

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Concepto de sistema	1
1.2	Concepto de bloque	1
1.3	Diagrama de bloques	2
1.4	Función de transferencia o transmitancia	2
1.5	Sistema controlado	5
1.6	Control manual en lazo cerrado	5
1.7	Control automático en lazo cerrado	6
1.8	Cambios de carga y perturbaciones	7
1.9	Realimentación	8
1.10	Álgebra de bloques	9
	1.10.1 Reglas algebraicas	10
2	La transformada de Laplace	17
2.1	Qué es y para qué sirve	17
2.2	Propiedades y teoremas de la transformada de Laplace	18
	2.2.1 Enumeración de las propiedades y teoremas	19
	2.2.2 Aplicación del teorema de la derivación real	23
	2.2.3 Antitransformada de fracciones impropias	26
2.3	Transmitancia operacional	27
2.4	Transformación de ecuaciones diferenciales	30
2.5	Ejemplos de cálculo	33
	2.5.1 Cálculo con condiciones iniciales	35
2.6	Conversión de una función laplaciana en una ecuación diferencial	37

3	Variables y parámetros	39
3.1	Es necesario tipificar	39
3.2	Variables	40
	Potencial o fuerza impulsora	40
	Flujo o corriente	40
	Carga o cantidad	40
3.3	Parámetros	41
	Resistencia y conductancia	42
	Capacidad	43
	Inertancia	44
3.4	Analogías	47
4	Elementos básicos	51
4.1	Formas o funciones elementales de excitación	51
4.1.1	Escalón unitario	51
4.1.2	Impulso unitario	53
4.1.3	Rampa unitaria	54
4.1.4	Función senoidal	54
4.2	Componentes básicos de un sistema controlado	54
4.2.1	Componentes activos	55
4.2.2	Elementos de primer orden	56
4.2.3	Retardo de primer orden resistencia-capacidad	56
4.2.4	Retardo de primer orden resistencia-inertancia	59
4.2.5	Estudio de elementos retardo de primer orden. Metodología de cálculo	62
	4.2.5.a Filtro o elemento R-C (resistencia-capacidad)	63
	4.2.5.b Elemento bulbo de temperatura	64
	4.2.5.c Concentración en un tanque agitado	66
	4.2.5.d Temperatura en un tanque agitado	68
	4.2.5.e Reacción de primer orden	69
	4.2.5.f Nivel de un tanque con restricción de descarga. Linealización de funciones de nivel	71
	4.2.5.g Recipiente con gas a presión provisto de una restricción. Linealización de funciones de sistemas con gases a presión	76
	4.2.5.h Recipiente con gas a presión con dos restricciones .	80
4.2.6	Elemento capacidad pura o integrador	84
	4.2.6.a Nivel en tanque con salida constante	85
	4.2.6.b Masa aislada provista de caldeo eléctrico	87
	4.2.6.c Pistón hidráulico	88

4.2.7	Elementos ajustables	89
4.2.7.a	Ganancia ajustable. Multiplicador	90
4.2.7.b	Reostato o potenciómetro	91
4.2.7.c	Válvula de control	92
4.2.7.d	Bomba centrífuga	97
4.2.8	Elementos de segundo orden	102
4.2.8.a	Circuito eléctrico R-L-C serie	104
4.2.8.b	Masa suspendida de un resorte con amortiguación	107
4.2.8.c	Sismógrafo	110
4.2.8.d	Acelerómetro	113
4.2.8.e	Dos retardos de primer orden en serie	115
4.2.8.f	Dos sistemas de nivel conectados en serie	117
4.2.8.g	Dos filtros R-C conectados en serie	120
4.2.8.h	Bulbo de temperatura con vaina	121
4.2.8.i	Tanque encamisado	124
4.2.8.j	Dos tanques a presión en serie	127
4.2.9	Elemento tiempo muerto	127
4.2.10	Elemento adelanto-retardo	130
4.2.11	Elemento anticipativo	132
4.2.12	Controladores	136
4.2.12.a	Proporcional (P)	136
	Banda proporcional	137
	Ganancia	138
	Desviación permanente	138
	Réajuste manual	138
	Ecuación del controlador	143
4.2.12.b	Integral (I)	144
	Ecuación del controlador	144
	Transmitancia operacional	146
4.2.12.c	Proporcional-integral (PI)	147
	Acción integral (Reset)	147
	Velocidad de reajuste	147
	Repeticiones por minuto	147
	Tiempo integral	148
	Ecuación del controlador	148
4.2.12.d	Proporcional-derivativo (PD)	149
	Acción derivativa (Rate)	149
	Tiempo derivativo	150
	Ecuación del controlador	150
4.2.12.e	Proporcional-integral-derivativo (PID)	150
	Ecuación del controlador	151
	Transmitancia operacional	151
	Ejecuciones especiales	153
	Nota sobre la señal de error o desviación	155

5	Respuesta temporal de los componentes básicos	157
5.1	Sistemática de cálculo	157
5.1.1	Respuesta al impulso	158
5.1.2	Respuesta al escalón unitario	159
5.1.3	Respuesta a la rampa unitaria	160
5.2	Respuesta de un retardo de primer orden	160
5.2.1	Respuesta indicial	161
	Práctica nº 5.1	167
	Práctica nº 5.2	168
5.2.2	Respuesta impulsiva	169
	Práctica nº 5.3	172
	Práctica nº 5.4	173
5.2.3	Respuesta a la rampa	174
	Práctica nº 5.5	177
5.3	Respuesta de un retardo de segundo orden	178
5.3.1	Respuesta indicial	179
	Caso subamortiguado	179
	Caso oscilatorio puro	182
	Caso sobreamortiguado	183
	Caso críticamente amortiguado	184
	Práctica nº 5.6	185
	Práctica nº 5.7	186
	Práctica nº 5.8	186
5.3.2	Respuesta impulsiva	187
	Caso subamortiguado	188
	Caso oscilatorio puro	188
	Caso sobreamortiguado	189
	Caso críticamente amortiguado	189
	Práctica nº 5.9	190
5.3.3	Respuesta a la rampa	190
	Caso subamortiguado	191
	Caso oscilatorio puro	195
	Caso sobreamortiguado	195
	Caso críticamente amortiguado	196
	Práctica nº 5.10	196
5.4	Respuesta de un bloque tiempo muerto	197
	Práctica nº 5.11	197
5.5	Respuesta de un bloque adelanto-retardo	198
5.5.1	Respuesta indicial	198
	Caso adelanto	199
	Caso retardo	199
	Práctica nº 5.12	200
	Práctica nº 5.13	201

5.5.2	Respuesta impulsiva	202
	Práctica nº 5.14	202
5.5.3	Respuesta a la rampa	203
	Práctica nº 5.15	205
5.6	Respuesta de un bloque anticipativo	206
5.6.1	Respuesta indicial	206
5.6.2	Respuesta impulsiva	206
5.6.3	Respuesta a la rampa	207
	Práctica nº 5.16	208
5.7	Respuesta de un controlador P+D	208
5.7.1	Respuesta indicial	209
5.7.2	Respuesta a la rampa	210
	Práctica nº 5.17	212
5.8	Respuesta de un controlador P+I	212
5.8.1	Respuesta indicial	213
	Práctica nº 5.18	214
5.8.2	Respuesta a la rampa	215
	Práctica nº 5.19	216
5.9	Respuesta de un controlador P+I+D	217
5.9.1	Respuesta indicial	218
5.9.2	Respuesta a la rampa	219
	Práctica nº 5.20	220
5.10	Respuesta de un controlador integral	221
	Nota sobre representación gráfica de impulsos	222
6	Respuesta frecuencial de los componentes básicos	223
6.1	Conceptos de base	223
6.1.1	El decibelio	224
6.1.2	La octava y la década	226
6.1.3	Las unidades dB/octava y dB/década	227
6.1.4	Números complejos y vectores	228
	Números complejos conjugados	232
	Operaciones con números complejos	233
6.1.5	Vectores giratorios (fasores). Ondas senoidales	237
6.2	Respuesta frecuencial	241
6.2.1	Obtención de la respuesta frecuencial	244
6.3	Tipos de representaciones gráficas	246
6.3.1	Diagrama de Bode	246
6.3.2	Diagrama de Nyquist	248
6.3.3	Diagrama de Black	249

6.4	Determinación de la respuesta frecuencial	250
6.4.1	Módulo K o constante K	250
6.4.2	Factores del tipo s	252
6.4.3	Factores del tipo $Ts+1$	254
	Práctica nº 6.1	263
6.4.4	Factores del tipo $T^2s^2+2\zeta Ts+1$	265
	Práctica nº 6.2	276
	Práctica nº 6.3	278
	Práctica nº 6.4	279
6.4.5	Factores del tipo e^{-Ts}	280
	Práctica nº 6.5	281
6.4.6	Elemento adelanto-retardo	282
	Práctica nº 6.6	286
	Práctica nº 6.7	286
6.4.7	Elemento anticipativo	287
	Práctica nº 6.8	289
6.4.8	Controlador P	290
6.4.9	Controlador P+D	290
	Práctica nº 6.9	293
6.4.10	Controlador P+I	294
	Práctica nº 6.10	296
6.4.11	Controlador P+I+D	297
	Práctica nº 6.11	302
	Práctica nº 6.12	303
	Práctica nº 6.13	305
6.4.12	Controlador integral	306
7	Control automático en lazo cerrado	309
7.1	Realimentación	309
7.2	Concepto de estabilidad	309
7.3	Criterios de optimización	311
7.4	Respuesta frecuencial y estabilidad	316
7.5	Margen de ganancia y margen de fase.	
	Estabilidad relativa	319
	7.5.1 Margen de ganancia	320
	7.5.2 Margen de fase	321
	7.5.3 Estabilidad relativa	322
7.6	Interpretación gráfica de los márgenes	
	de ganancia y de fase	322
	7.6.1 Ejemplo de cálculo de los márgenes	
	de ganancia y de fase	324

7.7	Criterios de estabilidad	326
7.7.1	Criterio de estabilidad de Nyquist	329
7.7.2	Criterio de estabilidad de Bode	330
7.7.3	Ampliación del criterio de estabilidad de Nyquist	330
7.8	Respuesta frecuencial en lazo cerrado	337
7.9	Manejo de las perturbaciones	342
7.10	Estrategias de control	347
8	Control en lazo cerrado simple	349
8.1	Aplicación	349
8.2	Diagrama de bloques	349
	Práctica n° 8.1	351
8.3	Simulación y análisis de sistemas controlados	351
8.3.1	Respuesta generalizada de un lazo con perturbación	352
	Generalización de las funciones de transferencia en lazo cerrado	356
8.3.2	Control proporcional de un proceso retardo de primer orden	357
	Respuesta frente a cambios en el punto de consigna	358
	Práctica n° 8.2	361
	Respuesta frente a perturbaciones	365
	Práctica n° 8.3	366
8.3.3	Control proporcional de un proceso formado por dos retardos de primer orden	367
	Respuesta frente a cambios en el punto de consigna	368
	Práctica n° 8.4	371
	Respuesta frente a perturbaciones	373
	Práctica n° 8.5	376
	Práctica n° 8.6	377
8.3.4	Control proporcional de un proceso formado por tres retardos de primer orden	379
	Práctica n° 8.7	382
8.3.5	Control en modo integral de un proceso formado por un retardo de primer orden	389
	Práctica n° 8.8	391
8.3.6	Control proporcional-integral de un proceso formado por un retardo de primer orden	393
	Práctica n° 8.9	394
8.3.7	Control proporcional-integral de un proceso formado por dos retardos de primer orden	395
	Práctica n° 8.10	397
8.3.8	Control proporcional-integral de un proceso formado por tres retardos de primer orden	401
	Práctica n° 8.11	403

8.3.9	Control proporcional-integral-derivativo de un proceso formado por dos retardos de primer orden	406
	Práctica nº 8.12	409
8.4	Efecto de un retardo de tiempo en la medida	410
	Práctica nº 8.13	414
8.5	Efecto de un tiempo muerto en un sistema	416
8.5.1	Efecto del tiempo muerto en la medida	416
	Práctica nº 8.14	418
8.5.2	Efecto del tiempo muerto en el proceso	420
	Práctica nº 8.15	421
8.5.3	Mejoras que aporta la acción derivativa	423
	Práctica nº 8.16	424
	Práctica nº 8.17	425
8.6	Efecto de las alinealidades en un sistema	426
	Práctica nº 8.18	428
9	Controles complejos en lazo cerrado	433
9.1	Control en cascada	433
	Práctica nº 9.1	441
	Práctica nº 9.2	447
	Práctica nº 9.3	474
9.1.1	Predicción de la desviación permanente	478
9.2	Control en adelanto	482
9.2.1	Ecuaciones del control en adelanto	484
	Práctica nº 9.4	495
	Práctica nº 9.5	503
 Apéndices		
A-1	Tabla de transformadas de Laplace	519
A-2	Escalado de procesos y normalización de variables para el ordenador	529
1	Introducción	529
2	Márgenes de operación	529