

# Contenido

---

<i>Prefacio</i> .....	xvii
<i>Acerca de los autores</i> .....	xxix
<b>CAPÍTULO 1</b> <i>Introducción a los sistemas de control</i> .....	1
1.1. Introducción .....	2
1.2. Historia del control automático .....	4
1.3. Dos ejemplos del uso de la realimentación .....	7
1.4. La práctica de la ingeniería de control .....	8
1.5. Ejemplos de sistemas de control modernos .....	9
1.6. Ensamblaje automático y robots .....	16
1.7. La evolución futura de los sistemas de control .....	17
1.8. Diseño en ingeniería .....	18
1.9. Sistemas mecatrónicos .....	19
1.10. Diseño de sistemas de control .....	23
1.11. Ejemplo de diseño: Control de velocidad de una mesa giratoria .....	24
1.12. Ejemplo de diseño: Sistema de control para la dosificación de insulina ....	26
1.13. Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	27
Ejercicios .....	29
Problemas .....	30
Problemas avanzados .....	34
Problemas de diseño .....	35
Términos y conceptos .....	36
<b>CAPÍTULO 2</b> <i>Modelos matemáticos de sistemas</i> .....	37
2.1. Introducción .....	38
2.2. Ecuaciones diferenciales de sistemas físicos .....	38
2.3. Aproximaciones lineales de sistemas físicos .....	43
2.4. La transformada de Laplace .....	46
2.5. La función de transferencia de sistemas lineales .....	52
2.6. Modelos de diagramas de bloques .....	63
2.7. Modelos de grafos de flujo de señal .....	72
2.8. Análisis de sistemas de control por computador .....	78
2.9. Ejemplos de diseño .....	79
2.10. La simulación de sistemas utilizando MATLAB .....	89
2.11. Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	102

2.12. Resumen .....	105
Ejercicios .....	105
Problemas .....	111
Problemas avanzados .....	124
Problemas de diseño .....	125
Problemas con MATLAB .....	126
Términos y conceptos .....	128

**CAPÍTULO 3**    *Modelos en variables de estado* ..... 130

---

3.1. Introducción .....	131
3.2. Las variables de estado de un sistema dinámico .....	131
3.3. La ecuación diferencial del estado .....	134
3.4. Modelos de grafos de flujo de señal y diagramas de bloques .....	137
3.5. Modelos alternativos de grafos de flujo de señal y diagramas de bloques ..	147
3.6. La función de transferencia de la ecuación de estado .....	153
3.7. La respuesta temporal y la matriz de transición de estado .....	154
3.8. Una evaluación en tiempo discreto de la respuesta temporal .....	158
3.9. Ejemplo de diseño: Impresora con transmisión por correo .....	163
3.10. Análisis de modelos de variables de estado utilizando MATLAB .....	170
3.11. Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	173
3.12. Resumen .....	176
Ejercicios .....	177
Problemas .....	179
Problemas avanzados .....	186
Problemas de diseño .....	188
Problemas con MATLAB .....	189
Términos y conceptos .....	190

**CAPÍTULO 4**    *Características de los sistemas de control con realimentación* ..... 191

---

4.1. Sistemas de control en lazo abierto y en lazo cerrado .....	192
4.2. Sensibilidad de los sistemas de control a variaciones en los parámetros ...	194
4.3. Control de la respuesta transitoria de los sistemas de control .....	197
4.4. Señales de perturbación en un sistema de control con realimentación .....	201
4.5. Error en estado estacionario .....	206
4.6. El coste de la realimentación .....	208
4.7. Ejemplo de diseño: Máquinas taladradoras en el canal inglés .....	209
4.8. Ejemplo de diseño: Vehículo explorador de Marte .....	212
4.9. Características de los sistemas de control utilizando MATLAB .....	214
4.10. Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	219
4.11. Resumen .....	224
Ejercicios .....	226
Problemas .....	228
Problemas avanzados .....	235
Problemas de diseño .....	238
Problemas con MATLAB .....	240
Términos y conceptos .....	242

<b>CAPÍTULO 5</b>	<b><i>Comportamiento de los sistemas de control con realimentación</i></b> ...	243
<hr/>		
5.1.	Introducción .....	244
5.2.	Señales de entrada de prueba .....	245
5.3.	Comportamiento de un sistema de segundo orden .....	247
5.4.	Efectos de un tercer polo y un cero sobre la respuesta de un sistema de segundo orden .....	253
5.5.	Estimación de la razón de amortiguamiento .....	258
5.6.	Localización de las raíces en el plano $s$ y respuesta transitoria .....	259
5.7.	El error en estado estacionario de los sistemas de control con realimentación ..	260
5.8.	El error en estado estacionario de los sistemas con realimentación no unitaria ..	265
5.9.	Índices de comportamiento .....	267
5.10.	Simplificación de sistemas lineales .....	276
5.11.	Ejemplo de diseño: Control de apuntamiento del telescopio Hubble .....	279
5.12.	Comportamiento de sistemas utilizando MATLAB y Simulink .....	282
5.13.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	291
5.14.	Resumen .....	295
	Ejercicios .....	295
	Problemas .....	299
	Problemas avanzados .....	304
	Problemas de diseño .....	306
	Problemas con MATLAB .....	308
	Términos y conceptos .....	310
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b><i>Estabilidad de los sistemas lineales con realimentación</i></b> .....	311
<hr/>		
6.1.	El concepto de estabilidad .....	312
6.2.	El criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz .....	316
6.3.	Estabilidad relativa de los sistemas de control con realimentación .....	324
6.4.	Estabilidad de los sistemas con variables de estado .....	325
6.5.	Ejemplo de diseño: Control de giro de un vehículo con bandas de rodamiento ..	329
6.6.	Estabilidad de sistemas utilizando MATLAB .....	331
6.7.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	339
6.8.	Resumen .....	342
	Ejercicios .....	343
	Problemas .....	345
	Problemas avanzados .....	348
	Problemas de diseño .....	350
	Problemas con MATLAB .....	352
	Términos y conceptos .....	353
<b>CAPÍTULO 7</b>	<b><i>Método del lugar de las raíces</i></b> .....	354
<hr/>		
7.1.	Introducción .....	355
7.2.	Concepto del lugar de las raíces .....	355
7.3.	Procedimiento del lugar de las raíces .....	359
7.4.	Ejemplo de análisis y diseño de un sistema de control utilizando el método del lugar de las raíces .....	374

7.5.	Diseño de parámetros por el método del lugar de las raíces .....	378
7.6.	Sensibilidad y el lugar de las raíces .....	383
7.7.	Controladores de tres términos (PID) .....	391
7.8.	Ejemplo de diseño: Sistema de control de un manipulador láser .....	393
7.9.	El diseño de un sistema de control de un robot .....	396
7.10.	El lugar de las raíces utilizando MATLAB .....	398
7.11.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	404
7.12.	Resumen .....	405
	Ejercicios .....	409
	Problemas .....	412
	Problemas avanzados .....	421
	Problemas de diseño .....	424
	Problemas con MATLAB .....	430
	Términos y conceptos .....	431
<b>CAPÍTULO 8</b>	<b><i>Métodos de respuesta en frecuencia</i></b> .....	<b>432</b>
8.1.	Introducción .....	433
8.2.	Gráficas de la respuesta en frecuencia .....	435
8.3.	Un ejemplo del trazado del diagrama de Bode .....	452
8.4.	Medidas de la respuesta en frecuencia .....	456
8.5.	Especificaciones de comportamiento en el dominio de la frecuencia .....	458
8.6.	Diagrama de magnitud logarítmica y de fase .....	461
8.7.	Ejemplo de diseño: Sistema de control de una máquina de estampación ...	461
8.8.	Métodos de respuesta en frecuencia utilizando MATLAB .....	465
8.9.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	471
8.10.	Resumen .....	472
	Ejercicios .....	477
	Problemas .....	480
	Problemas avanzados .....	490
	Problemas de diseño .....	491
	Problemas con MATLAB .....	494
	Términos y conceptos .....	496
<b>CAPÍTULO 9</b>	<b><i>Estabilidad en el dominio de la frecuencia</i></b> .....	<b>497</b>
9.1.	Introducción .....	498
9.2.	Transformación de los contornos en el plano $s$ .....	499
9.3.	El criterio de Nyquist .....	504
9.4.	Estabilidad relativa y el criterio de Nyquist .....	516
9.5.	Criterios de comportamiento en el dominio temporal especificados en el do- minio frecuencial .....	522
9.6.	Ancho de banda del sistema .....	529
9.7.	Estabilidad de sistemas de control con retardos .....	530
9.8.	Ejemplo de diseño: Vehículo de reconocimiento controlado de forma remota ..	534
9.9.	Controladores PID en el dominio de la frecuencia .....	537
9.10.	Estabilidad en el dominio de la frecuencia utilizando MATLAB .....	538

9.11. Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	547
9.12. Resumen .....	549
Ejercicios .....	556
Problemas .....	562
Problemas avanzados .....	572
Problemas de diseño .....	574
Problemas con MATLAB .....	579
Términos y conceptos .....	580

---

## **CAPÍTULO 10** *Diseño de sistemas de control con realimentación* ..... 581

10.1. Introducción .....	582
10.2. Enfoques en el diseño de sistemas .....	583
10.3. Redes de compensación en cascada .....	585
10.4. Diseño por adelanto de fase utilizando el diagrama de Bode .....	589
10.5. Diseño por adelanto de fase utilizando el lugar de las raíces .....	595
10.6. Diseño de sistemas utilizando redes de integradores .....	601
10.7. Diseño por retardo de fase utilizando el lugar de las raíces .....	604
10.8. Diseño por retardo de fase utilizando el diagrama de Bode .....	608
10.9. Diseño de sistemas en el diagrama de Bode utilizando métodos analíticos y por computador .....	613
10.10. Sistemas con un prefiltro .....	615
10.11. Diseño para respuesta plana .....	617
10.12. Ejemplo de diseño: Sistema de control del bobinado de un rotor .....	620
10.13. Ejemplo de diseño: El trazador gráfico X-Y .....	623
10.14. Diseño de sistemas utilizando MATLAB .....	626
10.15. Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	633
10.16. Resumen .....	634
Ejercicios .....	636
Problemas .....	638
Problemas avanzados .....	649
Problemas de diseño .....	652
Problemas con MATLAB .....	656
Términos y conceptos .....	658

---

## **CAPÍTULO 11** *Diseño de sistemas realimentados con variables de estados* ..... 659

11.1. Introducción .....	660
11.2. Controlabilidad .....	660
11.3. Observabilidad .....	663
11.4. Diseño del sistema de control con realimentación del vector de estado com- pleto .....	666
11.5. Fórmula de Ackermann .....	670
11.6. Diseño del observador .....	671
11.7. Diseño del compensador: Integración de la realimentación del vector de es- tado completo y del observador .....	675
11.8. Entradas de referencia .....	681

11.9.	Sistemas de control óptimo .....	683
11.10.	Diseño con modelo interno .....	693
11.11.	Ejemplo de diseño: Sistema de verificación automático .....	696
11.12.	Diseño con variables de estado utilizando MATLAB .....	699
11.13.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	707
11.14.	Resumen .....	709
	Ejercicios .....	709
	Problemas .....	710
	Problemas avanzados .....	714
	Problemas de diseño .....	717
	Problemas con MATLAB .....	719
	Términos y conceptos .....	722
<b>CAPÍTULO 12 <i>Sistemas de control robusto</i></b> .....		<b>723</b>
12.1.	Introducción .....	724
12.2.	Sistemas de control robusto y sensibilidad del sistema .....	725
12.3.	Análisis de robustez .....	728
12.4.	Sistemas con parámetros inciertos .....	731
12.5.	El diseño de sistemas de control robustos .....	733
12.6.	Controladores PID .....	738
12.7.	Diseño de sistemas de control PID robustos .....	740
12.8.	Ejemplo de diseño: Autopiloto de un avión .....	745
12.9.	Diseño del sistema de control de un telescopio espacial .....	746
12.10.	Diseño de una bobinadora robusta .....	748
12.11.	Sistema de control robusto con modelo interno .....	751
12.12.	Diseño de una máquina de torneado de diamante de ultra precisión .....	753
12.13.	Sistema de realimentación pseudocuantitativa .....	757
12.14.	Sistemas de control robusto utilizando MATLAB .....	759
12.15.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	762
12.16.	Resumen .....	764
	Ejercicios .....	766
	Problemas .....	767
	Problemas avanzados .....	773
	Problemas de diseño .....	777
	Problemas con MATLAB .....	784
	Términos y conceptos .....	786
<b>CAPÍTULO 13 <i>Sistemas de control digital</i></b> .....		<b>787</b>
13.1.	Introducción .....	788
13.2.	Aplicaciones de los sistemas de control por computador .....	788
13.3.	Sistemas de datos muestreados .....	790
13.4.	La transformada $z$ .....	793
13.5.	Sistemas de datos muestreados en lazo cerrado .....	798
13.6.	Análisis de estabilidad en el plano $z$ .....	800
13.7.	Comportamiento de un sistema de segundo orden de datos muestreados ..	801

13.8.	Sistemas en lazo cerrado con compensación mediante un computador ....	804
13.9.	Diseño del sistema de control del movimiento de una mesa de trabajo ...	806
13.10.	Lugar de las raíces de sistemas de control digital .....	808
13.11.	Implementación de controladores digitales .....	812
13.12.	Sistemas de control digital utilizando MATLAB .....	813
13.13.	Ejemplo de diseño secuencial: Sistema de lectura de una unidad de disco ..	818
13.14.	Resumen .....	820
	Ejercicios .....	820
	Problemas .....	822
	Problemas avanzados .....	824
	Problemas de diseño .....	826
	Problemas con MATLAB .....	827
	Términos y conceptos .....	828
<b>APÉNDICE A</b>	<i>Fundamentos de MATLAB</i> .....	831
<b>APÉNDICE B</b>	<i>Fundamentos de Simulink</i> .....	849
	<i>Referencias</i> .....	858
	<i>Índice</i> .....	869

## RECURSOS WEB

<b>APÉNDICE C</b>	<i>Símbolos y unidades y factores de conversión</i>
<b>APÉNDICE D</b>	<i>Pares de transformadas de Laplace</i>
<b>APÉNDICE E</b>	<i>Una introducción al álgebra matricial</i>
<b>APÉNDICE F</b>	<i>Conversión de decibelios</i>
<b>APÉNDICE G</b>	<i>Números complejos</i>
<b>APÉNDICE H</b>	<i>Pares de transformadas <math>z</math></i>