

INDICE

Prefacio	XIX
Prefacio al Software de Computadora para Sistemas de Control	XXII
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Componentes básicos de un sistema de control	2
1.1.2. Ejemplos de aplicaciones de sistemas de control	3
1.1.3. Sistemas de control en lazo abierto (Sistemas no realimentados)	9
1.1.4. Sistemas de control en lazo cerrado (Sistemas de control realimentados)	9
1.2. ¿Qué es Realimentación y Cuáles son sus Efectos?	11
1.2.1. Efecto de la realimentación en la ganancia global	12
1.2.2. Efecto de realimentación en la estabilidad	12
1.2.3. Efecto de la realimentación en la sensibilidad	13
1.2.4. Efecto de la realimentación en la perturbaciones externas o ruido	14
1.3. Tipos de Sistemas de Control Realimentado	15
1.3.1. Sistemas de control lineales contra no lineales	15
1.3.2. Sistemas invariantes con el tiempo contra variantes con el tiempo	16
1.4. Resumen	19
2. Fundamentos Matemáticos	21
2.1. Introducción	21
2.2. Conceptos sobre Variables Compleja	22
2.2.1. Variable compleja	22
2.2.2. Funciones de una variable compleja	22
2.2.3. Función analítica	23
2.2.4. Singularidad y polos de una función	24
2.2.5. Ceros de una función	24
2.3. Ecuaciones Diferenciales	25
2.3.1. Ecuaciones diferenciales ordinarios lineales	25
2.3.2. Ecuaciones diferenciales no lineales	25
2.3.3. Ecuaciones diferenciales de primer orden: ecuaciones de estado	26
2.4. Transformada de Laplace	28
2.4.1. Definición de la transformación de Laplace	29
2.4.2. Transformada inversa de Laplace	30
2.4.3. Teoremas importantes de la Transformada e Laplace	31
2.5. Transformada inversa de Laplace mediante la Expansión en Fracciones Parciales	34
2.5.1. Expansión en fracciones parciales	35
2.5.2. Solución por computadora de la expansión en fracciones parciales	39
2.6. Transformada Inversa de Laplace a la Solución de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias Lineales	41
2.7. Teoría de Matrices Elemental	44
2.7.1. Definición de una matriz	45
2.8. Álgebra de Matrices	49
2.8.1. Igualdad de matrices	50
2.8.2. Suma y resta de matrices	50
2.8.3. Ley asociativa de matrices (Suma y Resta)	51
2.8.4. Ley conmutativa de matrices (Suma y Resta)	51

2.8.5. Multiplicación de matrices	51
2.8.6. Reglas de multiplicación de matrices	52
2.8.7. Multiplicación por un escalar K	53
2.8.8. Inversa de una matriz	53
2.8.9. Rango de una matriz	54
2.8.10. Solución de matrices con ayuda de computadora	55
2.9. Forma Matricial de la Ecuaciones de Estado	55
2.10. Ecuaciones en Diferencias	57
2.11. La Transformada z	58
2.11.1. Definición de la transformada z	58
2.11.2. Relación entre la transformada de Laplace y la transformada z	59
2.11.3. Algunos teoremas importantes de la transformada z	61
2.11.4. Transformada z inversa	64
2.11.5. Solución por computadora de la expansión en fracciones parciales de $Y(z)/z$	66
<i>2.12. Aplicación de la Transformada z a la solución de Ecuaciones en Diferencias Lineales</i>	67
2.13. Resumen	68
3. Funciones de Transferencia, Diagramas de Bloques y Gráficas de Flujo de Señales	77
3.1. Introducción	77
3.2. Respuesta al impulso y función de transferencia de sistemas lineales	78
3.2.1. Respuestas al impulso	78
3.2.2. Función de transferencia (Sistemas de una entrada y una salida)	78
3.2.3. Función de transferencia (Sistemas multivariables)	81
3.3. Diagramas de Bloques	83
3.3.1. Diagramas de bloques de un sistema de control	84
3.3.2. Diagramas de bloques y funciones de transferencia de un sistema multivariable	86
3.4. Gráficas de Flujo de Señales	89
3.4.1. Elementos básicos de una gráfica de flujo de señales	89
3.5. Resumen de las propiedades básicas de una gráfica de flujo de señales	90
3.6. Definiciones de los términos de una gráfica de flujo de señales	91
3.7. Álgebra de las gráficas de flujo de señales	94
3.7.1. Gráfica de flujo de señales de un sistema de control realimentado	94
3.8. Fórmula de Ganancia para Gráficas de Flujo de Señales	96
3.8.1. Aplicaciones de la fórmula de ganancia entre nodos de salida y nodos intermedios	98
3.9. Aplicación de la Fórmula de Ganancia a Diagramas de Bloques	99
3.10. Diagramas de Estado	100
3.10.1. De ecuaciones diferenciales al diagrama de estado	102
3.10.2. De diagrama de estado a la función de transferencia	104
3.10.3. De diagrama de estado a las ecuaciones de estado y de salida	105
3.11. Funciones de Transferencia de Sistemas en Tiempo Discreto	106
3.11.1. Funciones de transferencia de sistemas en tiempo discreto con elementos en cascada	111
3.11.2. Función de transferencia del retén de orden cero	113

3.11.3. Funciones de transferencia en lazo cerrado de sistemas en tiempo discreto	114
3.12. Resumen	117
4. Modelado Matemático de Sistemas Físicos	134
4.1. Introducción	134
4.2. Ecuaciones de circuitos eléctricos	134
4.3. Modelado de elementos de sistemas mecánicos	138
4.3.1. Movimiento de traslación	138
4.3.2. Movimiento de rotación	142
4.3.3. Conversión entre movimientos de traslación y de rotación	145
4.3.4. Trenes de engranes, palancas y bandas	147
4.3.5. Juego y zona muerta	150
4.4. Ecuaciones de Sistemas Mecánicos	151
4.5. Detectores y Codificadores en Sistemas de Control	160
4.5.1. Potenciómetro	160
4.5.2. Tacómetros	166
4.5.3. Codificador incremental	168
4.6. Motores de cd en Sistemas de Control	171
4.6.1. Principios de operación básicos de motores de cd	172
4.6.2. Clasificación básica de cd de imán permanente	173
4.6.3. Modelado matemático de motores de cd de imán permanente	175
4.6.4. Curvas par – velocidad de un motor de cd	180
4.6.5. Curvas par – velocidad de un sistema amplificador/motor de cd	181
4.7. Linealización de Sistemas no Lineales	183
4.8. Sistemas con Retardo	189
4.8.1. Aproximación de funciones de retardo mediante funciones racionales	190
4.9. Amplificadores Operacionales	191
4.9.1. Amplificador operacional	192
4.9.2. Sumas y restas	192
4.9.3. Configuraciones de amplificadores operacionales de primer orden	194
4.10. Sistema de Seguimiento del Sol	197
4.10.1. Sistema de coordenadas	198
4.10.2. Detector de error	198
4.10.3. Amplificador operacional	199
4.10.4. Amplificador de rastreo	200
4.10.5. Tacómetro	200
4.10.6. Motor de cd	200
4.11. Resumen	200
5. Análisis de Variable de Estado	226
5.1. Introducción	226
5.2. Representación matricial de las ecuaciones de estado	227
5.3. Matriz de transición de estado	230
5.3.1. Significado de la matriz de transición de estado	232
5.3.2. Propiedades de la matriz de transición de estado	232
5.4. Ecuación de Transición de Estado	233
5.4.1. Ecuación de transición de estado a partir del diagrama de estado	236
5.5. Relación entre las Ecuaciones de Estado y Ecuaciones Diferenciales de Orden Superior	240

5.6. Relación entre las ecuaciones de estado y las funciones de transferencia	242
5.7. Ecuación Características, Valores y Vectores Característicos	245
5.7.1. Valores característicos	247
5.7.2. Vectores característicos	248
5.8. Transformaciones de Similitud	250
5.8.1. Propiedades invariantes de las transformaciones de similitud	252
5.8.2. Forma canónica controlable	253
5.8.3. Forma canónica observable	256
5.8.4. Forma canónica diagonal	258
5.8.5. Forma canónica de Jordan	261
5.9. Descomposición de Funciones de Transferencia	263
5.9.1. Descomposición directa	263
5.9.2. Descomposición en cascada	269
5.9.3. Descomposición en paralelo	271
5.10. Controlabilidad de Sistemas Lineales	273
5.10.1. Concepto general sobre controlabilidad	275
5.10.2. Definición de controlabilidad de estado	276
5.10.3. Prueba alternas sobre controlabilidad	277
5.11. Obsevabilidad de Sistemas Lineales	279
5.11.1. Definición de observabilidad	280
5.11.2. Pruebas alternas sobre observabilidad	280
5.12. Relación entre Controlabilidad, Observabilidad y Funciones de Transferencia	281
5.13. Teoremas Invariantes sobre Controlabilidad y Observabilidad	284
5.14. Ecuaciones de Estado de Sistemas Lineales en Tiempo Discreto	286
5.14.1. Ecuaciones de estado discretas	287
5.14.2. Soluciones de las ecuaciones de estado discretas: Ecuaciones de transición de estado discreto	289
5.15. Solución de las Ecuaciones de Estado Discreto Mediante la Transformada z	291
5.15.1. Matriz función de transferencia y ecuación característica	292
5.16. Diagramas de Estado de Sistemas en Tiempo Discreto	294
5.16.1. Diagramas de estado de sistemas de datos muestreados	296
5.17. Ejemplo Final: Sistema de Suspensión Magnética de una Bola	299
5.18. Resumen	303
6. Estabilidad de Sistemas de Control Lineales	327
6.1. Introducción	327
6.2. Estabilidad ee entrada acotada y salida acotadas: Sistemas en Tiempo Continuo	328
6.2.1. Relación entre las raíces de la ecuación característica y la estabilidad	329
6.3. Estabilidad de entrada cero y estabilidad asintótica de sistemas e tiempo continuo	330
6.4. Métodos para determinar la estabilidad	333
6.5. Criterio de Routh – Hurwitz	334
6.5.1. Criterio de Hurwitz	335
6.5.2. Arreglo de Routh	336

6.5.3. Casos especiales cuando el arreglo de Routh termina prematuramente	339
6.6. Estabilidad de Sistemas en Tiempo Discreto	343
6.6.1. Estabilidad BIBO	344
6.6.2. Estabilidad de entrada cero	344
6.7. Pruebas de Estabilidad para Sistemas en Tiempo Discreto	345
6.7.1. Método de la transformada bilineal	346
6.7.2. Pruebas de estabilidad discretas	349
6.8. Resumen	351
7. Análisis de Sistemas de Control en el Dominio del Tiempo	361
7.2. Señales de prueba típicas para obtener la respuesta en tiempo de sistemas de control	363
7.3. Error en estado estable	365
7.3.1. Error en estado estable causando por elementos de sistemas no lineales	365
7.3.2. Error en estado de sistemas de control lineales en tiempo continuo	367
7.4. Respuesta al Escalón Unitario y Especificaciones en el Dominio del Tiempo	385
7.5. Respuesta Transitoria de un Sistema Prototipo de Segundo Orden	387
7.5.1. Factor de amortiguamiento relativo y factor de amortiguamiento	388
7.5.2. Frecuencia natural no amortiguada	390
7.5.3. Sobrepasso máximo	394
7.5.4. Tiempo de retardo y tiempo de levantamiento	396
7.5.5. Tiempo de asentamiento	398
7.6. Análisis en el Dominio del Tiempo de un Sistema de Control de Posición	402
7.6.1. Respuesta transitoria al escalón unitario	405
7.6.2. Respuesta en estado estable	409
7.6.3. Respuesta en el tiempo a una entrada rampa unitaria	409
7.6.4. Respuesta en el tiempo de un sistema de tercer orden	411
7.7. Efectos de Añadir Polos y Ceros a las Funciones de Transferencia	415
7.7.1. Adición de un polo en la función de transferencia de la trayectoria directa: Sistemas con realimentación unitaria	416
7.7.2. Adición de un polo en la función de transferencia en lazo cerrado	417
7.7.3. Adición de un cero en la función de transferencia en lazo cerrado	419
7.7.4. Adición de un cero en la función de transferencia de la trayectoria directa: Sistemas con realimentación unitaria	420
7.8. Polos Dominantes de las Funciones de Transferencia	422
7.8.1. Factor de amortiguamiento relativo	423
7.8.2. Forma apropiada para despreciar los polos insignificantes considerando la respuesta en estado estable	424
7.9. Aproximación a Sistemas de Orden Superior por Sistemas de Baja Orden: El Enfoque Formal	424
7.9.1. Criterio de aproximación	425
7.10. Propiedades en el Dominio del Tiempo de Sistemas en Tiempo Discreto	437
7.10.1. Respuesta en el tiempo de sistemas de control en tiempo	437

discreto	
7.10.2. Transformación de trayectorias entre el plano s y el plano z	442
7.10.3. Relación entre las raíces de la ecuación característica y la respuesta transitoria	445
7.10.4. Análisis de error en estado estable de sistemas de control en tiempo discreto	447
7.11. Resumen	454
8. La Técnica del Lugar Geométrico de las Raíces	470
8.1. Introducción	470
8.2. Propiedades básicas del lugar geométrico de las raíces	472
8.3. Propiedades y construcción del lugar geométrico de las raíces	477
8.3.1. Puntos $K = 0$ y $K = +\infty$	477
8.3.2. Número de ramas del lugar geométrico de las raíces	478
8.3.3. Simetría del lugar geométrico de las raíces	479
8.3.4. Ángulos de las asíntotas del lugar geométrico de las raíces: comportamiento del lugar geométrico de las raíces en $s \rightarrow \infty$	479
8.3.5. Intersección de las asíntotas (centroide)	481
8.3.6. Lugar geométrico de las raíces sobre el eje real	483
8.3.7. Ángulos de salida y ángulos de entrada del lugar geométrico de las raíces	485
8.3.8. Intersección del lugar geométrico de las raíces con el eje imaginario	488
8.3.9. Puntos de ruptura (puntos de silla) sobre el lugar geométrico de las raíces	488
8.3.10. Sensibilidad de las raíces	495
8.3.11. Cálculo de k sobre el lugar geométrico de las raíces	498
8.4. Solución por Computadora	505
8.4.1. rplot de CSAD	505
8.4.2. Root del programa CC	508
8.5. Algunos Aspectos Importantes sobre la Construcción del Lugar Geométrico de las Raíces	509
8.5.1. Efectos de la adición de polos y ceros de $G(s)H(s)$	509
8.6. Contornos de las raíces: variación de parámetros múltiples	517
8.7. Lugar geométrico de las raíces de sistemas en tiempo discreto	524
8.8. Resumen	528
9. Análisis en el Dominio de la Frecuencia	539
9.1. Introducción	539
9.1.1. Respuesta en frecuencia de sistemas en lazo cerrado	541
9.1.2. Especificaciones en el dominio de la frecuencia	541
9.2. M_w y Ancho de Banda del Prototipo de Segundo Orden	544
9.2.1. Pico de resonancia y frecuencia de resonancia	544
9.2.2. Ancho de banda	547
9.3. Efectos de la Adición de un Cero en la Función de Transferencia de la Trayectoria directa	551
9.4. Efectos de la Adición de un Polo en la Función de Transferencia de la Trayectoria Directa	555
9.5. Criterio de Estabilidad de Nyquist: Fundamentos	557
9.5.1. El problema de estabilidad	557
9.5.2. Definición de encierro e incluido	559

9.5.3. Número de encierros e inclusiones	560
9.5.4. Principio del argumento	560
9.5.5. Trayectoria de Nyquist	565
9.5.6. Criterio de Nyquist y la gráfica de $L(s)$ o $G(s)H(s)$	567
9.6. Criterio de Nyquist para Sistemas con Función de Transferencia de Fase Mínima	568
9.6.1. Aplicación del Criterio de Nyquist a funciones de transferencia de fase mínima que no son estrictamente propias	570
9.7. Relación entre el lugar geométrico de las raíces y el diagrama de Nyquist	570
9.8. Ejemplos ilustrativos: Criterio de Nyquist aplicado a funciones de transferencia de fase no mínima	574
9.9. Criterio general de Nyquist: para funciones de transferencia de fase mínima y no mínima	578
9.9.1. Sistema con funciones de transferencia de fase mínima	582
9.9.2. Sistemas con funciones de transferencia en lazo impropias	583
9.10. Ejemplos ilustrativos: Criterio general de Nyquist para funciones de transferencia de fase mínima y no mínima	583
9.11. Efectos de la adición de polos y ceros a $L(s)$ sobre la forma del lugar geométrico de Nyquist	594
9.12. Análisis de estabilidad de sistemas en lazos múltiples	598
9.13. Estabilidad de sistemas de control lineales con retratos puros	600
9.13.1. Trayectoria crítica	603
9.13.2. Aproximación de $e^{-\tau ds}$	603
9.14. Estabilidad relativa: Margen de ganancia y margen de fase	605
9.14.1. Margen de ganancia	608
9.14.2. Margen de fase	610
9.15. Análisis de estabilidad con las trazas de Bode	613
9.15.1. Trazas de Bode para sistemas con retrasos puros	615
9.16. Estabilidad Relativa Relacionada con la Pendiente de la Curva de Magnitud de las Trazas de Bode	618
9.16.1. Sistemas condicionalmente estable	618
9.17. Análisis de estabilidad con la traza de magnitud – fase	621
9.18. Lugar geométrico de M – Constante en el plano $G(j\omega)$	622
9.19. Lugar geométrico de fase constante en el plano $G(j\omega)$	625
9.20. Lugar geométrico de M – constante en el plano de magnitud – fase: la Carta de Nichols	627
9.21. Solución por computadora	631
9.22. Carta de Nichols aplicada a sistemas con realimentación no unitaria	634
9.23. Estudios de sensibilidad en el dominio de la frecuencia	636
9.24. Análisis en el dominio de la frecuencia de sistemas de control de datos muestreados	638
9.24.1. Trazas de Bode con la transformación w	641
9.25. Resumen	645
10. Diseño de Sistemas de Control	664
10.1. Introducción	664
10.1.1. Especificaciones de diseño	665
10.1.2. Configuraciones de controladores	667

10.1.3. Principios fundamentales de diseño	670
10.2. Diseño con Controlador PD	671
10.2.1. Interpretación en el dominio del tiempo del control PD	
10.2.2. Interpretación del control PD en el dominio de la frecuencia	676
10.2.3. Resumen de los efectos de un control PD	678
10.3. Diseño con el Controlador PI	691
10.3.1. Interpretación en el dominio del tiempo y diseño del control PI	694
10.3.2. Interpretación en el dominio de la frecuencia y diseño del control PI	695
10.4. Diseño con el Controlador PID	708
10.5. Diseño con el Controlador de Adelanto de Fase	714
10.5.1. Interpretación y diseño en el dominio del tiempo del control de adelanto de fase	715
10.5.2. Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia del control de adelanto de fase	717
10.5.3. Efectos de la compensación de adelanto de fase	736
10.5.4. Limitaciones del control de adelanto de fase de una sola etapa	736
10.5.5. Controlador de adelanto de fase de etapas múltiples	737
10.5.6. Consideraciones sobre sensibilidad	742
10.6. Diseño con el Controlador de Atraso de Fase	743
10.6.1. Interpretación y diseño en el dominio del tiempo del control de atraso de fase	743
10.6.2. Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia del control de atraso de fase	747
10.6.3. Efectos y limitaciones del control de atraso de fase	758
10.7. Diseño con el controlador de atraso – adelanto	759
10.8. Diseño mediante cancelación de polos y ceros: Filtro de muesca	761
10.8.1. Filtro activo de segundo orden	764
10.8.2. Interpretación y diseño en el dominio de la frecuencia	766
10.9. Controladores prealimentados en la trayectoria directa	775
10.10. Diseño de sistemas de control robusto	778
10.11. Control realimentado de lazos menores	789
10.11.1. Control realimentado de velocidad o tacométrico	790
10.11.2. Control realimentado de lazos menores mediante filtros activos	790
10.12. Control mediante realimentación de estado	794
10.13. Diseño por ubicación de polos a través de la realimentación de estado	796
10.14. Realimentación de estado con control integral	802
10.15. Resumen	809
11. Diseño de Sistemas de control en Tiempo Discreto	
11.1. Introducción	836
11.2. Implantación digital de controladores analógicos	837
11.2.1. Implantación digital del controlador PID	838
11.2.2. Implantación digital de los controladores de atraso y adelanto	842
11.3. Controladores digitales	843
11.4. Diseño de Sistemas en tiempo discreto en el dominio de la frecuencia y en el plano z	847
11.4.1. Controladores de adelanto y atraso de fase en el dominio w	847

11.5. Diseño de sistemas de control en tiempo discreto de repuesta con osciladores muertas	855
11.6. Diseño por ubicación de polos mediante la realimentación de estado	857
11.7. Resumen	859
Apéndice A. Trazas en el dominio de la frecuencia	564
Apéndice B. Tabla de transformada de Laplace	887
Apéndice C. Tabla de transformadas z	889
Respuestas y sugerencias a problemas selectos	890
Índice	898