

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. El control automático . . . . .	2
1.1.1. La realimentación . . . . .	3
1.1.2. Etapas de diseño de un sistema de control . . . . .	4
1.2. Reseña histórica del control automático . . . . .	7
1.3. El control en el ámbito naval y marítimo . . . . .	11
1.3.1. Aprovechamiento económico de explotaciones . . . . .	11
1.3.2. Mejora de prestaciones en buques y artefactos marinos	12
1.3.3. Control de maniobras en aplicaciones novedosas . . . . .	13
1.4. Organización de este texto . . . . .	13
<b>2. Introducción a los sistemas y señales</b>	<b>15</b>
2.1. Introducción . . . . .	15
2.2. Conceptos básicos . . . . .	16
2.2.1. Sistema dinámico . . . . .	16
2.2.2. Variables de entrada . . . . .	18
2.2.3. Perturbaciones . . . . .	19
2.2.4. Variables de salida . . . . .	20
2.2.5. Variables de estado . . . . .	22
2.2.6. Representación de sistemas . . . . .	24
2.3. Clasificación de los sistemas dinámicos . . . . .	26
2.3.1. Atendiendo a la naturaleza de las magnitudes . . . . .	26
2.3.2. Atendiendo a la dependencia temporal de las señales .	27
2.3.3. Atendiendo al grado de determinismo . . . . .	28
2.3.4. Atendiendo al número de entradas y salidas . . . . .	29
2.3.5. Sistemas lineales y no lineales . . . . .	29
2.4. Sistemas LTI continuos . . . . .	30
2.5. Causalidad. Convolución. Respuesta temporal . . . . .	32
2.5.1. Principio de causalidad . . . . .	32
2.5.2. Señales de entrada normalizadas . . . . .	34
2.5.3. Convolución . . . . .	38
2.5.4. Respuesta temporal . . . . .	40

<b>3. Transformaciones complejas</b>	<b>43</b>
3.1. Introducción . . . . .	43
3.2. Series de Fourier . . . . .	44
3.3. Transformada de Fourier . . . . .	55
3.4. Transformada inversa de Fourier . . . . .	59
3.5. Transformada de Laplace . . . . .	60
3.6. Transformada de algunas funciones . . . . .	62
3.6.1. Función impulso unitario . . . . .	62
3.6.2. Escalón unitario . . . . .	62
3.6.3. Rampa y parábola unitarias . . . . .	63
3.6.4. Función potencial . . . . .	63
3.6.5. Función exponencial . . . . .	63
3.6.6. Seno y coseno . . . . .	64
3.6.7. Senh y cosh . . . . .	64
3.7. Propiedades de la transformada de Laplace . . . . .	64
3.7.1. Teorema del valor inicial . . . . .	67
3.7.2. Teorema del valor final . . . . .	67
3.7.3. Convolución . . . . .	68
3.8. Transformada inversa de Laplace . . . . .	70
3.8.1. El teorema de los residuos . . . . .	71
<b>4. Función de transferencia</b>	<b>77</b>
4.1. Introducción . . . . .	77
4.2. Concepto . . . . .	77
4.3. Sistemas de primer orden . . . . .	81
4.3.1. Respuesta impulsional . . . . .	81
4.3.2. Respuesta ante entrada en escalón unitario . . . . .	83
4.4. Sistemas de segundo orden . . . . .	84
4.4.1. Respuesta impulsional . . . . .	85
4.4.2. Respuesta ante entrada en escalón . . . . .	88
4.5. Sistemas de orden superior . . . . .	91
4.6. Introducción al álgebra de bloques . . . . .	94
4.6.1. Bloques en cascada y en paralelo . . . . .	94
4.6.2. Conexión realimentada . . . . .	95
4.6.3. Realimentación con compensador . . . . .	96
4.6.4. Algunas equivalencias algebraicas . . . . .	97
4.6.5. Algunos esquemas de sistemas realimentados . . . . .	98
4.7. Linealización . . . . .	101
4.7.1. Equilibrio . . . . .	102
4.7.2. Punto de funcionamiento . . . . .	103
4.7.3. Linealización en torno a un punto de funcionamiento . . . . .	103
4.8. Principio de analogía . . . . .	116

<b>5. Análisis en el dominio complejo</b>	<b>121</b>
5.1. Introducción . . . . .	121
5.2. Régimen transitorio . . . . .	122
5.2.1. Sistemas de primer orden . . . . .	124
5.2.2. Sistemas de segundo orden . . . . .	126
5.2.3. Sistemas de orden superior. Dinámica dominante . . .	140
5.2.4. Efecto de los ceros . . . . .	143
5.3. Estabilidad . . . . .	145
5.3.1. Estabilidad en el plano complejo. Criterio de Routh . .	146
5.3.2. Estudio de estabilidad en el plano complejo. Ejemplos	149
5.3.3. Análisis en situaciones singulares . . . . .	150
5.4. Régimen permanente . . . . .	154
5.4.1. Error de posición . . . . .	155
5.4.2. Error de velocidad . . . . .	156
5.4.3. Error de aceleración . . . . .	157
5.4.4. Errores y constantes de error . . . . .	157
<b>6. Análisis en el dominio frecuencial</b>	<b>159</b>
6.1. Introducción . . . . .	159
6.2. Respuesta ante excitación senoidal . . . . .	160
6.3. Diagrama de Bode . . . . .	161
6.4. Diagrama de Bode de funciones elementales . . . . .	164
6.4.1. Ganancia . . . . .	164
6.4.2. Derivador . . . . .	165
6.4.3. Integrador . . . . .	166
6.4.4. Sistemas de primer orden . . . . .	167
6.4.5. Sistemas de segundo orden . . . . .	170
6.5. Trazado del diagrama de Bode . . . . .	173
6.5.1. Trazado del diagrama de ganancia . . . . .	174
6.5.2. Trazado del diagrama de fase . . . . .	177
6.5.3. Ejemplos del trazado del diagrama de Bode . . . . .	179
6.6. Sistemas de fase mínima y no mínima . . . . .	189
6.7. Estabilidad en el dominio frecuencial . . . . .	190
6.7.1. El principio del argumento . . . . .	192
6.7.2. Camino de Nyquist . . . . .	194
6.7.3. Criterio de estabilidad de Nyquist . . . . .	196
6.7.4. Ejemplos del trazado del diagrama de Nyquist . . . .	197
6.8. Márgenes de estabilidad . . . . .	207
6.8.1. Margen de ganancia . . . . .	207
6.8.2. Margen de fase . . . . .	207
6.9. Ancho de banda . . . . .	209

<b>7. Introducción a los sistemas realimentados</b>	<b>211</b>
7.1. Introducción . . . . .	211
7.2. Sistemas realimentados . . . . .	212
7.2.1. Control por prealimentación . . . . .	213
7.2.2. Control por realimentación . . . . .	215
7.3. Especificaciones de diseño en el dominio temporal . . . . .	219
7.3.1. Respuesta deseada en régimen transitorio . . . . .	220
7.3.2. Respuesta deseada en régimen permanente . . . . .	222
7.3.3. Especificaciones generales en el dominio temporal . . . . .	223
7.4. Especificaciones en el dominio frecuencial . . . . .	224
7.5. Especificaciones generales . . . . .	228
<b>8. Diseño de reguladores en el dominio complejo</b>	<b>229</b>
8.1. Introducción . . . . .	229
8.2. El regulador <b>P</b> , <b>PI</b> , <b>PD</b> y <b>PID</b> . . . . .	230
8.2.1. Regulador proporcional <b>P</b> . . . . .	230
8.2.2. Regulador proporcional derivativo <b>PD</b> . . . . .	231
8.2.3. Regulador proporcional integral <b>PI</b> . . . . .	233
8.2.4. Regulador proporcional integral derivativo <b>PID</b> . . . . .	235
8.3. Diagrama del lugar de las raíces . . . . .	239
8.3.1. Polos del sistema en bucle cerrado . . . . .	240
8.3.2. Trazado del lugar de las raíces . . . . .	243
8.3.3. Aspecto cualitativo del lugar . . . . .	254
8.4. Diseño de reguladores I . . . . .	257
8.4.1. Regulador proporcional <b>P</b> . . . . .	257
8.4.2. Regulador proporcional integral <b>PI</b> . . . . .	261
8.4.3. Regulador proporcional derivativo <b>PD</b> . . . . .	269
8.4.4. Regulador proporcional integral derivativo <b>PID</b> . . . . .	280
8.4.5. Causalidad del regulador . . . . .	289
8.4.6. Aspectos finales . . . . .	296
8.5. Diseño de reguladores II . . . . .	298
<b>9. Diseño de reguladores en el dominio frecuencial</b>	<b>309</b>
9.1. Introducción . . . . .	309
9.2. Compensación por Ajuste de Ganancia . . . . .	310
9.2.1. Procedimiento de diseño . . . . .	310
9.3. Compensación de adelanto de fase . . . . .	318
9.3.1. Procedimiento de diseño . . . . .	320
9.4. Compensación de atraso de fase . . . . .	334
9.4.1. Procedimiento de diseño . . . . .	335
9.5. Compensación de adelanto-atraso de fase . . . . .	342
9.5.1. Procedimiento de diseño . . . . .	343