

ÍNDICE

1. Introducción	
1.1 Concepto de sistemas	1
1.2 Concepto de bloque	1
1.3 Diagrama de bloques	2
1.4 Función de transferencias o transmisión	2
1.5 Sistema controlado	5
1.6 Control manual en lazo cerrado	6
1.7 Control automático en lazo cerrado	7
1.8 Cambios de carga y perturbaciones	8
1.9 Realimentación	8
1.10 Álgebra de bloques	9
1.10.1 Reglas algebraicas	10
2. La transformada de Laplace	
2.1 qué es y para qué sirve	17
2.2 Propiedades y teoremas de la transformación de Laplace	18
2.2.1 Enumeración e las propiedades	19
2.2.2 Aplicación de teorema de la derivación real	23
2.2.3 Antitransformada de fracciones impropias	26
2.3 Trasmittancia operacional	27
2.4 Transformación de ecuaciones diferenciales	30
2.5 Ejemplos de cálculo	33
2.6 Conversión de una Función laplaciana en una ecuación diferencial	37
3. Variables y parámetros	
3.1 Es necesario tipificar	39
3.2 Variables	
* Potencial o fuerza impulsora	
* Flujo o corriente	
* Carga o cantidad	40
3.3 Parámetros	41
* Resistencia y conductancia	42
* Capacidad	43
* Inertancia	44
3.4 Analogías	47
4. Elementos básicos	
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 unitario	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 del primer orden resistencia - capacidad	56
4.2.4 Retardo del primer orden resistencia - inertancia	59
4.2.5 Estudio de elementos retardo de primer orden	
Metodología de cálculo	62

4.2.5.a Filtro R - C	63
4.2.5.b Elementos 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 del 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 Elementos capacidad pura o integrador	84
4.2.6. a. Nivel de 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. Potenciómetro	91
4.2.7. c. Válvula de control	92
4.2.7. d. Bomba centrifuga	97
4.2.8. Elementos de segundo orden	102
4.2.8 a. Circuito electrónico 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 retardo del 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 Elementos tiempo muerto	127
4.2.10 Elementos adelanto - retardo	130
4.2.11 Elementos anticipativo	132
4.2.12 Controladores	136
4.2.12. a. Proporcional (P)	136
* Banda proporcional	137
* Ganancia	138
* Desviación permanente	138
* Reajuste manual	138
* Ecuación del controlador	138
4.2.12. b. Integral (I)	141
* Ecuación del controlador	142
* Transmitancia operacional	143
4.2.12. c. Proporcional integral (PI)	144
* Acción integral	144
* Velocidad de reajuste	145
* Repeticiones por minuto	145
* Tiempo integral	145
* Ecuaciones de controlador	145

4.2.12.d. Proporcional – derivativo (PD)	146
* Acción derivativa	146
* Tiempo derivativo	147
* Ecuación del controlador	147
4.2.12. e. Proporcional integral – derivativo (PID)	147
* Ecuación de controlador	148
* Transmitancia operacioanal	148
* Ejecuciones especiales	149
Nota sobre la señal de error o desviación	151
5 Respuesta temporal e los componentes básicos	
5.1 Sistemático de cálculo	153
5.1.1 Respuesta al impulso	154
5.1.2 Respuesta al escalón unitario	155
5.1.3 Respuesta a la rampa unitaria	156
5.2 Respuesta de un retardo de primer orden	156
5.2.1 Respuesta inicial	157
* Práctica n. 5.1	163
* Práctica n. 5.2	164
5.2.2 Respuesta impulsiva	165
* Práctica n. 5.3	168
* Práctica n.5.4	169
5.2.3 Respuesta a la rampa	170
* Práctica n. 5.5	173
5.3 Respuesta de un retardo de segundo orden	174
5.3.1 Respuesta inicial	175
* Caso subamortiguado	175
* Caso oscilatorio puro	178
* Caso subamortiguado	179
* Caso críticamente amortiguado	180
* Práctica n. 5.6	181
* Práctica n. 5.7	182
* Práctica n. 5.8	182
5.3.2 Respuestas impulsivas	183
* Caso subamortiguado	184
* Caso oscilatorio puro	184
* Caso subamortiguado	185
* Caso críticamente amortiguado	185
* Práctica n. 5.9	186
5.3.3. Respuesta a la rampa	186
* Caso subamortiguado	187
* Caso oscilatorio puro	191
* Caso subamortiguado	191
* Caso críticamente amortiguado	192
* Práctica n. 5.10	192
5.4 Respuesta de un bloque tiempo muerto	193
* Práctica n. 5.11	193
5.5 Respuesta de un bloque adelanto - retardo	194
5.5.1 respuesta inicial	194

Caso adelanto	195
Caso retardo	195
* Práctica n. 5.12	196
* Práctica n. 5.13	197
5.5.2 Respuesta impulsiva	198
* Práctica n. 5.14	198
5.5.3 Respuesta a la rampa	199
* Práctica n. 5.15	201
5.6 Respuesta de un bloque anticipativo	202
5.6.1 Respuesta indicial	202
5.6.2 Respuesta impulsiva	202
5.6.3 Respuesta a la rampa	203
* Práctica n. 5.16	204
5.7 Respuesta de un controlador P + D	204
5.7.1 Respuesta indicial	205
5.7.2 Respuesta a la rampa	206
* Práctica n. 5.17	208
5.8 Respuesta de un controlador P + I	208
5.8.1 respuesta inicial	209
* Práctica n. 5.18	210
5.2.8 Respuesta a la rampa	211
* Práctica n. 5.19	
5.9 respuesta de un controlador P+I+D	213
5.9.1 Respuesta inicial	214
5.9.2 respuesta a la rampa	215
* Práctica n. 5.20	216
5.10 Respuesta de un controlador integral	217
Nota sobre representación grafica de impulsos	218
6 Respuesta frecuencial de los componentes básicos	
6.1 Conceptos de base	219
6.1.1 El decibelio	220
6.1.2 La octava y la década	222
6.1.3 Las unidades dB/octava y dB/década	223
6.1.4 Números complejos y vectores	224
* Números complejos conjugadores	228
* Operaciones con números complejos	229
6.1.5 Vectores giratorios (factores). Ondas senoidales	233
6.2 Respuesta frecuencial	237
6.2.1 Obtención de la respuesta frecuencial	240
6.3 Tipos de representaciones gráficas	242
6.3.1 Diagrama de Bode	242
6.3.2 Diagrama de Nyquist	244
6.3.3 Diagrama de Black	245
6.4 Determinación de la respuesta frecuencial	246
6.4.1 Módulo K o constante K	246
6.4.2 Factores de tipo s	248
6.4.3 Factores de tipo Ts + 1	261
* Práctica n. 6.1	259

6.4.4 Factores de tipo $T_2 s_2 + 2T_s + 1$	261
* Práctica n. 6.2	272
* Práctica n. 6.3	274
* Práctica n. 6.4	275
6.4.5 Factores de tipo $e - T_s$	276
* Práctica n. 6.5	277
6.4.6 Elementos adelanto - retardo	278
* Práctica n. 6.6	282
* Práctica n. 6.7	282
6.4.7 Elementos anticipativo	283
* Práctica n. 6.8	285
6.4.8 Controlador P	286
6.4.9 Controlador P+ D	286
* Práctica n. 6.9	289
6.4.10 Controlador P+I	290
* Práctica n. 6.10	292
6.4.11 Controlador P+I+D	293
* Práctica n. 6.11	298
* Práctica n. 6.12	299
* Práctica n. 6.13	301
6.4.12 Controlador integral	302
7 Control automática en lazo cerrado	
7.1 Realimentación	305
7.2 Concepto de estabilidad	305
7.3 Criterios de optimización	307
7.4 Respuesta frecuencial y estabilidad	312
7.5 Margen de ganancia y margen de fase. Estabilidad relativa	315
7.5.1 Margen de ganancia	316
7.5.2 Margen de fase	317
7.5.3 Estabilidad relativa	318
7.6 Interpretación gráfica de los márgenes de ganancia y de fase	318
7.6.1 Ejemplos de cálculo de los márgenes de ganancia y de fase	320
7.7 Criterios de estabilidad	322
7.7.1 Criterios de estabilidad de Nyquist	325
7.7.2 Criterios de estabilidad de Bode	326
7.7.3 Aplicación de criterio de estabilidad de Nyquist	326
7.8 Respuesta frecuencial en lazo cerrado	333
7.9 Manejo de perturbaciones	338
7.10 Estrategias de control	343
8 Control en lazo cerrado simple	
8.1 Aplicación	345
8.2 Diagrama de bloques	345
* Práctica n. 8.1	
8.3 Simulación y análisis de sistema controlado	347
8.3.1 Respuesta generalizada de un lazo con perturbación. Generalización de las funciones de transferencias en lazos cerrados	352
8.3.2 Control proporcional de un proceso retardo del primer orden	353
Respuesta frente a cambios en el punto de consignar	354

* Práctica n. 8.2	357
Respuestas frente a perturbaciones	361
* Práctica n. 8.3	362
8.3.3 Control proporcional de un proceso formados por dos retardos de primer orden	363
Respuestas frente a cambios en el punto de consigna	364
* Práctica n. 8.4	367
Respuestas frente a perturbaciones	369
* Práctica n. 8.5	372
* Práctica n. 8.6	373
8.3.4 Control proporcional de un proceso formados por tres retardos de primer orden	375
* Práctica n. 8.7	378
8.3.5 Control en modo integral de un proceso formado por un retardo de primer orden	385
* Práctica n. 8.8	387
8.3.6 Control proporcional – integral de un proceso formado por un retardo de primer orden	389
* Práctica n. 8.9	390
8.3.7 Control proporcional – integral de un proceso formado por dos retardos de primer orden	391
* Práctica n. 8.10	393
8.3.8 Control proporcional – integral de un proceso formado por tres retardos de primer orden	397
* Práctica n. 8.11	399
8.3.9 Control proporcional – integral – derivativo de un proceso formado por dos retardos de primer orden	402
* Práctica n. 8.12	405
8.4 Efecto de un retardo de tiempo en la medida	406
* Práctica n. 8.13	410
8.5 Efecto de un tiempo muerto en un sistema	412
8.5.1 Efecto de un tiempo muerto en la medida	412
* Práctica n. 8.14	414
8.5.2 Efecto del tiempo muerto en el proceso	416
* Práctica n. 8.15	417
8.5.3 Mejoras que aporta la acción derivativa	419
* Práctica n. 8.16	420
* Práctica n. 8.17	421
8.6 Efecto de las alinealidades en un sistema	422
* Práctica n. 8.18	424
9 Controles complejos en lazo cerrado	
9.1 Control en cascada	429
* Práctica n. 9.1	437
* Práctica n. 9.2	443
* Práctica n. 9.3	470
9.1.1 Predicción de la desviación permanente	474
9.2 Control en adelanto	478
9.2.1 Ecuaciones del control en adelanto	480
* Práctica n. 9.4	491

* Práctica n. 9.5	499
Apéndice	
A – 1 Tabla de transformadas de Laplace	515
A – 2 Escalonado de procesos y normalización de variables para el ordenador	525
1 Introducción	525
2 márgenes de operación	525
3 Normalización de variables	526
4 escalonado del tiempo	531
5 resumen	533
6 Manejo de los parámetros * Valor de base *	535
7 Manejo de parámetros * Elevac. / Supres. De cero*	545
8 Manejo de parámetro * Valor de referencia*	548
A – 3 Composición de la respuestas temporal de un sistema	551
A – 4 Regla de Mason para el cálculo de la transmitancia entre dos puntos de un sistema	561
A – 5 Bibliografía	571
Anexo 1	
Guía resumida para uso del programa	575
1 Requisitos para uso del programa	575
1.1 Se requiere	575
1.2 Notas sobre resolución de pantalla	575
2 Instalación del programa	
2.1 Ficheros de instalación	576
2.2 Obtención del fichero para la instalación	577
2.3 Procedimientos para la instalación	577
3 Arranque del programa	577
4 Menú principal de Windows	578
Estructura de los menús	578
5 descripción de las principales opciones	579
5.1 análisis de componentes básicos	580
5.2 Simulación de lazos de control	580
5.3 Menús de opciones	580
5.3.1 Menú frecuencial	581
* Diagrama real	581
* Diagrama de Bode	581
* Diagrama de Nyquist	581
* Diagrama de Black	581
* Todos los diagramas	582
* Marcas de frecuencias	582
* Frecuencia crítica (resonancia)	582
* Frecuencia de cruce de ganancia	582
* Frecuencia de pico de resonancia	583
5.3.2 Menú Temporal	583
a) Para componentes básicos	583
* Impulso	583
* Escalón	583
* Rampa	583
b) Para lazos de control	583

* Escalón condiciones iniciales	584
* Rampas programadas	584
5.3.3 Menú Cambios	584
* Parámetros de componente	585
* Límites de las escalas de frecuencias	585
* Duración de la respuesta temporal	585
* Constantes (Componentes básicos)	585
* Programación de las rampas (Lazos de control)	585
* Modos (Lazos de control)	586
a) modo de lazos en la respuesta frecuencial	586
b) Modo de presentación de la respuesta temporal	587
* Frecuencia de muestreo (Lazos de control)	588
5.3.4 Menú Miscelán	589
* Borrar pantalla	589
* Vista anterior	589
* Ver diagramas de bloques	589
* Ver parámetros de los bloques activos (Lazos de c.)	590
* Hacer nulos los bloques (Lazos de control)	590
5.4 Otros menús	590
5.4.1 Menú archivos	590
* Imprimir	591
* Preferencias	591
5.4.2 Menú general	592
5.4.3 Menús especiales	592
* Cambios / Color de fondo	592
* Miscelán / Calculador ABACUS	592
* Miscelán / Calculadora de Windows	593
5.4.4 Menú Información	593
5.4.5 Menús redundantes	593
5.4.6 Otras opciones en la ejecución de una Respuesta temporal	594
6 Control de errores	595
7 Ficheros del programa	596
7.1 Ficheros generados en la instalación	596
7.2 ficheros generados por el usuario	597
8 Misceláneos	
Peculiaridades de un programa de simulación	597
8.1 Generalidades	597
8.2 Tiempo muerto virtual oculto en el sistema	598
8.3 El problema de las variables discontinuas	598
PRECAUCIÓN	600