

INDICE

Capitulo 1. Introducción	
1-1 introducción	1
1-1-1 elementos básicos de un sistema de control de datos discretos	2
1-1-2- ventajas de los sistemas de control de datos discretos	3
1-2 ejemplos de sistemas de control digital y discretos	
1-2-1 sistemas de control simplificado de un solo eje para un piloto automático	6
1-2-2 sistemas de regulación de laminado controlado por computadora digital	8
1-2-3 controlador digital para una turbina y generador	
1-2-4 sistemas de control de un motor de pasos	9
1-2-5 sistemas de controlados por microprocesador	10
1-2-6 modelo discreto de un problema de pago de intereses	11
Bibliografía	12
Capitulo 2. Conversión y procesamiento de señales	
2-1 introducción	13
2-2 señales digitales y codificación	15
2-3 conversión de datos y cuantización	16
2-4 dispositivos de muestreo y retención	20
2-4-1 representación en diagrama de bloque del dispositivo S/H	24
2-5 conversión digital-analógica (D/A)	25
2-6 conversión analógica-digital(A/D)	28
2-6-1 consideraciones sobre el periodo de muestreo	32
2-6-2 representación en diagrama de bloques simplificado de los convertidores A/D y d/a	34
2-7 modelado matemático del proceso de muestreo	
2-7-1 muestreador con ancho de pulso finito	35
2-7-2 frecuencia de traslapamiento, frecuencia de Nyquist y frecuencia de alias	41
2-8 teorema de muestreo	42
2-8-1 adición al teorema de muestreo	43
2-9 modelado matemático del muestreo con la integral de convolución	44
2-10 aproximación máximamente plana del muestreador de ancho de pulso finito	45
2-10-1 muestreador ideal	46
2-10-2 otras expresiones para $F^*(s)$	47
2-11 algunas propiedades de $F^*(s)$ en el plano s	51
2-12 reconstrucción de datos y filtrado de señales muestreadas	52
2-13 retenedor de orden cero	55
2-13-1 características del retenedor de orden cero en el dominio de la frecuencia	56
2-14 retenedor de primer orden	59
2-14-1 características del retenedor de primer orden en el dominio de la frecuencia	61
2-15 retenedor poligonal y retenedor retraso	64
2-15-1 características del retenedor de orden cero en el dominio de la frecuencia en el dominio de la frecuencia del retenedor poligonal	66

2-15-2 retenedor con retraso	67
Problemas	67
Bibliografía	73
Capítulo 3. Transformada z	
3-1 motivación para el uso de la transformada z	75
3-1-1 definición de la transformada z	
3-1-2- relación entre la transformada de Laplace y a transformada z	77
3-1-3 expresión alterna para $F(z)$	78
3-2 ejemplos de evaluación de transformadas z	79
3-3 relación entre el plano s y el plano z	84
3-3-1 lugares de amortiguamiento constante	
3-3-2 lugares de frecuencia constante	
3-3-3 lugares de relación de amortiguamiento constante	86
3-4 transformada z inversa	
3-4-1 no unicidad de la transformada z	89
3-5 teoremas de la transformada z	96
3-6 limitaciones del método de la transformada z	106
3-7 aplicaciones de la transformada z	
3-7-1 problema del pago de intereses	107
3-7-2 problema de la red en escalera	109
3-7-3 solución de ecuaciones de diferencia con polos complejos entre instantes de muestreo	110
3-8 señales ente los instantes de muestreo	
3-8-1 método del muestreo submúltiplo, transformad z con muestreo múltiple	111
3-8-2 transformada z con retardo y transformada z modificada	
Problemas	119
Bibliografía	122
Capítulo 4. Funciones de transferencia, diagramas de bloques y graficas de flujo de señal	124
4-1 Introducción	
4-2 función de transferencia de pulsos y la función de transformada z	
4-2-1 sistemas de datos discretos con elementos en cascada separados por un muestreador	127
4-2-2 sistemas de datos discretos con elementos en cascada no separados por un muestreador	128
4-3 función de transferencia de pulsos del retenedor de orden cero y relación entre $G(g)$ y $G(Z)$	129
4-4 sistemas de lazo cerrado	133
4-4-1 ecuación características	136
4-4-2 causalidad y realizabilidad física	137
4-5 graficas de flujo d señal muestreada	138
4-6 función de transferencia en z modificada	145
4-7 sistemas discretos con muestreo múltiple	149
4-7-1 sistemas con muestre múltiple del tipo lento-rápido	150
4-7-2 sistemas con muestreo múltiple del tipo rápido-lento	154
4-7-3 sistemas con muestreo múltiple donde todos los elementos son digitales	161
4-7-4 sistemas de lazo cerrado con muestreo múltiple	162

4-7-5 sistemas muestreados con frecuencias de muestreo cíclicas	168
Problemas	173
Bibliografía	182
Capítulo 5. Técnicas con variables de estado	
5-1 introducción	184
5-2 ecuaciones de estado y ecuaciones de transición de estados de sistemas de datos continuos	185
5-2-1 Matriz de transición de estados, solución de ecuaciones de estado homogéneas	186
5-2-2 propiedades de la matriz de transición de estados	
5-2-3 solución de ecuaciones de estado no homogéneas, ecuación de transición de estados	188
5-3 ecuaciones de estado es sistemas de datos discretos con dispositivos de muestreo y retención	189
5-4 ecuaciones de estado de sistemas digitales donde todos los elementos son digitales	191
5-5 simulación digital y aproximación	
5-6 ecuaciones de transición de estados	
5-6-1 método recursivo	192
5-6-2 método de la transformada z	194
5-7 relación entre ecuaciones de estado y funciones de transferencia	197
5-8 ecuación característica, valores propios y vectores propios	199
5-8-1 valores propios	200
5-8-2 vectores propios	201
5-9 diagonalización de la matriz A	206
5-10 forma canónica de Jordan	208
5-11 métodos para el calculo de la matriz de transición de estados	211
5-11-1 método del teorema de Cayley-Hamilton	212
5-11-2 método de la transforma z	213
5-11-3 calculo de la matriz de transición de estados $f(t)$	216
5-12 relación entre ecuaciones de estado y ecuaciones de diferencias de orden superior	218
5-13 transformación a la forma canónica de variables de fase, diseño para la colocación de polos	220
5-14 diagrama de estado	
5-14-1 diagramas de estado de sistemas de datos continuos	227
5-14-2 diagramas de estado de sistemas digitales	231
5-15 descomposición de funciones de transferencia discretos	
5-15-1 descomposición directa	234
5-15-2 descomposición en cascada	235
5-15-3 descomposición en paralelo	236
5-16 diagramas de estado de sistemas discretos, sistemas con retenedores de orden cero	238
5-16-1 diagrama de estado de un retenedor de orden cero	239
5-17 análisis con variables de estado de la respuesta entre instantes de muestreo	244
5-18 análisis con variables de estado de sistemas con muestreo múltiple, de omisión y asíncronos	246
5-18-1 sistemas muestreado con frecuencia de muestreo cíclica	246

Problemas	251
Bibliografía	259
Capítulo 6. Controlabilidad, observabilidad y estabilidad	
6-1 introducción	260
6-2 Controlabilidad de sistemas de datos discretos e invariantes en el tiempo	262
6-2-2 teoremas sobre controlabilidad	
6-3 observabilidad de sistemas discretos lineales e invariantes en el tiempo	271
6-3-1 definición de observabilidad	
6-3-2 teoremas de observabilidad	272
6-4 relaciones entre controlabilidad, observabilidad y funciones de transferencia	277
6-5 comparación entre controlabilidad, observabilidad y el periodo de muestreo en un sistema de datos discreto	279
6-6 estabilidad de sistemas lineales de control digital, definiciones y teorema	280
6-6-1 definiciones de estabilidad	
6-6-2 estabilizabilidad	
6-7 pruebas de estabilidad de sistemas discretos	286
6-7-1 método de la transformación bilineal, extensión del criterio de Routh-Hurwitz	287
6-7-2 prueba de estabilidad de Jury	294
6-7-3 el segundo método de Liapunov	300
Problemas	307
Bibliografía	315
Capítulo 7. Análisis en el dominio del tiempo y en dominio z	
7-1 introducción	317
7-2 Prototipo de sistemas de segundo orden	320
7-3 comparación entre las respuestas en el tiempo de sistemas de datos continuos y sistemas de datos discretos	321
7-3-1 sistemas de datos continuos	
7-3-2 sistemas de control digital	323
7-4 repaso del análisis de error de estado estacionario de sistemas de control de datos continuos	332
7-5 análisis de error de estado estacionario de sistemas de control digital	334
7-5-1 error de estado estacionario debido a una entrada escalón, coeficiente de error discreto para un escalón	335
7-5-2 error de estado estacionario debido a una entrada rampa, coeficiente de error discreto para una rampa	336
7-5-3- error de estado estacionario debido a una entrada parabólica, coeficiente de error discreto para una parábola	337
7-5-4 resumen de coeficiente de error discreto	338
7-6 correlación entre la respuesta en el tiempo y la ubicación de las raíces en los planos s y z	339
7-7 lugar del factor de amortiguamiento constante y lugar de la relación de amortiguamiento constante	342
7-8 raíces dominantes de la ecuación características	344
7-9 efecto de las configuraciones de polos y ceros en el plano z sobre el	346

máximo sobreimpulso y el tiempo de pico	
7-10 reputa de tiempo mínimo en los instantes de muestreo	355
7-11 lugar de las raíces par sistemas de control digital	356
7-11-1 propiedades del lugar de las raíces en el plano z	359
7-11-2 ejemplos ilustrativos del lugar de las raíces	361
7-11-3 lugar de las raíces para sistemas con retrasos puros	364
7-12 efectos de la adición de polos y ceros a la función de transferencia de lazo abierto	367
7-12-1 efectos de la adición de un cero a la función de transferencia de lazo abierto	
7-12-2 efectos de la adición de un polo a la función de transferencia de lazo abierto	369
Problemas	370
Bibliografía	382
Capítulo 8. Análisis en el dominio de la frecuencia	
8-1 introducción	383
8-2 grafica polar de $GH(z)$	385
8-3 criterio de estabilidad de Nyquist	
8-3-1 trayectorias de Nyquist	388
8-3-2 Criterios de Nyquist	
8-3-3 ejemplos ilustrativos del criterio de Nyquist	391
8-4 Grafica de Bode	400
8-5 márgenes de ganancia y de fase	
8-5-1 margen de ganancia	405
8-5-2 margen de fase	406
8-6 grafica ganancia-fase y la carta de Nichols	410
8-7 consideraciones sobre el ancho de banda	411
8-8 análisis de sensibilidad	412
Problemas	414
Bibliografía	417
Capítulo 9. Simulación y rediseño digital	
9-1 introducción	418
9-2 simulación digital, modelado digital con dispositivos de muestreo y retención	419
9-3 simulación digital, formulación con variables de estado	423
9-4 simulación digital, integración numérica	
9-4-1 integración rectangular	424
9-5 características en el dominio de la decencia, frecuencia de distorsión	429
9-5-1 frecuencia de predistorsión	431
9-6 rediseño digital	434
9-6-1 solución en forma cerrada para $G(T)$	437
9-6-2 Acoplamiento parcial de estados	438
9-6-3 solución a al matriz de retroalimentación por desarrollo en series	439
9-6-4 solución exacta para $E(T)$	
9-6-5 solución de $E(T)$ por desarrollo en series	441
9-6-6 consideraciones de estabilidad y restricciones sobre la selección de la matriz de ponderación GH	442
9-6-7 rediseño digital del satélite simplificado Skylab	443
Problemas	449

Bibliografía	454
Capítulo 10. Diseño de sistemas de control discretos	
10-1 introducción	456
10-2 compensación en cascada por controladores de datos continuos	
10-2-1 aproximación con retraso de procesos de muestreo y retención	459
10-2-2 diseño con la transformación bilineal	463
10-3 diseño de controladores de datos continuos con controladores digitales equivalentes	470
10-3-1 controlador continuo en cascada	471
10-3-2 controlador retroalimentado continuo	472
10-4 controladores digitales	473
10-4-1 consideraciones de realizabilidad física	
10-4-2 realización de controladores digitales mediante programación digital	474
10-4-3 controlador digital PID	481
10-5 diseño de sistemas de control con controladores digitales mediante la transformación bilineal	483
10-5-1 Propiedades básicas de controlador de adelanto de fase para $D(r)$	485
10-5-2 Propiedades básicas de controlador de atraso de fase para $D(r)$	486
10-6 diseño en el plano z utilizando el diagrama del lugar de las raíces	498
10-6-1 controladores de adelanto y atraso de fase	499
10-6-2 controlador digital PID	501
10-6-3 controlador digital PD	
10-6-4 controlador digital PI	502
10-6-5 diseño con cancelación de polos y ceros	503
10-6-6 ejemplos de diseño	505
10-7 compensación con dos grados de libertad	516
10-7-1 diseño del controlador con prealimentación	518
10-7-2 ruido y rechazo de perturbaciones	519
10-8 diseño de sistemas de control robustos	521
10-9 diseño de sistemas de datos discretos con respuesta de tiempo mínimo	530
10-9-1 diseño de sistemas de control digital con respuesta de tiempo mínimo	
10-9-2 diseño de sistemas de datos muestreados con respuesta de tiempo mínimo	543
10-9-3 lugar de las raíces de sistemas discretos con respuestas de tiempo mínimo	550
10-10 diseño con controladores por compensación de banda	551
10-11 diseño de la ubicación de los polos mediante retroalimentación de estados (una entrada)	556
10-12 diseño de la ubicación de los polos mediante retroalimentación de estados (varias entradas)	563
10-13 diseño de la ubicación de los polos mediante retroalimentación incompleta de estados o retroalimentación de la salida	567
10-14 diseño de sistemas de control digital con retroalimentación de estados y retroalimentación dinámica de salida	574
10-15 realización de la retroalimentación de estados con controladores dinámicos	580

Problemas	589
Bibliografía	606
Capítulo 11. Control óptimo	
11-1 introducción	608
11-2 ecuación discreta de Euler Lagrange	
11-3 Principio discreto del máximo (mínimo)	614
11-4 control de tiempo óptimo con restricción de energía	619
11-5 diseño del regulador digital lineal óptimo	625
11-5-1 diseño del regulador digital lineal (problema del tiempo finito)	627
11-5-2 diseño del regulador digital lineal (problema del tiempo finito)	633
11-6 principio de optimalidad y programación dinámica	636
11-7 solución de la ecuación discreta de Riccati	
11-7-1 método recursivo para resolver la ecuación discreta de Riccati	640
11-7-2 método valores propios-vectores propios	644
11-8 sensibilidad al periodo de muestreo	650
11-9 observador de estados digital	660
11-9-1 diseño del observador de estados de orden completo	662
11-9-2 diseño del observador de estados de orden reducido	672
Problemas	679
Bibliografía	685
Capítulo 12. Control con microprocesadores y PDS	
12-1 Introducción	688
12-2 arquitectura básica de una computadora	689
12-2-1 dispositivo de entrada-salida	690
12-2-2 memoria	690
12-2-3 unidad de procesamiento central (UPC)	691
12-3 control con microprocesador de sistemas de control	694
12-4 controladores de tarjeta con integrados diseñados a la medida	
12-4-1 tarjeta Galil DMC-105	696
12-5 procesadores digitales de señal	
12-5-1 Texas instruments TMS320	702
12-5-2 sistemas de desarrollo y herramientas de soporte	704
12-6 efectos de la longitud de palabra finita y de la cuantización sobre la controlabilidad y la ubicación de los polos en lazo cerrado	706
12-7 efectos de cuantización, cota mínima superior del error de cuantización	711
12-7-1 análisis con variables de estado	716
12-7-2 análisis con transformada z	717
12-8 retrasos en sistemas de control basados en microprocesador	720
Problemas	721
Bibliografía	723
Apéndice A. Números de punto fijo y de punto flotante	
A-1 representación de números en punto fijo	725
A-2 representación de números en punto flotante	728
Apéndice B. Modelado matemático del muestreo con la integral de convolución	
B-1 Expresiones para la salida del muestreador de ancho de pulso finito $F_p^*(s)$	731
B-2 Expresiones para la salida del muestreador ideal $F^*(s)$	736

B-1 Expresiones alternas para la transformada z modificada	737
Apéndice C. tabla de transformada de Laplace, z y z modificada	740
Apéndice D. Formula para la ganancia en graficas de flujo de señal	744
Apéndice E. tabla de Routh para el análisis de estabilidad	745
Apéndice F. Tarjeta de control de movimiento GALIL DMC-100	746
Indice	747