# ÍNDICE

PRIMERA PARTE - TÉCNICAS CLÁSICAS DE CONTROL

Capítulo 1. Introducción
1.1 Generalidades ..... 3
1.2 Servomecanismos ..... 5
1.3 Sistemas de control en anillo abierto ..... 5
1.4 Sistemas de control en anillo cerrado ..... 6
1.5 Función de transferencia o transmitancia ..... 7
Ejercicios ..... 11

Capítulo 2. Estudio dinámico de la transmitancia
2.1 Introducción ..... 13
2.2 Transformada de Laplace ..... 14
2.3 Transmitancias de sistemas ..... 18
2.3.1 Resistencia eléctrica ..... 18
2.3.2 Bobina eléctrica ..... 18
2.3.3 Condensador eléctrico ..... 18
2.3.4 Pistón hidraúlico ..... 20
2.3.5 Nivel de un tanque ..... 20
2.3.6 Sistema térmico ..... 21
2.3.7 Sistema manométrico ..... 22
2.3.8 Oscilación amortiguada de un muelle ..... 23
2.3.9 Reactor encamisado ..... 23
2.3.10 Válvula de control ..... 24
2.3.11 Batería de dos reactores perfectamente agitados ..... 26
2.4 Propiedades adicionales de la transformada de Laplace ..... 27
2.4.1 Teorema del valor inicial ..... 27
2.4.2 Teorema del valor final ..... 28
2.4.3 Teorema del retardo puro ..... 28
Ejercicios ..... 29

Capítulo 3. Análisis temporal
3.1 Introducción ..... 31
3.2 Funciones elementales de excitación ..... 32
3.2.1 Escalón unidad ..... 32
3.2.2 Impulso unidad ..... 32
3.2.3 Rampa unidad ..... 32
3.2.4 Función parabólica ..... 33
3.2.5 Función senoidal ..... 33
3.3 Respuesta impulsional ..... 33
3.4 Respuesta indicial ..... 33
3.5 Respuesta ante una entrada en rampa ..... 34
3.6 Análisis temporal de los sistemas de primer orden ..... 34

3.7 Análisis temporal de los sistemas de segundo orden ..... 40
Ejercicios ..... 51

Capítulo 4. Diagramas de bloques
4.1 Introducción ..... 53
4.2 Bloques en serie ..... 53
4.3 Bloques en paralelo ..... 55
4.4 Bloques en retroalimentación ..... 55
4.5 Bloques en cadenas cruzadas ..... 56
4.6 Ejemplo ..... 57
Ejercicios ..... 59

Capítulo5. Análisis frecuencial
5.1 Introducción ..... 61
5.2 Representación de la ganancia y del desfase y aplicación a una función de transferencia de primer orden ..... 64
5.2.1 Plano de Bode ..... 64
5.2.2 Plano polar o de Nyquist ..... 71
5.2.3 Plano de Black ..... 75
5.3 Representación de la respuesta frecuencial de la función de retardo $y = e^{-Ts}$ 76
5.4 Respuesta frecuencial de una transmitancia de segundo orden ..... 79
5.4.1 Plano de Bode ..... 80
5.4.2 Plano polar o de Nyquist ..... 85
5.5 Análisis frecuencial de transmitancias compuestas ..... 90
5.6 Respuesta frecuencial de los controladores ..... 96
5.6.1 Control proporcional ..... 96
5.6.2 Control proporcional + integral ..... 102
5.6.3 Control proporcional+derivado ..... 110
5.6.4 Control proporcional + integral + derivado ..... 116
5.6.5 Control PID en el diagrama de Nyquist ..... 124
5.7 Consideraciones de aplicación de las acciones de control ..... 131
Ejercicios ..... 135

Capítulo 6. Estabilidad
6.1 Estabilidad absoluta ..... 137
6.1.1 Criterio de raíces de la ecuación característica ..... 137
6.1.2 Criterio de Routh ..... 138
6.1.3 Criterio de Hurwitz ..... 139
6.1.4 Criterio de fracciones continuas ..... 140
6.1.5 Criterio de Bode ..... 141
6.1.6 Criterio de Nyquist ..... 141
6.1.7 Criterio del lugar geométrico de raíces ..... 142
6.2 Estabilidad relativa ..... 146
6.2.1 Criterio de Bode ..... 146
6.2.2 Estudio del lazo cerrado de control ..... 152
Ejercicios ..... 157





Capítulo 7. Análisis y evaluación de un lazo de control
7.1 Método analítico ..... 159
7.1.1 Análisis de la estabilidad en modo manual ..... 161
7.1.2 Análisis de la estabilidad mediante el ordenador ..... 167

Capítulo 8. Análisis e identificación de procesos
8.1 Respuesta indicial ante una entrada en escalón ..... 176
8.2 Respuesta frecuencial ..... 179
8.2.1 Razóm de amortiguamiento a partir de los picos de resonancia ..... 180
8.3 Respuesta impulsional ..... 181
8.4 Respuesta impulsional de realimentación de relé ..... 183
8.5 Método de control P ..... 186
8.6 Parámetros del modelo del proceso ..... 187

Capítulo 9. Selección y ajuste de las acciones de control
9.1 Generalidades ..... 189
9.2 Método de tanteo ..... 189
9.3 Sintonización en lazo cerrado ..... 190
9.3.1 Método de ganancia límite ..... 190
9.4 Sintonización en lazo abierto ..... 191
9.4.1 Método de curva de respuesta de Ziegler &Nichols ..... 191
9.4.2 Método de la curva de reacción de Cohen-Coon ..... 192
9.5 Métodos de ajuste de reducción del error ..... 192
9.6 Método de autoajuste ..... 201
9.7 Otros métodos de ajuste ..... 203
9.8 Simulación y control de procesos simples ..... 204
Ejercicios ..... 223

Capítulo 10. Elementos finales de control
10.1 Válvulas de control ..... 225
10.1.1 Generalidades ..... 225
10.2 Curvas características de la válvula ..... 226
10.2.1 Características de caudal inherentes ..... 226
10.2.2 Características de caudal efectivas ..... 228
10.3 Cálculo de la válvula de control. Coeficientes Cv, $K_v$, Kc y $C_f$. Líquidos ..... 231
10.4 Cálculo de la válvula de control para gases ..... 235
10.5 Cálculo de la válvula de control para vapores ..... 235
10.6 Ejemplos de cálculo de válvulas de control ..... 236
Ejercicios ..... 243

Capítulo 11. Otros tipos de control
11.1 Control en cascada ..... 247
11.2 Control de relación ..... 255
11.3 Control de gama partida ..... 256
11.4 Control selectivo ..... 256
11.5 Control anticipativo ..... 256

11.6 Control de procesos discontinuos (batch) ..... 263
11.7 Control adaptativo ..... 265
11.8 Control distribuido ..... 266
Ejercicios ..... 267

SEGUNDA PARTE - TECNICAS ACTUALES

Capítulo 12. Transformada Z
12.1 Generalidades ..... 271
12.2 Transformada Z ..... 273
12.3 Respuesta impulsional ..... 274
12.4 Respuesta indicial ..... 275
12.5 Teoremas del valor inicial y final ..... 276
12.6 Funciones de transferencia de pulsos ..... 277
12.6.1 Inversión de la transformada z ..... 277
12.6.2 Función de transferencia de pulsos en lazo cerrado ..... 278
12.7 Estabilidad ..... 279
12.8 Ecuación del controlador ..... 279
Ejercicios ..... 281

Capítulo 13. Ecuación de estado
13.1 Generalidades ..... 283
13.2 Ejercicios de formulación ..... 285
13.3 Resolución de la ecuación de estado ..... 288
13.3.1 Resolución manual de un ejemplo ..... 291
13.3.2 Resolución con el ordenador del control de presión en una tubería ..... 300
Ejercicios ..... 313

Capítulo 14. Estabilidad y sistemas de control
14.1 Generalidades ..... 315
14.2 Técnicas de Liapunov ..... 320
14.3 Correctores ..... 324
14.4 Control robusto ..... 325
14.5 Control linealizador global ..... 327
14.6 Control estadístico del proceso (SPC) ..... 327
14.7 Control multivariable ..... 328
14.8 Sistemas óptimos de control ..... 331
14.9 Sistemas de control adaptativo ..... 335
14.10 Control predictivo ..... 337
14.11 Sistemas expertos ..... 339
14.12 Control por redes neuronales ..... 340
14.13 Control por lógica difusa ..... 342
14.14 Resumen y conclusiones ..... 343
Ejercicios ..... 344

Capítulo 15. Simulación de procesos
15.1 Secadero tipo «flash» o de evaporación rápida ..... 345
15.2 Secadero rotativo ..... 356
15.3 Secadero túnel ..... 365
15.4 Evaporador de triple efecto ..... 378
15.5 Reactor discontinuo ..... 392
15.6 Columna de destilación ..... 406
Ejercicios ..... 451

Apéndice - 1
A.1 Código de identificación de instrumentos ..... 453
A.2 Métodos numéricos en simulación digital ..... 454
A.2.1 Integración ..... 454
A.2.2 Resolución numérica de una ecuación diferencial ..... 454
A.2.3 Linealización ..... 457
A.2.4 Métodos de convergencia ..... 458
A.2.5 Operaciones con matrices ..... 460
A.3. Lenguaje Visual Basic de EXCEL (VBA – Visual Basic for Applications) ..... 461
A.4 Resolución de los problemas propuestos ..... 466

Apéndice - 2
Glosario ..... 493
Referencias ..... 503
Instrucciones de uso del CD .....