

Instrumentación y control de plantas químicas

Manuales de químicas



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los

derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

Instrumentación y control de plantas químicas

Pedro Ollero de Castro

Catedrático de Ingeniería Química de la Universidad de Sevilla

Eduardo Fernández Camacho

Catedrático de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla



Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S.A.

© Pedro Ollero de Castro y Eduardo Fernández Camacho

© EDITORIAL SÍNTESIS, S.A.
Vallehermoso, 34 - 28015 Madrid
Teléf.: (91) 593 20 98
<http://www.sintesis.com>.

Depósito Legal: M. 20.725-2012
ISBN: 978-84-975633-4-5

Impresión:
Impreso en España - Printed in Spain

ÍNDICE

PRÓLOGO	15
1. INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS QUÍMICOS	19
1.1. Introducción	20
1.2. Un ejemplo simple de control	23
1.2.1. Control por realimentación	24
1.2.2. Control anticipativo	26
1.3. Definiciones y conceptos básicos relativos a los sistemas de control de procesos	27
1.3.1. Variable de proceso a controlar	28
1.3.2. Punto de consigna o referencia	28
1.3.3. Variable manipulada o variable (señal) de control	29
1.3.4. Variable de perturbación	29
1.4. Señales e instrumentos de un sistema de control de procesos	29
1.4.1. Sensor	29
1.4.2. Transmisor o transductor	30
1.4.3. Controlador	30
1.4.4. Actuador o elemento final de control	31
1.5. Técnicas y niveles de control de procesos	31
1.5.1. Control regulatorio básico	32
1.5.2. Técnicas avanzadas de control y control supervisor	34
1.5.3. Control multivariable	36
1.5.4. Optimización en línea	37
1.6. Diseño del sistema de control para plantas de proceso (<i>plantwide control</i>)	39
Referencias bibliográficas	41
2. MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PROCESOS QUÍMICOS	43
2.1. Introducción	44
2.2. Consideraciones generales acerca del modelado matemático de procesos químicos	46
2.2.1. Principios fisicoquímicos involucrados	46
2.2.2. Grado de detalle del modelo	46
2.2.3. Consistencia del modelo	46
2.2.4. Régimen nominal de operación	47
2.3. Ecuaciones de conservación y tipos de modelos	47

2.4. Las ecuaciones de conservación en la formulación de modelos de parámetros globalizados	48
2.4.1. Ecuación de conservación de la masa total	48
2.4.2. Ecuaciones de conservación de la masa de componentes individuales	49
2.4.3. Ecuación de conservación de la energía	51
2.4.4. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	54
2.5. Las ecuaciones de conservación en la formulación de modelos de parámetros distribuidos	56
2.5.1. Conservación de la masa total	56
2.5.2. Ecuaciones de conservación de la masa de componentes individuales	57
2.5.3. Ecuación de conservación de la energía	58
2.6. Ejemplos de modelos dinámicos de procesos químicos	59
2.6.1. Modelo de un reactor presurizado que opera en fase gas	59
2.6.2. Modelo matemático de un destilador simple	60
2.6.3. Modelo matemático de una columna de destilación ideal	64
2.6.4. Modelo matemático de un reactor gas-líquido	67
2.6.5. Modelo matemático de un intercambiador tubular con vapor a condensación	69
2.7. Integración del modelo matemático del proceso en la descripción matemática del sistema de control	71
Problemas propuestos	73
3. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE PROCESOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	77
3.1. Introducción	78
3.2. Linealización de modelos dinámicos de procesos químicos	78
3.2.1. Linealización de términos no lineales	79
3.2.2. Linealización de modelos dinámicos de procesos	80
3.2.3. Variables de desviación	81
3.3. Sistemas lineales de primer orden	82
3.3.1. Análisis cualitativo de la respuesta de un sistema lineal de primer orden	82
3.3.2. Ganancia estática y constante de tiempo de un sistema no lineal de primer orden	86
3.3.3. Análisis general de la dinámica de un sistema lineal de primer orden	87
3.3.4. Respuesta de un sistema lineal de primer orden no autorregulado	87
3.3.5. Respuesta de sistemas lineales de primer orden a otro tipo de entradas	88
3.4. Sistemas de segundo orden	89
3.4.1. Sistemas de segundo orden constituidos por dos capacidades en serie	90
3.4.2. Sistemas intrínsecamente de segundo orden	94
3.5. Sistemas de orden superior	96
3.5.1. Procesos multicapacitivos	96
3.5.2. Procesos con tiempo muerto	97
3.5.3. Procesos con respuesta inversa	99
3.6. Uso de MATLAB para generar y representar funciones del tiempo	99
Problemas propuestos	101

4. ANÁLISIS DINÁMICO EN EL DOMINIO DE LAPLACE:	
FUNCIONES DE TRANSFERENCIA	105
4.1. Introducción	106
4.2. La transformada de Laplace	106
4.2.1. Propiedades de la transformada de Laplace	106
4.2.2. Teoremas de la transformada de Laplace	107
4.2.3. Transformada de Laplace de funciones importantes	107
4.2.4. Transformada inversa o antitransformada	109
4.3. Resolución de ecuaciones diferenciales lineales	111
4.3.1. Respuesta a un escalón de algunos sistemas dinámicos simples	111
4.4. Funciones de transferencia y modelos entrada-salida	114
4.4.1. Propiedades de la función de transferencia	115
4.4.2. Funciones de transferencia de algunos sistemas simples	117
4.4.3. Respuesta a un escalón y a un impulso de sistemas representados por funciones de transferencia	118
4.4.4. Funciones de transferencia de sistemas de parámetros distribuidos	118
4.5. Análisis cualitativo del comportamiento dinámico de un sistema y concepto de estabilidad	120
4.6. Diagramas de bloques	120
4.6.1. Diagramas de bloques en lazos de control	125
4.7. Reducción de modelos de función de transferencia	126
Referencias bibliográficas	128
Problemas propuestos	128
5. ANÁLISIS DINÁMICO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA:	
RESPUESTA FRECUENCIAL	131
5.1. Introducción	132
5.2. Respuesta en frecuencia	132
5.2.1 Representación gráfica de la respuesta en frecuencia	134
5.3. Respuesta en frecuencia de sistemas constituidos por varias funciones de transferencia en serie	137
5.4. Sistemas de fase no mínima	142
Problemas propuestos	143
6. MODELOS DINÁMICOS EMPÍRICOS PARA CONTROL DE PROCESOS	145
6.1. Introducción	146
6.2. Metodología general	147
6.3. El método de la curva de reacción	148
6.3.1. Determinación de los parámetros del modelo	149
6.3.2. Uso práctico del método de la curva de reacción	151
6.4. Identificación de procesos	152
6.4.1. Uso de MATLAB para obtener la función de transferencia de un proceso	154

6.4.2. Determinación de los parámetros de un modelo de primer orden con tiempo muerto usando una hoja de cálculo	155
6.4.3. Consideraciones prácticas sobre identificación de procesos	157
6.5. Observaciones finales y conclusiones	158
Problemas propuestos	159
7. CONTROL POR REALIMENTACIÓN: CONTROLADORES PID	161
7.1. Introducción	162
7.2. Instrumentación de un lazo simple de control	162
7.2.1. Sensores y transmisores	164
7.2.2. Válvulas de control	165
7.2.3. Líneas de transmisión	167
7.2.4. Controladores	167
7.3. Controladores analógicos PID	168
7.3.1. Acción proporcional y controladores P	169
7.3.2. Acción integral y controladores PI	171
7.3.3. Acción derivativa y controladores PID	173
7.3.4. Modificaciones al algoritmo PID convencional	176
7.3.5. Algunas características adicionales de los controladores PID	178
7.4. Controladores digitales	180
7.4.1. Selección del intervalo de muestreo	181
7.5. Selección de las acciones de control	182
8. ANÁLISIS DINÁMICO DE LAZOS DE REALIMENTACIÓN Y CONTROLABILIDAD DE PROCESOS	185
8.1. Introducción	186
8.2. Justificación del control por realimentación	187
8.3. Criterios de estabilidad en lazo cerrado	192
8.3.1. Criterio de estabilidad de Bode	194
8.3.2. Márgenes de fase y de ganancia	196
8.3.3. Ganancia y frecuencia última	198
8.4. Diseño de controladores de realimentación	200
8.5. Análisis de controlabilidad de procesos	202
8.5.1. Escalado de procesos	202
8.5.2. Controlabilidad frente a perturbaciones	202
8.5.3. Controlabilidad frente a cambios en la referencia	206
8.5.4. Características de un proceso que limitan la controlabilidad	207
Referencias bibliográficas	212
Problemas propuestos	212
9. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID	217
9.1. Introducción	218
9.2. Sintonización de controladores de realimentación	218

9.3. Criterios de calidad de respuesta	219
9.3.1. Criterios basados en una característica puntual de la respuesta	219
9.3.2. Criterios basados en la integral del error	220
9.4. Selección del tipo de controlador y su sintonización	222
9.5. Métodos empíricos de sintonización de controladores	223
9.5.1. Método de ajuste de Ziegler-Nichols de lazo cerrado	223
9.5.2. Método de ajuste de Ziegler-Nichols de lazo abierto	226
9.5.3. Métodos de ajuste basados en la integral del error	228
9.6. Métodos analíticos de sintonización basados en modelos	234
9.7. Sintonización automática de controladores	235
Referencias bibliográficas	236
Problemas propuestos	237
10. CONTROL REGULATORIO AVANZADO	241
10.1. Introducción	242
10.2. Control en cascada	242
10.2.1. Estructura de un sistema de control en cascada	243
10.2.2. Sintonización de controladores en cascada	244
10.3. Control anticipativo	248
10.3.1. Control anticipativo incremental	250
10.3.2. Análisis de controlabilidad de control anticipativo y de realimentación combinados	254
10.3.3. Control anticipativo no lineal con modelos basados en principios físicos	256
10.3.4. Control de relación (<i>ratio control</i>)	257
10.3.5. Control anticipativo de relación aplicado a una columna de destilación	258
10.4. Control selectivo o control con restricciones	260
10.5. Control de gama partida	265
Problemas propuestos	267
11. CONTROL BASADO EN MODELOS	273
11.1. Introducción	274
11.2. Control IMC (<i>Internal Model Control</i>)	274
11.2.1. Diseño de un controlador IMC	276
11.2.2. Uso práctico de controladores IMC	282
11.3. Compensador de tiempos muertos o Predictor de Smith	283
11.3.1. El Predictor de Smith y los errores de modelado	285
11.4. Sintonización IMC de controladores PI o PID de realimentación	287
Referencias bibliográficas	289
Problemas propuestos	290
12. CONTROL DE PROCESOS MULTIVARIABLES	291
12.1. Introducción	292
12.2. Descripción de un sistema multivariable	293

12.2.1. Efectos estático y dinámico de las interacciones	295
12.3. Evaluación de las interacciones	296
12.4. Emparejamiento entre variables controladas y manipuladas	299
12.4.1. La ganancia relativa de perturbación	305
12.5. Sintonización de los controladores en un sistema multivariable descentralizado	306
12.6. Desacoplamiento	313
12.6.1. Desacoplamiento parcial	314
12.6.2. Desacoplamiento por inversión del modelo	315
Referencias bibliográficas	317
Problemas propuestos	318
13. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MPC)	321
13.1. Introducción	322
13.2. Características básicas del Control Predictivo Basado en Modelos	323
13.3. Modelo de predicción del comportamiento del proceso	324
13.4. Control DMC	326
13.4.1. Control DMC monovariable	326
13.4.2. Control DMC con realimentación de la salida	327
13.4.3. El esfuerzo de control en un controlador DMC	328
13.4.4. Extensión a sistemas multivariables	329
13.4.5. Implementación y sintonización de un controlador DMC	329
13.4.6. Gestión de restricciones	330
13.5. Control MPC de una columna de fraccionamiento	331
13.6. Sistemas comerciales de control predictivo	334
Referencias bibliográficas	334
14. CONTROL A ESCALA DE PLANTA	335
14.1. Introducción	336
14.2. Descripción del problema de control a escala de planta	337
14.3. Control del inventario en plantas químicas	347
14.3.1. Control de inventario en unidades en serie	349
14.3.2. Control de inventario en unidades en un lazo de recirculación	350
14.3.3. Control de inventario en unidades de un sistema cerrado	350
14.3.4. Control del inventario de componentes	352
14.3.5. El efecto <i>snow ball</i> y las reglas de Luyben	353
14.4. Metodologías de diseño de sistemas de control a escala de planta	356
14.4.1. Metodología de Price y Georgakis	357
14.4.2. Metodología de Luyben	357
14.4.3. Metodología de Skogestad	359
14.5. Control de una planta de producción de acetato de vinilo	363
Referencias bibliográficas	371
Problemas propuestos	372

15. CONTROL POR COMPUTADOR	375
15.1. Introducción	376
15.2. Ventajas e inconvenientes del control por computador	376
15.3. Funciones de los computadores en el control y la supervisión de procesos	378
15.4. Instrumentación específica para el control por computador	381
15.4.1. Conversión digital-analógica	381
15.4.2. Conversión analógica-digital	383
15.4.3. Mantenedores	384
15.4.4. Multiplexores	385
15.4.5. Señales diferenciales	386
15.5. Características del software de los sistemas de control por computador	386
15.6. Estructuras de los sistemas de control por computador	389
15.7. Señales muestreadas	392
15.7.1. Elección del periodo de muestreo	392
15.7.2. El fenómeno del <i>aliasing</i>	393
16. CONTROL SECUENCIAL DE PROCESOS	397
16.1. Introducción	398
16.2. Ejemplo ilustrativo	398
16.3. Ecuaciones lógicas	401
16.3.1. Algunas propiedades de las operaciones lógicas	401
16.3.2. Lógica de contactos	402
16.3.3. Puertas lógicas	403
16.4. Sistemas lógicos combinacionales y secuenciales	403
16.4.1. Diagramas de contactos	406
16.4.2. Automatas programables	408
16.4.3. Programación GRAFCET	410
Problemas propuestos	414
17. INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS	417
17.1. Introducción.....	418
17.2. El proceso de medida	418
17.3. Clasificación de los instrumentos de medida	419
17.3.1. Instrumentos de monitorización y control	419
17.3.2. Instrumentos activos o pasivos	419
17.3.3. Instrumentos de medida por comparación y por desplazamiento	420
17.3.4. Medidores analógicos y digitales	420
17.4. Definiciones y conceptos básicos	421
17.5. La transmisión de la medida	423
17.5.1. Transmisión neumática	424
17.5.2. Transmisión eléctrica	425
17.5.3. Convertidores presión-intensidad	426
17.5.4. Codificación de la información	426
17.6. Instrumentación inteligente	427

17.7. Calibrado	428
17.8. Diagramas de tuberías e instrumentos	428
18. MEDIDORES DE TEMPERATURA	431
18.1. Introducción	432
18.2. Factores involucrados en la medición de la temperatura	432
18.2.1. Medida de la temperatura de sólidos	433
18.2.2. Medida de la temperatura de fluidos	433
18.3. Clasificación de los sensores de temperatura	434
18.4. Termopares	435
18.4.1. Descripción básica	435
18.4.2. Hilos de extensión	437
18.4.3. Compensación de temperatura	439
18.4.4. Características constructivas	440
18.4.5. Termopilas	440
18.5. Termorresistencias (sondas de resistencia)	441
18.5.1. Descripción básica	442
18.6. Termistores	444
18.7. Pirómetros de radiación	445
18.7.1. Descripción básica	445
18.7.2. Tipos de pirómetros de radiación	446
18.7.3. Componentes de un pirómetro	448
18.8. Selección del sensor de temperatura	449
18.8.1. Rango de temperatura	449
18.8.2. Precisión	449
18.8.3. Velocidad de respuesta	449
18.8.4. Tipos de fallos	450
18.8.5. Interferencia eléctrica	450
18.8.6. Coste	450
Referencias bibliográficas	450
19. MEDIDORES DE PRESIÓN Y DE NIVEL	451
19.1. Introducción	452
19.2. Conversión mecánica-eléctrica	452
19.2.1. Galgas extensiométricas	452
19.2.2. Potenciómetros	455
19.2.3. Transductores capacitivos	455
19.2.4. Transductores inductivos	455
19.2.5. Transductores piezoeléctricos	456
19.3. Elementos primarios para la medida de presión	456
19.3.1. Columna de líquido	456
19.3.2. Elementos elásticos	457
19.4. Medidores de nivel	458
19.4.1. Lecturas de nivel todo-nada	458

19.4.2. Lecturas proporcionales	459
19.5. Medida del nivel de sólidos	461
20. MEDIDORES DE CAUDAL	463
20.1. Introducción	464
20.2. Caudalímetro de presión diferencial	464
20.2.1. Teoría básica de los caudalímetros de presión diferencial	465
20.2.2. Tipos de caudalímetros de presión diferencial	466
20.2.3. Ecuación de diseño de un caudalímetro de presión diferencial	468
20.2.4. Dimensionamiento de un caudalímetro de presión diferencial	470
20.2.5. Instalación de caudalímetros de presión diferencial	473
20.2.6. Pérdida de carga en caudalímetros de presión diferencial	473
20.3. Caudalímetro de impacto	473
20.4. Caudalímetros lineales	474
20.4.1. Caudalímetros de ultrasonidos	474
20.4.2. Caudalímetros electromagnéticos	476
20.4.3. Caudalímetros de turbina	478
20.4.4. Caudalímetros de torbellino (vórtex)	479
20.4.5. Rotámetros	480
20.5. Caudalímetros de inserción	483
20.5.1. Tubo Pitot	483
20.5.2. Otros caudalímetros de inserción	484
20.6. Medida del caudal másico con caudalímetros volumétricos	485
20.7. Medidores de caudal másico	486
20.7.1. Caudalímetros de momento angular	486
20.7.2. Caudalímetros térmicos de caudal másico	488
20.8. Selección de medidores de caudal	489
Referencias bibliográficas	491
Problemas propuestos	491
21. ANALIZADORES DE PROCESO	493
21.1. Introducción	494
21.2. Análisis en línea o en tiempo real	495
21.3. Características básicas de los analizadores	497
21.3.1. Selectividad	498
21.3.2. Velocidad de respuesta	498
21.3.3. Precisión	498
21.3.4. Rango	498
21.3.5. Linealidad	498
21.3.6. Repetitividad	499
21.4. Analizadores en línea	499
21.4.1. Espectrómetros	499
21.4.2. Espectrómetros de masas	501
21.4.3. Cromatógrafos	502

21.4.4. Analizadores electroquímicos	502
21.4.5. Analizadores de conductividad térmica	506
21.4.6. Analizadores de conductividad eléctrica	507
21.4.7. Analizadores ópticos y sónicos	507
21.4.8. Analizadores basados en la combustión	509
21.5. Sistemas de muestreo y acondicionamiento	510
21.5.1. Toma de la muestra	510
21.5.2. Transporte de la muestra	510
21.5.3. Acondicionamiento de la muestra	511
Referencias bibliográficas	512
22. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL:	
VÁLVULAS DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA	513
22.1. Introducción	514
22.2. Válvulas de control	514
22.2.1. Tipos de válvulas de control	514
22.3. Componentes de una válvula de control	517
22.3.1. Cuerpo y elementos internos	517
22.3.2. Materiales constructivos	518
22.3.3. Actuadores	521
22.3.4. Accesorios de válvulas de control	523
22.4. Características de caudal de las válvulas de regulación	526
22.4.1. Característica instalada de caudal	527
22.4.2. Selección de la característica inherente de una válvula	530
22.5. Dimensionamiento de válvulas de control	532
22.5.1. Ecuaciones de flujo a través de válvulas para líquidos y gases	533
22.5.2. Fórmulas de cálculo de K_v y C_v	534
22.5.3. Correcciones por viscosidad	535
22.5.4. Mezclas líquido-gas	536
22.5.5. Mezclas líquido-vapor	537
22.5.6. Cavitación y flashing	537
22.5.7. Criterios de dimensionamiento de una válvula de regulación	539
22.6. Otros elementos finales de control	545
Referencias bibliográficas	547
Problemas propuestos	547