

INDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Sistemas de control: que son	1
1.2. Ejemplos de sistemas de control	2
1.3. Sistemas de control en malla abierta y en malla cerrada	3
1.4. Retroalimentación	4
1.5. Características de la retroalimentación	5
1.6. Sistemas de control analógico y digitales	5
1.7. El problema de la ingeniería de los sistemas de control	7
1.8. Modelos o representación de sistemas de control	7
Capítulo 2. Terminología de los Sistemas de Control	18
2.1. Diagramas de bloques: fundamentos	18
2.2. Diagramas de bloques de sistemas de control continuos (analógicos) con retroalimentación	19
2.3. Terminología del diagrama de bloques en malla cerrada	20
2.4. Diagramas de bloques de componentes discretos en el tiempo (datos muestreados digitales), y de sistemas controlados por computador	21
2.5. Terminología suplementaria	24
2.6. Servomecanismos	27
2.7. Regulados	27
Capítulo 3. Ecuaciones Diferenciales, Ecuaciones de Diferencia y Sistemas lineales	47
3.1. Ecuaciones de un sistema	47
3.2. Ecuaciones diferenciales y ecuaciones de diferencia	47
3.3. Ecuaciones diferenciales parciales y ordinarias	48
3.4. Variabilidad e invariancia en el tiempo	49
3.5. Ecuaciones diferenciales y de diferencia lineales y no lineales	49
3.6. El operador diferencial D y la ecuación característica	50
3.7. Independencia lineal y conjuntos fundamentales	51
3.8. Solución de ecuaciones diferenciales lineales ordinarias con coeficientes constantes	53
3.9. La respuesta libre	54
3.10. La respuesta forzada	55
3.11. La respuesta total	56
3.12. Las respuestas transitoria y en estado estacionario	57
3.13. Funciones de singularidad: pasos, rampas e impulsos	57
3.14. Sistemas de segundo orden	59
3.15. Representación por variables de estado de sistemas descritos por ecuaciones diferenciales lineales	60
3.16. Solución de ecuaciones de diferencia lineales con coeficientes constantes	63
3.17. Representación por variables de estado de sistemas descritos por ecuaciones de diferencia lineales	67
3.18. Linealidad y superposición	69

3.19. Causalidad y sistemas realizables físicamente	71
Capítulo 4. La Transformada de Laplace y la Transformada z	92
4.1. Introducción	92
4.2. La transformada de Laplace	92
4.3. La inversa de la transformada de Laplace	93
4.4. Algunas propiedades de la transformada de Laplace y de su inversa	93
4.5. Tabla resumida de transformadas de Laplace	97
4.6. Aplicación de la transformadas de Laplace a la solución de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes	98
4.7. Expansiones en fracciones parciales	103
4.8. Inversas de las transformadas utilizando expansiones en fracciones parciales	105
4.9. La transformada z	106
4.10. Determinación de raíces de polinomios	115
4.11. El plano complejo: diagramas de polos y ceros	118
4.12. Evaluación gráfica de residuos	120
4.13. Sistema de segundo orden	122
Capítulo 5. Estabilidad	145
5.1. Definiciones de estabilidad	145
5.2. Localización de la raíces características en sistemas continuos	145
5.3. Criterio de estabilidad de Routh	146
5.4. Criterio de estabilidad de Hurwitz	147
5.5. Criterio de estabilidad de fracciones continuas	148
5.6. Criterio de estabilidad para sistemas discretos en el tiempo	149
Capítulo 6. Funciones de Transferencia	163
6.1. Definición de función de transferencia de un sistema continuo	163
6.2. Propiedades de la función de transferencia de un sistema continuo	164
6.3. Funciones de transferencia de compensadores y controladores de sistemas de control continuo	165
6.4. Respuesta de tiempo de sistemas continuos	166
6.5. Respuesta de frecuencia del sistema continuo	166
6.6. Funciones de transferencia de sistemas discreto en el tiempo, compensadores y respuestas de tiempo	166
6.7. Respuesta de frecuencia de sistemas discretos en el tiempo	170
6.8. Combinación de elementos continuos y discretos en el tiempo	171
Capítulo 7. Algebra de los Diagramas de Bloques y Funciones de Transferencia de los Sistemas	198
7.1. Introducción	198
7.2. Revisión de fundamentos	198
7.3. Bloques en cascada	199
7.4. Formas canónicas de un sistema de control con retroalimentación	200
7.5. Teoremas de transformación de diagramas de bloques	201
7.6. Sistemas con retroalimentación unitaria	203
7.7. Superposición de entradas múltiples	204
7.8. Reducción de diagramas de bloques complicados	206

Capítulo 8. Grafos de Flujo de Señales	231
8.1. Introducción	231
8.2. Fundamentos de los grafos de flujo de señales	231
8.3. Algebra de los grafos de flujo de señales	232
8.4. Definiciones	234
8.5. construcción de grafos de flujo de señales	235
8.6. La fórmula general de ganancia entrada – salida	237
8.7. Cálculo de la función de transferencia de componentes de cascada	240
8.8. Reducción de diagramas de bloques utilizando grafos de flujo de señales y la fórmula general de ganancia entrada – salida	242
Capítulo 9. Medidas de Sensitividad de un Sistema y Clasificación de Sistemas con Retroalimentación	268
9.1. Introducción	268
9.2. Sensitividad de las funciones de transferencia y de las funciones de respuesta de frecuencia a los parámetros del sistema	268
9.3. Sensitividad de la salida con respecto a los parámetros para los modelos de ecuaciones diferenciales y de diferencia	275
9.4. clasificación de los sistemas continuos con retroalimentación	277
9.5. Constantes de error de posición para sistemas continuos con retroalimentación unitaria	278
9.6. constantes de error de posición para sistemas continuos con retroalimentación unitaria	279
9.7. Constantes de error de aceleración para sistemas continuos con retroalimentación unitaria	280
9.8. Constantes de error para sistemas discretos con retroalimentación unitaria	281
9.9. Tabla resumen para sistemas continuos y discretos en el tiempo, con retroalimentación unitaria	281
9.10. Constantes de error para sistemas más generales	282
Capítulo 10. Análisis y Diseño de Sistemas de Control con Retroalimentación: Objetivos y Métodos	297
10.1. Introducción	297
10.2. Objetivos del análisis	297
10.3. Métodos de análisis	297
10.4. Objetivos de diseño	298
10.5. Compensación del sistema	304
10.6. Métodos de diseño	305
10.7. La transformada w para el análisis y el diseño de sistemas discretos en el tiempo utilizando métodos de sistemas continuos	305
10.8. Diseño algebraico de sistemas digitales, incluyendo sistemas con transitorio mínimo	308
Capítulo 11. Análisis de NYQUIST	318
11.1. Introducción	318
11.2. Representación gráfica de funciones complejas de una variable compleja	319

11.3. Definiciones	320
11.4. Propiedades de la representaciones $P(s)$ o $P(z)$	322
11.5. Diagrama polares	324
11.6. Propiedades de los diagramas polares	325
11.7. La trayectoria de Nyquist	327
11.8. El diagrama de estabilidad de Nyquist	330
11.9. Diagrama de estabilidad de Nyquist de sistemas prácticos de control con retroalimentación	331
11.10. El criterio de estabilidad de Nyquist	336
11.11. Estabilidad relativa	338
11.12. Los círculos M y N	339
Capítulo 12. Diseño Utilizando el Análisis de NYQUIST	384
12.1. Filosofía del diseño	384
12.2. Compensación del factor de ganancia	384
12.3. Compensación del factor de ganancia utilizando círculo M	386
12.4. Compensación por adelanto	387
12.5. Compensación por atraso	391
12.6. Compensación por atraso – adelanto	393
12.7. Otros esquemas de compensación y combinación de compensadores	395
Capítulo 13. Análisis Utilizando el Lugar de las Raíces	411
13.1. Introducción	411
13.2. Variación de los polos de un sistema en malla cerrada: el lugar de las raíces	411
13.3. Criterios de ángulos y magnitud	413
13.4. Números de lugares	414
13.5. Lugares sobre el eje real	414
13.6. Asíntotas	415
13.7. Puntos de separación	415
13.8. Ángulos de salida y de llegada	416
13.9. Construcción del lugar de las raíces	418
13.10. La función de transferencia en malla cerrada y la respuesta en el dominio del tiempo	420
13.11. Márgenes de ganancia y de fase a partir del lugar de las raíces	422
13.12. Relación de amortiguación a partir de las raíces para sistemas continuos	424
Capítulo 14. Diseño Utilizando el Lugar de las Raíces	443
14.1. El problema de diseño	443
14.2. Compensación por cancelación	444
14.3. Compensación de fase: redes de adelanto y de atraso	445
14.4. Compensación de magnitud y combinaciones de compensadores	446
14.5. Aproximaciones por polos – ceros dominantes	449
14.6. Diseño puntual	454
14.7. Compensación por retroalimentación	456
Capítulo 15. Análisis de BODE	471
15.1. Introducción	471

15.2. Escalas de Bode y la ganancia de Bode para sistema continuos en el tiempo	472
15.3. La forma de Bode y la ganancia de Bode sistemas continuos en el tiempo	472
15.4. Diagramas de Bode de funciones de respuestas de frecuencia sencillas continuas en el tiempo y sus aproximaciones asintóticas	472
15.5. Construcción de diagramas de Bode para sistemas continuos en el tiempo	480
15.6. Diagramas de Bode de funciones de respuestas de frecuencia discretas en el tiempo	483
15.7. Estabilidad relativa	484
15.8. Respuestas de frecuencia en malla cerrada	486
15.9. Análisis de Bode de sistemas discretos en el tiempo utilizando la transferencia w	487
Capítulo 16. Diseño Utilizando el Análisis de Bode	499
16.1. Filosofía del diseño	499
16.2. Compensación del factor de ganancia	499
16.3. Compensación por adelanto para sistemas continuas en el tiempo	501
16.4. compensación por atraso para sistemas continuos en el tiempo	505
16.5. Compensación por atraso – adelanto para sistemas continuos en el tiempo	507
16.6. Diseño de sistemas discretos en el tiempo utilizando el análisis de Bode	509
Capítulo 18. Diseño Utilizando el Análisis de los Diagramas de Nichols	556
18.1. Filosofía del diseño	556
18.2. Compensación del factor de ganancia	556
18.3. Compensación del factor de ganancia utilizando curvas de amplitud constante	557
18.4. Compensación por adelanto en sistemas continuos en el tiempo	558
18.5. Compensación por atraso en sistemas continuos en el tiempo	562
18.6. Compensación por atraso – adelanto	564
18.7. Diseño de sistemas discretos en el tiempo utilizando las cartas d Nichols	568
Capítulo 19. Introducción a los Sistemas de Control no Lineales	581
19.1. Introducción	581
19.2. Aproximaciones linealizadas y linealizadas por tramos de sistemas no lineales	582
19.3. Métodos del plano de fase	588
19.4. Criterio de estabilidad de Lyapunov	594
19.5. Métodos de respuesta de frecuencia	597
Capítulo 20. Introducción a Temas Avanzados en el Análisis y el Diseño de Sistemas de Control	614
20.1. Introducción	614
20.2. Controlabilidad y observabilidad	614
20.3. Diseño en el dominio del tiempo de sistemas con retroalimentación	616

(retroalimentación de estados)	
20.4. Sistemas de control con entradas aleatorias	618
20.5. Sistemas de control óptimo	619
20.6. Sistemas de control adaptable	620
Apéndice A. Algunos pares de transformadas de Laplace útiles para el análisis de sistemas de control	622
Apéndice B. Algunos pares de transformadas z útiles para el análisis de sistemas de control	
Bibliografía y Referencias	627
Índice	629