

# Indice

<b>1</b>	<b>Conceptos básicos relativos al control</b>	<b>11</b>
1.1	Conceptos y designaciones	11
	Control en bucle abierto de una variable	11
	Control en bucle cerrado de una variable	13
1.2	Sistemas analógicos y digitales	21
1.3	Respuesta transitoria de la variable controlada	23
1.4	Respuesta a un escalón y respuesta de frecuencia	27
<b>2</b>	<b>Descripción del comportamiento dinámico de los elementos de los sistemas de control</b>	<b>31</b>
2.1	Paso del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia	31
2.2	Elemento retardador de 1 <sup>er</sup> orden	33
	Ecuación general en función del tiempo	33
	Ecuación en función de la frecuencia	34
	Respuesta a un escalón	34
	Respuesta de frecuencia y respuesta indicial	36
	Lugar geométrico	37
	Características de frecuencia	39
	Transformación de Laplace	40
2.3	Elemento retardador de 2 <sup>o</sup> orden	42
	Ecuación general en función del tiempo	43
	Respuesta de frecuencia y función de transferencia	44
	Respuesta a un escalón y respuesta indicial	45
	Lugar geométrico	49
	Características de frecuencia	52
2.4	Elemento retardador de 2 <sup>o</sup> orden formado por dos elementos retardadores de 1 <sup>er</sup> orden	55
	Ecuación general en función del tiempo	55
	Respuesta indicial	56
	Función de transferencia	57
	Características de frecuencia	57
<b>3</b>	<b>Comportamiento de los elementos de los sistemas controlados</b>	<b>62</b>
3.1	Elemento de acción proporcional	64
3.2	Elemento de acción integral	67
3.3	Elemento retardador de 1 <sup>er</sup> orden	71

3.4	Elemento retardador de 2° orden . . . . .	75
3.5	Elemento de acción proporcional y derivada . . . . .	80
3.6	Elemento de acción derivada con componente de retardo . . . . .	86
3.7	Elemento de tiempo muerto . . . . .	88
3.8	Elementos no lineales . . . . .	93
<b>4</b>	<b>Controladores electrónicos . . . . .</b>	<b>100</b>
4.1	Estudio del amplificador operacional como cuadripolo . . . . .	101
4.1.1	Amplificador ideal . . . . .	103
4.1.2	Amplificador real . . . . .	103
	Respuesta dinámica de un amplificador real . . . . .	107
	Respuesta estática de un amplificador real . . . . .	110
4.2	Montajes básicos de los amplificadores operacionales . . . . .	115
	Amplificador inversor . . . . .	117
	Amplificador no inversor . . . . .	126
	Amplificador diferencial . . . . .	128
	Amplificador con salida de corriente impuesta . . . . .	130
	Amplificador con realimentación positiva . . . . .	131
4.3	Comportamiento y realización práctica de los controladores . . . . .	134
	Acción proporcional . . . . .	136
	Acción integral . . . . .	141
	Comparación de las características de los controladores P e I . . . . .	146
	Acción proporcional e integral . . . . .	149
	Acción derivada . . . . .	158
	Acción proporcional y derivada . . . . .	160
	Acción proporcional, integral y derivada . . . . .	171
4.4	Circuitos auxiliares de los controladores . . . . .	177
	Circuitos de alisamiento . . . . .	178
	Circuitos de limitación . . . . .	188
	Amplificadores y controladores con característica de diodo . . . . .	200
4.5	Cálculadores analógicos . . . . .	204
<b>5</b>	<b>Combinaciones entre los elementos de los sistemas de control . . . . .</b>	<b>214</b>
5.1	Representación del comportamiento de los elementos de los sistemas de control . . . . .	214
5.2	Combinaciones entre las líneas de actuación . . . . .	216
5.3	Combinaciones básicas entre los elementos de los sistemas de control . . . . .	217
	Conexión en serie . . . . .	218
	Conexión en paralelo . . . . .	219
	Conexión en anillo I con realimentación directa . . . . .	220

	Conexión en anillo II con realimentación a través de un segundo elemento . . . . .	221
5.4	Ejemplos de combinaciones básicas entre los elementos de los sistemas de control . . . . .	223
	Ejemplos de conexiones en serie . . . . .	223
	Ejemplos de conexiones en paralelo . . . . .	225
	Ejemplos de conexiones en anillo I con realimentación directa . . . . .	227
	Ejemplos de conexiones en anillo II con realimentación a través de un segundo elemento . . . . .	230
5.5	Transformación de ramificaciones y de nudos . . . . .	231
	Transformación de ramificaciones . . . . .	232
	Transformación de nudos sumadores . . . . .	233
	Transformación de nudos multiplicadores y divisores . . . . .	234
5.6	Funciones de transferencia del bucle de control . . . . .	235
	Análisis del bucle de control abierto . . . . .	236
	Análisis del bucle de control cerrado en función de la variable de referencia . . . . .	237
	Análisis del bucle de control cerrado en función de la variable perturbadora . . . . .	239
	Consideración de la influencia de la variable de referencia y de la variable perturbadora . . . . .	241
<b>6</b>	<b>Ajuste óptimo de los bucles de control . . . . .</b>	<b>242</b>
6.1	Evaluación de las respuestas a un escalón correspondientes a la variable controlada . . . . .	243
	Respuesta a una variable perturbadora en escalón . . . . .	243
	Respuesta a una variable de referencia en escalón . . . . .	245
6.2	Compensación . . . . .	247
	Compensación con un controlador PD . . . . .	248
	Compensación con un controlador PI . . . . .	250
	Compensación con un controlador PID . . . . .	253
6.3	Suma de las pequeñas constantes de tiempo . . . . .	255
6.4	Bucle de control sencillo . . . . .	258
	Bucle gobernado por un controlador P . . . . .	258
	Bucle gobernado por un controlador I . . . . .	259
6.5	Consideraciones generales sobre la optimización . . . . .	261
6.6	Métodos de optimización basados en la acomodación del módulo . . . . .	265
6.6.1	Optimización en función del módulo . . . . .	265
	Sistema controlado con muchos retardos pequeños de 1 <sup>er</sup> orden . . . . .	265
	Sistema controlado con retardos pequeños y grandes de 1 <sup>er</sup> orden . . . . .	268
	Comparación de los efectos de los controladores I, PI y PID sobre un sistema controlado dado . . . . .	271

	Sistema controlado con un retardo muy grande y algunos muy pequeños de 1 <sup>er</sup> orden . . . . .	273
6.6.2	Optimación en función de la simetría . . . . .	279
	Sistema controlado con un elemento de acción integral y muchos retardos pequeños de 1 <sup>er</sup> orden . . . . .	281
	Sistema controlado con un elemento de acción integral y un retardo grande y varios pequeños de 1 <sup>er</sup> orden . . . . .	285
	Sistema controlado con un retardo que es más de cuatro veces mayor que el conjunto de todos los demás retardos de 1 <sup>er</sup> orden	286
	Alisamiento de la consigna . . . . .	291
6.6.3	Comparación entre la optimación en función del módulo y la optimación en función de la simetría . . . . .	297
	Variación de los parámetros del controlador . . . . .	298
	Constante de tiempo equivalente de un bucle de control optimado	304
6.6.4	Corrección de los efectos de las perturbaciones . . . . .	309
6.6.5	Supresión de las sobreoscilaciones de la variable controlada debidas a la saturación del controlador . . . . .	327
	Generador de rampas . . . . .	329
	Controlador de la aceleración . . . . .	331
	Comparación de las ventajas e inconvenientes del generador de rampas y del controlador de la aceleración . . . . .	333
	Canal de la variable controlada con efecto proporcional y derivador	334
6.7	Ajuste óptimo de los controladores empleando tablas . . . . .	338
<b>7</b>	<b>Apéndice</b> . . . . .	<b>354</b>
7.1	Designaciones y conceptos . . . . .	354
7.2	Símbolos . . . . .	364
7.3	Resumen de las funciones de transferencia y de las respuestas indiciales más habituales . . . . .	365
<b>8</b>	<b>Índice alfabético</b> . . . . .	<b>367</b>