

# Contenido

## 1. Introducción

1

- 1.1 Introducción 2
- 1.2 Historia de sistemas de control 4
- 1.3 El ingeniero de sistemas de control 9
- 1.4 Características de respuesta y configuraciones de un sistema 10
- 1.5 Objetivos del análisis y diseño 14
  - Introducción al estudio de un caso real 17
- 1.6 El proceso de diseño 21
- 1.7 Diseño asistido por computadora 26
  - Resumen 28
  - Preguntas de repaso 29
  - Problemas 29
  - Bibliografía 35

## 2. Modelado en el dominio de la frecuencia

37

- 2.1 Introducción 38
- 2.2 Repaso de la transformada de Laplace 39
- 2.3 La función de transferencia 49
- 2.4 Funciones de transferencia de redes eléctricas 52
- 2.5 Funciones de transferencia de un sistema mecánico traslacional 68

- 2.6 Funciones de transferencia de un sistema mecánico rotacional 76
- 2.7 Funciones de transferencia para sistemas con engranes 82
- 2.8 Funciones de transferencia de un sistema electromecánico 87
- 2.9 Analogías de un circuito eléctrico 94
- 2.10 No linealidades 97
- 2.11 Linealización 99
  - Estudio de un caso real 105
  - Resumen 109
  - Preguntas de repaso 109
  - Problemas 110
  - Bibliografía 125

### 3. Modelado en el dominio del tiempo

- 3.1 Introducción 128
- 3.2 Algunas observaciones 129
- 3.3 La representación general en el espacio de estados 133
- 3.4 Aplicación de la representación en el espacio de estados 136
- 3.5 Conversión de una función de transferencia al espacio de estados 144
- 3.6 Conversión del espacio de estados a función de transferencia 151
- 3.7 Linealización 154
  - Estudio de un caso real 157
  - Resumen 162
  - Preguntas de repaso 163
  - Problemas 163
  - Bibliografía 172

### 4. Respuesta de tiempo

- 4.1 Introducción 175
- 4.2 Polos, ceros y respuesta del sistema 175
- 4.3 Sistemas de primer orden 179
- 4.4 Sistemas de segundo orden: introducción 182
- 4.5 El sistema general de segundo orden 188
- 4.6 Sistemas de segundo orden subamortiguados 191
- 4.7 Respuesta de sistema con polos adicionales 202
- 4.8 Respuesta de un sistema con ceros 207

- 4.9 Efecto de no linealidades sobre respuesta en tiempo 212
- 4.10 Solución mediante las transformadas de Laplace a las ecuaciones de estado 216
- 4.11 Solución en el dominio del tiempo a las ecuaciones de estado 219
  - Estudio de un caso real 227
  - Resumen 232
  - Preguntas de repaso 234
  - Problemas 235
  - Problemas de diseño 245
  - Bibliografía 249

## 5. Reducción de subsistemas múltiples

- 5.1 Introducción 251
- 5.2 Diagramas de bloques 251
- 5.3 Análisis y diseño de sistemas realimentados 261
- 5.4 Gráficas de flujo de señales 264
- 5.5 Regla de Mason 267
- 5.6 Gráficas de flujo de señales a partir de ecuaciones de estado 270
- 5.7 Representaciones alternativas en el espacio de estados 273
- 5.8 Transformaciones de similitud 283
  - Estudio de un caso real 295
  - Resumen 301
  - Preguntas de repaso 302
  - Problemas 303
  - Problemas de diseño 320
  - Bibliografía 323

## 6. Estabilidad

- 6.1 Introducción 325
- 6.2 Criterio de Routh-Hurwitz 329
- 6.3 Criterio de Routh-Hurwitz: casos especiales 332
- 6.4 Criterio de Routh-Hurwitz: ejemplos adicionales 340
- 6.5 Estabilidad en el espacio de estados 348
  - Estudio de un caso real 351
  - Resumen 353

Preguntas de repaso 354

Problemas 354

Problemas de diseño 362

Bibliografía 365

## 7. Errores en estado estable

7.1 Introducción 368

7.2 Error en estado estable para sistemas con realimentación unitaria 372

7.3 Constantes de error estático y tipo de sistema 378

7.4 Especificaciones de error en estado estable 383

7.5 Error en estado estable para perturbaciones 385

7.6 Error en estado estable para sistemas con realimentación no unitaria 388

7.7 Sensibilidad 392

7.8 Error en estado estable para sistemas en el espacio de estados 395

Estudio de un caso real 399

Resumen 402

Preguntas de repaso 403

Problemas 404

Problemas de diseño 418

Bibliografía 421

## 8. Técnicas del lugar geométrico de las raíces

422

8.1 Introducción 423

8.2 Definición del lugar geométrico de las raíces 427

8.3 Propiedades del lugar geométrico de las raíces 430

8.4 Trazado del lugar geométrico de las raíces 433

8.5 Afinación del trazo 438

8.6 Un ejemplo 449

8.7 Diseño de la respuesta transitoria por medio del ajuste de la ganancia 452

8.8 Lugar geométrico de las raíces generalizado 458

8.9 Lugar geométrico de las raíces para sistemas con realimentación positiva 459

8.10 Sensibilidad de los polos 463

Estudio de un caso real 465

Resumen	470
Preguntas de repaso	471
Problemas	472
Problemas de diseño	487
Bibliografía	494

## 9. Diseño por medio del lugar geométrico de las raíces 495

9.1	Introducción	496
9.2	Mejoramiento de error en estado estable por medio de compensación en cascada	499
9.3	Mejoramiento de la respuesta transitoria por medio de compensación en cascada	510
9.4	Mejoramiento del error en estado estable y respuesta transitoria	527
9.5	Compensación mediante realimentación	543
9.6	Construcción física del compensador	554
	Estudio de un caso real	560
	Resumen	566
	Preguntas de repaso	567
	Problemas	568
	Problemas de diseño	578
	Bibliografía	584

## 10. Técnicas de respuesta en frecuencia 585

10.1	Introducción	586
10.2	Aproximaciones asintóticas: trazas de Bode	593
10.3	Introducción al criterio de Nyquist	614
10.4	Trazado de un diagrama de Nyquist	619
10.5	Estabilidad por medio del diagrama de Nyquist	626
10.6	Margen de ganancia y margen de fase por medio del diagrama de Nyquist	630
10.7	Estabilidad, margen de ganancia y margen de fase por medio de trazas de Bode	633
10.8	Relación entre respuestas transitoria en lazo cerrado y la respuesta en frecuencia en lazo cerrado	636
10.9	Relación entre respuestas en frecuencia en lazo cerrado y en lazo abierto	640

- 10.10 Relación entre las respuestas transitorias en lazo cerrado y en frecuencia en lazo abierto 646
- 10.11 Características del error en estado estable a partir de respuesta en frecuencia 650
- 10.12 Sistemas con tiempo de retardo 655
  - Estudio de un caso real 665
  - Resumen 667
  - Preguntas de repaso 668
  - Problemas 669
  - Bibliografía 682

**11. Diseño por medio de la respuesta en frecuencia 684**

- 11.1 Introducción 685
- 11.2 Respuesta transitoria por medio de ajuste de ganancia 686
- 11.3 Compensación de atraso de fase 690
- 11.4 Compensación de adelanto de fase 694
- 11.5 Compensación de adelanto-atraso de fase 701
  - Estudio de un caso real 707
  - Resumen 709
  - Preguntas de repaso 710
  - Problemas 711
  - Problemas de diseño 717
  - Bibliografía 718

**12. Diseño por medio del espacio de estados 719**

- 12.1 Introducción 720
- 12.2 Diseño de controlador 721
- 12.3 Controlabilidad 728
- 12.4 Métodos alternos al diseño de un controlador 733
- 12.5 Diseño del observador 738
- 12.6 Observabilidad 746
- 12.7 Métodos alternos al diseño de un observador 750
- 12.8 Diseño del error en estado estable por medio de control integral 757
  - Estudio de un caso real 761
  - Resumen 766

Preguntas de repaso	768
Problemas	769
Problemas de diseño	774
Bibliografía	776
<b>13. Sistemas de control digital</b>	<b>778</b>
13.1 Introducción	779
13.2 Modelado de la computadora digital	783
13.3 La transformada $z$	786
13.4 Funciones de transferencia	792
13.5 Reducción de diagramas de bloques	795
13.6 Estabilidad	798
13.7 Errores en estado estable	806
13.8 Respuesta transitoria en el plano $z$	811
13.9 Diseño de la ganancia sobre el plano $z$	813
13.10 Compensación en cascada a través del plano $s$	817
13.11 Implementación de un compensador digital	821
Estudio de un caso real	824
Resumen	829
Preguntas de repaso	830
Problemas	831
Problemas de diseño	837
Bibliografía	838
Apéndice A Lista de símbolos	839
Apéndice B Tutorial de MATLAB	843
Apéndice C Tutorial de Simulink de MATLAB	897
Apéndice D Tutorial de herramientas GUI de MATLAB	911
Apéndice E Tutorial de las rutinas de matemática simbólica de MATLAB	924
Apéndice F Obtención de un diagrama esquemático para un motor de cd	936
Glosario	940
Respuestas a problemas seleccionados	949

<b>Créditos</b>	955
<b>Índice</b>	957
<b>Apéndice G Matrices, determinantes y sistemas de ecuaciones</b>	<b>CD ROM</b>
G.1 Definiciones y notaciones de matrices	
G.2 Operaciones de matrices	
G.3 Identidades de matrices y determinantes	
G.4 Sistemas de ecuaciones	
Bibliografía	
<b>Apéndice H Ayudas de cálculo para Sistemas de Control</b>	<b>CD ROM</b>
H.1 Respuesta escalón de un sistema representado en el espacio de estados	
H.2 Lugar geométrico de las raíces y respuesta en frecuencia	
<b>Apéndice I Solución de ecuaciones de estado para <math>t_0 \neq 0</math></b>	<b>CD ROM</b>
<b>Apéndice J Reglas del lugar geométrico de las raíces: deducciones</b>	<b>CD ROM</b>
J.1 Comportamiento del lugar geométrico de las raíces en el infinito	
J.2 Deducción del método de transición para puntos de salida	
<b>Soluciones a ejercicios de evaluación de destreza</b>	<b>CD ROM</b>
<b>Archivos para MATLAB</b>	<b>CD ROM</b>
<b>Gráficas para conferencias</b>	<b>CD ROM</b>