

# Contenido

---

## 1. Introducción 1

---

- 1-1 Un sistema de control de procesos 1
- 1-2 Términos importantes y objetivo del control automático de procesos 4
- 1-3 Control regulatorio y servocontrol 5
- 1-4 Señales de transmisión, sistemas de control y otros términos 5
- 1-5 Estrategias de control 6
  - 1-5.1 Control por retroalimentación 6
  - 1-5.2 Control feedforward 8
- 1-6 Bases necesarias para el control de procesos 10
- 1-7 Resumen 11
  - Problemas 11

## 2 Matemáticas necesarias para el análisis de sistemas de control 13

---

- 2-1 La transformada de Laplace 14
  - 2-1.1 Definición de la transformada de Laplace 14
  - 2-1.2 Propiedades de la transformada de Laplace 17
- 2-2 Solución de ecuaciones diferenciales mediante la transformada de Laplace 23
  - 2-2.1 Procedimiento de solución por la transformada de Laplace 23
  - 2-2.2 Inversión mediante expansión en fracciones parciales 25
  - 2-2.3 Tiempo muerto 30
- 2-3 Caracterización de la respuesta del proceso 33
  - 2-3.1 Variables de desviación 33
  - 2-3.2 Respuesta de la salida 35
  - 2-3.3 Estabilidad 43
- 2-4 Respuesta de sistemas de primer orden 43
  - 2-4.1 Respuesta escalón 45
  - 2-4.2 Respuesta rampa 46
  - 2-4.3 Respuesta sinusoidal 47
  - 2-4.4 Respuesta con retardo 49
  - 2-4.5 Respuesta de una unidad de adelanto/atraso 50
- 2-5 Respuesta de sistemas de segundo orden 52
  - 2-5.1 Respuestas sobreamortiguadas 55
  - 2-5.2 Respuestas subamortiguadas 58
  - 2-5.3 Respuestas de orden superior 62
- 2-6 Linealización 64
  - 2-6.1 Linealización de funciones de una variable 66
  - 2-6.2 Linealización de funciones de dos o más variables 68

**xiv** Contenido

2-6.3 Linealización de ecuaciones diferenciales 70  
Resumen 73  
Problemas 74

**3. Sistemas dinámicos de primer orden 81**

---

3-1 Procesos y la importancia de sus características 81  
3-2 Modelaje matemático de procesos 84  
3-3 Ejemplo de un proceso térmico 88  
3-4 Tiempo muerto 99  
3-5 Funciones de transferencia y diagramas de bloques 102  
3-5.1 Funciones de transferencia 102  
3-5.2 Diagramas de bloques 104  
3-6 Ejemplo de un proceso de gas 112  
3-7 Reactores químicos 118  
3-7.1 Notas introductorias 118  
3-7.2 Ejemplo de un reactor químico 120  
3-8 Efectos de las no linealidades en los procesos 124  
3-9 Comentarios adicionales 127  
3-10 Resumen 130  
Problemas 131

**4. Sistemas dinámicos de orden superior 149**

---

4-1 Sistemas no interactivos 149  
4-1.1 Proceso de nivel no interactivo 149  
4-1.2 Tanques térmicos en serie 157  
4-2 Sistemas interactivos 160  
4-2.1 Proceso de nivel interactivo 161  
4-2.2 Tanques térmicos con reciclado 167  
4-2.3 Reacción química no isotérmica 170  
4-3 Respuesta de los sistemas de orden superior 183  
4-4 Otros tipos de respuestas de procesos 186  
4-4.1 Procesos integrantes: proceso de nivel 186  
4-4.2 Proceso inestable de lazo abierto: reactor químico 191  
4-4.3 Procesos de respuesta inversa: reactor químico 198  
4-5 Resumen 200  
4-6 Repaso de los capítulos 3 y 4 201  
Problemas 202

**5. Componentes básicos de los sistemas de control 215**

---

5-1 Sensores y transmisores 215  
5-2 Válvulas de control 218

5-2.1	El actuador de la válvula de control	218
5-2.2	Capacidad y dimensionamiento de la válvula de control	221
5-2.3	Características de la válvula de control	228
5-2.4	Ganancia y función de transferencia de la válvula de control	235
5-2.5	Resumen de la válvula de control	240
5-3	Controladores por retroalimentación	240
5-3.1	Acción del controlador	241
5-3.2	Tipos de controladores por retroalimentación	242
5-3.3	Modificaciones al controlador PID y comentarios adicionales	256
5-3.4	Saturación de la integral y su prevención	260
5-3.5	Resumen de los controladores por retroalimentación	263
5-4	Resumen	263
	Problemas	264

## **6. Diseño de sistemas de control de procesos de lazo simple 273**

---

6-1	El lazo de control por retroalimentación	273
6-1.1	Función de transferencia de lazo cerrado	276
6-1.2	Ecuación característica del lazo	284
6-1.3	Respuesta de lazo cerrado de estado estacionario	291
6-2	Estabilidad del lazo de control	295
6-2.1	Criterio de estabilidad	295
6-2.2	Método de sustitución directa	297
6-2.3	Efecto de los parámetros del lazo sobre la ganancia última y el periodo último	301
6-2.4	Efecto del tiempo muerto	304
6-2.5	Resumen de los ejemplos	305
6-3	Resumen	306
	Problemas	306

## **7. Sintonización de los controladores por retroalimentación 321**

---

7-1	Respuesta con razón de asentamiento de un cuarto por el método de la ganancia última	322
7-2	Caracterización de procesos de lazo abierto	328
7-2.1	Prueba escalón de un proceso	330
7-2.2	Sintonización para una respuesta con razón de asentamiento de un cuarto	339
7-2.3	Sintonización para criterios de la integral mínima del error	342
7-2.4	Sintonización de controladores por muestreo de datos	349
7-2.5	Resumen de sintonización de controladores	350
7-3	Sintonización de controladores para procesos integrantes	351
7-3.1	Modelo de un sistema de control de nivel de líquido	351
7-3.2	Controlador de nivel proporcional	354

7-3.3	Control de nivel promedio	357
7-3.4	Resumen de sintonización de procesos integrantes	359
7-4	Síntesis de controladores por retroalimentación	360
7-4.1	Desarrollo de la fórmula de síntesis del controlador	360
7-4.2	Especificación de la respuesta de lazo cerrado	361
7-4.3	Modos del controlador y parámetros de sintonización	362
7-4.4	Resumen de resultados de la síntesis del controlador	367
7-4.5	Reglas de sintonización por control de modelo interno (IMC)	370
7-5	Sugerencias para sintonizar controladores por retroalimentación	372
7-5.1	Estimación de los tiempos integral y derivativo	373
7-5.2	Ajuste de la ganancia proporcional	375
7-6	Resumen	376
	Problemas	377

**8. Técnicas del lugar de las raíces y de la respuesta de frecuencia 393**

---

8-1	Algunas definiciones	393
8-2	Análisis de sistemas de control por retroalimentación mediante el lugar de las raíces	395
8-3	Graficación de diagramas del lugar de las raíces	399
8-4	Análisis de sistemas de control usando respuesta de frecuencia	401
8-4.1	Gráficas de Bode	411
8-4.2	Criterio de estabilidad usando la respuesta de frecuencia	421
8-5	Resumen	431
	Problemas	431

**9. Control en cascada 437**

---

9-1	Ejemplo de un proceso	438
9-2	Consideraciones de estabilidad	441
9-3	Implementación y sintonización de controladores	443
9-3.1	Sistemas en cascada de dos niveles	444
9-3.2	Sistemas en cascada de tres niveles	447
9-4	Otros ejemplos de procesos	448
9-5	Comentarios finales	450
9-6	Resumen	452
	Problemas	452

**10. Control de relación, control override y control selectivo 459**

---

10-1	Señales, software y algoritmos de cálculo	459
10-1.1	Señales	460
10-1.2	Programación	461
10-1.3	Algoritmos para calcular escalamientos	466

- 10-2 Control de relación 467
- 10-3 Control override o de restricción 476
- 10-4 Control selectivo 481
- 10-5 Diseño de sistemas de control 485
- 10-6 Resumen 500
- Problemas 501

## **11. Control feedforward 521**

---

- 11-1 El concepto de feedforward 521
- 11-2 Diseño de controladores feedforward lineales usando diagramas de bloques 524
- 11-3 El elemento de adelanto-atraso 534
- 11-4 Regresando al ejemplo anterior 537
- 11-5 Diseño de controladores feedforward no lineales a partir de principios básicos de procesos 542
- 11-6 Algunos comentarios finales y resumen del diseño de los controladores feedforward 546
- 11-7 Otros tres ejemplos 549
- 11-8 Resumen 558
- Problemas 559

## **12. Control de procesos multivariable 569**

---

- 12-1 Interacción del lazo 569
- 12-2 Apareamiento de las variables controlada y manipulada 575
  - 12-2.1 Cálculo de las ganancias relativas para un sistema  $2 \times 2$  579
  - 12-2.2 Cálculo de las ganancias relativas para un sistema  $n \times n$  586
- 12-3 Desacoplamiento de lazos interactivos 590
  - 12-3.1 Diseño de desacopladores a partir de diagramas de bloques 590
  - 12-3.2 Diseño de desacopladores para sistemas  $n \times n$  599
  - 12-3.3 Diseño de desacopladores a partir de principios básicos 603
- 12-4 Control multivariable contra optimización 606
- 12-5 Análisis dinámico de sistemas multivariables 607
  - 12-5.1 Análisis dinámico de un sistema  $2 \times 2$  607
  - 12-5.2 Sintonización de controladores para sistemas interactivos 611
- 12-6 Diseño de sistemas de control a nivel de planta 613
- 12-7 Resumen 620
- Problemas 621

## **13. Simulación dinámica de sistemas de control 627**

---

- 13-1 Usos y herramientas de la simulación dinámica 628
  - 13-1.1 Usos de la simulación dinámica 628
  - 13-1.2 Herramientas para la simulación dinámica 628

**xviii** Contenido

- 13-2 Simulación de funciones de transferencia lineales 630
- 13-3 Simulación de procesos 634
- 13-4 Simulación de la instrumentación de control 642
  - 13-4.1 Simulación de válvulas de control 643
  - 13-4.2 Simulación de controladores por retroalimentación 646
  - 13-4.3 Simulación de sensores-transmisores 651
  - 13-4.4 Simulación de compensación dinámica utilizando adelanto-atraso 653
- 13-5 Otros aspectos sobre simulación 660
- 13-6 Resumen 670
  - Problemas 670

**A. Símbolos y nomenclatura empleados para la instrumentación 681**

---

**B. Diseño: estudio de casos 689**

---

- Caso 1. Proceso de síntesis de metanol 696
- Caso 2. Proceso de hidrocarburo 698
- Caso 3. Proceso de ácidos grasos 699
- Caso 4. Sistemas de control en el proceso de refinación del azúcar 701
- Caso 5. Proceso del ácido sulfúrico 702
- Caso 6. Sistema de control para una planta de granulación de nitrato de amonio 704
- Caso 7. Sistema de control para la deshidratación de gas natural 705

**C. Sensores, transmisores y válvulas de control 707**

---

- C-1 Sensores de presión 707
- C-2 Sensores de flujo 708
- C-3 Sensores de nivel 712
- C-4 Sensores de temperatura 714
- C-5 Sensores de composición 717
- C-6 Transmisores 717
  - C-6.1 Transmisores neumáticos 717
  - C-6.2 Transmisores electrónicos 719
- C-7 Tipos de válvulas de control 720
  - C-7.1 Vástago recíproco 720
  - C-7.2 Vástago rotatorio 724
- C-8 Actuadores de la válvula de control 724
  - C-8.1 Actuadores de diafragma con operación neumática 724
  - C-8.2 Actuadores de pistón 724
  - C-8.3 Actuadores electrohidráulicos y electromecánicos 725
  - C-8.4 Actuadores manuales con volante 725

- C-9 Accesorios de la válvula de control 726
  - C-9.1 Posicionadores 726
  - C-9.2 Multiplicadores 727
  - C-9.3 Interruptores de límite 727
- C-10 Válvulas de control: consideraciones adicionales 727
  - C-10.1 Correcciones de viscosidad 728
  - C-10.2 Vaporización instantánea y cavitación 728
- C-11 Resumen 732

#### **D. Sintonización: estudios de caso 735**

---

- Proceso 1. Regenerador—control por retroalimentación 736
- Proceso 2. Regenerador—control en cascada 737
- Proceso 3. Proceso de secado de papel 738
- Proceso 4. Absorbedor de HCl 740
- Proceso 5. Proceso de mezclado 743
- Proceso 6. Proceso del reactor 744
- Proceso 7. Proceso de destilación 744

#### **E. Estudio de casos operativos 747**

---

- Estudio de caso operativo 1: Absorbedor de HCl 747
- Estudio de caso operativo 2: Unidad de tratamiento de aguas 750
- Estudio de caso operativo 3: Regenerador catalítico 752
- Estudio de caso operativo 4: Costillitas 754
- Estudio de caso operativo 5: Unidad de secado de papel 756

#### **Índice 759**