
- Coordinarse con otros departamentos de la planta.
- Computarizar el sistema de órdenes de trabajo.
- Desarrollar estándares para los trabajos.
- Desarrollar trabajos estándar.

12.5.9 Instalaciones

Si se encuentra que las instalaciones están en la clase A o B, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Reubicar las instalaciones de mantenimiento.
- Mejorar las prácticas de seguridad.
- Establecer mantenimiento preventivo para los equipos importantes.
- Establecer un programa para la custodia de las herramientas.
- Establecer informes sobre la disponibilidad del equipo.

12.5.10 Control de almacenes, materiales y herramientas

Si el control de los almacenes, materiales y herramientas se clasifica como clase A o B, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Establecer un catálogo de refacciones en existencia.
- Establecer una lista de proveedores aprobados.
- Analizar las demoras en mantenimiento debido a la falta de disponibilidad de piezas.
- Revisar y actualizar regularmente las políticas para los inventarios.

- Emplear el análisis ABC para establecer los requerimientos de materiales y los niveles de reorden.

12.5.11 Mantenimiento preventivo e historia del equipo

Si se encuentra que el mantenimiento preventivo y la historia del equipo están en la clase A o B, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Establecer un registro de la historia de reparaciones de los principales equipos.
- Cubrir el equipo esencial mediante un mantenimiento preventivo.
- Revisar la frecuencia y entrega de informes del mantenimiento preventivo.
- Asignar a una persona la responsabilidad de la planeación, programación y control del mantenimiento preventivo.

12.5.12 Ingeniería y monitoreo de las condiciones

Si la ingeniería y el monitoreo de las condiciones se clasifican como clase A o B, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Establecer un sistema de rutinas de diagnóstico.
- Analizar el tiempo muerto del equipo cada seis meses.
- Controlar el tiempo muerto del equipo mediante un mantenimiento predictivo.

12.5.13 Medición del trabajo e incentivos

Si se encuentran deficiencias en la medición del trabajo y los incentivos, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Establecer normas de tiempo para los trabajos.
- Revisar los registros de trabajos pendientes para identificar sus causas.
- Equilibrar la carga de trabajo y los requerimientos de personal.
- Revisar anualmente los requerimientos de personal.

12.5.14 Sistema de información

Si el sistema de información se clasifica como clase A o B, las posibles acciones correctivas incluyen las siguientes:

- Identificar los requerimientos de mantenimiento.
- Establecer el apoyo de la computadora para varias funciones de mantenimiento.
- Establecer un mejor sistema para la recopilación de datos.
- Desarrollar un sistema de información que satisfaga los requerimientos identificados en el primer punto.

12.6 ESTUDIO DE CASO PARA LA MEJORA DE LA PRODUCTIVIDAD DEL MANTENIMIENTO

La planta en la cual se aplicó este plan se encuentra en la Provincia Oriental de Arabia Saudita. La calificación de los factores de mantenimiento fue realizada por el departamento de mantenimiento. Al calificar y hacer las comparaciones por pares es usualmente recomendable tener dos o tres expertos en el área de mantenimiento, además de dos o tres personas del departamento de mantenimiento. Las calificaciones ideales y las calificaciones reales de los factores se presentan en la tabla 12.2.

Se hizo una comparación por pares comparando la importancia de los factores de la productividad del sistema de mantenimiento empleando la escala de la tabla 12.1. La matriz de comparación por pares se muestra en la tabla 12.3. Para obtener el vector característico (eigenvector) que corresponde al mayor valor característico (eigenvalor) se utilizó la International Mathematical Software Library (ISML). Luego se normalizó el vector y se obtuvo el peso de cada factor. Estos se muestran en la tabla 12.4.

TABLA 12.2 Calificaciones de los factores para la planta.

Número de factor	Calificación (S_i)	Calificación ideal (L_i)	Número de factor	Calificación (S_i)	Calificación ideal (L_i)
1	7.00	10	8	9.67	10
2	6.20	10	9	6.70	10
3	6.75	10	10	7.82	10
4	7.33	10	11	7.80	10
5	7.25	10	12	6.00	10
6	8.00	10	13	3.00	10
7	7.14	10	14	8.00	10

TABLA 12.3 Matriz de comparación por pares para los 14 factores.

Factor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	4/9	4/6	4/2	4/9	4/8	1	4/5	4/3	4/5	1	4/7	1	4/6
2	9/4	1	9/6	9/2	1	9/8	9/4	9/5	9/3	9/5	9/4	9/7	9/7	9/6
3	6/4	6/9	1	6/2	6/9	6/8	6/4	6/5	6/3	6/5	6/4	6/7	6/4	1
4	2/4	2/9	2/6	1	2/9	2/8	2/4	2/5	2/3	2/5	2/4	2/7	2/4	2/6
5	9/4	1	9/6	9/2	1	9/8	9/4	9/5	9/3	9/5	9/4	9/7	9/4	9/6
6	8/4	8/9	8/6	8/2	8/9	1	8/4	8/5	8/3	8/5	8/4	8/7	8/4	8/6
7	1	4/9	4/6	4/2	4/9	4/8	1	4/5	4/3	4/5	1	4/7	4/1	4/6
8	5/4	5/9	5/6	5/2	5/9	5/8	5/4	1	5/3	1	5/4	5/7	5/4	5/6
9	3/4	3/9	3/6	3/2	3/9	3/8	3/4	3/5	1	3/5	3/4	3/7	3/4	3/6
10	5/4	5/9	5/6	5/2	5/9	5/8	5/4	1	5/3	1	5/4	5/7	5/4	5/6
11	1	4/9	4/6	4/2	4/9	4/8	1	4/5	4/3	4/5	1	4/7	1	4/6
12	7/4	7/9	7/6	7/2	7/9	7/8	7/4	7/5	7/3	7/5	7/4	1	7/4	7/6
13	1	7/9	4/6	4/2	4/9	4/8	1/4	4/5	4/3	4/5	1	7/4	1	4/6
14	6/4	6/9	1	6/2	6/9	6/8	6/4	6/5	6/3	6/5	6/4	6/7	6/4	1

TABLA 12.4 Pesos de los factores mediante el PJA.

Número de factor	Peso normalizado	Número de factor	Peso normalizado
1	0.52	8	0.065
2	0.117	9	0.039
3	0.078	10	0.065
4	0.026	11	0.052
5	0.117	12	0.091
6	0.104	13	0.052
7	0.063	14	0.078

TABLA 12.5 Análisis tabular ABC.

Número de factor	Desviación ponderada porcentual	Desviación ponderada porcentual acumulada	Número de factor	Desviación ponderada porcentual	Desviación ponderada porcentual acumulada
2	15.2	15.2	1	5.3	78.5
13	12.5	27.7	14	5.3	83.8
12	12.5	40.2	10	4.8	88.6
5	11.0	51.2	11	3.9	92.5
3	8.7	59.9	4	2.4	94.9
6	7.1	67.0	8	0.8	100
7	6.2	73.2			

Para identificar los factores que más contribuyen a la desviación con respecto a la calificación ideal, se realizó un análisis ABC como se muestra en la tabla 12.5. Ésta muestra los factores ordenados descendientemente por porcentaje de desviación y la desviación acumulada. Los factores 2, 13, 12 y 5 están en la clase A, y se deberá lanzar un programa de mejora para estos factores a fin de obtener la mayor mejora global.

RESUMEN

En este capítulo se presentó un programa para evaluar la productividad del mantenimiento. Además, el programa describe las técnicas y métodos para desarrollar un plan de mejora continua para un sistema de mantenimiento. Los pasos del programa se presentaron en la figura 12.1. El programa ha sido demostrado y probado en una planta de tipo de proceso, y se espera que dé por resultado una mejora del 25% en la productividad del mantenimiento.

EJERCICIOS

- 12.1 Haga una lista de los factores que constituyen el esquema de auditoría de mantenimiento.
- 12.2 Mencione los tres factores más importantes en el esquema de auditoría. Justifique su respuesta.
- 12.3 Utilice el proceso jerárquico analítico (PJA) para estimar el peso de cada factor del ejercicio 12.1.
- 12.4 ¿Por qué se necesita el análisis ABC en el programa de mejora continua?
- 12.5 Haga una lista de las posibles acciones correctivas para el factor de ingeniería y monitoreo de las condiciones, si el programa de auditoría encuentra que muestra deficiencia.
- 12.6 Visite una organización de su área y realice una programa detallado de auditoría. Emplee el método presentado en este capítulo para sugerir mejoras.

REFERENCIAS

1. S. O. Duffuaa and A. Raouf, "Continuous Maintenance Productivity Improvement Using Structured Audit," *International Journal of Industrial Engineering, Applications and Practice*, Vol. 3, No. 3, pp. 151-160.

2. S. O. Duffuaa, A. N. Shuaib, A. Raouf and M. O. Budair, "Evaluation of Maintenance Management Systems," *Journal of King Saud University*, Vol. 4, pp. 29-42.
3. K. Ishikawa, "Guide to Quality Control," *Quality Resources*, White Plains, NY.
4. A. Kelly, "Maintenance and Its Management." Conference Communication, Farnham.
5. P. Moody, *Decision Making*, McGraw-Hill, New York.
6. S. Thomas and L. G. Vargas, *The Logic of Priorities*, Nijhoff, Boston.
7. T. A. Westerkamp, "Using Computer to Audit Maintenance Productivity", in *Maintenance Management* (E. Hartmann, Ed.), Industrial Engineering and Management Press, Atlanta.
8. P. F. Wilson, H. Dell and G. F. Anderson, *Root Cause Analysis Tool for Total Quality Management*, ASQC Quality Press, Milwaukee.
9. T. Wireman, *World Class Maintenance Management*, Industrial Press, New York.

13

AVANCES EN LOS CONCEPTOS DEL MANTENIMIENTO

13.1 INTRODUCCIÓN

El equipo que se utiliza en los procesos industriales se ha vuelto más complejo con el paso del tiempo. En el siglo XIX, la maquinaria, en su mayor parte, era sencilla, robusta y estaba construida para realizar funciones únicas a lo largo de un período grande. De hecho, muchas de ellas aún están en operación hoy en día. Más tarde, se enlazaron varias máquinas simples.

En el siglo XX, las máquinas se hicieron más complejas y las funciones de máquinas industriales enlazadas se consolidaron aún más en las fábricas de producción masiva. Estas nuevas máquinas se caracterizaban por líneas de maquinaria compleja e híbrida, que comprendían dispositivos mecánicos, eléctricos, hidráulicos y neumáticos. A mediados del siglo XX, el tamaño de las fábricas y empresas de servicios públicos continuó creciendo, junto con su utilización, a fin de lograr economías de escala. Hacia finales de dicho siglo, la flexibilidad, la variedad de los productos y la rapidez se convirtieron en el lema de las industrias manufactureras y de procesos, y las economías de escala dieron paso a las celdas de la tecnología de grupos. La computarización de los procesos de producción se convirtió en una cosa común, en donde los controladores lógicos programables (PLC), los sistemas expertos para diagnóstico y los sistemas de control supervisor y adquisición de datos (SCADA) administran plantas enteras.

La administración del mantenimiento ha tenido que cambiar para estar al día con el cambiante lugar de trabajo. La escala del cambio va desde un solo trabajador vigilando un sencillo y robusto molino de agua, hasta los ingenieros de confiabilidad desarrollando programas de mantenimiento predictivo, eficaces en costos, para un grupo de robots soldadores. Varias metodologías han sido desarrolladas para ayudar al ingeniero de manteni-

miento en estos cambios. En este capítulo se presentarán algunos avances en los conceptos del mantenimiento. La sección 13.2 examina el concepto del diseño para la factibilidad del mantenimiento, seguido del mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) en la sección 13.3. La sección 13.4 presenta el mantenimiento productivo total (MPT), y la sección 13.5 describe el *benchmarking* (patrones de referencia). En la sección 13.6 se presenta el concepto de la reingeniería del proceso de mantenimiento.

13.2 DISEÑO DE LA FACTIBILIDAD DEL MANTENIMIENTO

La factibilidad del mantenimiento se definió en el capítulo 9 como la probabilidad de realizar el mantenimiento de un equipo en un tiempo específico. Este período podría ser el tiempo medio para la reparación (MTTR), definido como

$$\text{MTTR} = \text{Tiempo medio para la reparación} = \frac{\text{Tiempo muerto por reparación}}{\text{Número de reparaciones}}$$

El tiempo muerto por reparación es el tiempo total desde la falla o pérdida de la función hasta la aceptación por parte del “cliente” del restablecimiento de la función, a fin de que pueda comenzar la producción plena. Hay varias fases entre estos dos puntos, como se ilustra en la figura 13.1.

El diseño para mantenibilidad tiene como objetivo reducir la frecuencia de las reparaciones requeridas, la duración del tiempo de reparación y el tiempo total de intervención de mantenimiento, incluyendo las tareas de

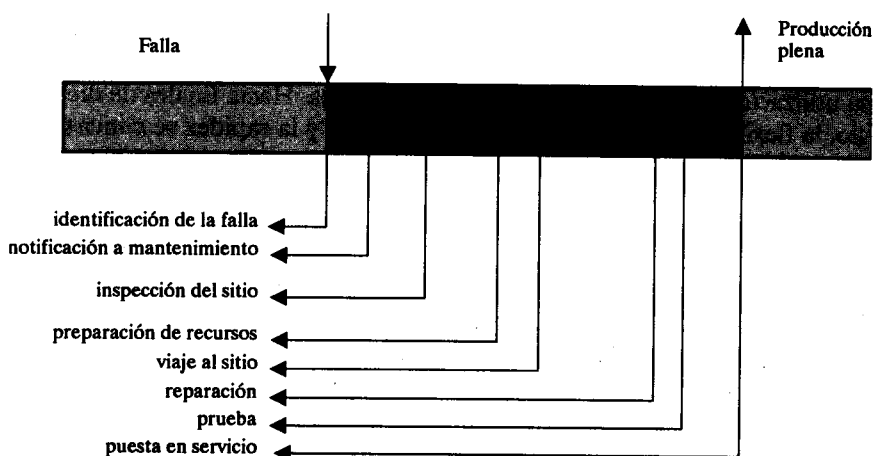


Figura 13.1 Medidas de mantenimiento para el tiempo medio para la reparación.

mantenimiento preventivo. La meta del diseño para la mantenibilidad es evitar el mantenimiento.

El diseño con vistas a evitar el mantenimiento comienza cuando se formulan las necesidades presentes y futuras de equipo por parte del cliente. Durante este tiempo, se debe recopilar y organizar la información de los usuarios actuales del diseño existente sobre problemas encontrados y darle solución a éstos, así como información acerca de las mejoras hechas al equipo durante su operación y mantenimiento de rutina.

El plan del nuevo producto se establece tomando en cuenta todo el costo del ciclo de vida, incluyendo los costos de la adquisición original, su instalación, prueba, operaciones, mantenimiento y eliminación. Durante la etapa de diseño, se incorporan nuevos estándares sobre la base de tecnologías recientemente desarrolladas, análisis de fallas y causas fundamentales del modelo actual, y pruebas de confiabilidad.

Durante la fase del desarrollo del prototipo se identifican los problemas de manufactura y especificaciones, tanto por fenómeno como por componentes de la máquina. Esta información se retroalimenta al plan de mercadotecnia y del producto, así como a través de una revisión detallada del diseño, antes de proceder a la producción real. Una vez producido e instalado en la planta del cliente, se estudian nuevamente los aspectos de confiabilidad y mantenibilidad y se incorporan en los modelos futuros mejorados.

Los clientes actualmente están buscando un valor global en el equipo. ¿Les permitirá elaborar productos con alta calidad y bajo costo durante ciclos cortos? ¿Proporcionará un buen servicio con un mínimo de riesgo para el negocio, la seguridad y el ambiente?

El diseño con miras a la prevención del mantenimiento deberá tener las siguientes características:

- Elementos incorporados de diagnóstico en búsqueda de anomalías, causas fundamentales de fallas y procedimiento de restablecimiento.
- Facilidad para desarmarse y armarse.
- Facilidad y rapidez en las preparaciones y en los cambios.
- Incorporación de sistemas expertos.
- Facilidad de limpieza, inspección, lubricación, ajuste y reemplazo de componentes.
- Operación limpia, sin excesivo esparcimiento de aceite y desperdicios.
- Protección contra el polvo y suciedad en mecanismos sensibles.
- Consumo eficiente de energía, amable con el ambiente y seguro.
- Adaptable a varias ubicaciones de la planta y ambientes.
- A prueba de impericia, de manera que sea más fácil seguir los procedimientos correctos que los incorrectos.

- Alta confiabilidad y precisión.
- Facilidad en el arranque inicial.

13.3 MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) fue desarrollado por la industria de la aviación civil en Estados Unidos. La Federal Aviation Administration (FAA) de Estados Unidos comisionó a la empresa United Airlines para emprender un estudio de la eficacia de las reparaciones generales, basadas en el tiempo, de componentes complejos en los sistemas de los equipos de las aeronaves civiles. Existía la creencia de que estas reparaciones generales basadas en el tiempo no contribuían mucho para reducir la frecuencia de las fallas y no eran económicas. Este estudio se llevó a cabo en el momento en que se estaban diseñando aeronaves de cuerpo amplio, y la complejidad de los sistemas de los equipos y sus componentes había crecido dramáticamente con respecto a los diseños anteriores. La conclusión clave fue que las reparaciones generales, basadas en el tiempo, de equipos complejos no afectaba de manera significativa, ni positiva ni negativamente, la frecuencia de las fallas. En algunos equipos, en realidad la frecuencia de las fallas era mayor inmediatamente después de una reparación general. Este estudio demostró que la probabilidad condicional de falla, denominada “de la tina de baño”, contra la curva de la edad era sólo uno de los seis principales patrones de fallas. El patrón de fallas más común en los equipos complejos es aquel que muestra una elevada “mortalidad infantil”; es decir, la máxima probabilidad condicional de falla ocurre en los primeros períodos de la edad del equipo, luego disminuye hasta una tasa constante de fallas, como se describe en la figura 13.2.

Las reparaciones generales programadas, basadas en el tiempo, “restablecen” la edad de nuevo a 0, incrementando de esta forma la probabilidad de falla. Durante la mayor parte de la vida del equipo complejo, las fallas están relacionadas con eventos aleatorios, como cargas de choque, sobrevoltajes, prácticas incorrectas de lubricación, operación inadecuada, etc. Estos eventos aleatorios provocan un deterioro acelerado del funcionamiento del equipo, el cual a menudo puede monitorearse empleando técnicas de mantenimiento preventivo basado en las condiciones.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad es una metodología lógica derivada de esta investigación en el sector de la aviación, y hace uso de la herramienta del análisis de modo de falla, efecto y grado crítico (FMECA). La metodología sigue una serie de pasos:

1. Seleccione los sistemas del equipo que sean más importantes para la planta, la instalación, la flotilla o algún otro activo.

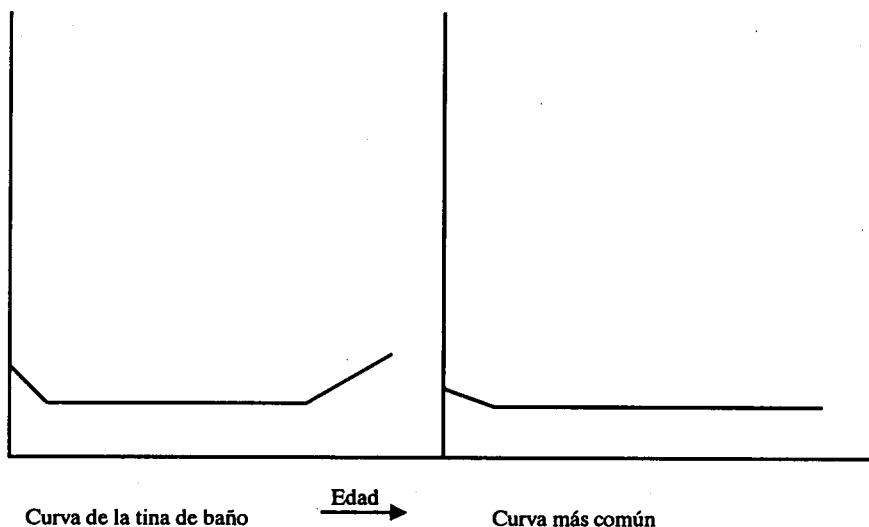


Figura 13.2 Probabilidad condicional de la falla contra la edad del equipo.

2. Defina el rendimiento o función esperada de este equipo y, por lo tanto, lo que constituye una falla funcional.
3. Identifique las causas fundamentales de la falla funcional.
4. Determine el efecto, para estas causas, en una secuencia de eventos en términos de seguridad, ambiente, producción, o si es un efecto oculto (por ejemplo, el mecanismo del botón de emergencia de un elevador podría fallar, aunque la falla no se conocería hasta que se necesitara la función, a menos que se probara).
5. Calcular el grado crítico del efecto de dicha falla.
6. Emplear un diagrama lógico, del cual se presenta una muestra en la figura 13.3, para seleccionar la táctica de mantenimiento más apropiada para prevenir la falla.
7. Determinar la acción específica que prevenga la falla funcional y su frecuencia de programación, con base en un análisis de la historia del equipo o mediante la experiencia de expertos apropiados.
8. Si no existe una tarea preventiva que sea apropiada, determine si puede operarse hasta que se presente la falla, si se justifica un rediseño, o si existe una prueba que pueda realizarse para determinar la falla.

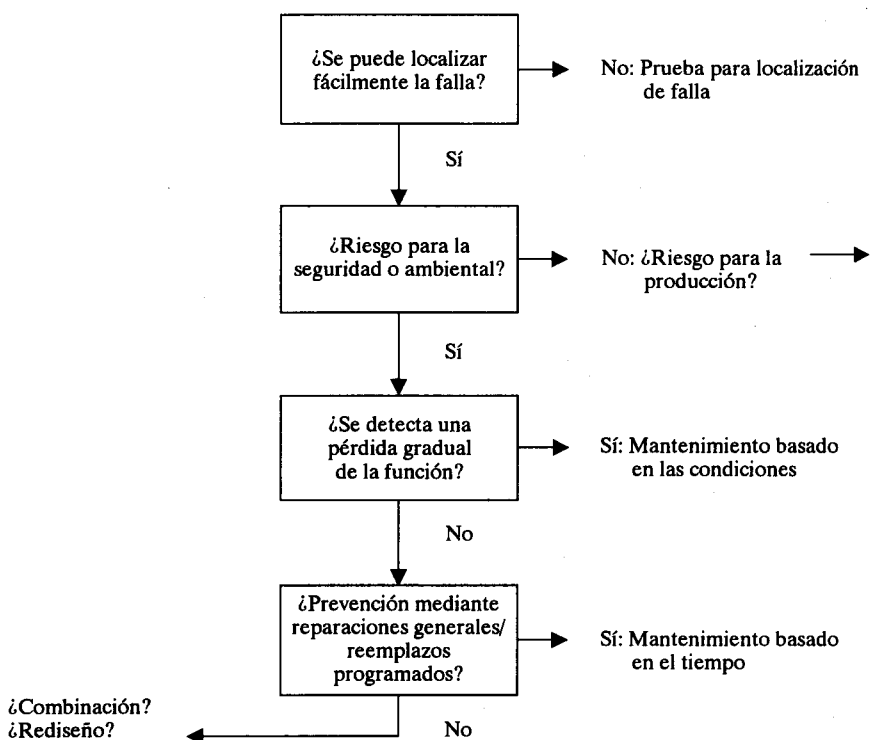


Figura 13.3 Diagrama de árbol lógico simplificado para el MCC.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad asegura que se emprendan las acciones correctas de mantenimiento preventivo o predictivo y elimina aquellas tareas que no producen ningún impacto en la frecuencia de fallas. Debido al enfoque riguroso para definir funciones, normas, mecanismo de falla, efectos y grado crítico, el sistema del equipo que está bajo revisión se entiende mucho mejor que antes de la revisión. El resultado de cada estudio del MCC del sistema de un equipo es una lista de acciones de mantenimiento, programas y responsabilidades. Éstas, a su vez, dan por resultado una mejor disponibilidad, confiabilidad y rendimiento operativo del equipo, y eficacia en costos. Aun cuando el MCC favorece las tácticas del mantenimiento centrado en las condiciones, si la falla no da motivo a una preocupación en cuanto a la seguridad y no tiene un impacto económicamente significativo en la producción, una de las opciones presentadas en el árbol lógico del MCC es operar el equipo hasta que falle (es decir, no hay mantenimiento programado). Para mayor información sobre el MCC, ver [1, 5].

13.4 MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL

El mantenimiento productivo total (MPT) es un enfoque gerencial para el mantenimiento que se centra en la participación de todos los empleados de una organización en la mejora del equipo. Este método se desarrolló en el sector manufacturero japonés, comenzando con la aplicación del mantenimiento preventivo al estilo norteamericano y europeo y avanzando hasta la aplicación de los conceptos de la administración de la calidad total y la manufactura justo a tiempo al campo del mantenimiento de los equipos.

El Instituto Japonés de Ingenieros de Planta definió el MPT en 1971 con cinco metas claves:

- Maximizar la eficacia global de equipo, que incluye disponibilidad, eficiencia en el proceso y calidad del producto.
- Aplicar un enfoque sistemático para la confiabilidad, la factibilidad del mantenimiento y los costos del ciclo de vida.
- Hacer participar a operaciones, administración de materiales, mantenimiento, ingeniería y administración en el control del equipo.
- Involucrar a todos los niveles gerenciales y a los trabajadores.
- Mejorar el rendimiento del equipo mediante actividades de grupos pequeños y el desempeño del equipo de trabajadores.

Los operadores del equipo son el punto central de las actividades del MPT. Aunque la mayoría de los operadores entienden lo que hace su equipo, pocos comprenden los mecanismos fundamentales sobre cómo funciona. El término "mantenimiento autónomo" se utiliza para describir las actividades de los operadores que se relacionan con el mantenimiento del equipo y con la naturaleza de estudio independiente de otras acciones de mejora del equipo. Los operadores realizarán tareas de limpieza, inspección, lubricación, ajustes, cambios de componentes menores y otras tareas de mantenimiento ligero que requieren cierta capacitación e instrucción, pero no destrezas completas de mantenimiento. El operador gradualmente aprende cómo diagnosticar los problemas del equipo antes de que se vuelvan serios.

En el MPT, siempre que un equipo funciona por debajo del nivel requerido, la pérdida de funcionamiento se registra y se monitorea. Estas pérdidas pueden agruparse en seis categorías: descomposturas, preparación y ajustes, trabajo en vacío y paros menores, reducción en la velocidad, defectos y pérdidas de rendimiento. Las descomposturas y las preparaciones ocasionan tiempo muerto y producen un impacto en la disponibilidad; la reducción en la velocidad tiene un impacto en el tiempo del ciclo, y los defectos y pérdidas de rendimiento tienen un impacto en la calidad. La eficacia global del equipo, definida como el producto de disponibilidad, tiempo

del ciclo y tasa de calidad, es la medida clave de eficacia del MPT. El operador y el trabajador de mantenimiento son capacitados para identificar problemas relacionados con la eficacia global del equipo y para realizar conjuntamente análisis de causas fundamentales para investigar las pérdidas.

Dentro del departamento de mantenimiento, la metodología del MPT fomenta el desarrollo de la planeación sistemática y el control del mantenimiento preventivo y correctivo, y apoya plenamente las actividades autónomas realizadas por el operador. En las plantas en donde el entorno de operación y mantenimiento ha sido mejorado hasta el punto de disminuir las devoluciones, se emprenden actividades para una prevención activa del mantenimiento, como se describió anteriormente en la sección sobre diseño para mantenibilidad. En todo momento deberá ponerse mucho énfasis en mejorar las habilidades del operador y del trabajador de mantenimiento. Los gastos en la capacitación son normalmente del orden del 5% al 8% del presupuesto para mano de obra.

13.4.1 Otorgamiento de facultades a los empleados

No es necesario recalcar los beneficios de hacer participar a los operadores en el éxito del MPT. Una forma pragmática de lograr esto es empleando un método sistemático, basado en datos, para la transferencia de destrezas. La transferencia de destrezas es el proceso de sacar las tareas que requieren destrezas bajas del dominio exclusivo de un grupo y llevarlas a una zona de tareas compartidas. Bajo esta política, un operador que haya sido capacitado y certificado adecuadamente puede realizar la tarea de un mecánico y viceversa. Esta sociedad entre la función de operaciones y la de mantenimiento tiene muchos beneficios que incluyen los siguientes:

- Los operadores y los mecánicos se convierten en personal con habilidades múltiples, lo cual conduce a un enriquecimiento del trabajo y a una mayor flexibilidad de los trabajadores.
- La participación de los operadores en el mantenimiento de rutina crea un sentido de responsabilidad, orgullo y propiedad.
- Los tiempos de demora se reducen y se incrementa la productividad.
- Se promueve el trabajo en equipo entre las funciones de operaciones y mantenimiento.

13.4.2 Administración del equipo

El equipo es el punto focal del MPT. Este esfuerzo comienza identificando las pérdidas importantes del equipo. Como se indicó anteriormente, las siguientes seis pérdidas limitan la eficacia del equipo:

1. Fallas del equipo (descomposturas).
2. Tiempo muerto por preparación y ajustes.
3. Trabajo en vacío y paros menores.
4. Reducción de la velocidad.
5. Defectos del proceso.
6. Reducción del rendimiento.

La meta fundamental del MPT con respecto al equipo es aumentar su eficacia hasta su máximo potencial y mantenerlo en dicho nivel. Esto puede lograrse entendiendo las pérdidas anteriores y diseñando medios para eliminarlas.

13.4.2.1 Fallas del equipo Las descomposturas representan un gran porcentaje de las pérdidas totales. Deben hacerse todos los intentos por evitarlas. Para maximizar la eficacia del equipo, las descomposturas deben reducirse a 0 cambiando la actitud de que las descomposturas son inevitables.

13.4.2.2 Tiempo muerto por preparación y ajustes Cuando termina la producción de un tipo dado de producto y el equipo se ajusta para estar listo a producir otro tipo de producto, se presentan pérdidas debido al tiempo muerto de preparación y a productos defectuosos. Estas pérdidas pueden disminuirse reduciendo el tiempo de preparación. Muchas compañías están trabajando para lograr preparaciones de un solo minuto.

13.4.2.3 Trabajo en vacío y paros menores La producción puede verse interrumpida debido a un mal funcionamiento o a que una máquina esté ociosa entre la elaboración de dos productos. Las fuentes de estas pérdidas deben identificarse y eliminarse. La eliminación de los paros menores es una condición previa y esencial para la producción automatizada.

13.4.2.4 Reducción de la velocidad Estas pérdidas corresponden a la diferencia entre la velocidad de diseño del equipo y la velocidad de operación real. La reducción de la velocidad puede deberse a problemas mecánicos y a una calidad defectuosa, o puede ser impuesta por el operador por temor de abusar del equipo. En otros casos, tal vez ni siquiera se conozca la velocidad óptima. El aumento de la velocidad da por resultado una mejora clara de la productividad si se identifican y se eliminan las razones de trabajar a una velocidad reducida.

13.4.2.5 Defectos del proceso Éstos constituyen pérdidas en calidad ocasionadas por el proceso. Las condiciones que ocasionan el defecto deben identificarse y eliminarse.

13.4.2.6 Rendimiento reducido Consiste en las pérdidas de arranque que ocurren durante las primeras etapas de la producción, desde el principio hasta su estabilización.

La mejora de la eficacia del equipo requiere la medición de estas pérdidas. Las seis pérdidas anteriores afectan la disponibilidad del equipo, su eficiencia y la calidad del producto de la siguiente forma:

1. La disponibilidad del equipo se ve afectada por la preparación y los ajustes y por las fallas del equipo.
2. La eficiencia del equipo se ve afectada por trabajar en vacío y paros menores y la reducción de la velocidad.
3. El rendimiento reducido y los defectos del proceso afectan la calidad del producto.

La eficacia global del equipo (OEE) está dada como sigue:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \times \text{Eficiencia del desempeño} \times \text{Tasa de calidad}$$

en donde

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo de carga} - \text{Tiempo muerto}}{\text{Tiempo de carga}}$$

en donde el tiempo de carga es el tiempo disponible menos el tiempo muerto planeado. El tiempo muerto planeado se refiere al tiempo muerto programado oficialmente en el plan de producción, como actividades de mantenimiento programado y administración.

$$\text{Eficiencia de desempeño} = \frac{\text{Tiempo teórico del ciclo} \times \text{Cantidad procesada}}{\text{Tiempo de operación}}$$

$$\text{Tasa de calidad} = \frac{\text{Cantidad procesada} - \text{Cantidad defectuosa}}{\text{Cantidad procesada}}$$

La eficacia global del equipo puede reducirse a lo siguiente:

$$OEE = \frac{\text{Tiempo teórico del ciclo} \times \text{Cantidad procesada} \times \text{Tasa de calidad}}{\text{Tiempo de carga}}$$

El tiempo teórico del ciclo y el tiempo de carga son constantes por día. Por lo tanto la OEE está relacionada directamente con el número de artículos de buena calidad. La OEE puede mejorarse incrementando la disponibilidad, la eficiencia en el desempeño y, más importante, la tasa de calidad. Puede verse que la disponibilidad puede mejorarse reduciendo el tiempo muerto, y que la eficiencia en el desempeño puede mejorarse reduciendo el tiempo del ciclo.

Para mejorar la tasa de calidad, deberá identificarse el estado en el cual el equipo produce artículos de alta calidad. A continuación deberá establecerse una política de mantenimiento para conservar el equipo en dicho estado. Por lo tanto, la meta del mantenimiento deberá ser conservar el equipo en un estado en el que se produzcan cero defectos.

13.4.3 Implantación del MPT

Nakajima [4] sugiere los siguientes doce pasos para implantar el MPT:

1. Anunciar la decisión de la alta dirección de introducir el MPT.
2. Lanzar una campaña educativa para introducir el MPT.
3. Crear organizaciones para promover el MPT.
4. Establecer políticas básicas de MPT.
5. Formular un plan maestro para el desarrollo del MPT.
6. Mantener el impulso del MPT.
7. Mejorar la eficacia de cada equipo.
8. Desarrollar un programa autónomo de mantenimiento.
9. Desarrollar un programa de mantenimiento programado para el departamento de mantenimiento.
10. Llevar a cabo una capacitación para mejorar las destrezas en operaciones y mantenimiento.
11. Desarrollar un programa eficaz de administración.
12. Perfeccionar la implantación del MPT y elevar sus niveles.

El MPT permite obtener mejoras fundamentales dentro de la organización mejorando la utilización de los trabajadores y del equipo. La mejora en la eficacia del equipo y en las actitudes de los empleados son elementos clave en la mejora global dentro de la organización (para mayores detalles sobre el MPT, ver [3, 4]).

13.5 **BENCHMARKING Y MANTENIMIENTO DE CLASE MUNDIAL**

Aunque el *benchmarking* o comparación por patrones de referencia como enfoque gerencial hacia la mejora continua comenzó en la década de 1980, sus raíces se remontan a los tiempos en que los artesanos ponían una marca permanente en sus bancos de trabajo para asegurar que el avance de su trabajo se midiera contra un estándar adecuado y consistente. El *benchmarking* actual tiene sus raíces en la administración de la calidad total, cuando las corporaciones que buscaban obtener reconocimiento como compañías de calidad total, mediante premios como el Malcolm Baldrige National Quality Award de Estados Unidos o el Premio PM del Instituto Japonés de Mantenimiento de Planta, hacían recorridos en otras compañías que habían ganado estos premios para ver cómo lo habían logrado. La corporación Xerox fue pionera en el *benchmarking* competitivo, y en la actualidad se acepta de manera general una definición completa basada en su trabajo original: "El *benchmarking* es un proceso sistemático continuo para evaluar productos, servicios y el proceso del trabajo de las organizaciones de las que se reconoce que representan las mejores prácticas con fines de mejora de la organización".

La selección de los socios en el *benchmarking* puede provenir de otros departamentos o plantas dentro de la organización (internamente), competidores directos, el sector industrial en general, o de cualquier empresa independiente del sector, que realiza la función o proceso que está bajo revisión mejor que la mayoría. Por tanto, una planta para el estampado de partes automotrices que desee aplicar el *benchmarking* al mantenimiento predictivo podría observar plantas hermanas en los otros lugares de la compañía, en otras plantas para estampado de partes automotrices de la competencia, en fabricantes metálicos en general de la industria, o en una refinería petroquímica, una planta de energía nuclear o una línea aérea, cada una con razones precisas para ser muy buena en el mantenimiento predictivo.

El *benchmarking*, como una metodología para mejora continua, busca tanto los parámetros como los procesos para alcanzar estos parámetros. La metodología comienza con una comprensión total del desempeño de la planta anfitriona y aquellos procesos que son elementales para el éxito de la planta. Esto representará el alcance de lo que debe fijarse como referencia. En la

administración del mantenimiento se hace una evaluación de diez áreas, y tres o cuatro de las áreas más críticas son candidatas para el ejercicio de *benchmarking*. Un equipo de trabajo formado por personal de mantenimiento, ingeniería, materiales y operaciones examina lo siguiente:

1. Planeación a largo plazo e iniciativas de mejora.
2. Organización y planeación de la fuerza laboral.
3. Planeación, programación y control del trabajo.
4. Compras, almacenes y control de inventarios.
5. Mantenimiento preventivo y predictivo.
6. Medidas y estadística de desempeño.
7. Administración y sistemas de información.
8. Ingeniería de confiabilidad.
9. Interfaz y comunicación de mantenimiento/producción.
10. Administración y procesos administrativos.

Las medidas de desempeño para la administración del mantenimiento están disponibles desde hace algún tiempo en varios sectores industriales (por ejemplo, aerolíneas, generación de energía, refinación de petróleo/gas/petroquímica y procesamiento de pulpa/papel); sin embargo, la documentación de las actividades en los diez procesos anteriores para determinar cómo se han alcanzado estas medidas de desempeño debe hacerse mediante un *benchmarking* competitivo.

La aplicación del *benchmarking* a un proceso para desarrollar un programa de mantenimiento preventivo y predictivo (MP) eficaz en costos, por ejemplo, implica entender la relación causal entre este proceso y otros y sus estadísticas de desempeño. Un programa de MP acertado reduce las descomposturas, las emergencias, los trabajos urgentes, el tiempo extra, los costos de mano de obra y los costos de inventario de partes, y aumenta la disponibilidad, confiabilidad, eficiencia del proceso y la precisión de operación del equipo y, en consecuencia, la calidad del producto.

Un programa de MP de clase mundial hace uso de las siguientes técnicas analíticas: análisis de modo de falla y efecto y grado crítico (FMECA); análisis de fallas mediante diagrama de árbol (FTA); análisis de causas fundamentales; y método rutinarios para el monitoreo del funcionamiento del equipo, como monitoreo de vibraciones, análisis de lubricantes, termografía, análisis de tendencias mediante historia del equipo y sistemas expertos para diagnóstico.

El mantenimiento de clase mundial puede lograrse mediante la adaptación a las circunstancias de las mejores prácticas en todas las áreas y mediante la aplicación de los factores clave de éxito de una operación individual.

13.6 REINGENIERÍA DE PROCESOS EN MANTENIMIENTO

Hammer [2] fue el primero en formular los conceptos de la reingeniería de procesos en un artículo titulado: "No automatice, borre todo". El argumento era que muchos procesos de los negocios son extremadamente complicados, ineficientes y cargados con demasiadas actividades que no agregan valor y que su simple automatización con soluciones de tecnología informática no mejoraría sustancialmente su desempeño. Proponía volver a empezar con un nuevo proceso de negocios, directo y uniforme, que emprenda la transacción más común con el mínimo número de pasos y que se concentre en agregar valor para el cliente. Lo que agrega valor es alta calidad, rapidez y servicio a bajo costo y con un riesgo aceptable.

El mantenimiento ha sido manejado, históricamente, como una función de apoyo o servicio, con la única responsabilidad de impedir o reparar decomposturas. El personal de producción operaba el equipo, el personal de almacenes se encargaba de los materiales, el personal de ingeniería diseñaba o proporcionaba las especificaciones para el equipo, y cada departamento ponía atención a su "silo" funcional. Con los procesos internos y las medidas de desempeño encaminadas a optimizar cada silo, el proceso global de proporcionar servicio al cliente y generar utilidades estaba con frecuencia suboptimizado. Por ejemplo, un ingeniero puede cumplir exactamente las especificaciones con un diseño "único" y cumplir su meta de desempeño, pero las refacciones únicas y los procedimientos de mantenimiento, así como el costo, harán más difíciles el logro de los objetivos de los otros departamentos.

Cuando se ve el mantenimiento del equipo como un proceso de negocios, más que como una función o departamento, vemos que el personal de mantenimiento tiene un papel importante, pero de igual manera también el operador, el empleado del almacén y el ingeniero. La reingeniería del proceso de mantenimiento abarca el empleo de varias técnicas para ayudar a entender el proceso actual, sus costos y sus componentes que agregan valor, y ayudar a establecer la visión y las metas de desempeño para el nuevo proceso.

13.6.1 Análisis de procesos

La primera técnica se denomina análisis de procesos y comprende los siguientes pasos:

1. Fijar los límites del proceso.
2. Dibujar el flujo central del proceso a través de cada paso y responsabilidad.
3. Determinar las medidas de las entradas, de las salidas y otras medidas de rendimiento.
4. Identificar a los proveedores, clientes y gerentes claves.

Para el proceso de solicitud de trabajos de emergencia, el análisis del proceso sería como se muestra en la tabla 13.1. La entrada es la identificación de una falla o una falla incipiente, la salida es la reparación de la falla, y algunas medidas claves son las siguientes:

- Tiempo de respuesta del trabajador de mantenimiento para llegar al punto de la falla.
- Tiempo del ciclo desde la identificación de la falla hasta la conclusión.
- Costo del tiempo de los participantes en el proceso.
- Volumen de solicitudes de emergencia en un período de tiempo.
- Costo de los materiales.

Habiendo dibujado el proceso, puede que sea más fácil identificar las fuentes de ineficiencias, como las siguientes: burocracia, duplicación, complejidad,

TABLA 13.1 Proceso de solicitud de trabajos de emergencia.

Pasos del proceso	Ope- rador	Capataz de operadores	Capataz de manteni- miento	Técnico	Empleado de manteni- miento	Planificador de manteni- miento
Identificar	☒					
Notificar	☒					
Notificar		☒				
Notificar			☒			
Notificar				☒		
Inspeccionar				☒		
Realizar				☒		
Reportar				☒		
Documentar			☒			
Capturar					☒	
Analizar						☒
Cerrar					☒	

falta de tecnología, falta de normalización, tiempos de ciclos y costos excesivos, demasiados trabajadores, facilidad para cometer errores y sobrediseño.

13.6.2 Costeo basado en las actividades

La segunda técnica se denomina costeo basado en las actividades. En la mayoría de las organizaciones los costos se recopilan por planta, departamento o centro de costos, equipo y tipo de gastos, como mano de obra, materiales, servicios y generales. Para mejorar un proceso, se requieren los costos para dicho proceso. En el proceso de administración del mantenimiento generalmente hay de ocho a doce actividades que son importantes para cualquier organización. Éstas incluyen trabajo de emergencia, mantenimiento correctivo, planeación y programación, desarrollo y ejecución del MP, seguridad y vigilancia, subcontratación, capacitación en destrezas, abastecimientos, administración de inventarios, reparaciones generales y administración de datos y del desempeño.

El enfoque para el costeo basado en las actividades consta de los siguientes cinco pasos:

1. Determinar las actividades claves.
2. Determinar el costo de la actividad (mano de obra, materiales, servicios, gastos generales, etc.) y su desempeño (costo/unidad, tiempo, calidad, etc).
3. Establecer el determinante del costo o la salida de la actividad.
4. Rastrear este costo de la actividad a los objetivos de costo.
5. Evaluar la eficacia y la eficiencia en costos comparando el costo de la actividad con los objetivos del proceso. En la tabla 13.2 se muestra un ejemplo.

Como se muestra en la tabla 13.2, una gran porción del costo es por trabajos urgentes, el cual no se planea, en tanto que una pequeña porción del costo es por trabajo de MP, el cual ayudará a reducir el trabajo urgente.

13.6.3 *Benchmarking* competitivo

La tercera técnica, el *benchmarking* competitivo, intenta crear una visión de desempeño futuro, y se describió en la sección 13.5. Después de realizar el *benchmarking*, con frecuencia se realizan sesiones de lluvia de ideas para adaptar las mejores prácticas a las realidades de la organización individual.

TABLA 13.2 Costeo de las actividades de mantenimiento.

Actividades	Personal asalariado	Personal por hora	Contratistas en el sitio	Contratistas fuera del sitio	Arrendamientos	Transporte	Materiales	Total
Emergencia	0	50	50	0	10	10	100	220
Urgente	30	200	200	50	20	10	500	1010
Planeado	100	400	400	800	50	30	500	2280
Con paro	0	10	0	0	0	0	0	10
MP	40	100	100	400	10	10	200	860
Indirecto	0	400	50	0	0	0	0	450
Menor	0	100	100	0	10	10	100	320
Permanente	0	50	50	0	10	10	60	180
Total	170	1310	950	1250	110	80	1460	5330

RESUMEN

En este capítulo se presentaron avances en los conceptos del mantenimiento. Los conceptos presentados incluyen el diseño para mantenibilidad, el MCC, el MPT, el *benchmarking* y la reingeniería del proceso de mantenimiento. Se puso de relieve la aplicación de estos conceptos a la planeación, control y mejora del mantenimiento.

EJERCICIOS

- 13.1 Defina el término mantenibilidad.
- 13.2 ¿Cuál es el propósito del diseño para mantenibilidad?
- 13.3 Defina el término TMPR y sugiera la forma en que lo estimaría.
- 13.4 Haga una lista de ocho características del diseño para prevención del mantenimiento.
- 13.5 ¿Qué es el mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC)?
- 13.6 Mencione los pasos de la metodología del MCC.
- 13.7 Elabore un diagrama de árbol lógico. ¿Con que fines se utiliza en el MCC?
- 13.8 ¿Qué es el mantenimiento productivo total (MPT)?
- 13.9 ¿Cuáles son las seis principales pérdidas que el MPT busca reducir?
- 13.10 ¿Cuáles son los pasos para implantar el MPT?
- 13.11 Visite una planta de su área y seleccione uno de sus equipos críticos. Calcule la eficacia global de este equipo.
- 13.12 Mencione los pasos del *benchmarking*.
- 13.13 Defina el término reingeniería.
- 13.14 Visite una planta de su área y estudie su proceso para manejar el mantenimiento de emergencia. Elabore un diagrama de flujo de este proceso e identifique actividades que no agregan valor. Elimine estas actividades. Proceda a la reingeniería de este proceso.
- 13.15 Mencione tres procesos más dentro del mantenimiento a los que se les pueda aplicar la reingeniería.

REFERENCIAS

1. J. D. Campbell, *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*, Productivity Press, Portland, OR.
2. H. Hammer and J. Champy, *Reengineering the Corporation*, Nicholas Brealey, London.
3. E. Hartmann, *Successfully Installing TPM in a Non-Japanese Plant*, TPM Press, Allison Park, PA.
4. S. Nakajima, *Introduction to TPM*, Productivity Press, Cambridge, MA.
5. A. M. Smith, *Reliability Centered Maintenance*, McGraw-Hill, New York.

Apéndice A

REPASO ESTADÍSTICO

A.1 INTRODUCCIÓN

Las decisiones de mantenimiento, tales como cuándo efectuar un mantenimiento preventivo al equipo o cómo controlar los trabajos pendientes del mantenimiento, requieren información acerca de las fallas del equipo y la carga de mantenimiento. El momento de falla del equipo y los trabajos pendientes no pueden determinarse con certeza. Es necesario un conocimiento de la probabilidad y la estadística para estimar la probabilidad de falla y la carga de mantenimiento. Este apéndice repasa algunas de las definiciones y conceptos básicos de la estadística que se emplean como herramientas para el modelado y análisis de los sistemas de mantenimiento presentados en este libro. Para mayores detalles, ver [2, 3, 5, 7, 8] (que se dan al final del Apéndice C).

A.2 CONCEPTOS DE PROBABILIDAD

En esta sección se exponen y demuestran con ejemplos los conceptos de probabilidad necesarios para entender parte del material presentado en este libro.

A.2.1 Un espacio muestral

Un espacio muestral S es el conjunto de todos los resultados posibles de un experimento aleatorio. Un experimento aleatorio es un proceso mediante el cual se generan resultados aleatorios. Un ejemplo de un experimento aleatorio es el resultado de lanzar una moneda o un dado. Otros fenómenos que podrían considerarse como experimentos aleatorios son el número de unidades

defectuosas producidas al día, el número de fallas al año de un cierto equipo, el momento de falla de un equipo y el tiempo para reparar un equipo.

A.2.2 Un evento

Un evento E es un subconjunto de un espacio muestral. Por ejemplo, si un dado se tira una vez, el espacio muestral $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ y $E = \{1, 3\}$ es un evento.

A.2.3 Eventos igualmente probables

Eventos igualmente probables son eventos que tienen la misma posibilidad de ocurrencia. Por ejemplo, cuando se tira un dado no cargado, los eventos $\{1\}$, $\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$, $\{5\}$ y $\{6\}$ son todos ellos igualmente probables. Los eventos no son igualmente probables si el dado no está equilibrado.

A.2.4 Probabilidad

La probabilidad es la posibilidad de que ocurra un evento específico bajo condiciones establecidas. Es un número entre 0 y 1, inclusive. Una declaración de probabilidad se expresa como: hay una probabilidad de 0.25 o posibilidad del 25% de que el equipo falle antes de 1000 horas de operación. Hay tres métodos para obtener un valor de probabilidad. Estos métodos se explican a continuación.

El método clásico o *a priori* para calcular la probabilidad es como sigue: si un evento E puede ocurrir en m formas de un total de n formas igualmente posibles, la probabilidad $P(E)$ es

$$P(E) = \frac{\text{Número de formas para } E}{\text{Número total de formas}} = \frac{m}{n}$$

El método de la frecuencia o *a posteriori* define la probabilidad como sigue: si un evento igualmente posible E ocurre m veces en un total de n intentos, la probabilidad observada de E , $OP(E)$, o frecuencia relativa f , es

$$OP(E) = \frac{\text{Número de veces que ocurrió } E}{\text{Total de intentos}} = \frac{m}{n}$$

En el límite, a medida que n se hace grande, la probabilidad observada se acerca a la verdadera probabilidad de E , $P(E)$:

$$P(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} OP(E)$$

El método subjetivo emplea la estimación mejor informada de la probabilidad de un evento E . Este método es necesario en ausencia de datos.

A.2.4.1 Ejemplo Un dado no cargado se lanza 100 veces. Los siguientes datos muestran el número de veces que apareció cada cara:

Cara	Frecuencia
1	18
2	13
3	16
4	15
5	18
6	20

Sea $E = \{3, 4\}$. Use el método clásico y el método de la frecuencia para calcular la probabilidad de E . El método clásico da la probabilidad de E como sigue:

$$P(E) = \frac{2}{6} = \frac{1}{3} = 0.33$$

El método de la frecuencia estima $P(E)$ como

$$OP(E) = \frac{16+15}{100} = \frac{31}{100} = 0.31$$

Se espera que, a medida que el número de lanzamientos se acerque a ∞ , $OP(E)$ se acercará a 0.33.

A.2.5 Leyes simples de probabilidad

Sean E_1 y E_2 dos eventos. El complemento de E_1 , denotado por E_1^1 , es el conjunto de puntos en S , el espacio muestral, que no pertenecen a E_1 . La unión de E_1 y E_2 (denotada por $E_1 \cup E_2$) es el conjunto de todos los elementos (puntos) en E_1 o E_2 . Las siguientes son dos leyes simples de probabilidad:

$$P(E_1^1) = 1 - P(E_1)$$

$$P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2) - P(E_1 \cap E_2)$$

A.2.6 Probabilidad condicional

Si S es el espacio muestral y E_1 y E_2 son dos subconjuntos de S , la probabilidad de E_1 dado que haya ocurrido E_2 [denotada por $P(E_1 | E_2)$] es conocida como probabilidad condicional. En otras palabras, E_2 se convierte en el espacio muestral bajo esta condición.

Definamos la intersección de dos eventos E_1 y E_2 [denotada por $(E_1 \cap E_2)$] como el conjunto de elementos comunes tanto a E_1 y E_2 . Entonces $P(E_1 | E_2)$ es

$$P(E_1 | E_2) = P(E_1 \cap E_2) / P(E_2)$$

Por lo tanto,

$$P(E_1 \cap E_2) = P(E_1 | E_2) P(E_2)$$

A.2.6.1 Ejemplo Consideremos el problema de lanzar un dado no cargado. Suponiendo que $E_1 = \{1, 2, 3\}$ y $E_2 = \{2, 3, 4\}$, calcule la probabilidad de E_1 , $E_1 \cup E_2$, y $P(E_1 | E_2)$. El espacio muestral para este experimento aleatorio es

$$S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$P(E_1^c) = 1 - P(E_1) = 1 - \frac{3}{6} = \frac{1}{2}$$

$$P(E_1 \cup E_2) = \frac{4}{6} \quad \text{puesto que } P(1, 2, 3, 4) = \frac{4}{6}$$

$$P(E_1 | E_2) = \frac{P(E_1 \cap E_2)}{P(E_2)} = \frac{P(2, 3)}{P(2, 3, 4)} = \frac{\frac{2}{6}}{\frac{3}{6}} = \frac{2}{3}$$

A.2.7 Independencia estadística

Dos eventos E_1 y E_2 son estadísticamente independientes si y sólo si

$$P(E_1 | E_2) = P(E_1)$$

o

$$P(E_1 \cap E_2) = P(E_1)P(E_2)$$

Obviamente, E_1 y E_2 en el ejemplo anterior no son independientes, ya que

$$P(E_1) = \frac{1}{2} \neq P(E_1|E_2) = \frac{2}{3}$$

A.2.8 Población y muestras

Una población es el conjunto completo o universo de la característica bajo estudio. Corresponde al espacio muestral en un experimento aleatorio. Puede ser finito o infinito. El valor verdadero de una propiedad de una población se denomina parámetro de la población, que generalmente se denota por una letra griega ($\mu, \sigma, \lambda, \beta$, etc.).

Una muestra aleatoria o una muestra es una porción finita de la población. Una muestra se utiliza para estimar parámetros de la población. Un estadístico muestral o un estadístico es un número único calculado a partir de los datos de la muestra para estimar un parámetro de una población. En otras palabras, un estadístico es una función de valor real de la observación de la muestra. Un estadístico se denota mediante una letra romana como S o $\bar{X}$. Por ejemplo, $\bar{X}$, la media de la muestra, es una estimación común de la media de la población μ , y S es una estimación de σ .

A.2.9 Variables discretas y continuas

Una variable es la característica de la población bajo investigación y puede ser discreta y continua. Una variable discreta sólo asume ciertos valores aislados, por ejemplo, el número de accidentes en un taller.

Una variable continua puede asumir cualquier valor entre dos límites. El tiempo para la falla de un equipo es un ejemplo de una variable continua.

A.3 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Es común tener grandes cantidades de datos que pueden procesarse para obtener información, la cual puede conducir a una mejor toma de decisiones. En esta parte del apéndice se presentan técnicas fundamentales para la presentación y análisis de los datos.

A.3.1 Distribución de frecuencias relativas e histograma

La distribución de frecuencias relativas es una tabla que presenta las frecuencias de los valores observados de clases específicas a partir del rango de datos. La gráfica de las frecuencias contra los valores observados o clases se denomina histograma.

TABLA A.1 Días entre lubricaciones.

Días entre lubricaciones	Número de motores	Porcentaje de motores
3	5	0.07
4	4	0.06
5	10	0.14
7	15	0.21
10	9	0.13
13	12	0.17
18	7	0.08
20	10	0.14

El programa de mantenimiento para motores pequeños establece que la lubricación debe realizarse semanalmente (cada 5 días) o más seguido. Un planificador de mantenimiento verificó los registros de mantenimiento y encontró que los días entre lubricaciones variaban de 3 a 20 días. En la tabla A.1 se muestran los datos para los días entre lubricaciones. Si formamos clases con un ancho de 4, obtenemos la distribución de frecuencias relativas que se presenta en la tabla A.2. La figura A.1 muestra las clases contra las frecuencias relativas, que es el histograma para los datos de la tabla A.1. La suma de las frecuencias relativas es 1.0. Podemos utilizar el histograma de frecuencias relativas para demostrar que la probabilidad del tiempo transcurrido entre lubricaciones es de 8 días o más, tomando la suma de las frecuencias relativas a la izquierda de 8 que es igual a 0.52. Esto significa que más del 50% de los motores tienen un tiempo transcurrido de más de 8 días entre lubricaciones.

Las siguientes son reglas de sentido común para determinar el número de clases en una distribución de frecuencias y el ancho de cada clase. El número de clases K deberá seleccionarse con base en lo siguiente:

1. $K = \sqrt{n}$, en donde n es el número de observaciones.
2. $0 \leq K \leq 20$.

TABLA A.2 Frecuencias relativas de las lubricaciones.

Clase	Frecuencia relativa
[0, 4)	0.13
[4, 8)	0.35
[8, 12)	0.13
[12, 16)	0.17
[16, 20)	0.22

Nota: $[a, b)$ significa que el valor a está incluido en la clase y b no está incluido.

3. Utilizar diferentes valores de K para obtener una gráfica sin espacios vacíos.

El ancho de la clase W es como sigue

$$W = \frac{R}{K}$$

en donde $R = \text{máx } x_i - \text{mín } x_i$, es decir, el rango de los datos. Se pueden refinar algo los valores de W y K a fin de obtener puntos terminales de clase sencillos y naturales.

A.3.2 Medidas de tendencia central

Las tres medidas más comunes de tendencia central son la media, la mediana y la moda.

La media de la muestra $\bar{x}$ se define como

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

en donde Σ denota la suma de las observaciones, $x_1, x_2, \dots, x_n$.

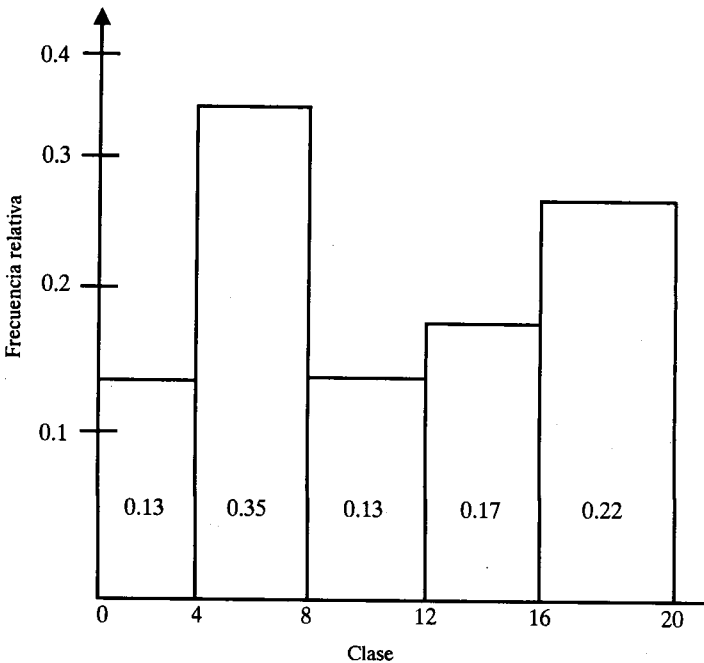


Figura A.1 Histograma de la frecuencia relativa del tiempo entre lubricaciones.

La mediana M de la muestra se define como cualquier valor tal que la mitad de los datos de la muestra son mayores que o iguales a este valor y la otra mitad son menores que o iguales a él.

La moda se define como el valor de la muestra con la mayor frecuencia.

A.3.3 Medidas de dispersión o variabilidad

Estas medidas reflejan la variabilidad en los datos. Las medidas más comunes de variabilidad son el rango R , la varianza S^2 , la desviación estándar S y el coeficiente de variación COV .

El rango R de la muestra se define como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la muestra

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

La varianza de los datos se define como

$$S^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

La desviación estándar, que es la principal medida de dispersión, es

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

El coeficiente de variación es la desviación estándar entre la media unitaria:

$$COV = \frac{S}{\bar{x}}$$

A.4 VARIABLES ALEATORIAS

Una variable aleatoria (v.a.) es una variable que asume sus valores con cierta probabilidad. Se designa mediante una letra mayúscula $X, Y, \dots, Z$. Matemáticamente, una v.a. es una función del espacio muestral al conjunto de números reales. Ejemplos de v.a. son: la cantidad de lluvia en un año dado, la demanda de un cierto producto, la vida de un foco, la cantidad de la carga mensual de mantenimiento, el tiempo para reparar un equipo o el número de accidentes en un taller en un mes determinado. Para definir una v.a. con precisión, necesitamos especificar su rango y la distribución de probabilidad sobre el rango.

A.4.1 Variables aleatorias discretas y continuas

Una v.a. que puede asumir cualquier valor en un continuo se denomina v.a. continua. Sin embargo, si toma valores aislados, se denomina discreta. La vida de un foco es una v.a. continua y el número de fallas al año de un cierto equipo es una v.a. discreta.

A.4.2 Función de masa de probabilidad discreta

Una función que define la distribución de la probabilidad sobre un rango de una variable aleatoria discreta se denomina función de masa de probabilidad (f.m.p). La f.m.p. está dada como

$$P(x) = P[X = x]$$

$P(x)$ tiene las siguientes propiedades:

$$P(x) \geq 0 \quad \sum_x p(x) = 1$$

A.4.2.1 Ejemplo Considere la variable aleatoria X , que representa el número de solicitudes de servicio de mantenimiento por día. X puede asumir los valores enteros entre 0 y 10, inclusive. La f.m.p. se define como sigue:

$$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{55} & x = 0, 1, 2, \dots, 10 \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Observe que

$$P(x) \geq 0 \quad \text{para todas las } x \text{ en } [0, 10]$$

$$\sum_x P(x) = 0 + \frac{1}{55} + \frac{2}{55} + \frac{3}{55} + \frac{4}{55} + \frac{5}{55} + \frac{6}{55} + \frac{7}{55} + \frac{8}{55} + \frac{9}{55} + \frac{10}{55} = 1$$

Por lo tanto, $p(x)$ satisface las condiciones de una f.m.p.

A.4.3 Función de densidad de probabilidad

La función de densidad de probabilidad (f.d.p.) $f(x)$ es una función que expresa la distribución de la probabilidad sobre el rango de una v.a. continua. Tiene las siguientes propiedades:

$$f(x) \geq 0$$

$$\Pr[a \leq x \leq b] = \int_a^b f(x) dx$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

La f.d.p. es un histograma de frecuencias relativas con un número infinito de clases, cada una con un ancho pequeño.

A.4.3.1 Ejemplo El tiempo para reparar un equipo es igualmente probable entre $[10, 20]$ minutos. Encuentre la probabilidad de que una reparación requiera menos de 15 minutos:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{10} & 10 \leq x \leq 20 \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Claramente,

$$f(x) \geq 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = \int_{10}^{20} \frac{1}{10} dx = \left. \frac{1}{10} x \right|_{10}^{20} = \frac{20}{10} - \frac{10}{10} = 1$$

$$P[X \leq 15] = \int_{10}^{15} \frac{1}{10} dx = \left. \frac{1}{10} x \right|_{10}^{15} = \frac{15}{10} - \frac{10}{10} = \frac{1}{2}$$

A.4.4 Función de distribución

La función de distribución de probabilidad acumulada, conocida como la función de distribución, se define como

$$F(x) = \Pr[X \leq x]$$

Para una v.a. discreta, $F(x)$ será

$$F(x) = \sum_{t \leq x} P(t)$$

y para una v.a. continua, $F(x)$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

La función $F(x)$ puede utilizarse para determinar la probabilidad de la v.a. tomando valores entre dos puntos (es decir, $\Pr[a \leq x \leq b]$) para una variable aleatoria continua como sigue:

$$\Pr[a \leq x \leq b] = F(b) - F(a)$$

Esta fórmula puede utilizarse para el caso de una v.a. discreta, dependiendo de si los puntos extremos del intervalo se incluyen o no.

$F(x)$ desempeña un papel importante en el cálculo de la confiabilidad del equipo. Por ejemplo, si el tiempo para la falla T tiene una f.d.p. $f(t)$, entonces la confiabilidad del equipo en el tiempo t_0 , $R(t_0)$, es la probabilidad de que el equipo sobreviva al tiempo t_0 :

$$R(t_0) = \Pr[T \geq t_0] = 1 - \Pr[T \leq t_0] = 1 - F(t_0)$$

$F(t)$ es un instrumento en el desarrollo de las políticas de mantenimiento preventivo.

A.4.5 Valor esperado de una variable aleatoria

El valor esperado $E(x)$ o la media de una v.a. se define como sigue. Para una v.a. discreta

$$\mu = E(X) = \sum_x xP(x)$$

Para una v.a. continua,

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx$$

El valor esperado de cualquier función $g(X)$ de una v.a., denotado por $E[g(X)]$, está dado como sigue. Para el caso de una v.a. discreta,

$$E[g(X)] = \sum_x g(x)p(x)$$

Para el caso de una v.a. continua,

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) f(x) dx$$

De igual manera, es cierto que el valor esperado de la suma de dos funciones de una v.a. es la suma de su valor esperado. En otras palabras, si $g(X)$ y $h(X)$ son funciones de una v.a. X , entonces

$$E[g(X) + h(X)] = E[g(X)] + E[h(X)]$$

A.4.5.1 Ejemplo Encuentre los valores esperados de las v.a. en los ejemplos dados en las secciones A.4.2.1 y A.4.3.1. El valor esperado de la v.a. en la sección A.4.2.1 es

$$\begin{aligned} E(x) &= \sum_{x=0}^{10} xp(x) \\ &= 0 + \frac{1}{55} + \frac{4}{55} + \frac{9}{55} + \frac{16}{55} + \frac{25}{55} + \frac{36}{55} + \frac{49}{55} + \frac{64}{55} + \frac{81}{55} + \frac{100}{55} = 7 \end{aligned}$$

El valor esperado de la v.a. en la sección A.4.3.1 es

$$E(x) = \int_{10}^{20} x \frac{1}{10} dx = \frac{x^2}{20} \Big|_{10}^{20} = \frac{400}{20} - \frac{100}{20} = 20 - 5 = 15$$

A.4.6 Varianza y desviación estándar de una variable aleatoria

La varianza de una variable aleatoria X se define como

$$\sigma^2 = \text{var}(X) = E[(X - \mu)^2] = E[X^2] - \mu^2$$

en donde μ es la media de X . Para una variable aleatoria discreta,

$$\sigma^2 = \sum_x (x - \mu)^2 P(x)$$

Para una v.a. continua, la varianza está dada como

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

La desviación estándar de X es la raíz cuadrada de la varianza. En la mayoría de los casos, μ y σ^2 no se conocen; sin embargo, generalmente se estiman mediante $\bar{x}$ y S^2 .

A.5 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD SELECCIONADAS

Las distribuciones de probabilidad son esenciales para la inferencia estadística y para el modelado de variables aleatorias que surgen en los problemas de mantenimiento, como el tiempo para la falla de los equipos y el tiempo para completar una tarea de reparación. Las distribuciones exponencial, normal logarítmica y Weibull se emplean extensamente en el modelado de datos de fallas. Las distribuciones exponencial y uniforme son útiles para modelar el tiempo para completar una tarea de mantenimiento. La distribución de Poisson es útil para representar el número de fallas en un período determinado. Las distribuciones normal, t , chi-cuadrada y F son necesarias para estimar y probar varias hipótesis estadísticas. A continuación se presentan algunas distribuciones conocidas útiles.

A.5.1 Distribución de Poisson

La distribución de Poisson es útil para modelar el número de unidades que llegan por unidad de tiempo o el número de partículas por unidad de área. Puede utilizarse para representar el número de órdenes de trabajo de mantenimiento recibidas por día o por mes, o el número de accidentes por unidad de tiempo. La función de masa de probabilidad para la v.a. de Poisson es

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

en donde $x!$ es la función factorial, es decir, $x! = x(x-1)(x-2)\dots, 1$. La distribución de Poisson tiene un parámetro λ , que es igual a su media μ y a su varianza σ^2 , es decir,

$$\mu = \lambda \quad \sigma^2 = \lambda$$

A.5.2 Distribución exponencial

La distribución exponencial representa datos de tiempo para la falla cuando ésta es realmente aleatoria o cuando la tasa de fallas es constante. Tales fallas generalmente son resultado de una carga excesiva repentina. Asimismo, la distribución exponencial puede modelar el tiempo para completar un servicio. Esta distribución es útil para modelar el tiempo para la falla de

muchos componentes electrónicos y equipos industriales, que tienen tasas de falla constantes. La función de densidad de la distribución exponencial es

$$f(t) = \frac{1}{\lambda} e^{-t/\lambda} \quad \text{para } t \geq 0$$

La media y la varianza de la distribución son $\mu = \lambda$, $\sigma^2 = \lambda$.

A.5.3 Distribución uniforme

La distribución uniforme representa la situación en la que todos los puntos tienen la misma probabilidad de ocurrir. En la práctica, puede utilizarse para modelar tiempos de terminación de tareas. La función de densidad de la variable aleatoria uniforme X , denotada por $U[a, b]$, es

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

La media y la varianza de la v.a. $U(a, b)$ son

$$\mu = \frac{a+b}{2} \quad \sigma^2 = \frac{1}{12}(b-a)^2$$

A.5.4 Distribución normal

La distribución normal (gaussiana) desempeña un papel central en la estimación y prueba de hipótesis. Puede modelar efectos aleatorios que son consecuencia de un gran número de v.a. pequeñas e independientes. La gráfica de la distribución normal tiene forma de campana. Su función de densidad es

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad -\infty < x < \infty$$

μ es la media y σ es la desviación estándar de la distribución normal. La distribución normal puede estandarizarse a lo que se conoce como la distribución normal estándar con media 0 y varianza 1. La distribución normal estándar por lo común se denota por Z y se obtiene de la distribución normal general mediante la siguiente transformación:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad -\infty < z < \infty$$

A.5.5 Distribución Weibull

La distribución Weibull surge al modelar datos de fallas de equipos sometidos a desgaste. También se utiliza para modelar el tiempo de terminación de tareas. La f.d.p. de la distribución Weibull se define como

$$f(x) = \begin{cases} \alpha \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right] & x > 0 \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

$\alpha > 0$ es un parámetro de forma y $\beta > 0$ es un parámetro de escala. La función de la distribución $F(x)$ está dada como

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \quad x > 0$$

La media y la varianza de la distribución Weibull son

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta^2}{\alpha} \left[2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right]$$

A.5.6 Distribución normal logarítmica

La distribución normal logarítmica representa el tiempo para completar alguna tarea. Si X tiene una distribución normal logarítmica, el $\ln X$ está normalmente distribuido. La función de densidad para la variable aleatoria normal logarítmica es

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) & x > 0 \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

μ es un parámetro de escala y $\sigma > 0$ es un parámetro de forma. La media y la varianza de la distribución normal logarítmica son

$$\begin{aligned} \mu &= \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \\ \sigma^2 &= \exp(2\mu + \sigma^2) [\exp(\sigma^2) - 1] \end{aligned}$$

A.5.7 Distribución chi-cuadrada

Esta distribución desempeña un papel central en las inferencias estadísticas acerca de la variabilidad. La variable aleatoria continua X tiene una distribución chi-cuadrada con v grados de libertad si su función de densidad es de la forma

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{v/2} \Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} x^{v/2-1} e^{-x/2} & x > 0 \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

en donde v es un entero positivo. La media y la varianza de la distribución chi-cuadrada están dadas como

$$\begin{aligned} \mu &= v \\ \sigma^2 &= 2v \end{aligned}$$

Se ha demostrado que la cantidad $(n-1)S^2/\sigma^2$ tiene una distribución chi-cuadrada con $n-1$ grados de libertad, lo que la hace útil para desarrollar intervalos de confianza y probar hipótesis estadísticas acerca de σ .

A.5.8 Distribución t

Las aplicaciones de la distribución t están en el área de inferencias sobre la media de una población o la diferencia entre dos medias. Sea Z una v.a. normal estándar y sea V una v.a. chi-cuadrada con v grados de libertad. Si Z y V son independientes, entonces la distribución de la v.a. T dada por

$$T = \frac{Z}{\sqrt{V/v}}$$

es una distribución t con v grados de libertad. La función de densidad de T es

$$f(t) = \frac{\Gamma\left[v + \frac{1}{2}\right]}{\Gamma\left[\frac{v}{2}\right]\sqrt{\pi v}} \left(1 + \frac{t^2}{v}\right)^{-(v+1)/2} \quad -\infty < t < \infty$$

A.5.9 Distribución F

La distribución F se utiliza para probar hipótesis acerca de varias medias y dos varianzas. Es una razón de dos distribuciones chi-cuadrada independientes. Sean U y V dos variables aleatorias independientes que tienen distribución chi-cuadrada con v_1 y v_2 grados de libertad, respectivamente. Entonces la cantidad

$$F = \frac{U/v_1}{V/v_2}$$

tiene una distribución F con v_1 y v_2 grados de libertad. La función de densidad de la distribución F está dada como

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\Gamma[v_1 + v_2 / 2](v_1 / v_2)^{v_1/2}}{\Gamma[v_1 / 2]\Gamma[v_2 / 2]} & \frac{x^{v_1/2}}{\left(1 + \frac{v_1 x}{v_2}\right)^{(v_1 + v_2)/2}} \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

la cantidad $(S_1^2 / \sigma_1^2) / (S_2^2 / \sigma_2^2)$ tiene una distribución F con $n_1 - 1$ y $n_2 - 2$ grados de libertad, en donde n_1 es el tamaño de la muestra de la primera población y n_2 es el tamaño de la muestra de la segunda población.

A.6 ESTIMACIÓN

La estimación es el proceso mediante el cual se estiman parámetros de la población. Una estimación por puntos es una estimación de un solo valor de un parámetro de una población. Una estimación por intervalos es una declaración de probabilidad de que un parámetro de una población se encuentra

entre valores calculados. Una estimación por intervalos tiene un nivel de confianza asociado con ella. El nivel de confianza es el grado en el que una declaración estadística particular es cierta bajo condiciones específicas. El nivel de significación es el grado de incertidumbre acerca de la declaración estadística bajo las mismas condiciones utilizadas para determinar el nivel de confianza. $1 - \alpha$ es el nivel de confianza y α es el nivel de significación.

A.6.1 Teorema del límite central

Si se toma una muestra aleatoria de una población con media μ y varianza σ^2 finitas y conocidas, entonces la cantidad $Z = (\bar{X} - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$ tiene una distribución normal estándar. Independientemente del tipo de distribución del que se toma la muestra, la media de la muestra tiene una distribución normal si el tamaño de la muestra es suficientemente grande.

A.6.2 Estimación de intervalos

El intervalo de confianza $1 - \alpha$ para la media m está dado como sigue:

1.

$$\bar{x} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

si σ es conocida y $Z_{\alpha/2}$ está dada por

$$\int_{-Z_{\alpha/2}}^{Z_{\alpha/2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = 1 - \alpha$$

2.

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

si σ no se conoce y $t_{\alpha/2}$ está definido como

$$\int_{-t_{\alpha/2}}^{t_{\alpha/2}} f(t) dt = 1 - \alpha$$

en donde $f(t)$ es la función de densidad para la distribución t . En muchos libros de estadística están disponibles las tablas para las dis-

tribuciones normal estándar y t dando los valores de $Z_{\alpha/2}$ y $t_{\alpha/2}$; ver, por ejemplo [7, 8].

A.6.3 Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra necesario para asegurar que $\bar{x}$ (la estimación de μ) está dentro de un error absoluto máximo e con respecto a μ con un nivel de confianza de $1 - \alpha$, suponiendo que σ es conocida, es

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sigma}{e} \right)^2$$

Para el empleo de esta fórmula, ver el capítulo 4.

A.6.4 Estimador de máxima verosimilitud

La estimación de máxima verosimilitud (EMV) de un parámetro de una población es el valor del parámetro en términos de la observación que maximiza el log de la función de verosimilitud. La función de verosimilitud está definida como

$$L(\theta_1, \theta_2, X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n f(\theta_1, \theta_2, X_i)$$

en donde θ_1, θ_2 son los parámetros de la población, $X_i, i = 1, \dots, n$, son n observaciones de la población, y $f(\theta_1, \theta_2, x)$ es la función de densidad o masa de la v.a.

A.6.4.1 Ejemplo Derive la estimación de máxima verosimilitud para el parámetro de la distribución exponencial. La función de densidad está dada como

$$f(\lambda, x) = \frac{1}{\lambda} e^{-x/\lambda} \quad x > 0$$

La función de verosimilitud para una muestra aleatoria $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ es

$$L(\lambda, X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\lambda} \exp\left(\frac{-X_i}{\lambda}\right) = \frac{1}{\lambda^n} \exp\left(\frac{-\sum_{i=1}^n X_i}{\lambda}\right)$$

$$\ln L(\lambda, X_1, X_2, \dots, X_n) = -n \ln \lambda - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

La EMV para λ maximiza $\ln L(\lambda, X_1, X_2, \dots, X_n)$:

$$\begin{aligned} \frac{dL(\lambda, x_1, x_2, \dots, x_n)}{d\lambda} &= \frac{-n}{\lambda} + \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\lambda^2} = 0 \\ \hat{\lambda} &= \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \bar{X} \end{aligned}$$

Para verificar si $\hat{\lambda}$ es máxima, encontramos la segunda derivada

$$\frac{d^2 L}{d\lambda^2}(\lambda, X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{n}{\lambda^2} - 2 \frac{\sum X_i}{\lambda^3}$$

Sustituyendo $\hat{\lambda} = \bar{X}$ en la segunda derivada, obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L}{\partial \lambda^2}(\hat{\lambda}, X_1, X_2, \dots, X_n) &= \frac{n^3}{\left(\sum X_i\right)^2} - 2 \frac{n^3}{\left(\sum X_i\right)^2} \\ &< 0 \\ &= n^3 \left[-\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)} \right] \end{aligned}$$

Puesto que $\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) > 0$, $\hat{\lambda} = \bar{X}$ maximiza $\ln L(\lambda_1, X_1, X_2, \dots, X_n)$ y, por lo tanto, la EMV para λ es $\bar{X}$.

A.6.5 Método de los momentos para la estimación

El método de los momentos estima los parámetros de la población igualando los momentos de la población con los momentos de los datos. Si tenemos dos parámetros, igualamos el primer momento de los datos con el primer momento de la población, y el segundo momento con el segundo momento. Luego resolvemos las ecuaciones resultantes.

El primer momento de una población es $E(X) = \mu$ y el n -ésimo momento de la población está dado por $E(X - \mu)^n$. El primer momento de los datos es $\bar{X}$ y el n -ésimo momento de los datos está dado por $\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^n / n$.

A.6.5.1 Ejemplo Estime los parámetros de la distribución normal logarítmica empleando el método de los momentos. El método de los momentos iguala los momentos de la muestra con los momentos de la población. Sean $X_1, X_2, \dots, X_n$ una muestra aleatoria de la población. Entonces tenemos

$$E(X) = e^{\mu + \sigma^2/2} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \bar{X}$$

$$\text{var}(X) = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n} = S^2$$

Tomando el $\ln$ para ambas ecuaciones, obtenemos

$$\mu + \frac{\sigma^2}{2} = \ln \bar{X}$$

$$2\mu + \sigma^2 + \ln(e^{\sigma^2} - 1) = \ln S^2$$

Multiplicando la primera ecuación por 2 y restándola de la segunda ecuación, obtenemos

$$\ln(e^{\sigma^2} - 1) = \ln S^2 - \ln \bar{X}^2 = \ln \frac{S^2}{\bar{X}^2} = \ln \left(\frac{S}{\bar{X}} \right)^2$$

Entonces

$$e^{\sigma^2} - 1 = \left(\frac{S}{\bar{X}} \right)^2$$

$$e^{\sigma^2} = \left(\frac{S}{\bar{X}} \right)^2 + 1$$

Por lo tanto,

$$\hat{\sigma}^2 = \ln \left(\left(\frac{S}{\bar{X}} \right)^2 + 1 \right) = \ln \left(\frac{S^2 + \bar{X}^2}{\bar{X}^2} \right)$$

Utilice la primera ecuación para estimar μ :

$$\begin{aligned} 2\mu + \sigma^2 &= \ln \bar{X}^2 \\ 2\mu &= \ln \bar{X}^2 - \hat{\sigma}^2 = \ln \bar{X}^2 - \ln \left(\frac{S^2}{\bar{X}^2} + 1 \right) \\ &= \ln \frac{\bar{X}^2}{S^2 / \bar{X}^2 + 1} \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\hat{\mu} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\bar{X}^4}{S^2 + \bar{X}^2} \right)$$

Los parámetros μ y σ^2 se estiman utilizando el método de los momentos como

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \frac{1}{2} \ln \frac{\bar{X}^4}{S^2 + \bar{X}^2} \\ \hat{\sigma}^2 &= \ln \left(\frac{S^2 + \bar{X}^2}{\bar{X}^2} \right) \end{aligned}$$

A.7 PRUEBA DE HIPÓTESIS

Una hipótesis es una declaración o una suposición acerca de una o más poblaciones. Se pueden formular hipótesis acerca de medias, varianzas, diferencias de medias o formas de f.d.p. Para probar las hipótesis empleamos muestras y los conocimientos de las distribuciones estadísticas para hacer inferencias acerca de las poblaciones de las que se toman las muestras. En cada prueba habrá dos hipótesis. Una es conocida como la hipótesis nula (H_0) y la otra se denomina hipótesis alternativa (H_1). Un ejemplo de la formulación de una hipótesis es

H_0 : $X_1, X_2, \dots, X_n$ provienen de una distribución exponencial

H_1 : $X_1, X_2, \dots, X_n$ no provienen de una distribución exponencial

en donde $X_1, X_2, \dots, X_n$ es una muestra aleatoria.

Al probar hipótesis estadísticas pueden ocurrir dos tipos de errores. Rechazar una H_0 verdadera se denomina error de tipo I, denotado por α , y aceptar una H_0 falsa se conoce como error tipo II, denotado por β . Ambos tipos de errores no pueden minimizarse simultáneamente. Al minimizar α

se incrementa β y viceversa. Los expertos en estadística fijan un nivel para α , denominado nivel de significación, y utilizan el estadístico de prueba que maximiza $1 - \beta$, la fuerza para la prueba.

A.7.1 Pasos para realizar una prueba de hipótesis estadística

Los pasos para realizar una prueba de hipótesis son:

1. Formular y establecer las hipótesis: la hipótesis nula H_0 y la hipótesis alternativa H_1 .
2. Decidir sobre el nivel apropiado de significación α (es decir, la probabilidad de rechazar una H_0 verdadera).
3. Utilizar el estadístico de prueba correcto para la hipótesis planteada (por ejemplo, la normal estándar, la prueba t , la prueba chi-cuadrada o la prueba F).
4. Determinar los criterios de rechazo (región crítica) empleando una distribución apropiada. Los valores que determinan la región generalmente se dan en tablas estadísticas, con base en los pasos 2 y 3.
5. Tomar una muestra de la población y calcular el valor del estadístico de prueba. Si el valor cae en la región de rechazo, rechace H_0 . En caso contrario, no la rechace (acéptela).

Existen varios estadísticos de prueba para una sola media, dos medias, una sola varianza, dos varianzas, bondad del ajuste.

Los estadísticos de prueba para una sola media son

1.

$$Z = \sqrt{n} \frac{(\bar{X} - \mu)}{\sigma}$$

cuando σ es conocida. La cantidad Z es la normal estándar por el teorema del límite central.

2.

$$t = \sqrt{n} \frac{(\bar{X} - \mu)}{S}$$

cuando no se conoce σ y se estima como S . La cantidad

$$\sqrt{n} \frac{(\bar{X} - \mu)}{S}$$

tiene una distribución t con $n - 1$ grados de rechazo.

Los estadísticos de prueba para la diferencias de dos medias son

1.

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}}$$

cuando no se conocen σ_1 y σ_2 . La cantidad Z tiene una distribución normal estándar.

2.

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$$

cuando no se conocen σ_1 y σ_2 pero son iguales (varianzas desconocidas pero iguales), donde

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

La cantidad t tiene una distribución t con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad.

3.

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2}}$$

La cantidad t tiene una distribución t con v grados de libertad dados como

$$v = \frac{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}}$$

y utilizada en el caso de que las varianzas no sean conocidas y no sean iguales.

El estadístico de prueba para la varianza σ^2 igual a un valor específico (es decir, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$) es

$$X^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$$

que tiene una distribución chi-cuadrada con $n - 1$ grados de libertad.

El estadístico de prueba para la igualdad de dos varianzas de poblaciones (es decir, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$) es

$$F = \frac{S_1^2 / \sigma_1^2}{S_2^2 / \sigma_2^2}$$

que tiene una distribución F con $n_1 - 1$ y $n_2 - 1$ grados de libertad.

El estadístico de prueba para la bondad del ajuste para un conjunto de datos en una distribución con f.d.p. $f(t)$ es

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

que tiene una distribución chi-cuadrada con $k - 1$ grados de libertad, en donde k es el número de clases para el histograma del conjunto de datos. O_i es la frecuencia observada y E_i es la frecuencia esperada o teórica.

$$E_i = \int_{C_{i-1}}^{C_i} f(t) dt$$

en donde C_{i-1} es el límite inferior de clase i y C_i es el límite superior de clase i .

A.7.1.1 Ejemplo Se ha hecho la hipótesis de que el tiempo para completar una tarea de inspección de mantenimiento está uniformemente distribuido entre 15 y 30 minutos. Para probar esta hipótesis, se tomó una muestra de tamaño 100 de los registros históricos, y su distribución de frecuencias se muestra como sigue. La clase es de la forma $[a, b)$, a incluida, b excluida.

Clase	Frecuencia
15-18	22
18-21	18
21-24	16
24-27	23
27-30	21

Seguimos los pasos indicados en la sección A.7.1:

1. H_0 : Los datos provienen de $U[15, 30]$.
 H_1 : Los datos no provienen de $U[15, 30]$.
2. $\alpha = 0.05$.
3. El estadístico de prueba es

$$X^2(k-1) = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

4. Determine la región crítica. El valor crítico se obtiene de la tabla chi-cuadrada con 4 grados de libertad. $X^2_{0.05} = 9.49$. Si el valor calculado es mayor que 9.49, H_0 se rechaza.
5. Utilizando la muestra y la siguiente tabla de frecuencias, se puede calcular el valor de chi-cuadrada usando la fórmula dada en el paso 3:

Clase	O_i	E_i
15-18	22	20
18-21	18	20
21-24	16	20
24-27	23	20
27-30	21	20

El valor de chi-cuadrada (X^2) calculado es

$$\begin{aligned}
 X^2 &= \frac{(22-20)^2}{20} + \frac{(18-20)^2}{20} + \frac{(16-20)^2}{20} + \frac{(23-20)^2}{20} + \frac{(21-20)^2}{20} + \\
 &= \frac{4}{20} + \frac{4}{20} + \frac{16}{20} + \frac{9}{20} + \frac{1}{20} = \frac{34}{20} = 1.7
 \end{aligned}$$

Debido a que el valor calculado es menor que el valor de chi-cuadrada de la tabla, la decisión es no rechazar H_0 ; es decir, los datos no presentan ninguna evidencia para rechazar H_0 .

A.8 AJUSTE DE DISTRIBUCIONES

En muchos problemas prácticos, para tomar decisiones puede necesitarse la información acerca de la distribución de fallas del equipo o de la distribución

de los tiempos para completar tareas de mantenimiento. Los datos sobre fallas o tiempos de terminación de tareas pueden estar disponibles en los registros históricos. En muchas situaciones podría ser necesario identificar las distribuciones que se ajustan a los datos. Esta sección proporciona los pasos para ajustar una distribución a un conjunto de datos. Las distribuciones son necesarias para análisis de confiabilidad, para encontrar las políticas óptimas de mantenimiento preventivo o para estudios de simulación a fin de determinar el nivel de personal óptimo.

A.8.1 Pasos para el ajuste de distribuciones

1. Desarrollar un histograma o una gráfica de líneas para los datos.
2. A partir de la forma del histograma o de la gráfica de líneas, hacer hipótesis sobre una familia de distribuciones de las cuales podrían provenir los datos. Esto depende de la forma del histograma y la forma de la curva de densidad de las distribuciones. Podría ser normal, Weibull, normal logarítmica, exponencial, uniforme, de Poisson, etc.
3. Estimar los parámetros de la familia para la que se hizo la hipótesis empleando la estimación de máxima verosimilitud o el método de los momentos.
4. Probar la bondad del ajuste de que los datos siguen la distribución con los parámetros estimados. Utilice la prueba chi-cuadrada de la sección A.7.1.

A.9 REGRESIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS

La regresión es una técnica matemática que se emplea para determinar la línea o la curva que mejor se ajusta al conjunto de datos observados minimizando las desviaciones entre los datos observados y los valores de la ecuación de regresión.

Si la desviación se mide en términos del error cuadrado (residual) y se minimiza la suma de las desviaciones cuadradas, entonces el criterio empleado para minimizar los errores se conoce como el principio de mínimos cuadrados. Este principio se emplea principalmente para determinar la ecuación de regresión. En los símbolos, si definimos

$\hat{x}_i$ = Valores estimados por la ecuación de regresión, $i = 1, 2, \dots, n$

x_i = Valores observados, $i = 1, 2, \dots, n$

ε_i = Error o desviación entre $\hat{x}_i$ y x_i

entonces

$$\varepsilon_i = x_i - \hat{x}_i$$

El método de mínimos cuadrados minimiza

$$SS = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2$$

Si se supone que una relación de una línea recta es la mejor entre t y x , entonces el modelo matemático para ella es

$$x = a + bt$$

Las mejores estimaciones para a y b se obtienen utilizando los mínimos cuadrados de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } SS = \sum_{i=1}^n (x_i - a - bt_i)^2$$

La minimización se realiza empleando la diferenciación parcial de la ecuación anterior para obtener las siguientes ecuaciones, conocidas como ecuaciones normales:

$$\frac{\partial SS}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (x_i - a - bt_i) = 0$$

$$\frac{\partial SS}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n t_i (x_i - a - bt_i) = 0$$

Resolviendo estas ecuaciones simultáneamente, las mejores estimaciones para a y b se obtienen como

$$\hat{b} = \frac{n \sum_i t_i x_i - (\sum t_i)(\sum x_i)}{n \sum_i t_i^2 - \left(\sum_i t_i \right)^2}$$

$$\hat{a} = \bar{x} - b\bar{t}$$

en donde

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

Apéndice B

CONFIABILIDAD Y ANÁLISIS DE FALLAS

B.1 FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD

La función de confiabilidad, a veces denominada función de supervivencia, es una función complementaria de la función de distribución, definida como

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = 1 - F(t)$$

Las funciones de confiabilidad para algunas distribuciones conocidas son las siguientes:

- Exponencial con parámetro λ :

$$R(t) = \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right)$$

- Uniforme entre a y b , $U[a, b]$:

$$R(t) = 1 - \frac{1}{b-a}(t-a)$$

- Weibull con parámetro de forma α y parámetro de escala β :

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}\right]$$

B.2 VIDA ESPERADA

Si $f(t)$ es la f.d.p. del tiempo para la falla, la vida esperada de un componente

$$E(t) = \int_0^{\infty} tf(t) dt = \int_0^t R(t) dt$$

B.3 FUNCIÓN DE TASA DE FALLAS

La función de tasa de fallas es la probabilidad de que el equipo falle en el próximo intervalo $(t, t + \delta t)$, siempre y cuando haya sobrevivido hasta el tiempo t . Es una probabilidad condicional

$$r(t) \delta t = \frac{\int_t^{t+\delta t} f(t) dt}{\int_t^{\infty} f(t) dt} = \frac{F(t + \delta t) - F(t)}{1 - F(t)}$$

Dividiendo entre δt y haciendo $\delta t \rightarrow 0$,

$$\begin{aligned} r(t) &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \delta t) - F(t)}{\delta t} \bigg/ 1 - F(t) \\ &= \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned}$$

$r(t)$ es conocida como la tasa de fallas instantáneas, o función al azar. A continuación se presentan las funciones de la tasa de fallas de algunas distribuciones conocidas.

- Exponencial con parámetro λ :

$$r(t) = \frac{1}{\lambda} \quad \text{tasa constante de fallas}$$

- Uniforme, $U(a, b)$:

$$r(t) = \frac{1}{b - t} \quad \text{tasa creciente de fallas}$$

siempre y cuando $a \leq t \leq b$.

- Weibull con parámetro de forma α y parámetro de escala β :

$$r(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad \text{tasa creciente de fallas}$$

B.4 NÚMERO ESPERADO DE FALLAS

El número de fallas en un intervalo $(0, t_p)$, denotado por $N(t)$, es una v.a. El número esperado de fallas en el intervalo $(0, t_p)$, denotado por $H(t_p)$, es

$$H(t_p) = E[N(t)] = \int_0^{t_p} r(t) dt$$

Para más detalles sobre el análisis de confiabilidad, ver [4].

Apéndice C

MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Los métodos de optimización son necesarios para tomar decisiones óptimas en mantenimiento. Se necesitan para desarrollar políticas óptimas de mantenimiento preventivo y una programación óptima de tareas. El método de la sección dorada se presentó en el capítulo 2. En este apéndice se presentan los fundamentos de la optimización junto con dos algoritmos. Para más detalles sobre los métodos de optimización, ver [1, 6].

C.1

La cantidad $|x - y|$ denota el valor absoluto entre dos valores reales x y y . Si X y Y son vectores, entonces $\|X - Y\|$ denota la norma, la distancia entre X y Y , definida como

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

C.2

La derivada de una función de una sola variable $f(t)$ definida como

$$\frac{df}{dt} = f'(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \delta t) - f(t)}{\delta t}$$

La derivada parcial de una función de varias variables se define como sigue:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \lim_{\delta x_i \rightarrow 0} \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_i + \delta x_i, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\delta x_i}$$

Puede verse como la derivada con respecto a x_i , manteniendo fijas todas las demás variables.

C.3 GRADIENTE

El gradiente es el vector de derivadas parciales

$$\nabla f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

C.4 MATRIZ HESSIANA

La matriz hessiana es la matriz de derivadas parciales cruzadas:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{vmatrix}$$

C.5 PUNTO ESTACIONARIO

X^* es un punto estacionario si y sólo si

$$\nabla f(X^*) = 0$$

En el caso de una función de una sola variable, $f'(x^*) = 0$.

C.6 MÍNIMO LOCAL

Un punto X^* es un mínimo local si satisface las siguientes condiciones necesarias y suficientes:

Condiciones necesarias: $\nabla f(X^*) = 0$

Condiciones suficientes: $H(X^*)$ es positivo y semidefinido.

En el caso de una función de una sola variable, las condiciones se vuelven

$$f'(x^*) = 0$$

$$f''(x^*) > 0$$

C.7 MÉTODO DE NEWTON

El método de Newton es un método basado en derivadas. Se basa en explotar la aproximación cuadrática de la función a minimizar. La aproximación cuadrática $q(x)$ de la función $f(x)$ en el punto x_k es

$$q(x) = f(x_k) + f'(x_k)(x - x_k) + \frac{1}{2} f''(x_k)(x - x_k)^2$$

El siguiente punto en el método de Newton se toma como aquél en donde la derivada de la aproximación cuadrática se desvanece:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$$

El método termina cuando $|x_{k+1} - x_k| < \varepsilon$ o cuando $|f'(x_k)| < \varepsilon$, en donde ε es una escalar de terminación especificada previamente.

C.8 MÉTODO DE HOOKE Y JEEVES

El método de Hooke y Jeeves realiza dos tipos de búsqueda en cada paso. El primer tipo es una búsqueda exploratoria a lo largo de las direcciones de las coordenadas; el segundo tipo es una búsqueda de patrones a lo largo de la dirección $X_k - X_{k-1}$, en donde X_k es un punto obtenido después de realizar la iteración k del algoritmo. El método original de Hooke y Jeeves realiza pasos discretos a lo largo de las direcciones de búsqueda. Aquí se presenta la versión continua del método utilizando una búsqueda lineal a lo largo de la dirección de las coordenadas $d_1, d_2, \dots, d_n$.

Paso 1. Seleccione una escalar $\varepsilon > 0$ para utilizarla como criterio de terminación para el algoritmo. Seleccione un punto inicial X_1 . Haga $y_1 = X_1$, haga $k = j = 1$, y vaya al paso 2.

Paso 2. Encuentre la λ_j óptima para el problema, minimice $f(y_j + \lambda d_j)$, y haga $y_{j+1} = y_j + \lambda_j d_j$. Si $j < n$, sustituya j por $j + 1$, repita el paso 2. En caso contrario, si $j = n$, haga $X_{k+1} = y_{n+1}$. Vaya al paso 3.

Paso 3. Si $\|X_{k+1} - X_k\| < \varepsilon$, termine; en caso contrario, vaya al paso 4.

Paso 4. Haga $d = X_{k+1} - X_k$ y sea λ^* la solución óptima que minimiza a $f(X_{k+1} + \lambda d)$. Haga $y_1 = X_{k+1} + \lambda^* d$. Haga $j = 1$, sustituya k por $k + 1$, y vaya al paso 1.

REFERENCIAS

1. M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, and C. M. Shetty, *Nonlinear Programming Theory and Algorithms*, 2nd Ed., Wiley, New York.
2. L. Blank, *Statistical Procedures for Engineering Management and Science*, McGraw-Hill, New York.
3. A. K. S. Jardine, *Maintenance, Replacement, and Reliability*, Pitman, New York.
4. K. C. Kapur and L. R. Lamberson, *Reliability in Engineering Design*, Wiley, New York.
5. A. M. Law and W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York.
6. D. G. Luenberger, *Introduction to Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, Reading, MA.
7. D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Wiley, New York.
8. R. E. Walpole and R. H. Myers, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, 5th. Ed., Macmillan, New York.

Índice

- Acción correctiva, 348
- Actividades de planeación, 32
- Administración computarizada del mantenimiento:
 - estructura, 304, 305
 - evaluación, 316
 - evolución, 319
 - funciones, 317
 - módulos, 304
- Administración de proyectos, 29, 37, 38
- Análisis ABC, 238, 340, 347, 355
- Análisis de errores, 163
- Análisis de errores de los pronósticos, 163
- Análisis de la ruta crítica, 197, 201, 204
- Análisis de lubricantes, 83
- Análisis de modo de falla y grado crítico, 360-361
- Análisis de vibraciones, 82
- Auditoría:
 - calificación, 347
 - esquema, 339-340
 - índice, 339
- Benchmarking*, 358, 368
- Capacitación:
 - actividades, 327, 329
 - diseño del programa, 333
 - implantación del programa, 333
 - política, 329
 - programa, 327, 334
 - sistema, 333, 335
 - tipos, 327
- Clasificación de refacciones, 250
- Condiciones:
 - mantenimiento basado en las, 33, 42
 - monitoreo de las, 44
- Conservación de registros, 54
- Control automático de procesos, 48
- Control de calidad:
 - círculos de, 276
 - decisiones, 256
 - responsabilidades, 255
 - tasa, 286
- Control estadístico de procesos, 257
- Costo del ciclo de vida, 359
- Cromatografía, 83
- Curva de la tina de baño, 246, 360-361
- Datos estructurales, 124, 128, 138-139, 141, 143
- Desviación absoluta media, 163
- Desviación normal, 126

- Diagrama de causa y efecto, 264, 266, 275
- Diagrama de dispersión, 269
- Disponibilidad, 41, 285-286, 288, 366
- Distribuciones:
 - ajuste de, 403
 - chi-cuadrada, 392
 - de Poisson, 389
 - distribución t , 392
 - exponencial, 389-390
 - normal, 390
 - normal logarítmica, 391-392, 403
 - uniforme, 390
 - Weibull, 391
- Efecto eléctrico, 84
- Eficacia global del equipo, 364
- Eficiencia en el desempeño, 366
- Equipo:
 - archivo de historia del, 56
 - programa de administración del, 70, 364
 - registro histórico, 56
- Error medio al cuadrado, 164
- Error porcentual medio absoluto, 163, 164
- Error porcentual medio al cuadrado, 164
- Esperado(a)
 - número de fallas, 409
 - valor, 387
 - vida, 408
- Esquema de calificaciones, 340
- Estadística, 380-381
- Estadística de prueba, 399, 400, 401, 402
- Estándares de tiempo, 37, 38
- Estimación:
 - de intervalos, 394
 - de máxima verosimilitud, 395
 - por momentos, 396
 - por puntos, 393
- Estimación comparativa, 141
- Estudio de tiempos, 125
- Existencias de seguridad, 244
- Facultades a empleados, 364
- Faltantes, 285
- Falla, 42
- Forma para el inventario
 - trabajador-destrezas, 330, 331
- Función de confiabilidad, 407
- Función de tasa de fallas, 408
- General Integer and Nonlinear Optimizer, 215
- Gradiente, 412
- Gráfica de Gantt, 200
- Gráfica de Pareto, 267-268
- Habilidades múltiples, 166
- Histograma, 260-263, 381-383
- Inspección:
 - coordinación de la, 107, 119
 - de una sola máquina, 102, 104
 - modelos de, 101
 - programa de, 102
- Intervalo de confianza, 394
- Inventario(s)
 - control de, 237
 - costo de, 236
 - inversión en, 285
 - obsolescencia de, 285
 - rotación de, 285
- Linear Interactive and Discrete Optimizer, 215
- Lista de verificación, 258-261
- Localización de fallas, 33
- Mantenibilidad, 358, 359

Mantenimiento:

- basado en las condiciones, 42, 76, 81, 82
 - capacidad de, 32, 35
 - capacitación, 327
 - categorías de trabajos de, 140
 - ciclo de control del, 49
 - con paro, 42
 - control de calidad, 253, 255, 257
 - control del, 57, 71
 - correctivo, 41, 42
 - costos de, 171, 284
 - de emergencia, 42
 - durante operación, 42
 - filosofía del, 32
 - historia de, 42
 - informes de, 353
 - mejora de la productividad, 353
 - operaciones y control del, 47
 - organización del, 32, 36
 - planeación de la capacidad a largo plazo, 147
 - planeación de la capacidad de, 166, 167, 173, 175, 178
 - planeado, 68, 87
 - prevención del, 359
 - preventivo, 43, 75-77, 81, 90, 118
 - preventivo imperfecto, 109
 - programa de, 43, 89
 - programación del, 197, 200, 213
 - pronóstico de la carga de, 32, 34, 35
 - pronósticos de, 147
 - sistema de órdenes de trabajo de, 50
 - sistema de prioridades del trabajo de, 199
 - terminología del, 41
 - y estándares de trabajo, 123-125
- Mantenimiento centrado en la confiabilidad, 358, 360, 361
- Mantenimiento correctivo, 33

Mantenimiento de oportunidad, 33

Mantenimiento por contrato, 189

Mantenimiento preventivo:

- basado en el tiempo, 77, 79, 80
- basados en las condiciones, 77, 79, 80
- definición de, 43, 77
- planeación del, 59, 60
- política de tipo I, 90, 91, 93, 100
- política de tipo II, 90, 97, 100
- y modelos matemáticos, 90

Mantenimiento preventivo basado en el tiempo o en el uso, 33

Mantenimiento productivo total:

- conceptos, 358, 363
- implantación, 367

Matriz hessiana, 412

Media, 383

Mediana, 383, 384

Medidas:

- de entrada, 283
- de salida, 285

Medidas de tendencia central:

- media, 383
- mediana, 383, 384
- moda, 383, 384

Medidas de variabilidad:

- coeficiente de variación, 384
- desviación estándar, 384
- rango, 384, 390-392
- varianza, 384, 389-392

Mejora continua, 339, 341

Mejora de la confiabilidad, 69•

Método de Hooke y Jeeves, 414

Método de la sección dorada, 93

Método de Newton, 93, 411

Método de optimización, 411

Métodos para decisiones de reemplazo, 84

Moda, 384

Modelos de programación

matemática:

cuadrático, 203

de redes, 203

entera, 203, 214

estocástico, 203, 213, 214

lineal, 203

no lineal, 203

Modelos del tiempo de demora,

115, 118

Modificación del diseño, 33

Módulo:

abastecimiento y control de

materiales, 309

administración de equipo, 305

administración de técnicos, 309

control de órdenes de trabajo,

306-308

informes de desempeño, 311

Nivel de reorden, 243

Nivel de servicio, 244, 285

Optimization Software Library, 97

Orden de compra, 313

Órdenes de trabajo:

control, 63

despacho, 61

diseño, 51

flujo, 53

procesamiento, 57, 62

programación, 61

sistema, 50, 152

Paro de la planta (mantenimiento con):

informes, 227

mantenimiento, 222

planeación, 223

programa, 226

Penetrantes, 84

Planeación y programación, 191,

201

Política tipo I, 90, 91, 93, *ver*

Mantenimiento preventivo

Política tipo II, 90, 97, 100

Proceso de producción, 30

Proceso del tiempo de demora,
116

Productividad, 283, 290, 298

Programas justo a tiempo, 29

Pronósticos, 147, 148, 187

Pronósticos cualitativos, 148, 149,
150, 153

Pronósticos cuantitativos, 148, 150,
151, 153

Prueba de hipótesis, 398, 399

Punto estacionario, 413

Razón de consistencia, 346

Reducción de costos, 70

Reemplazo, 34

Regresión mediante mínimos
cuadrados, 403

Reingeniería, 358

Reparación en el sitio, 86

Reparación general, 33

Retroalimentación de
información, 57, 62

Sistema, 29

Sistema de cascada, 36

Sistema de producción, 30

Sistema de tiempos
predeterminados de los
movimientos (STPM), 125,
136, 138, 140, 143

MTM, 136

MTM-2, 136-137

Tamaño de lote económico, 240

Técnica de evaluación y revisión
de programas, 201, 212

Técnicas de diagnóstico:
análisis de lubricantes, 83

- efecto eléctrico, 84
- penetrantes, 84
- termografía, 83
- ultrasonido, 84
- vibración, 83
- Técnicas de programación, 200
- Técnicas de pronósticos:
 - análisis de regresión, 151, 153, 154
 - promedio móvil ponderado, 152
 - promedio móvil simple, 151
 - pronósticos estacionales, 151, 160, 187
 - suavización exponencial, 151, 156, 187
- Técnicas determinísticas para la planeación de la capacidad:
 - método del *tableau* heurístico, 167, 186
 - programación entera, 173, 175, 177, 179
 - programación lineal, 167, 173, 175, 176
- Técnicas estocásticas para la planeación de la capacidad:
 - modelos de líneas de espera, 167, 178, 179, 187
 - simulación de eventos discretos, 167, 178, 179, 182
- Teorema del límite central, 394
- Termografía, 83
- Tiempo básico, 127-129
- Tiempo medio entre fallas, 285, 287
- Tiempo medio para la reparación, 285, 287, 358
- Tolerancias, 128-129
- Trabajo:
 - control del, 39
 - especificación del, 42
 - estándar de, 139-141, 143
 - muestreo de, 124, 130, 131-133, 135-136, 143
 - orden de, 43, 47, 50, 51, 53, 57, 60, 61, 62
 - requisición de, 43
 - tarjeta de, 54, 56
 - técnicas de medición, 124
- Trabajo de mantenimiento:
 - correctivo, 193
 - de emergencia, 193
 - de rutina, 140
 - modificación del diseño, 193
 - preventivo, 192
 - prioridades del, 199, 200
- Ultrasonido, 84, *ver* Técnicas de diagnóstico
- Variable:
 - aleatoria, 384, 387
 - continua, 381, 385
 - discreta, 381
- Variable aleatoria binomial, 131
- Varianza, 384, 389-392

