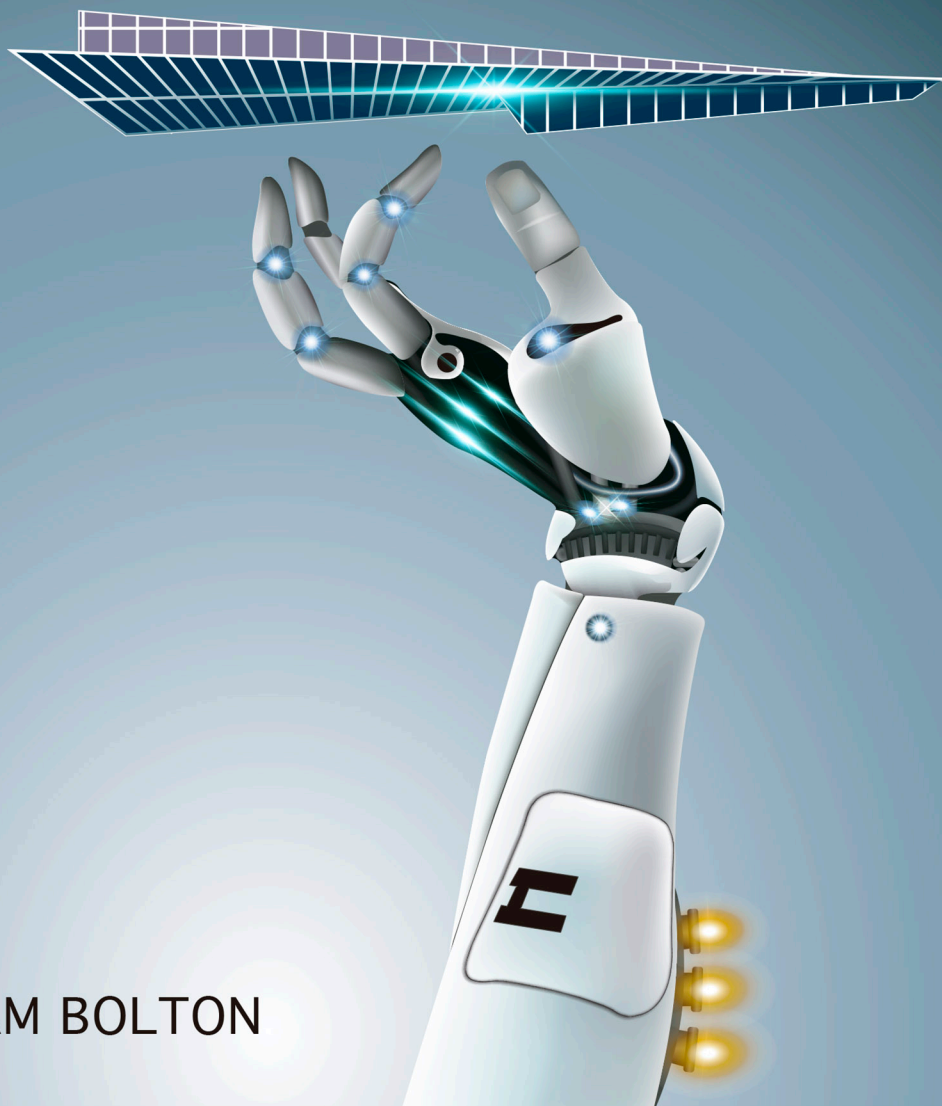


MECATRÓNICA

SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN
LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SEXTA EDICIÓN



WILLIAM BOLTON

 Alfaomega

MECATRÓNICA

MECATRÓNICA

SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN
LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UN ENFOQUE MULTIDISCIPLINARIO

6^a Edición

William Bolton

 **Alfaomega**

Gerente Editorial:
Marcelo Grillo Giannetto
mgrillo@alfaomega.com.mx

Datos catalográficos

Bolton, William.
Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería
mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario

Sexta Edición

Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México

ISBN: 978-607-622-974-3

Formato: 19 × 24.6 cm

Páginas: 664

Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario

William Bolton.

ISBN: 978-0-13-240763-2. Edición original en inglés "Mechatronics. Electronic control systems in mechanical and electrical engineering". Sixth Edition,

publicada por Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, England.

Derechos reservados © Pearson Education Limited.

Sexta edición: Alfaomega Grupo Editor, México, agosto 2017

© 2017 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Dr. Isidoro Olvera (Eje 2 sur) No. 74, Col. Doctores, 06720. Ciudad de México

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana

Registro No. 2317

Página Web: <http://www.alfaomega.com.co>

E-mail: cliente@alfaomegacolombiana.com

ISBN: 978-958-778-329-2

Derechos reservados:

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

NOTA IMPORTANTE:

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos han sido elaborados con gran cuidado por el autor y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Impreso en Colombia 2017. Printed in Colombia.

Empresas del grupo:

México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. - Dr. Isidoro Olvera (Eje 2 sur) No. 74, Col. Doctores, CP. 06720, Del. Cuauhtémoc, Ciudad de México - Tel.: (52-55) 5575-5022 - Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490.

Sin costo: 01-800-020-4396 - E-mail: atencionalcliente@alfaomega.com.mx

Colombia: Alfaomega Colombiana S.A. - Calle 62 No. 20-46, Barrio San Luis, Bogotá, Colombia, Tel.: (57-1) 746 0102 / 210 0122 - E-mail: cliente@alfaomegacolombiana.com

Chile: Alfaomega Grupo Editor, S.A. - Av. Providencia 1443. Oficina 24, Santiago, Chile
Tel.: (56-2) 2235-4248 - Fax: (56-2) 2235-5786 - E-mail: agechile@alfaomega.cl

Argentina: Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. - Av. Córdoba 1215, piso 10, CP: 1055, Buenos Aires, Argentina - Tel./Fax: (54-11) 4811-0887 y 4811 7183 - E-mail: ventas@alfaomegaeditor.com.ar



Contenido

Prefacio	ix	3. Acondicionamiento de señales	69
I INTRODUCCIÓN	1	3.1 Acondicionamiento de señales	69
1. Introducción a la mecatrónica	3	3.2 Amplificador operacional	70
1.1 ¿Qué es la mecatrónica?	3	3.3 Protección	81
1.2 El proceso de diseño	5	3.4 Filtrado	83
1.3 Sistemas	6	3.5 Puento de Wheatstone	84
1.4 Sistemas de medición	8	3.6 Modulación por pulsos	88
1.5 Sistemas de control	9	3.7 Problemas con las señales	89
1.6 Controlador lógico programable	21	3.8 Transferencia de potencia	92
1.7 Ejemplos de sistemas mecatrónicos	22	Resumen	92
Resumen	25	Problemas	93
Problemas	26	4. Señales digitales	95
II. SENSORES Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	27	4.1 Señales digitales	95
2. Sensores y transductores	29	4.2 Señales analógicas y digitales	95
2.1 Sensores y transductores	29	4.3 Convertidores de señales digital a analógica y de analógica a digital	99
2.2 Terminología del funcionamiento	30	4.4 Multiplexores	105
2.3 Desplazamiento, posición y proximidad	35	4.5 Adquisición de datos	106
2.4 Velocidad y movimiento	46	4.6 Procesamiento de señales digitales	109
2.5 Fuerza	49	Resumen	110
2.6 Presión de fluidos	50	Problemas	110
2.7 Flujo de líquidos	54	5. Lógica digital	112
2.8 Nivel de líquidos	55	5.1 Lógica digital	112
2.9 Temperatura	56	5.2 Compuertas lógicas	113
2.10 Sensores de luz	61	5.3 Aplicaciones de las compuertas lógicas	120
2.11 Selección de sensores	62	5.4 Lógica secuencial	126
2.12 Ingreso de datos mediante interruptores	63	Resumen	133
Resumen	65	Problemas	133
Problemas	66		

6. Sistemas de presentación de datos 136

6.1 Pantallas	136
6.2 Elementos para la presentación de datos	137
6.3 Grabación magnética	142
6.4 Grabación óptica	146
6.5 Pantallas o displays	147
6.6 Sistemas de adquisición de datos	151
6.7 Sistemas de medición	155
6.8 Prueba y calibración	158
Resumen	160
Problemas	160

III. ACTUACIÓN 163**7. Sistemas de actuación neumática e hidráulica 165**

7.1 Sistemas de actuación	165
7.2 Sistemas neumáticos e hidráulicos	165
7.3 Válvulas para control de dirección	169
7.4 Válvulas de control de presión	173
7.5 Cilindros	175
7.6 Servoválvulas y válvulas de control proporcional	178
7.7 Válvulas para el control de procesos	180
7.8 Actuadores giratorios	185
Resumen	186
Problemas	186

8. Sistemas de actuación mecánica 188

8.1 Sistemas mecánicos	188
8.2 Tipos de movimiento	189
8.3 Cadenas cinemáticas	191
8.4 Levas	194
8.5 Engranajes	196
8.6 Rueda dentada y trinquete	200
8.7 Bandas y cadenas de transmisión	200
8.8 Cojinetes (chumaceras)	202
Resumen	204
Problemas	205

9. Sistemas de actuación eléctrica 207

9.1 Sistemas eléctricos	207
9.2 Interruptores mecánicos	207

9.3 Interruptores de estado sólido	209
9.4 Solenoides	215
9.5 Motores de c.d	217
9.6 Motores de c.a	225
9.7 Motores paso a paso	227
9.8 Selección de un motor	234
Resumen	237
Problemas	237

IV. SISTEMAS DE MICROPROCESADORES 239**10. Microprocesadores y microcontroladores 241**

10.1 Control	241
10.2 Sistemas de microprocesadores	241
10.3 Microcontroladores	253
10.4 Aplicaciones	272
10.5 Programación	274
Resumen	277
Problemas	277

11. Lenguaje ensamblador 278

11.1 Lenguajes	278
11.2 Conjunto de instrucciones	279
11.3 Programas en lenguaje ensamblador	285
11.4 Subrutinas	290
11.5 Tablas de consulta	293
11.6 Sistemas embebidos	296
Resumen	300
Problemas	300

12. Lenguaje C 302

12.1 ¿Por qué el lenguaje C?	302
12.2 Estructura de un programa	302
12.3 Control de flujo y ciclos	309
12.4 Arreglos	313
12.5 Apuntadores	314
12.6 Desarrollo de programas	316
12.7 Ejemplos de programas	317
12.8 Programas Arduino	319
Resumen	323
Problemas	323

13. Sistemas de entrada/salida 326

13.1 Interfaces	326
13.2 Direccionamiento entrada/salida	326

13.3	Requerimientos de una interfaz	329	V. MODELOS DE SISTEMAS	411	
13.4	Adaptadores de interfaz para dispositivos periféricos	336	17. Modelos de sistemas básicos	413	
13.5	Interfaz para comunicaciones en serie	341	17.1	Modelos matemáticos	413
13.6	Ejemplos de acoplamiento mediante interfaz	344	17.2	Bloques funcionales de sistemas mecánicos	414
	Resumen	347	17.3	Bloques funcionales de sistemas eléctricos	422
	Problemas	348	17.4	Bloques funcionales de sistemas de fluidos	426
			17.5	Bloques funcionales de sistemas térmicos	433
				Resumen	436
				Problemas	437
14.	Controladores lógicos programables	349	18. Modelado de sistemas	439	
14.1	Controladores lógicos programables	349	18.1	Sistemas de ingeniería	439
14.2	Estructura básica del PLC	349	18.2	Sistemas rotacional-traslacional	439
14.3	Procesamiento de la entrada/salida	353	18.3	Sistemas electromecánicos	440
14.4	Programación en escalera o ladder	354	18.4	Linealidad	443
14.5	Lista de instrucciones	358	18.5	Sistemas hidromecánicos	445
14.6	Enclavamiento y relevadores internos	361		Resumen	448
14.7	Secuenciación	363		Problemas	448
14.8	Temporizadores y contadores	364			
14.9	Registros de corrimiento	367			
14.10	Controles maestro y de salto	368			
14.11	Manejo de datos	369			
14.12	Entrada/salida analógica	371			
	Resumen	373			
	Problemas	374			
15.	Sistemas de comunicación	376	19. Respuestas dinámicas de sistemas	449	
15.1	Comunicaciones digitales	376	19.1	Modelado de sistemas dinámicos	449
15.2	Control centralizado, jerárquico y distribuido	376	19.2	Terminología	450
15.3	Redes	379	19.3	Sistemas de primer orden	452
15.4	Protocolos	381	19.4	Sistemas de segundo orden	458
15.5	Modelo de interconexión de sistemas abiertos	382	19.5	Medidas de desempeño de los sistemas de segundo orden	464
15.6	Interfaces de comunicación en serie	385	19.6	Identificación de sistemas	467
15.7	Interfaces de comunicación paralela	391		Resumen	467
15.8	Protocolos inalámbricos	394		Problemas	469
	Resumen	395			
	Problemas	395			
16.	Localización de fallas	397	20. Funciones de transferencia de sistemas	471	
16.1	Técnicas para detección de fallas	397	20.1	La función de transferencia	471
16.2	Temporizador vigilante	398	20.2	Sistemas de primer orden	474
16.3	Verificación de paridad y codificación de errores	399	20.3	Sistemas de segundo orden	476
16.4	Fallas comunes de hardware	400	20.4	Sistemas en serie	478
16.5	Sistemas basados en microprocesadores	402	20.5	Sistemas con lazos de realimentación	479
16.6	Emulación y simulación	405	20.6	Efecto de la ubicación de los polos en respuesta transitoria	480
16.7	Sistemas basados en PLC	407		Resumen	484
	Resumen	409		Problemas	484
	Problemas	410			

21. Respuesta en frecuencia	486	23. Inteligencia artificial	528
21.1 Entrada senoidal	486	23.1 ¿Qué significa inteligencia artificial?	528
21.2 Fasores	487	23.3 Percepción y cognición	528
21.3 Respuesta en frecuencia	489	23.3 Razonamiento	530
21.4 Diagramas de Bode	492	23.4 Aprendizaje	533
21.5 Especificaciones de desempeño	501	Resumen	534
21.6 Estabilidad	502	Problemas	534
Resumen	503	VI. CONCLUSIÓN	535
Problemas	504		
22. Controladores en lazo cerrado	505	24. Sistemas mecatrónicos	537
22.1 Procesos continuos y discretos	505	24.1 Diseños mecatrónicos	537
22.2 Terminología	507	24.2 Casos de estudio	548
22.3 Modo de control de dos posiciones	509	24.3 Robótica	563
22.4 Modo de control proporcional	510	Resumen	567
22.5 Control derivativo	512	Problemas y tareas	567
22.6 Control integral	514	Tareas para investigación	568
22.7 Control PID	516	Tareas para diseño	568
22.8 Controles digitales	517	Apéndices	569
22.9 Desempeño de los sistemas de control	520	A. La transformada de Laplace	571
22.10 Sintonización de controladores	521	B. Sistemas numéricos	581
22.11 Control de velocidad	523	C. Álgebra booleana	587
22.12 Control adaptable	523	D. Conjuntos de instrucciones	596
Resumen	526	E. Funciones en biblioteca de C	601
Problemas	527	F. MATLAB y SIMULINK	604
		G. Análisis de circuitos eléctricos	610
		Información adicional	620
		Respuestas	624
		Índice analítico	639



Prefacio

El término mecatrónica fue ‘acuñado’ en 1969 por un ingeniero japonés, como combinación de ‘meca’ de la palabra mecanismos y ‘trónica’ de la palabra ‘electrónica’. El término tiene ahora un significado más amplio, ya que es usado para describir una filosofía en la Tecnología de la Ingeniería en la cual hay una integración coordinada y concurrentemente desarrollada de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control inteligente por computadora, en el diseño y manufactura de productos y procesos. Como resultado, los productos mecatrónicos tienen varias funciones mecánicas que se sustituyen con las electrónicas. Esto da como resultado una mayor flexibilidad, rediseño y reprogramación sencillos, y la capacidad de recopilar datos automatizados e informar.

Una consecuencia de esta tecnología es la necesidad de que ingenieros y técnicos adopten un método interdisciplinario e integrado para la ingeniería. Por consiguiente, ingenieros y técnicos requieren de habilidades y conocimientos que no se limitan a una sola área en un tema. Necesitan tener la capacidad de operar y comunicarse a través de una gama de disciplinas de ingeniería y referirlas con aquellas que cuentan con más habilidades especializadas. En esta obra se pretende proporcionar un fundamento básico de la mecatrónica así como enlaces a través de habilidades más especializadas.

La primera edición se diseñó para cubrir las unidades de Mecatrónica del Business and Technology Education Council (BTEC) de los cursos para la obtención del certificado Higher National Certificate/Diploma para técnicos y se diseñaron de manera que fueran compatibles con unidades más especializadas como las que se emplean en el diseño, la manufactura y el mantenimiento determinados por el área de aplicación del curso. El libro se utiliza de manera amplia para dichos cursos y también se ha encontrado que es útil para cursos de licenciatura en Gran Bretaña y en Estados Unidos. Con base en los comentarios y las sugerencias hechas por profesores de estos países, la segunda edición se amplió considerablemente al dar un tratamiento más profundo a los temas abordados, por lo que no sólo fue de interés para el público al que originalmente estaba dirigido, sino que su nuevo diseño lo hizo idóneo también para cursos de licenciatura. La tercera edición incluyó más detalles de algunas explicaciones, más análisis de los microcontroladores y la programación, mayor uso de modelos de sistemas mecatrónicos y el agrupamiento de factores clave en los apéndices. La cuarta edición fue una reestructuración completa de todos los aspectos del texto en cuanto a contenido y diseño, con algunos temas que se reagruparon, el traslado de más material a los apéndices para evitar problemas en el flujo del texto, nuevo material —en especial una introducción a la inteligencia artificial, más casos de estudio y revisión de algunos temas para mejorar su comprensión. También se han incluido en cada capítulo objetivos y resúmenes claves.

La sexta edición contempla una reestructuración de las partes que conforman al libro, ya que algunos lectores opinaron que la secuencia de los capítulos no coincidía con la secuencia general de la enseñanza. Entonces, la nueva edición considera el cambio de lugar de la parte de los modelos de sistemas de modo que se sitúe después de los sistemas de microprocesadores. Otras modificaciones consisten en la inclusión del material sobre Arduino y la adición de más temas en el capítulo 24.

El objetivo general de esta obra es proporcionar un estudio completo de la mecatrónica para que lo puedan utilizar técnicos y estudiantes de ingeniería, quienes lo encontrarán útil para:

- Adquirir una combinación de habilidades en ingeniería mecánica, electrónica y computación, necesarias para entender y diseñar sistemas mecatrónicos.
- Ser capaces de operar y comunicarse a través del amplio rango de las disciplinas de ingeniería necesarias en la mecatrónica.
- Ser capaces de diseñar sistemas mecatrónicos.

Cada capítulo del libro incluye objetivos, un resumen, ilustraciones y problemas con respuestas al final de la obra. En el capítulo 24 se incluyen tareas de investigación y diseño, así como también claves de sus posibles respuestas.

La estructura del libro es la siguiente:

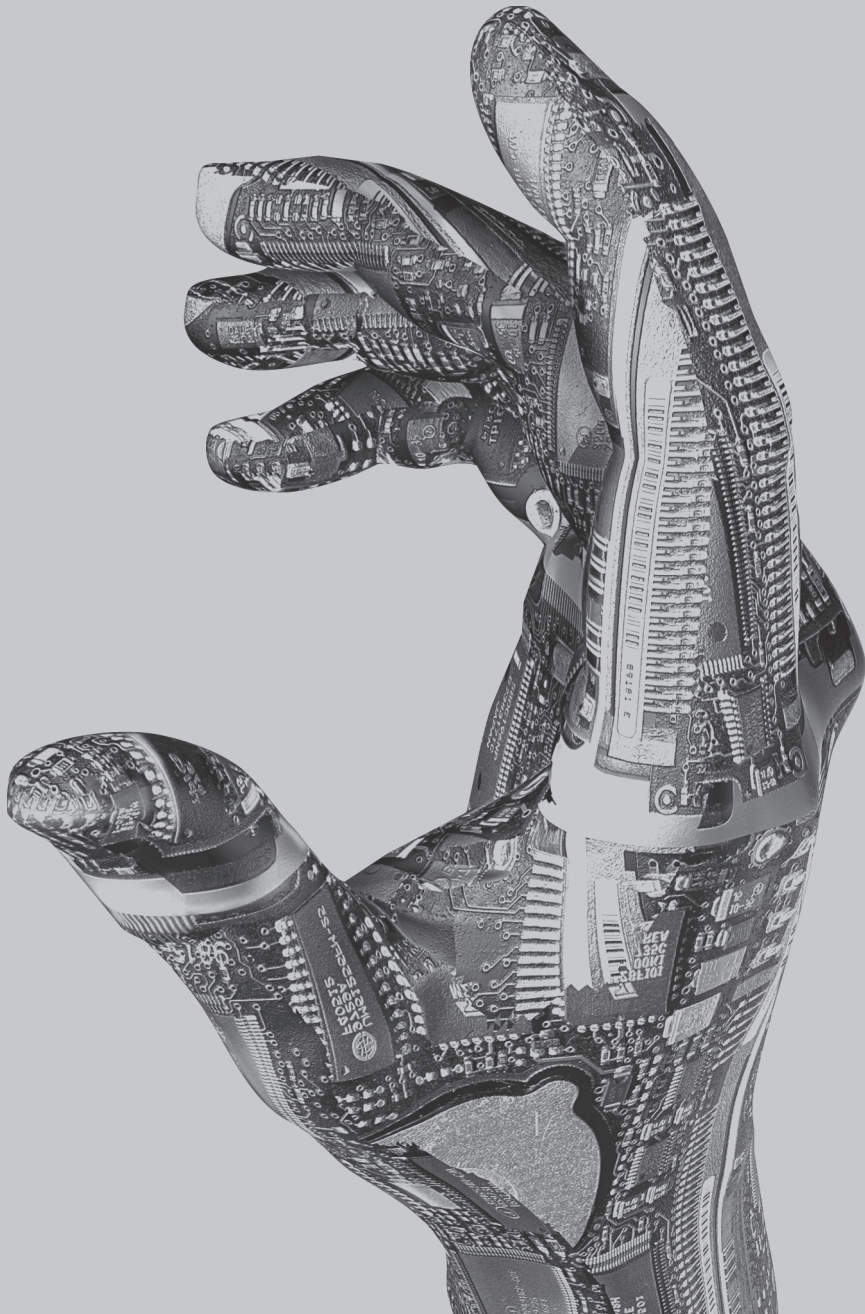
- Capítulo 1 es una introducción general a la mecatrónica.
- Capítulos 2 a 6 forman un bloque coherente que trata de los sensores y el condicionamiento de la señal.
- Capítulos 7 a 9 cubren el tema de los actuadores.
- Capítulos 10 a 16 se consideran los sistemas de microprocesadores.
- Capítulos 17 a 23 se refieren a los modelos de sistemas.
- Capítulo 24 presenta una conclusión general en cuanto al diseño de sistemas en mecatrónica.

Un agradecimiento especial a los fabricantes de los equipos mencionados en el texto y a los revisores que leyeron cuidadosamente la quinta edición e hicieron sugerencias para mejorar la obra.

W. Bolton

Parte I

Introducción





Capítulo uno Introducción a la mecatrónica

Objetivos

Después de estudiar este capítulo, el lector debe ser capaz de:

- Explicar qué significa mecatrónica y valorar su importancia en el diseño de ingeniería.
- Explicar qué es un sistema y definir los elementos de los sistemas de medición.
- Describir las diversas formas y elementos del sistema de lazo abierto y del sistema de lazo cerrado.
- Reconocer la necesidad de modelos de sistemas para predecir su comportamiento.

1.1

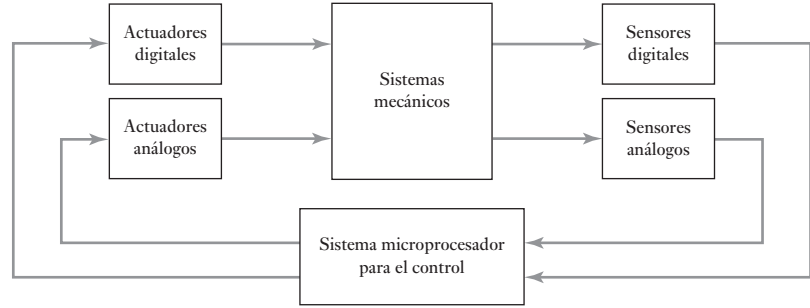
¿Qué es la mecatrónica?

El término mecatrónica fue “acuñado” en 1969 por un ingeniero japonés, como combinación de “meca” de la palabra mecanismos y “trónica” de la palabra “electrónica”. El término tiene ahora un significado más amplio, ya que es usado para describir una filosofía en la Tecnología de la Ingeniería en la cual hay una integración coordinada y concurrentemente desarrollada de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control inteligente por computadora, en el diseño y manufactura de productos y procesos. Como resultado, los productos mecatrónicos tienen varias funciones mecánicas que se sustituyen con las electrónicas. Esto da como resultado una mayor flexibilidad, rediseño y reprogramación sencillos, y la capacidad de recopilar datos automatizados e informar.

Un sistema mecatrónico no es sólo la unión de los sistemas electrónico y mecánico y es más que sólo un sistema de control; es una integración completa de todos ellos en la cual existe un enfoque concurrente al diseño. En el diseño de autos, robots, máquinas-herramienta, lavadoras, cámaras y muchas otras máquinas, se adopta cada vez más dicho enfoque integrado e interdisciplinario para el diseño en ingeniería. La integración a través de las fronteras tradicionales de la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica, la electrónica y la ingeniería de control debe ocurrir en los primeros pasos del proceso de diseño si se desarrollan sistemas más baratos, confiables y flexibles. La mecatrónica debe implicar un enfoque concurrente o participativo entre estas disciplinas en lugar del enfoque secuencial tradicional del desarrollo, es decir un sistema mecánico, luego el diseño de la parte eléctrica y la parte del microprocesador. De esta manera, la mecatrónica es una filosofía diseñada, un enfoque integral para la ingeniería.

La mecatrónica reúne áreas de la tecnología que involucran sensores y sistemas de medición, sistemas de manejo y actuación, así como sistemas de microprocesador (Figura 1.1), junto con el análisis del comportamiento de sistemas y sistemas de control. Esto esencialmente es un resumen de este libro. Este capítulo es una introducción al tema y desarrolla algunos de los conceptos básicos para dar un marco para el resto del libro en el que se desarrollarán los detalles.

Figura 1.1 Los elementos básicos del sistema mecatrónico.



1.1.1 Ejemplos de sistemas mecatrónicos

Considere una cámara fotográfica con enfoque y exposición automáticos. Para tomar una fotografía basta con apuntar hacia el objeto y oprimir un botón. La cámara puede ajustar el foco y el tiempo de exposición de manera automática, de tal forma que el objeto queda debidamente enfocado y con el tiempo de exposición correcto. No hay que ajustar el foco y el tiempo de exposición manualmente. Considere el caso de la suspensión “inteligente” de un camión. Este tipo de suspensión se ajusta para mantener la plataforma nivelada en caso de cargas distribuidas de manera desigual; también se ajusta cuando el camión toma curvas cerradas y cuando va por caminos con baches, o topes para mantener un trayecto suave. Y ahora considere el caso de una línea de producción automatizada. En ella se llevan a cabo diversos procesos de producción, todos de manera automática, y en la forma y secuencia correctas con un reporte de los resultados en cada etapa del proceso. La cámara automática, la suspensión del camión y la línea de producción automatizada son ejemplos de la fusión entre la electrónica, los sistemas de control y la ingeniería mecánica.

1.1.2 Sistemas integrados

El término sistema integrado se utiliza cuando los microprocesadores son construidos dentro de los sistemas y éste es el tipo de sistema que por lo general interesa en la mecatrónica. Un microprocesador puede considerarse básicamente como una colección de las compuertas lógicas y los elementos de memoria que no están comunicados como componentes individuales, pero cuyas funciones lógicas se implementan mediante software. Para ilustrar lo que se conoce como una compuerta lógica, suponga que quiere una salida donde la entrada A AND y la entrada B están mandando señales. Esto puede implementarse con lo que se conoce como una compuerta lógica AND. Una compuerta lógica OR daría una salida cuando la entrada A OR entrada B está encendida. Así, un microprocesador se ocupa de buscar salidas para verificar si están encendidas o apagadas, al procesar los resultados de tal interrogante según éste sea programado, y ofrece salidas que están encendidas o apagadas. Vea el Capítulo 10 para analizar en detalle los microprocesadores.

Con el objetivo de que se utilice un microprocesador en un sistema de control, necesita chips adicionales para dar memoria al almacenaje de datos y para puertos entrada/salida con el fin de habilitarlos en las señales de proceso desde y para el mundo externo. Los **microcontroladores** son microprocesadores con estas instalaciones extra, todas ellas integradas en un solo chip.

Un **sistema integrado** es un sistema basado en un microprocesador que está diseñado para controlar una gama de funciones y no está diseñado para que el usuario final lo programe de la misma forma que una computadora. Por lo tanto, con un sistema integrado, el usuario no puede cambiar lo que el sistema realiza al añadir o reemplazar el software.

Como ejemplo del uso de los microcontroladores en un sistema de control, una lavadora moderna tendrá un sistema de control basado en microprocesador para controlar el ciclo de lavado, las bombas, el motor y la temperatura del agua. Un automóvil moderno tendrá microprocesadores que controlen funciones como el sistema antibloqueo de frenos y el sistema de mando del motor. Otros ejemplos de sistemas integrados son cámaras de enfoque y exposición automáticas, videocámaras, celulares, reproductores DVD, lectores de tarjeta electrónicos, fotocopiadoras, impresoras, escáneres, televisiones y controladores de temperatura.

1.2**El proceso de diseño**

El proceso de diseño para cualquier sistema puede considerarse como el proceso que involucra las siguientes etapas:

1 *La necesidad*

El proceso de diseño comienza con una necesidad, quizá del consumidor o cliente. Esto se puede detectar en la investigación de mercado que se lleva a cabo para establecer las necesidades de clientes potenciales.

2 *Análisis de problema*

El primer paso en el desarrollo de un diseño es investigar la naturaleza verdadera del problema, por ejemplo, cuando éste se analiza. Ésta es una etapa importante en cuanto a que si el problema no se define con exactitud, puede ocasionar pérdida de tiempo en los diseños y no se satisfará la necesidad.

3 *Preparación de una especificación*

Si se sigue el análisis, se puede preparar la especificación de los requerimientos. Esto planteará el problema, cualquier restricción sujeta a la solución, y el criterio a aplicar para juzgar la calidad del diseño. En el planteamiento del problema se deberán especificar todas las funciones requeridas del diseño, junto con cualquier otra característica deseable. De esta manera puede haber una exposición del volumen, dimensiones, tipos y rangos de movimiento requeridos, precisión de requerimientos de entrada y salida de los elementos, interfases, requerimientos de potencia, entorno operativo, estándares y códigos de práctica relevantes, etcétera.

4 *Generación de soluciones posibles*

A esto se le califica por lo general como la **etapa conceptual**. Los esbozos de soluciones se preparan, mismos que funcionan con los detalles suficientes que indican los medios para obtener cada una de las funciones requeridas, por ejemplo tamaños aproximados y muestras de materiales y costos. También significa investigar lo que se ha hecho anteriormente ante problemas similares; no tiene sentido reinventar la rueda.

5 *Selecciones de una solución apropiada*

Las diversas soluciones se evalúan y la más apropiada es la que se selecciona. La evaluación a menudo incluye la representación de un sistema mediante un modelo para luego llevar a cabo una simulación con el objetivo de establecer cómo puede reaccionar a las entradas.

6 *Producción de un diseño detallado*

El detalle de un diseño seleccionado debe funcionar ahora. Éste puede requerir la producción de prototipos o maquetas de tamaño natural para determinar los detalles óptimos de un diseño.

7 *Producción de dibujos de trabajo*

El diseño seleccionado se traduce entonces en dibujos de trabajo, diagramas de circuitos, etc., de manera que se pueda elaborar el artículo.

Cada etapa del proceso de diseño no se debe considerar como algo independiente. A menudo se necesitará regresar a una etapa previa y darle mayor consideración. Así, cuando se presente un problema, puede haber la necesidad de regresar y reconsiderar el análisis del mismo en la etapa de generación de soluciones posibles.

1.2.1 Diseños tradicionales y mecatrónicos

El diseño de ingeniería es un proceso complejo que implica interacciones entre varias habilidades y disciplinas. Con el diseño tradicional, la propuesta era que el ingeniero mecánico diseñara los elementos mecánicos, luego el ingeniero de control progresara y diseñara el sistema de control. Esto da como resultado lo que se conoce como enfoque secuencial para el diseño. Sin embargo, la base del enfoque de la mecatrónica se considera que yace en la inclusión concurrente de las disciplinas de la ingeniería mecánica, electrónica, tecnología de computación e ingeniería de control en el enfoque del diseño. La concurrencia inherente de este enfoque depende mucho del modelado del sistema y luego de la simulación de la manera en la que el modelo reacciona a las entradas y por consiguiente cómo puede reaccionar el sistema real a las entradas.

Un ejemplo de cómo puede ayudar el enfoque multidisciplinario en la solución de un problema es el diseño de las básculas de baño. Tales básculas podrían considerarse sólo en términos de la compresión de los resortes y un mecanismo que se usa para convertir el movimiento en rotación de un eje y, por consiguiente, el movimiento de una aguja a través de una báscula; un problema que se debe tomar en cuenta en el diseño es que el peso indicado no deberá depender de la posición de la persona sobre la báscula. No obstante, se pueden considerar otras posibilidades más allá de un simple diseño mecánico. Por ejemplo, los resortes se podrían reemplazar por celdas de carga con galgas extensométricas y la salida de éstas utilizarlas con un microprocesador para que proporcionen una lectura digital del peso en un visualizador LED. Las básculas que resultarán de esto podrían ser mecánicamente más sencillas, con menos componentes y piezas movibles. Sin embargo, la complejidad se ha transferido al software.

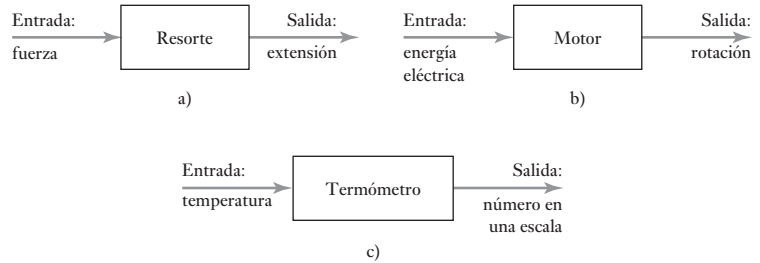
Un ejemplo más, el tradicional diseño del control de temperatura para un sistema de calefacción central doméstico ha sido el termostato bimetalico en un sistema de control de lazo cerrado. La flexión de la cinta bimetalica cambia a medida que cambia la temperatura y se emplea para operar un interruptor de encendido/apagado para el sistema de calefacción. Sin embargo, una solución multidisciplinaria para el problema podría ser que se empleara un sistema de microprocesador controlado usando tal vez un termiodiodo como sensor. Dicho sistema tiene muchas ventajas sobre el sistema de termostato bimetalico. Éste es relativamente rudimentario y la temperatura no se controla con exactitud; también, al concebir un método para obtener diferentes temperaturas en tiempos diversos del día es algo complejo y difícil de lograr. Sin embargo, el sistema de microprocesador controlado puede lidiar con esto con facilidad mediante la precisión y el control programado. El sistema es mucho más flexible. Esta mejora en cuanto a flexibilidad es una característica común de los sistemas mecatrónicos en comparación con los sistemas tradicionales.

1.3

Sistemas

En el diseño de sistemas mecatrónicos, uno de los pasos incluidos es crear un modelo del sistema, de forma que estas predicciones se hagan en relación con su comportamiento cuando ocurran las entradas. Tales modelos implican

Figura 1.2 Ejemplos de sistemas: a) resortes, b) motor, c) termómetro.



dibujar diagramas de bloques para representar sistemas. Un **sistema** puede ser considerado como una caja o diagrama de bloques que tiene una entrada y una salida, en donde lo importante no es lo que sucede adentro de la caja, sino sólo la relación entre la salida y la entrada. El término **modelado** se usa para representar el comportamiento de un sistema real con ecuaciones matemáticas; tales ecuaciones representan la relación entre las entradas y las salidas del sistema. Por ejemplo, un resorte puede considerarse como un sistema para tener una entrada de una fuerza F y una salida de una extensión x (Figura 1.2a). La ecuación utilizada para modelar la relación entre la entrada y la salida puede ser $F = kx$, donde k es una constante. Otro ejemplo, un motor se puede considerar como un sistema que cuenta con su entrada de energía eléctrica y con su salida de rotación de un eje (Figura 1.2b).

Un **sistema de medición** se puede considerar como una caja que se utiliza para hacer mediciones. Éste tiene como su entrada la cantidad que se está midiendo y como su salida el valor de la cantidad. Por ejemplo, un sistema de medición de temperatura, como un termómetro, tiene una entrada de temperatura y una salida de un número en una escala (Figura 1.2c).

1.3.1 Sistemas de modelado

La respuesta de cualquier sistema para una entrada no es instantánea. Por ejemplo, para el sistema de resorte descrito en la Figura 1.2a, a pesar de la relación entre la entrada, fuerza F , y la salida, extensión x , se le consideró como $F = kx$; esto sólo describe la relación cuando se dan las condiciones de estado de equilibrio. Cuando se aplica la fuerza es probable que ocurran oscilaciones antes de que el resorte vuelva a su estado normal y establezca su valor de extensión de estado de equilibrio (Figura 1.3). Las respuestas de los sistemas son funciones de tiempo. De esta manera, para conocer la forma en que los sistemas se comportan cuando hay entradas en éstos, se necesita crear modelos para sistemas que relacionen la salida con la entrada de modo que se pueda calcular, para una entrada dada, cómo variará la salida con el tiempo y cuánto le tomará volver a su estado normal.

Otro ejemplo más, si se pone a calentar agua en una tetera, le llevará algo de tiempo al agua alcanzar su punto de ebullición (Figura 1.4). Asimismo, cuando un controlador de microprocesador manda una señal, envía la orden

Figura 1.3 La respuesta a una entrada para un resorte.

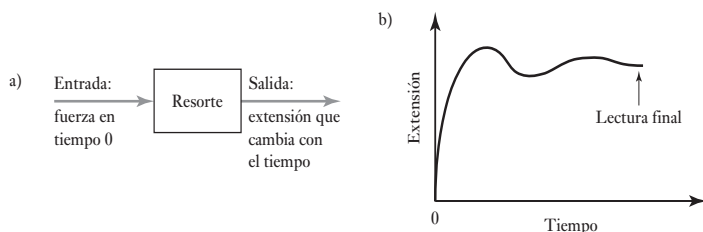


Figura 1.4 La respuesta a una entrada para un sistema de tetera.

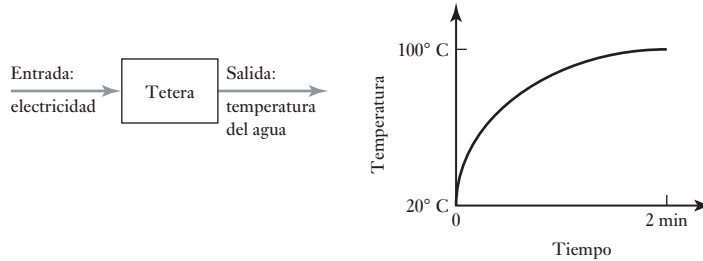
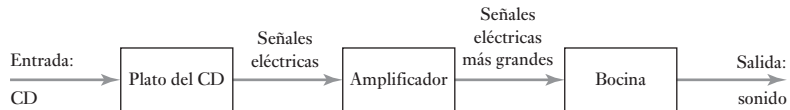


Figura 1.5 Un reproductor de CD.



de mover la lente para el enfoque en una cámara automática, luego transcurre un tiempo antes de que la lente alcance su posición para el enfoque correcto.

A menudo, la relación entre la entrada y la salida para un sistema se describe mediante una ecuación diferencial. Tales ecuaciones y sistemas se analizan en el Capítulo 17.

1.3.2 Sistemas conectados

En otro sistema que no es el más sencillo y que por lo general es mejor considerarlo como una serie de bloques interconectados, cada bloque tiene una función específica. Así, hay una salida de un bloque que se convierte en la entrada del siguiente en el sistema. Al dibujar un sistema así, es necesario reconocer que las líneas trazadas para conectar las cajas indican un flujo de información en la dirección indicada por una flecha y no necesariamente conexiones físicas. Ejemplo de un sistema de conexión es un reproductor de CD. Imagine que ahí hay tres bloques interconectados: el plato del CD, el cual tiene una entrada de un CD y una salida de las señales eléctricas, un amplificador que tiene una entrada de estas señales eléctricas y una salida de señales eléctricas más grandes, así como una bocina con una salida de las señales eléctricas y una salida de sonido (Figura 1.5). En la siguiente sección de sistemas de medición se ofrece otro ejemplo de ese conjunto de bloques conectados.

1.4

Sistemas de medición

Los **sistemas de medición** tienen una relevancia particular cuando se habla de mecatrónica. En general, se puede considerar que estos sistemas están formados por tres elementos básicos (como se ilustra en la Figura 1.6):

- 1 Un **sensor** que responda a la cantidad a medir al dar como su salida una señal relacionada con la cantidad. Por ejemplo, un termopar es un sensor de temperatura. La entrada al sensor es una temperatura y la salida es una fem (fuerza electromotriz) relacionada con el valor de la temperatura.
- 2 Un **acondicionador de señal** toma la señal desde el sensor y la manipula dentro de una condición apropiada ya sea para presentarla en forma visual o, en el caso del sistema de control, con el fin de ejercer control. Así, por ejemplo, la salida desde un termopar es más bien una pequeña fem y

Figura 1.6 Un sistema de medición y los elementos que lo forman.

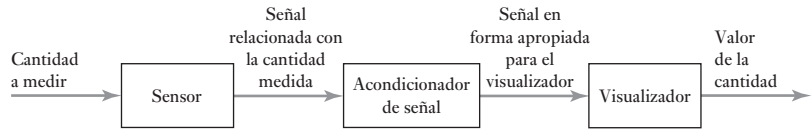
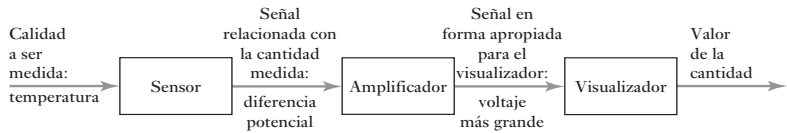


Figura 1.7 Un sistema de termómetro digital.



puede ser alimentada a través de un amplificador para obtener una señal más grande. El amplificador es el acondicionador de señal.

- 3 Un **sistema visualizador** donde se despliega la salida desde el acondicionador de señal. Por ejemplo, esto puede ser una aguja moviéndose a través de una escala o una lectura digital.

Como ejemplo, considere un termómetro digital (Figura 1.7). Éste tiene una entrada de temperatura hacia un sensor, probablemente un diodo semiconductor. La diferencia potencial a través del sensor es, a una corriente constante, una medida de temperatura. La diferencia potencial es entonces ampliada por un amplificador operacional para dar un voltaje que puede conducir directamente un visualizador. El sensor y el amplificador operacional pueden instalarse en el mismo chip de silicio.

Los sensores se estudian en el Capítulo 2 y los acondicionadores de señal en el Capítulo 3. Los sistemas de medición implican todos los elementos que se ven en el Capítulo 6.

1.5

Sistemas de control

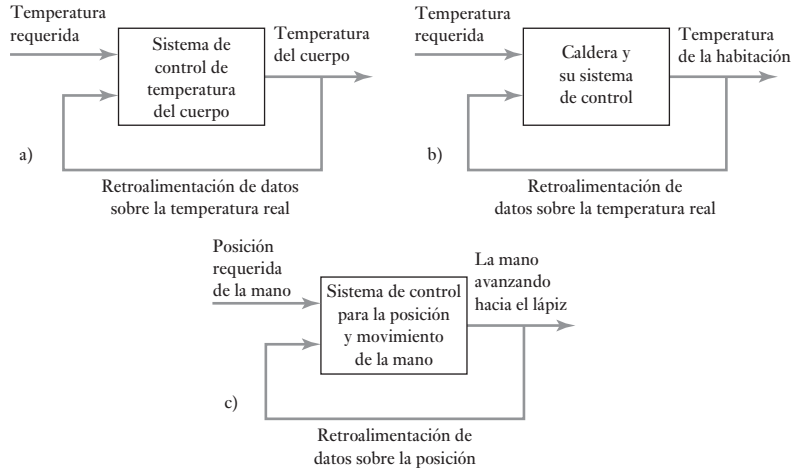
Un **sistema de control** puede considerarse como un sistema que se puede utilizar para:

- 1 Controlar algo variable de algún valor particular, por ejemplo un sistema central de calentamiento donde la temperatura se controla para un valor particular.
- 2 Controlar la secuencia de eventos, por ejemplo las marcas de una lavadora que establecen el lugar y el tiempo de un ciclo, por ejemplo “blancos” y entonces un ciclo de lavado en particular controla la lavadora, esto es secuencia de eventos, apropiado para ese tipo de ropa.
- 3 Controlar si ocurre o no un evento, por ejemplo un seguro en una máquina por el cual no puede ser operada hasta que el dispositivo de seguridad esté en posición.

1.5.1 Retroalimentación

Considere el ejemplo de un sistema de control en el cual todos los seres humanos están incluidos. A menos que se esté enfermo, la temperatura del cuerpo humano es casi constante, independientemente de que se encuentre en un ambiente frío o caliente. Para poder mantener este valor de temperatura constante, el cuerpo cuenta con un sistema de control de temperatura. Si la temperatura del cuerpo empieza a rebasar el valor normal, suda; si disminuye, tiene escalofríos. Ambos mecanismos sirven para restaurar la temperatura a su valor normal. El sistema de control mantiene constante la temperatura. Este sistema recibe una entrada enviada por sensores que le dicen cuál es la temperatura y compara estos datos con el valor que debe tener; a continuación, produce la

Figura 1.8 Control por retroalimentación: a) temperatura del cuerpo humano, b) temperatura de la habitación con calefacción central, c) levantamiento de un lápiz.



respuesta adecuada a fin de lograr la temperatura requerida. El anterior es un ejemplo de **control por retroalimentación**; las señales de salida regresan como entrada, por ejemplo la temperatura real para modificar la reacción del cuerpo a fin de restaurar la temperatura a su valor “normal”. En un **control por retroalimentación**, el sistema de control compara la salida real retroalimentada con el valor que se requiere y ajusta su salida de acuerdo con el resultado. En la Figura 1.8a se ilustra este sistema de control por retroalimentación.

Una manera de controlar la temperatura de una casa con calefacción central sería que una persona con un termómetro estuviera cerca del interruptor de apagado/encendido de la caldera y la encendiera o apagara, dependiendo del resultado de la lectura del termómetro. La anterior es una forma burda de control por retroalimentación, con un ser humano como elemento de control. El término retroalimentación se usa porque las señales se alimentan de regreso desde la salida para modificar la entrada. El sistema de control por retroalimentación más común tiene un termostato o controlador, el cual automáticamente enciende o apaga la caldera, según la diferencia entre la temperatura predeterminada y la temperatura real (Figura 1.8b). Este sistema de control permite mantener una temperatura constante.

Si alguien desea tomar un lápiz que está sobre una banca, debe recurrir a un sistema de control para garantizar que la mano llegue hasta el lápiz. Para ello, la persona observa la posición de su mano en relación con el lápiz y hace los ajustes necesarios de posición al moverla hacia el lápiz. Se tiene una retroalimentación de información relativa a la posición real de la mano, para poder modificar sus reacciones y lograr los movimientos y posición de la mano requeridos (Figura 1.8c). Este sistema de control regula la posición y el movimiento de la mano.

Los sistemas de control por retroalimentación están presentes en todas partes, no sólo en la naturaleza y el hogar, sino también en la industria. Son muchos los procesos y máquinas industriales que requieren control, ya sea humano o automático. Por ejemplo, existen procesos de control donde la temperatura, el nivel de un líquido, el flujo de fluidos, la presión, etc., se mantienen constantes. Hay procesos químicos en los que es necesario mantener el líquido de un tanque a un nivel o temperatura determinados. Existen sistemas de control en los que es necesario colocar en cierta posición una parte móvil, de manera precisa y constante, o bien mantener una velocidad constante.

Sería el caso, por ejemplo, de un motor diseñado para trabajar a velocidad constante, o de una operación de maquinado en la cual la posición, la velocidad y la operación de una herramienta se controlan de manera automática.

1.5.2 Sistemas de lazo cerrado y de lazo abierto

Existen dos tipos básicos de sistemas de control: de **lazo abierto** y de **lazo cerrado**. La diferencia entre ellos se ilustra con un ejemplo sencillo. Considere un calefactor eléctrico que cuenta con un interruptor que permite elegir entre una resistencia calentadora de 1 o de 2 kW. Si una persona elige alguna de ellas para calentar una habitación, bastaría con poner el interruptor en la posición de 1 kW si no desea una temperatura muy elevada. La habitación se calentará y alcanzará una temperatura definida sólo por la elección de la resistencia calentadora de 1 kW, no la de 2 kW. Si se producen cambios en las condiciones, tal vez si alguien abre una ventana, no hay forma de ajustar el calor para compensar el frío. Éste es un ejemplo de control de lazo abierto, ya que no se retroalimenta la información al calefactor para ajustarlo y mantenerlo a una temperatura constante. El sistema de calefacción y su resistencia calentadora se pueden convertir en un sistema de lazo cerrado si la persona que tiene el termómetro enciende y apaga el interruptor para 1 y 2 kW, dependiendo de la diferencia entre la temperatura real y la temperatura deseada para mantener constante la temperatura de la habitación. En este caso, existe una retroalimentación, la entrada del sistema se ajusta según si su salida corresponde a la temperatura requerida. Esto significa que la entrada del interruptor depende de la desviación de la temperatura real respecto a la temperatura deseada; la diferencia entre ambas se obtiene mediante un comparador, que en este caso es la persona. En la Figura 1.9 se muestran ambos sistemas.

Un ejemplo cotidiano de un sistema de control de lazo abierto es el tostador. El control se ejerce mediante el establecimiento de un reloj temporizador que determina la cantidad de tiempo en la que el pan debe tostarse. El tono café, resultado de la acción de tostado, se determina únicamente por este tiempo preestablecido. No existe retroalimentación para controlar el grado de tostado para un tono café requerido.

Para ilustrar aún más las diferencias entre los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado, considere un motor. Con un sistema de lazo abierto, la velocidad del eje está determinada sólo por el ajuste inicial de una perilla que afecta el voltaje aplicado al motor. Cualquier cambio en el voltaje de alimentación, o en las características del motor como consecuencia de cambios en la temperatura,

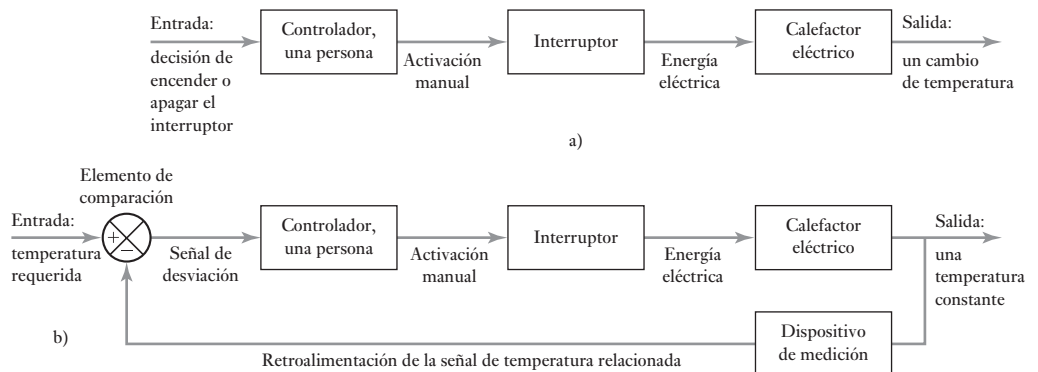


Figura 1.9 Calentamiento de la habitación: a) sistema de lazo abierto, b) sistema de lazo cerrado.

o bien en la carga del eje, cambiará su velocidad, pero sin compensar dicho cambio. No existe retroalimentación. En el caso de un sistema de lazo cerrado, el ajuste inicial de la perilla de control corresponde a cierta velocidad del eje, que se mantendrá constante mediante la retroalimentación, independientemente de los cambios en el voltaje de alimentación, las características del motor o la carga. En un sistema de lazo abierto, la salida del sistema no tiene efecto en la señal de entrada. En un sistema de control de lazo cerrado, la salida sí tiene efecto en la señal de entrada, modificándola para mantener la señal de salida en el valor requerido.

Los sistemas de lazo abierto tienen la ventaja de ser relativamente sencillos, por lo que su costo es bajo y en general su confiabilidad es buena. Sin embargo, con frecuencia son imprecisos ya que no hay corrección de errores. Los sistemas de lazo cerrado tienen la ventaja de ser bastante precisos para igualar el valor real y el deseado. Pero son más complejos y, por lo tanto, más costosos y con mayor probabilidad de descomposturas debido a la mayor cantidad de componentes.

1.5.3 Elementos básicos de un sistema de lazo cerrado

En la Figura 1.10 se muestra la configuración general de un sistema básico de lazo cerrado. Consta de los siguientes elementos:

1 Elemento comparador/comparador

Compara el valor deseado o de referencia de la condición variable que se controla con el valor medido de lo que se produce y genera una señal de error. Se puede considerar que suma la señal de referencia, positiva, a la señal del valor medido, que en este caso es negativa:

$$\text{señal de error} = \text{señal del valor de referencia} - \text{señal del valor medido}$$

En general, el símbolo utilizado para representar un elemento en el que se suman las señales es un círculo dividido; cada entrada va a un segmento. Como todas las entradas se suman, la entrada de retroalimentación se indica como negativa y la señal de referencia como positiva, de manera que la suma da la diferencia entre las señales. Un **lazo de retroalimentación** es el medio por el cual una señal relacionada con la condición real producida se retroalimenta para modificar la señal de entrada de un proceso. Se dice que la **retroalimentación negativa** es cuando la señal que se retroalimenta se resta al valor de entrada. Para controlar un sistema se requiere la retroalimentación negativa. La **retroalimentación positiva** se presenta cuando la retroalimentación de la señal se suma a la señal de entrada.

2 Elemento de control/controlador

En cuanto recibe una señal de error, el controlador decide qué acción llevar a cabo. Podría tratarse, por ejemplo, de una señal para accionar un interruptor o abrir una válvula. El plan de control que aplica el controlador

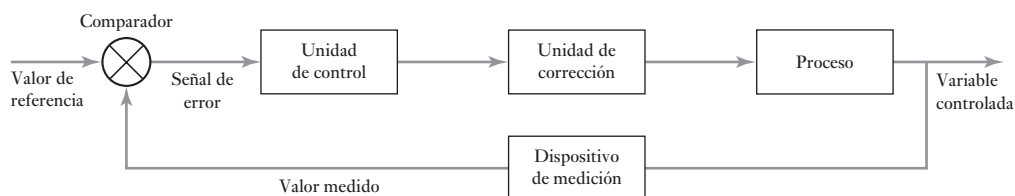


Figura 1.10 Elementos de un sistema de control de lazo cerrado.

podría consistir en entregar una señal que encienda o apague un dispositivo al producirse un error, como en el caso del termostato de una habitación; o quizás una señal que abra o cierre proporcionalmente una válvula, de acuerdo con la magnitud del error. Las acciones de control pueden ser **sistemas alambrados**, en cuyo caso la acción de control se define de manera permanente por la conexión entre los elementos; o bien, pueden ser **sistemas programables**, donde el algoritmo de control se almacena en una unidad de memoria y se puede modificar con una reprogramación. En el Capítulo 10 se analizan los controladores.

3 *Elemento correcto*

El elemento de actuación produce un cambio en el proceso a fin de corregir o modificar la condición controlada. Puede ser un interruptor que enciende un calentador para aumentar la temperatura de un proceso, o una válvula que al abrirse permite la entrada de un mayor volumen de líquido al proceso. El término **actuador** designa al elemento de una unidad de corrección que proporciona la energía para realizar la acción de control. Los elementos de corrección se tratan en los Capítulos 7, 8 y 9.

4 *Elemento de proceso / planta*

El proceso es aquello que se está controlando. Puede tratarse de la habitación de una casa cuya temperatura se controla o de un tanque con agua cuyo nivel se controla.

5 *Elemento de medición*

El elemento de medición produce una señal relacionada con el estado de la variable del proceso que se controla. Podría tratarse de un interruptor que se enciende cuando alcanza determinada posición o de un termopar que produce una fem relacionada con la temperatura.

En el caso del sistema de lazo cerrado de la Figura 1.10, para una persona que controla la temperatura de una habitación, los elementos del sistema son:

Variable controlada	–	temperatura de la habitación
Valor de referencia	–	temperatura deseada de la habitación
Comparador	–	persona que compara el valor medido y el valor de temperatura deseado
Señal de error	–	diferencia entre las temperaturas medida y deseada
Controlador	–	persona
Unidad de corrección	–	interruptor del calentador
Proceso	–	calentamiento mediante un calentador
Dispositivo de medición	–	termómetro

Un sistema de control automático para el control de una habitación puede involucrar un elemento termostático el cual es sensible a la temperatura. Se enciende cuando la temperatura cae por debajo de un valor establecido y se apaga cuando lo alcanza (Figura 1.11). Este interruptor sensible a la temperatura se usa entonces para encender el calentador. El elemento termostático tiene las funciones combinadas de comparación del valor de la temperatura requerida con el que tiene lugar y controla la operación de un interruptor. A menudo, éste es el caso que los elementos en los sistemas de control son capaces de combinar una cantidad de funciones.

En la Figura 1.12 se muestra un ejemplo de un sistema de control sencillo que sirve para mantener constante el nivel del agua en un tanque. El valor de

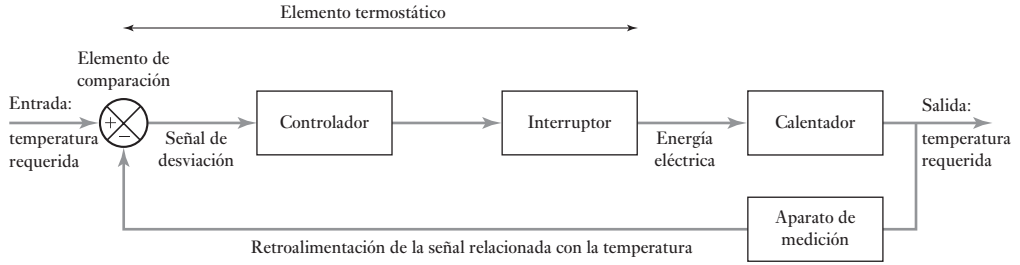


Figura 1.11 Calentamiento de una habitación: un sistema de lazo cerrado.

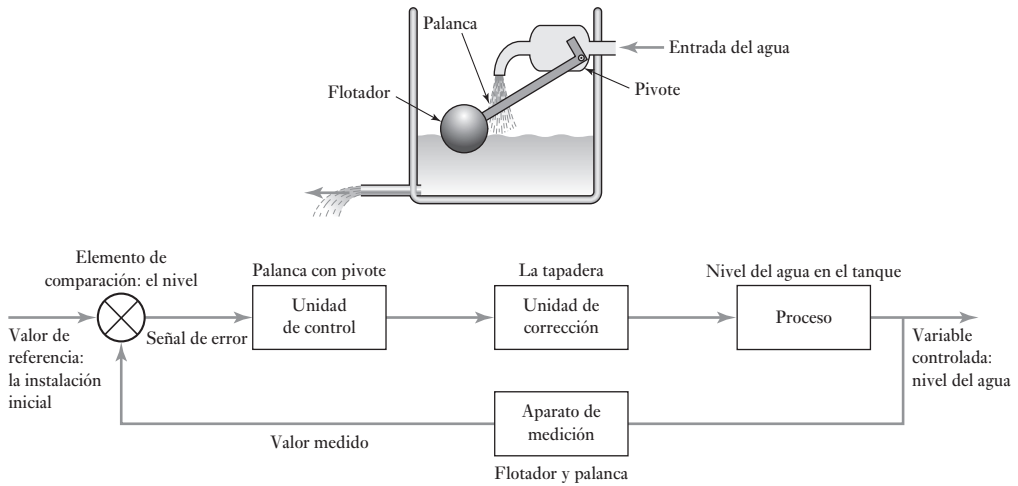


Figura 1.12 El control automático del nivel del agua.

referencia es el ajuste inicial del brazo de la palanca, de manera que interrumpa el suministro de agua justo en el nivel deseado. Al salir el agua del tanque, el flotador se desplaza hacia abajo, junto con el nivel del agua. Esto provoca el giro de la palanca, y permite la entrada de agua. El flujo continúa hasta que el flotador sube al punto en que la palanca impide la entrada de más agua. Se trata de un sistema de lazo cerrado cuyos elementos son:

- | | |
|-------------------------|--|
| Variable controlada | – nivel del agua en el tanque |
| Valor de referencia | – ajuste inicial del flotador y posición de la palanca |
| Comparador | – la palanca |
| Señal de error | – diferencia entre las posiciones real e inicial de la palanca |
| Controlador | – palanca con pivote |
| Unidad de corrección | – tapadera con la que abre o cierra el paso del agua |
| Proceso | – nivel del agua en el tanque |
| Dispositivo de medición | – flotador y palanca |

Lo anterior es un ejemplo de sistema de control de lazo cerrado que involucra sólo elementos mecánicos. ¿se puede colocar la palabra “elementos” com-

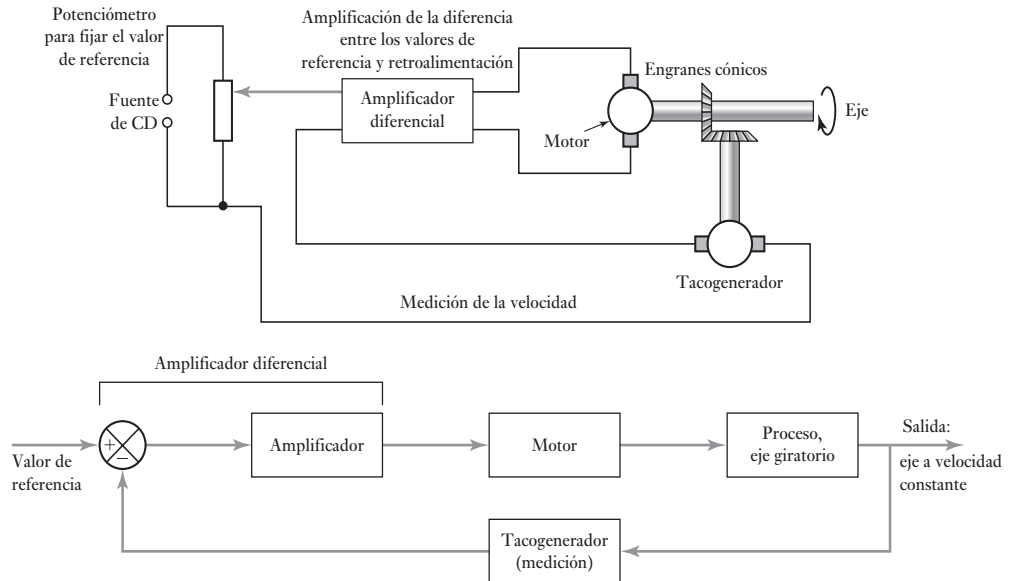


Figura 1.13 Control de la velocidad angular.

pleta? También habría sido posible controlar el nivel del líquido con un sistema de control electrónico. En este caso se tendría un sensor de nivel para producir una señal eléctrica que serviría, después de un acondicionamiento adecuado, como entrada a una computadora donde se compara con un valor predeterminado; la diferencia sería la señal de error, que se utiliza para dar una respuesta adecuada de la salida de la computadora. Ésta, después de acondicionarla, se usa para controlar el movimiento de un actuador en la válvula de control de flujo y determinar la cantidad de agua que se deja entrar al tanque.

En la Figura 1.13 se muestra un sistema de control automático sencillo para la velocidad angular de un eje. Mediante un potenciómetro se fija el valor de referencia, es decir el voltaje que se alimenta al amplificador diferencial y que sirve como valor de referencia de la velocidad angular deseada. El amplificador diferencial se usa para comparar y amplificar los valores de referencia y de retroalimentación, es decir amplifica la señal de error. Esta señal amplificada se envía a un motor, que a su vez ajusta la velocidad angular del eje. La velocidad del eje se mide utilizando un tacogenerador, conectado al eje mediante un par de engranes cónicos. La señal del tacogenerador se retroalimenta al amplificador diferencial:

Variable controlada	–	velocidad angular del eje
Valor de referencia	–	ajuste inicial de deslizamiento en el potenciómetro
Comparador	–	el amplificador diferencial
Señal de error	–	diferencia entre la salida desde el potenciómetro y desde el sistema tacogenerador
Controlador	–	el amplificador diferencial
Unidad de corrección	–	el motor
Proceso	–	engrane rotatorio
Dispositivo de medición	–	el tacogenerador

1.5.4 Sistemas de control análogos y digitales

En los **sistemas análogos** todas las señales son funciones continuas de tiempo y es el tamaño de la señal la que es una medida de la variable (Figura 1.14a). Los ejemplos presentados hasta el momento en este capítulo son de ese tipo. Los **sistemas digitales** pueden considerarse como una secuencia de señales de encendido/apagado, el valor de la variable que se representa por la secuencia de pulsos de encendido/apagado (Figura 1.14b).

Al utilizar una señal digital para que represente una señal análoga continua, la señal análoga se muestrea en instantes particulares de tiempo y los valores de la muestra se convierten efectivamente en un número digital, es decir en una secuencia particular de señales digitales. Por ejemplo, podríamos tener para una señal digital de tres dígitos la secuencia digital de:

ningún pulso, ningún pulso, un pulso que representa una señal análoga de 0V,
ningún pulso, ningún pulso, un pulso que representa 1V,
ningún pulso, pulso, ningún pulso que representa 2V,
ningún pulso, pulso, pulso que representa 3V,
pulso, ningún pulso, ningún pulso que representa 4V,
pulso, ningún pulso, pulso que representa 5V,
pulso, pulso, ningún pulso que representa 6V,
pulso, pulso, pulso que representa 7V.

Dado que la mayoría de las situaciones que se han de controlar son análogas por naturaleza y que son las entradas y las salidas de sistemas de control, por ejemplo una entrada de temperatura y la salida de un calentador, una característica necesaria de un sistema de control digital es que las entradas análogas reales se deben convertir a formas digitales y las salidas digitales deben volver a formas análogas reales. Esto implica el uso de convertidores análogos a digitales (ADC) para las entradas y convertidores digitales a análogos (DAC) para las salidas.

La Figura 1.15 a) muestra los elementos básicos del sistema de control digital de lazo cerrado; compárelo con el sistema análogo de lazo abierto en la Figura 1.10. El valor de referencia, o punto de establecimiento, debe ser una entrada a partir de un interruptor. Los elementos del convertidor análogo a digital (ADC) y del convertidor digital a análogo (DAC) están incluidos en el lazo a fin de que se pueda reemplazar el controlador digital con señales digitales

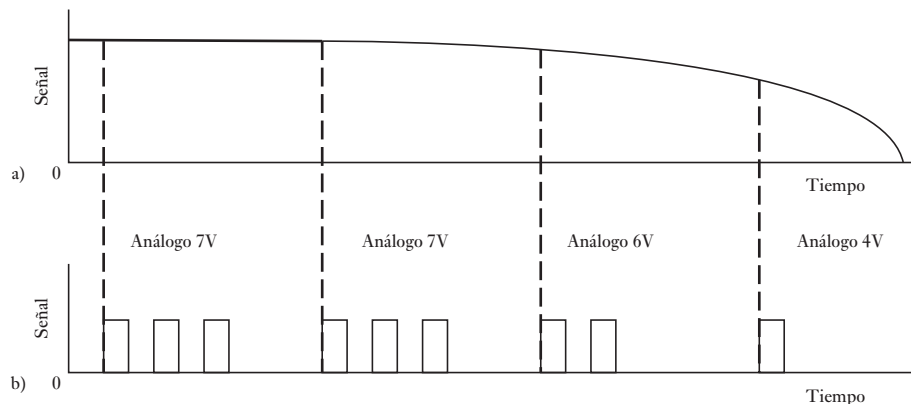


Figura 1.14 Señales: a) análoga y b) la versión digital de la señal análoga que muestra la corriente de señales muestreadas.

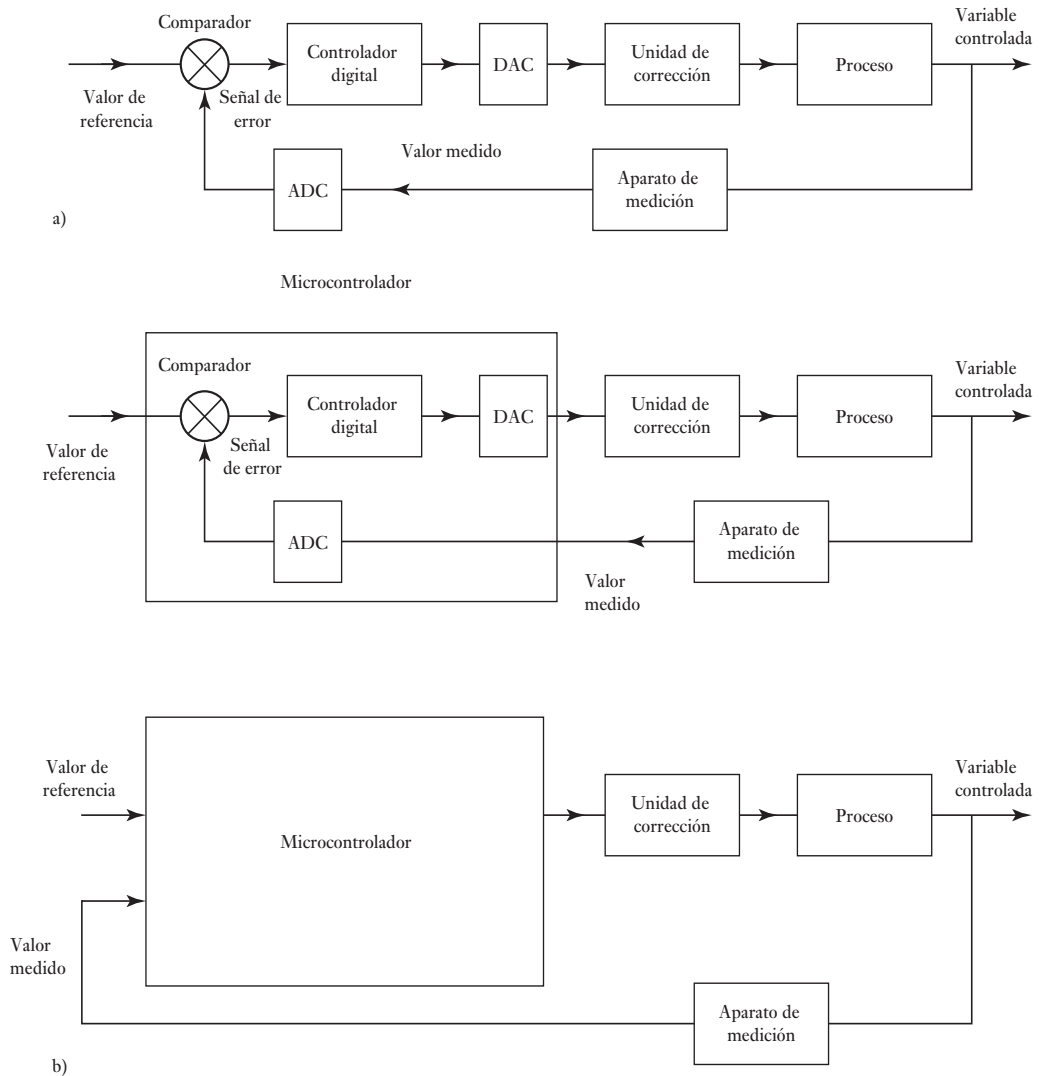


Figura 1.15 a) Elementos básicos de un sistema de control de lazo cerrado, y b) sistema de control de un microcontrolador.

desde sistemas de medición análogos, y su salida de señales digitales se puedan convertir a una forma análoga para operar las unidades de corrección. Pareciera que habría que agregar un grado de complejidad al sistema de control para tener esta conversión análoga a digital y la conversión digital a análoga, pero hay algunas ventajas importantes: las operaciones digitales se pueden controlar mediante un programa, es decir un conjunto de instrucciones establecidas; el almacenamiento de información es más fácil; la precisión puede ser mayor; los circuitos digitales se ven menos afectados por el ruido, e inclusive son más fáciles de diseñar.

El controlador digital podría ser una computadora que correría un programa, digamos una parte de un software, para implementar las acciones requeridas. El término algoritmo de control se emplea para describir la secuencia de pasos que se requieren para resolver la problemática del control. El algoritmo

de control que se utilizaría para un control digital se podría describir por los siguientes pasos:

- Leer el valor de referencia, es decir el valor deseado.
- Leer la salida de la planta real desde el ADC.
- Calcular la señal de error.
- Calcular la salida requerida del controlador.
- Enviar la salida del controlador al DAC.
- Esperar el siguiente intervalo de muestreo.

Sin embargo, muchas de las aplicaciones no necesitan el gasto de una computadora y un microchip bastaría. Por lo tanto, en las aplicaciones de mecatrónica se suele utilizar un microcontrolador para un control digital. Un microcontrolador es un microprocesador con elementos integrados agregados como una memoria y convertidores análogo a digital y digital a análogo, los cuales se pueden conectar directamente a la planta que se va a controlar de modo que el arreglo podría ser como se muestra en la Figura 1.15 b. Entonces, el algoritmo de control podría ser:

- Leer el valor de referencia, es decir el valor deseado.
- Leer la salida de la planta real desde su puerto de entrada del ADC.
- Calcular la señal de error.
- Calcular la salida requerida del controlador.
- Enviar la salida del controlador a su puerto de salida del DAC.
- Esperar el siguiente intervalo de muestreo.

Un ejemplo de un sistema de control digital puede ser un sistema de control automático para el control de la temperatura de la habitación que incluye un sensor de temperatura que da una señal análoga, la cual después de una señal de acondicionamiento apropiada para convertirla en señal digital, es colocada en la entrada del sistema de microprocesador donde se compara con el conjunto de valor y una señal de error generada. Entonces, un controlador digital la sigue para dar a esta salida una señal digital que, una vez emitida la señal apropiada de acondicionamiento para dar un equivalente análogo, se puede utilizar para controlar un calentador y por lo tanto la temperatura de la habitación. Tal sistema puede ser programado con facilidad para diferentes temperaturas en diferentes tiempos del día.

Para ilustrar más sobre el sistema de control digital, la Figura 1.16 muestra una forma de sistema de control digital para la velocidad que un motor puede alcanzar. Compare esto con el sistema análogo en la Figura 1.13.

El software que se utiliza con un controlador digital necesita ser capaz de:

- Leer datos desde su puerto de entrada.
- Llevar datos de transferencia internos y operaciones matemáticas.
- Enviar datos a sus puertos de salida.

Además, contendrá:

Estructuras para determinar en qué momentos se implementará el sistema.

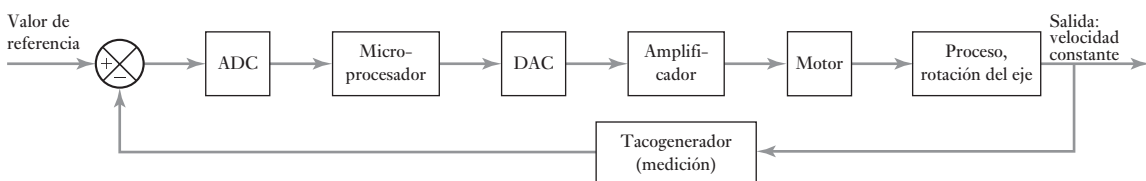


Figura 1.16 Control de velocidad angular.

De esta forma podríamos contar con que el programa sólo espera que ocurra el tiempo de muestreo de ADC y luego salte a la acción cuando se presente una entrada de una muestra. El término **poleo** se emplea en situaciones como éstas, cuando el programa verifica constantemente los puertos de entrada para cada evento de muestreo. De modo que debemos:

- Comprobar los puertos de entrada para señales de entrada.
- No ejecutar si no hay señales.
- Comprobar los puertos de entrada para señales de entrada.
- No ejecutar si no hay señales.
- Comprobar los puertos de entrada para señales de entrada.
- Leer datos ante señal desde sus puertos de entrada.
- Llevar datos de transferencia internos y operaciones matemáticas.
- Enviar datos a sus puertos de salida.
- Comprobar los puertos de entrada para señales de entrada.
- No ejecutar si no hay señales.
- Y así sucesivamente.

Una alternativa de poleo es utilizar un **control de interrupción**. El programa no comprueba sus puertos de entrada pero recibe una señal cuando se presenta una entrada. Esta señal puede provenir de un reloj externo el cual proporciona una señal cada vez que el ADC toma una muestra.

- No hay señal de reloj externo.
- No actuar.
- Señal de reloj externo de que se ha dado una entrada.
- Leer datos desde sus puertos de entrada.
- Llevar datos de transferencia internos y operaciones matemáticas.
- Enviar datos a sus puertos de salida.
- Esperar la siguiente señal del reloj externo.

1.5.5 Controladores secuenciales

Existen diversas situaciones en las que el control se ejerce mediante elementos que se encienden o apagan a tiempos o valores preestablecidos para controlar los procesos y producir una secuencia escalonada de operaciones. Por ejemplo, una vez concluido el paso 1, se inicia el paso 2; cuando éste concluye, se inicia el paso 3, y así sucesivamente.

El término **control secuencial** se usa cuando las acciones están ordenadas estrictamente de acuerdo con una secuencia definida en un tiempo o por una sucesión de eventos. Un control como el anterior se obtiene mediante un circuito eléctrico que cuenta con grupos de relevadores o de interruptores operados por levas, los cuales se conectan de manera que se produzca la secuencia deseada. En la actualidad es probable que este tipo de circuitos se reemplacen por un sistema controlado por microprocesador y con una secuencia controlada por un programa de software.

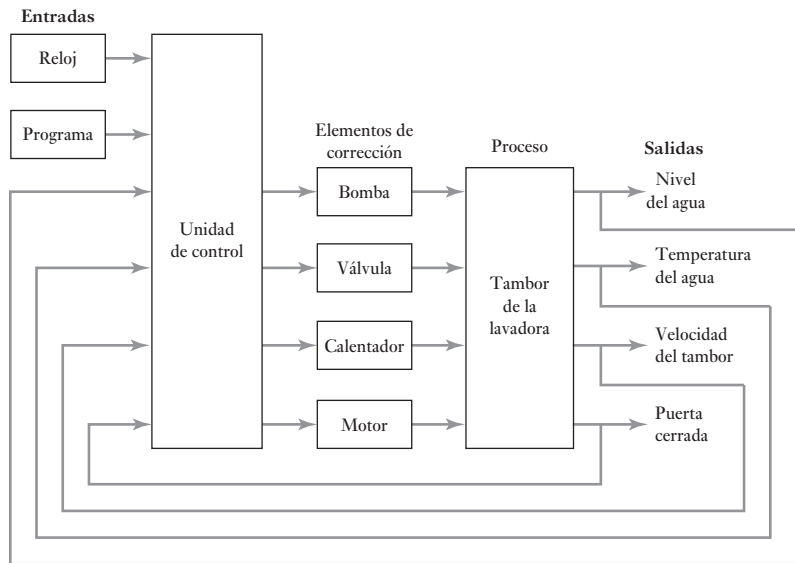
Como ejemplo de control secuencial considere las lavadoras de ropa. Éstas llevan a cabo diversas operaciones en la secuencia correcta. Entre ellas está un ciclo de prelavado, cuando las prendas que se encuentran dentro del tambor se prelavan con agua fría; a continuación se realiza el ciclo de lavado principal con agua caliente; sigue un ciclo de enjuague que emplea varias veces agua fría; por último el ciclo de exprimido, en el cual se elimina el agua de las prendas. Cada una de las operaciones consta de varios pasos. Por ejemplo, durante

el ciclo de prelavado se abre una válvula para llenar con agua el tambor hasta un nivel deseado, se cierra la válvula, se enciende el motor del tambor y gira durante cierto tiempo, luego se activa la bomba para vaciar el tambor de agua. La secuencia de operaciones es llamada **programa**, es decir la secuencia de instrucciones en cada programa que es predefinida y “desarrollada” en el controlador usado.

En la Figura 1.17 se muestra el sistema básico de una lavadora de ropa, que da una idea general de los elementos que lo constituyen. El sistema que solía emplearse como controlador de la lavadora era un sistema mecánico que empleaba un grupo de interruptores operados por levas, es decir interruptores mecánicos, un sistema que es fácilmente ajustable y que proporciona una gran variedad de programas.

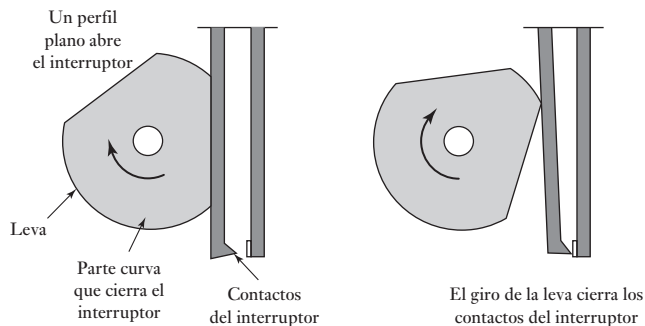
En la Figura 1.18 se muestra el principio básico de este tipo de interruptores. Al encender la lavadora comienza a girar lentamente el eje de un pequeño motor, con una rotación proporcional al tiempo. Dicha rotación hace girar las levas del controlador que a su vez presionan interruptores eléctricos y encienden los circuitos en la secuencia correcta. El perfil de la leva determina el momento en el que opera un interruptor. Es decir, los perfiles de las levas son los medios a través de los cuales se especifica y guarda el programa en la lavadora. La secuencia de instrucciones y las instrucciones utilizadas en un programa de lavado en particular están definidas por el grupo de levas elegido. En las

Figura 1.17 Sistema de lavadora.



Retroalimentación de las salidas del nivel del agua, temperatura del agua, velocidad del tambor y cierre de la puerta.

Figura 1.18 Interruptor operado por levas.



lavadoras modernas, el controlador es un microprocesador y el programa no se obtiene con la posición mecánica de las levas, sino mediante un programa de software. Al microprocesador que controla la lavadora se le puede considerar como ejemplo del enfoque mecatrónico en el que un sistema mecánico se ha integrado con controles electrónicos. Como consecuencia, un sistema mecánico voluminoso es reemplazado por un microprocesador mucho más compacto.

Durante el ciclo de prelavado, una válvula eléctrica se abre al aplicar una corriente y se cierra cuando cesa la corriente. Esta válvula acepta la entrada de agua fría en el tambor durante un lapso determinado por el perfil de la leva, o por la salida del microprocesador utilizado para operar el interruptor. Sin embargo, como el requisito es un nivel específico de agua en el tambor de la lavadora, se necesita otro mecanismo que impida que el agua siga llegando al tambor, durante el tiempo permitido y una vez que se alcanza el nivel requerido. Un sensor produce una señal cuando el nivel del agua llega al nivel preestablecido y produce una salida en el microprocesador que se utiliza para interrumpir el paso de corriente a la válvula. En el caso de la válvula controlada por levas, el sensor acciona un interruptor, que cierra la válvula por la que llega el agua al tambor de la lavadora. Una vez concluido lo anterior, el microprocesador o el giro de las levas, activa una bomba para vaciar el tambor.

Durante el ciclo de lavado principal, el microprocesador produce una salida, que inicia una vez concluida la parte del prelavado del programa; en el caso del sistema que funciona por leva, ésta tiene un perfil tal que empieza a operar cuando termina el ciclo de prelavado. Activa una corriente en un circuito para abrir una válvula que deja entrar agua fría en el tambor. Se detecta este nivel y se interrumpe el paso del agua al alcanzar el nivel requerido. A continuación, el microprocesador o las levas proporcionan una corriente que sirve para activar un interruptor que suministra una corriente mayor a un calentador eléctrico para calentar el agua. Un sensor de temperatura interrumpe la corriente una vez que la temperatura del agua llega al valor predefinido. El microprocesador o las levas encienden el motor del tambor y se inicia la rotación. Esto continúa durante el tiempo determinado por el microprocesador o por el perfil de la leva, y después se apaga el motor. A continuación, el microprocesador o una leva, alimentan una corriente en una bomba de descarga para vaciar el agua del tambor.

La parte del enjuague de esta operación es una secuencia de señales para abrir válvulas que permiten la entrada de agua fría en la lavadora, interrumpen esta entrada, activan el motor para que gire el tambor, activan una bomba para vaciar el agua del tambor y repiten esta secuencia varias veces.

La parte final de la operación es cuando el microprocesador o una leva, activa el motor a una velocidad mayor que en el caso del enjuague, para exprimir las prendas.

1.6

Controlador lógico programable

En muchos sistemas sencillos tal vez exista un microcontrolador integrado, que sea un microprocesador con memoria todo integrado dentro de un chip, que ha sido específicamente programado para la tarea en cuestión. Una forma más adaptable es el **controlador lógico programable (PLC)**. Éste es un controlador basado en un microprocesador que utiliza memoria programable para almacenar instrucciones y para implementar funciones como secuencia, conteo de tiempo y aritmética lógicas para controlar eventos y que puedan reprogramarse con facilidad para distintas tareas. En la Figura 1.19 se muestra la acción del control de un controlador lógico programable, las salidas como señales desde, por ejemplo, interruptores cerrados y el programa que se