

Simulación dinámica y control de procesos

Guía práctica

Cristina Patricia Lamb Bernal
Juan David Ortega Álvarez



Lamb Bernal, Cristina Patricia

Simulación dinámica y control de procesos: guía práctica / Cristina Patricia Lamb Bernal, Juan David Ortega Álvarez. -- Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2014.

272 p. ; 24 cm. -- (Colección académica)

ISBN 978-958-720-219-9

1. Procesos químicos – Simulación por computadores. 2. Control de procesos químicos – Programas para computador. I. Ortega Álvarez, Juan David. II. Tít. III. Serie

Universidad EAFIT-Centro Cultural Biblioteca Luis Echavarría Villegas

Simulación dinámica y control de procesos Guía práctica

Primera edición: julio de 2014

© Cristina Patricia Lamb Bernal

© Juan David Ortega Álvarez

© Fondo Editorial Universidad EAFIT

Carrera 48A No. 10 sur - 107

Tel.: 261 95 23, Medellín

<http://www.eafit.edu.co/fondoeditorial>

e-mail: fonedit@eafit.edu.co

ISBN: 978-958-720-219-9

Diseño de colección: Miguel Suárez

Fotografía de carátula: 186348470, ©shutterstock.com

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de los editores.

Editado en Medellín, Colombia

Tabla de contenido

Introducción	23
1. Simulación dinámica.....	27
1.1 Ejercicio 1.1. Simulación dinámica de un separador de fases	28
1.1.1 Simulación en estado estacionario	28
1.1.2 Adición de equipos y dimensionamiento.....	29
1.1.3 Especificaciones dinámicas de las corrientes	33
1.1.4 Dimensionamiento del separador	35
1.1.5 Cambio de estado estacionario a modo dinámico.....	40
1.1.6 Cambio de temperatura.....	41
1.2 Ejercicio 1.2. Simulación dinámica de una torre de destilación.....	42
1.2.1 Simulación en estado estacionario	42
1.2.2 Información general sobre el “Asistente dinámico”	45
1.2.3 Adición de especificaciones y dimensionamiento de equipos	51
1.2.4 Simulación dinámica.....	62
1.2.5 Cambio tipo escalón en la temperatura y el flujo de alimentación.....	68
1.3 Ejercicio 1.3. Simulación dinámica de una torre de absorción	70
1.3.1 Simulación en estado estacionario	71
1.3.2 Adición de especificaciones y de equipos, y dimensionamiento	75

1.3.3 Simulación dinámica	81
1.3.4 Resumen de ecuaciones	82
1.4 Ejercicio 1.4. Simulación dinámica de un reactor del tipo PFR	89
1.4.1 Simulación en estado estacionario	90
1.4.2 Adición de especificaciones y de equipos, y dimensionamiento	92
1.4.3 Simulación dinámica.....	96
1.4.4 Cambio de temperatura.....	98
1.5 Ejercicio 1.5. Simulación dinámica de un acondicionador de gas	100
1.5.1 Simulación en estado estacionario	101
1.5.2 Adición de especificaciones y de equipos, y dimensionamiento	103
1.5.3 Cambio de estado estacionario a modo dinámico.....	110
2. Control de procesos	131
2.1 Control en Hysys®	132
2.1.1 Especificación de las válvulas para operación en modo dinámico.....	133
2.1.2 No linealidades de los elementos de control.....	135
2.2 Ejercicio 2.1. Control On/Off del separador del Ejercicio 1.1	137
2.2.1 Opción “Desactivado” (“Off”)	141
2.2.2 Modo manual (“Manual”)	144
2.2.3 Control automático tipo On/Off	150
2.3 Ejercicio 2.2. Control PID de un separador de fases.....	154
2.4 Ejercicio 2.3. Obtención de la curva de estado estacionario de un sistema y de su modelo dinámico.....	166
2.4.1 Obtención de la curva de estado estacionario de un sistema.....	167

2.4.2	Ajuste del modelo en lazo abierto.....	172
2.4.3	Ajuste del modelo en lazo cerrado	182
2.4.4	Ajuste del modelo al sistema en lazo cerrado contro- lado.....	189
2.5	Ejercicio 2.4. Sintonización de controladores	191
2.5.1	Caso de estudio en estado estacionario	194
2.5.2	Simulación en modo dinámico	198
2.5.3	Sintonización por el método de Ziegler y Nichols en lazo abierto.....	199
2.5.4	Sintonización por el método de Ziegler y Nichols en lazo cerrado	207
3.	Simulación dinámica con eventos y arranque de planta	215
3.1	Ejercicio 3.1. Simulación con eventos	215
3.1.1	Construcción en estado estacionario del modelo para simulación con eventos.....	217
3.1.2	Simulación dinámica con eventos	218
3.2	Ejercicio 3.2. Inicialización dinámica.....	246
3.2.1	Conceptos generales de la inicialización dinámica en Hysys®	246
3.2.2	Simulación con inicialización en estado estacionario.....	253
3.2.3	Simulación dinámica con inicialización	259
	Bibliografía	269

Índice de figuras

Figura 1.1	Diagrama de flujo en estado estacionario del Ejercicio 1.1	28
Figura 1.2	Condiciones de las corrientes <u>Vapor</u> y <u>Líquido</u> en estado estacionario	29
Figura 1.3	Diagrama de flujo completo del Ejercicio 1.1	30
Figura 1.4	Especificación de caída de presión en la válvula de vapor.....	30
Figura 1.5	Selección de opciones de dimensionamiento de la válvula de vapor	31
Figura 1.6	Ventana de opciones dinámicas de las válvulas	32
Figura 1.7	Especificación dinámica de la corriente <u>Alimentación</u>	34
Figura 1.8	Especificación dinámica de la corriente <u>Salida Líquido</u>	34
Figura 1.9	Especificación dinámica de la corriente <u>Salida Vapor</u>	35
Figura 1.10	Opciones de dimensionamiento del separador	36
Figura 1.11	Pestaña “ <i>General</i> ” del “Asistente dinámico”	38
Figura 1.12	“Dimensiones desconocidas” (“ <i>Unknown Sizes</i> ”) en los equipos	38
Figura 1.13	Dimensionamiento del separador empleando el tiempo de residencia del líquido.....	39
Figura 1.14	Proceso debidamente especificado para pasar a modo dinámico	40
Figura 1.15	Opción para cambiar de modo estacionario a dinámico.....	41
Figura 1.16	Mensaje de alerta para cambiar a modo dinámico.....	41
Figura 1.17	Diagrama de flujo de la torre de destilación en estado estacionario	43
Figura 1.18	Ventana principal de la torre de destilación	44
Figura 1.19	Especificación de recuperación de benceno en la torre de destilación	44
Figura 1.20	Ventana principal del “Asistente dinámico” del Ejemplo 1.2 en estado estacionario	45
Figura 1.21	Ventana de especificaciones de presión (Ejemplo 1.2)	46

Figura 1.22	Ventana de “Adición de válvulas” (“ <i>Insert Valves</i> ”) del “Asistente dinámico” (Ejemplo 1.2)	47
Figura 1.23	Ventana de “Especificaciones de flujos internos” (“ <i>Int. Flow Spec</i> ”) del “Asistente dinámico” (Ejemplo 1.2)	48
Figura 1.24	Ventana de secciones de etapas (Ejemplo 1.2)	49
Figura 1.25	Ventana de dimensionamiento de la válvula del destilado	53
Figura 1.26	“Opciones dinámicas” establecidas en la válvula del destilado.....	53
Figura 1.27	Especificación dinámica de la <u>Salida Destilado</u>	54
Figura 1.28	Ambiente de la columna de destilación “ <i>Column Environment</i> ”	55
Figura 1.29	Ventana “ <i>Main TS</i> ” de la torre de destilación	56
Figura 1.30	Ventana de la opción de dimensionamiento “ <i>Nozzles</i> ” de la torre de destilación	57
Figura 1.31	Ventana principal del “Asistente dinámico” del Ejercicio 1.2	59
Figura 1.32	Especificación de flujo interno del “Asistente dinámico” del Ejercicio 1.2	59
Figura 1.33	Inconveniente del perfil de presión de la torre del Ejercicio 1.2....	60
Figura 1.34	Opción “ <i>Performance</i> → <i>Column Profiles</i> ” de la torre del Ejercicio 1.2.....	61
Figura 1.35	Cambio de presión de la corriente <u>Alimentación</u> de la torre.....	62
Figura 1.36	Ventana general del “Asistente dinámico” cuando se especifican todos los parámetros del Ejercicio 1.2.....	63
Figura 1.37	Ventana principal de la herramienta “ <i>StripChart</i> ”	64
Figura 1.38	Adición de variables a “ <i>StripChart</i> ”	64
Figura 1.39	Variables ingresadas en el registro “ <i>Flujos</i> ” del Ejercicio 1.2.....	65
Figura 1.40	Creación de registro de “Temperatura” en el “ <i>StripChart</i> ”	65
Figura 1.41	Opciones generales de los gráficos dinámicos de Hysys®	66
Figura 1.42	Opción de escala automática de las gráficas dinámicas	67
Figura 1.43	Comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo	67
Figura 1.44	Comportamiento de los flujos molares a lo largo del tiempo	68
Figura 1.45	Cambio de temperatura de la alimentación a 380 K (106,85 °C) ...	69
Figura 1.46	Comportamiento de los flujos másicos cuando se disminuye la temperatura en la alimentación a 380 K (106,85 °C)	69

Figura 1.47	Comportamiento de los flujos másicos cuando se aumenta la temperatura en la alimentación a 390 K (116,85 °C)	70
Figura 1.48	Diagrama de flujo en estado estacionario del Ejercicio 1.3	71
Figura 1.49	Función de ajuste de la torre de absorción del Ejercicio 1.3	72
Figura 1.50	Propiedades en estado estacionario de la corriente <u>Salida Líquido</u> ..	73
Figura 1.51	Propiedades en estado estacionario de la corriente <u>Salida Gas</u>	74
Figura 1.52	Adición de válvulas al diagrama de flujo del Ejercicio 1.3	75
Figura 1.53	Diagrama de flujo del Ejercicio 1.3 una vez se elimina la función de ajuste.....	76
Figura 1.54	Opciones seleccionadas en el dimensionamiento de la torre	77
Figura 1.55	Selección del tipo de empaque de la torre de absorción	78
Figura 1.56	Opciones de dimensionamiento de las secciones de la torre “ <i>Tray Section Information</i> ”	79
Figura 1.57	Información obtenida del dimensionamiento de la torre de absorción.....	80
Figura 1.58	Suministro manual de la información de dimensionamiento de la torre de absorción.....	81
Figura 1.59	Comportamiento dinámico del flujo molar al correr el simulador...	82
Figura 1.60	Ruta para abrir la herramienta de <i>Resumen de Ecuaciones</i>	82
Figura 1.61	Ventana de <i>Resumen de Ecuaciones</i> en el Ejercicio 1.3	83
Figura 1.62	Mensaje de error cuando se sobreespecifica el caso de estudio.....	84
Figura 1.63	Lista de la variable que Hysys® recomienda eliminar para el caso específico	85
Figura 1.64	Desactivación de la especificación de presión en la corriente <u>Entrada Líquido</u>	86
Figura 1.65	Mensaje de error cuando se subespecifica el caso de estudio	86
Figura 1.66	Selección de la especificación dinámica de caída de presión (ΔP) fija.....	87
Figura 1.67	Mensaje de error debido a problemas de singularidad.....	88
Figura 1.68	Mensaje de error en la convergencia del <i>solver</i>	89
Figura 1.69	Diagrama de flujo del Ejercicio 1.4 en estado estacionario	91
Figura 1.70	Especificaciones de dimensionamiento del reactor PFR.....	91

Figura 1.71	Opción general del “Asistente dinámico” del Ejercicio 1.4 en estado estacionario	92
Figura 1.72	“Opciones dinámicas” de un reactor PFR.....	94
Figura 1.73	Opciones de diseño del reactor PFR del Ejercicio 1.4.....	95
Figura 1.74	Ventana de “Opciones dinámicas” del reactor con el valor de k calculado.....	95
Figura 1.75	Comportamiento dinámico de los flujos molares de entrada y salida del reactor.....	96
Figura 1.76	Comportamiento dinámico de la temperatura de entrada y salida del reactor.....	97
Figura 1.77	Datos del perfil de composiciones dentro del reactor	97
Figura 1.78	Gráfica del perfil de composiciones dentro del reactor	98
Figura 1.79	Comportamiento dinámico de los flujos molares de entrada y salida del reactor (550 °C)	99
Figura 1.80	Comportamiento dinámico de la temperatura de entrada y salida del reactor (550 °C)	99
Figura 1.81	Diagrama de flujo del acondicionador de gas	100
Figura 1.82	Selección del modelo del intercambiador de calor	102
Figura 1.83	Especificación de diferencia de temperatura $\Delta T = 10$ °C.....	102
Figura 1.84	Ventana principal del “Asistente dinámico” del sistema de acondicionamiento de gases en estado estacionario (Ejercicio 1.5)	103
Figura 1.85	Activación del cambio de especificación dinámica de presión en la corriente <u>Salida Gas</u>	104
Figura 1.86	Desactivación del cambio de especificación dinámica de flujo en la corriente <u>Alimentación</u>	105
Figura 1.87	Opción “ <i>PF versus DP</i> ” del “Asistente dinámico” (Ejercicio 1.5)....	106
Figura 1.88	Especificación del tiempo de residencia del separador	107
Figura 1.89	Opción para que el “Asistente dinámico” calcule los valores k (“ <i>k values</i> ”).....	107
Figura 1.90	Opción “ <i>Other → Misc Specs</i> ” del “Asistente dinámico”	108
Figura 1.91	Creación de registros con la herramienta “ <i>StripChart</i> ” (Ejercicio 1.5)	109
Figura 1.92	Ingreso a las opciones del integrador de Hysys®	110

Figura 1.93	Pestaña general del integrador de Hysys®	111
Figura 1.94	Establecimiento del período de simulación de 2 horas	112
Figura 1.95	Comportamiento de la temperatura de entrada y salida en un período de 2 horas (Ejercicio 1.5)	113
Figura 1.96	Comportamiento de los flujos de entrada y salida en un período de 2 horas (Ejercicio 1.5)	113
Figura 1.97	Comportamiento de los flujos de entrada y salida cuando se someten a perturbaciones de tipo escalón (Ejercicio 1.5)	114
Figura 1.98	Opciones generales del integrador.....	116
Figura 1.99	Opciones de pérdida de calor hacia el exterior del separador	118
Figura 1.100	Pérdida de calor del separador	119
Figura 1.101	Mensaje de alerta sobre posible singularidad en el modelo	120
Figura 1.102	Error en modelo del sistema debido a especificaciones inconsistentes	120
Figura 1.103	Información de los posibles causantes de la singularidad.....	121
Figura 1.104	Ventana “Dynamics → Holdup” del separador.....	122
Figura 1.105	Composición de la corriente.....	123
Figura 1.106	Mensaje de <i>flash</i> dentro de la válvula	124
Figura 1.107	Escalón de temperatura sin seleccionar la opción “Close component material and energy balances”	126
Figura 1.108	Escalón de temperatura seleccionando la opción “Close component material and energy balances”	127
Figura 1.109	Opción de temperatura ambiental del sistema (“Heat Loss”)	128
Figura 1.110	Pérdida negativa de calor hacia el exterior	129
Figura 2.1	Características de operación de las válvulas	134
Figura 2.2	Creación de la característica operacional de la válvula en la opción “User Table”	134
Figura 2.3	Características de operación de las válvulas	135
Figura 2.4	“Opciones dinámicas” de las válvulas	136
Figura 2.5	Adición de la operación lógica “Digital Point” con el nombre “Controlador On-Off”	138
Figura 2.6	Ventana de selección de las variables del Controlador On-Off	139

Figura 2.7	Ventana principal del registro para el gráfico del control On-Off...	139
Figura 2.8	Diagrama de flujo del Ejercicio 2.1	140
Figura 2.9	Selección de modos de operación del Controlador On/Off.....	141
Figura 2.10	Respuesta del sistema cuando se activa el modo “Off”	142
Figura 2.11	Especificación de apertura de la válvula en 40%.....	143
Figura 2.12	Respuesta del sistema cuando se fija la apertura de la válvula en 40%.....	143
Figura 2.13	Ventana de parámetros del Controlador On-Off con la opción “Manual” activada	145
Figura 2.14	Duración del pulso “Pulse On”	146
Figura 2.15	Duración del pulso “Pulse Off”	147
Figura 2.16	Carátula del Controlador On-Off (“Face Plate”)	148
Figura 2.17	Carátula del Controlador On-Off (“Face Plate”) en estado desactivado	148
Figura 2.18	Comportamiento del sistema cuando se activa y desactiva la “OP” (modo manual del Controlador On-Off)	149
Figura 2.19	Comportamiento del sistema ante un pulso de 1 hora (operación realizada en modo manual del Controlador On-Off)	150
Figura 2.20	Ventana de parámetros de la opción “Auto” del Controlador On-Off	151
Figura 2.21	Información de la opción “Parameters” para ejercer control automático del tipo On/Off	153
Figura 2.22	Respuesta del control automático On/Off del separador.....	154
Figura 2.23	Ventana “Connections” del controlador PID	156
Figura 2.24	Diagrama de flujo del proceso controlado por medio de un PID	156
Figura 2.25	Opciones generales de configuración del controlador PID.....	158
Figura 2.26	Selección del tipo de diseño del controlador antes de realizar la autosintonía	159
Figura 2.27	Parámetros de control calculados con la herramienta de “Autosintonía”	160
Figura 2.28	Valores de Kc, Ti y Td actualizados en la opción de “Parameters”...	161
Figura 2.29	Carátula “Face Plate” del controlador PI	162

Figura 2.30	Respuesta del sistema controlado al sintonizar y sin aplicar una perturbación	162
Figura 2.31	Respuesta del sistema controlado al aplicar un cambio tipo escalón en la temperatura.....	163
Figura 2.32	Opción para aumentar el número de datos graficados (“ <i>Set-up Logger</i> ”).....	164
Figura 2.33	Control más agresivo. Respuesta del sistema en lazo cerrado respecto a cambios de temperatura	165
Figura 2.34	Control más conservador. Respuesta del sistema en lazo cerrado respecto a cambios de temperatura	165
Figura 2.35	Ventana principal de la herramienta “ <i>Case Studies</i> ”.....	168
Figura 2.36	Selección de variables dependientes e independientes en análisis de sensibilidad.....	168
Figura 2.37	Selección del rango y de tamaño de paso del análisis de sensibilidad.....	169
Figura 2.38	Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad (curva de estado estacionario en Hysys®)	169
Figura 2.39	Resultados obtenidos del análisis de sensibilidad (curva de estado estacionario en Excel®).....	171
Figura 2.40	Selección de muestras expuestas en la gráfica e intervalo de muestreo.....	174
Figura 2.41	Cambio tipo escalón del flujo molar de <u>Entrada Líquido</u>	175
Figura 2.42	Respuesta del sistema ante un cambio tipo escalón en el flujo molar de <u>Entrada Líquido</u>	176
Figura 2.43	Datos dinámicos del sistema cuando se realiza un cambio tipo escalón en el flujo molar de <u>Entrada Líquido</u>	176
Figura 2.44	Opción para usar el asistente de Excel® para importar un texto.....	177
Figura 2.45	Asistente para importar un texto (delimitación de la información)	177
Figura 2.46	Gráfica con datos seleccionados para el ajuste del modelo.....	179
Figura 2.47	Ajuste de primer orden (calculado) comparado con datos dinámicos de la simulación (experimental)	180
Figura 2.48	Ajuste de segundo orden con amortiguamiento comparado con datos dinámicos de la simulación	181
Figura 2.49	Ajuste de segundo orden con amortiguamiento y tiempo muerto comparado con datos dinámicos de la simulación.....	181

Figura 2.50	Especificaciones de la corriente de <u>Alimentación Líquido</u> del Ejercicio 2.3.....	183
Figura 2.51	Especificaciones dinámicas del actuador del Ejercicio 2.3.....	184
Figura 2.52	Ventana de conexiones del controlador (Ejercicio 2.3).....	185
Figura 2.53	Parámetros del controlador diseñado.....	186
Figura 2.54	Diagrama de flujo del proceso de absorción en lazo cerrado.....	187
Figura 2.55	Comportamiento del sistema en lazo cerrado cuando se realiza un cambio tipo escalón en el “ <i>set point</i> ” (SP).....	188
Figura 2.56	Parámetros del controlador después de su sintonización (Ejercicio 2.3).....	190
Figura 2.57	Respuesta del sistema controlado ante un cambio de tipo escalón en la referencia del flujo de entrada (3,42 a 3,48 kgmol/h).....	190
Figura 2.58	Diagrama de flujo del Ejercicio 2.4 en estado estacionario.....	193
Figura 2.59	Comportamiento dinámico del actuador de la Válvula V1.....	194
Figura 2.60	Ventana “ <i>Dynamics</i> → <i>Specs</i> ” del intercambiador de calor con las especificaciones dinámicas establecidas.....	195
Figura 2.61	Ventana principal del “Asistente dinámico” del Ejercicio 2.4.....	196
Figura 2.62	Listado de las variables que se van a graficar en el Ejercicio 2.4.....	197
Figura 2.63	Opción “ <i>Time Axis</i> → <i>Set-up Logger</i> ” especificada como se requiere para el Ejercicio 2.4.....	197
Figura 2.64	Respuesta dinámica del Ejercicio 2.4.....	198
Figura 2.65	Respuesta dinámica del sistema cuando la entrada es sometida a un escalón de 66,235 a 65% en la apertura de la Válvula V1.....	201
Figura 2.66	Respuesta del flujo de n-decano ante un cambio de tipo escalón en la apertura de la Válvula V1.....	202
Figura 2.67	Ventana de conexiones del controlador PID del Ejercicio 2.4.....	204
Figura 2.68	Especificaciones establecidas en la opción de “Parámetros” del PID (lazo abierto).....	205
Figura 2.69	Respuesta del sistema al activar el controlador.....	205
Figura 2.70	Respuesta del sistema controlado al ser sometido a una perturbación.....	206
Figura 2.71	Respuesta del sistema controlado al ser sometido a un cambio en la referencia “ <i>set point</i> ” (SP).....	207

Figura 2.72	Respuesta del sistema controlado cuando el nivel del líquido en el separador se estabiliza cerca del 100%.....	207
Figura 2.73	Respuesta dinámica de lazo cerrado para $K_c = 1$	210
Figura 2.74	Respuesta del sistema con ganancia última al ser sometido a un escalón	211
Figura 2.75	Especificaciones establecidas en la opción de “Parámetros” del PID (lazo cerrado).....	212
Figura 2.76	Respuesta del sistema controlado al ser sometido a una perturbación (parámetros del controlador calculados en lazo cerrado).....	213
Figura 2.77	Respuesta del sistema controlado al ser sometido a un cambio en la referencia o “ <i>set point</i> ” (SP) (parámetros del controlador calculados en lazo cerrado)	213
Figura 3.1	Diagrama de flujo del proceso en estado estacionario (Ejercicio 3.1)	218
Figura 3.2	Ventana de “Conexiones” del controlador (Ejercicio 3.1)	219
Figura 3.3	Ventana principal de la válvula de control de energía.....	220
Figura 3.4	Resultados de los parámetros de sintonización obtenidos (Ejercicio 3.1)	221
Figura 3.5	Ventana de “Parámetros” del controlador PID del Ejercicio 3.1	222
Figura 3.6	Ventana principal del “Calendario de eventos” (“ <i>Event Scheduler</i> ”)	223
Figura 3.7	Ventana principal del “Calendario de eventos” (“ <i>Event Scheduler</i> ”) después de crear una secuencia	225
Figura 3.8	Ventana principal de la secuencia	226
Figura 3.9	Opción de “Configuración” (“ <i>Settings</i> ”) de las secuencias	226
Figura 3.10	La ventana principal del evento “ <i>Event 1</i> ”	228
Figura 3.11	Condiciones disponibles de los eventos, recuadro “ <i>Wait For</i> ”	228
Figura 3.12	Variables de las expresiones lógicas.....	229
Figura 3.13	Especificación del tiempo transcurrido en la simulación	230
Figura 3.14	Opción “ <i>A Specific Simulation Time</i> ”	230
Figura 3.15	Opciones de la condición “ <i>A Variable To Stabilize</i> ”	231
Figura 3.16	Ventana de “Lista de acciones” (“ <i>Action List</i> ”) del evento	231
Figura 3.17	Condición del primer evento (<i>Event 1</i>).....	234

Figura 3.18	Acción (<i>Action 1</i>) especificada.....	235
Figura 3.19	Segunda acción (<i>Action 2</i>) especificada	236
Figura 3.20	Ventana principal de la secuencia cuando se tienen dos eventos ...	237
Figura 3.21	Especificaciones de la pestaña “ <i>Branching & Time Out Behaviour</i> ”	237
Figura 3.22	Condición del Evento 2	238
Figura 3.23	Acción propuesta para el Evento 2 (cambio de modo de controlador).....	239
Figura 3.24	Ventana de condiciones del Evento 3 (período de reacción de 6 horas)	240
Figura 3.25	Cambio a modo manual del controlador	240
Figura 3.26	Ventana de condiciones del Evento 4 (período de reacción de 1 s)	241
Figura 3.27	Acción para cerrar la válvula de alimentación	241
Figura 3.28	Acción para apagar el controlador (pasar a modo “ <i>Off</i> ”)	242
Figura 3.29	Acción para parar la simulación	243
Figura 3.30	Personalización del intervalo de tiempo de simulación a 6 horas ...	243
Figura 3.31	Aumento del número de datos que se grafican	244
Figura 3.32	Ventana principal del “Calendario de eventos” (“ <i>Event Scheduler</i> ”) con la secuencia completa	244
Figura 3.33	Simulación del proceso de producción de estireno (eventos).....	245
Figura 3.34	Ventana principal de la herramienta “Inicialización dinámica” (“ <i>Dynamic Initialization</i> ”)	246
Figura 3.35	“Opciones dinámicas” de un reactor CSTR	248
Figura 3.36	Diagrama de flujo en estado estacionario (Ejercicio 3.2)	253
Figura 3.37	Especificación de corriente de aire unida a <u>F4</u>	254
Figura 3.38	Ventana de conexiones de la función de transferencia	255
Figura 3.39	Rangos de operación y parámetros de inicialización en frío de la función de transferencia	256
Figura 3.40	Opción de “Retardo” de la función de transferencia.....	257
Figura 3.41	Ventana de “Parámetros”, opción de “Segundo orden”, de la función de transferencia.....	258
Figura 3.42	Diagrama de flujo del proceso con la función de transferencia.....	259
Figura 3.43	Determinación de tiempo de muestreo e intervalo de muestra (Ejercicio 3.2).....	259

Figura 3.44	Simulación dinámica de Ejercicio 3.2 sin inicializar	260
Figura 3.45	“Opciones dinámicas” de inicialización del reactor CSTR.....	260
Figura 3.46	Condiciones de arranque del reactor	261
Figura 3.47	Ruta para ingresar a la herramienta de “Inicialización dinámica”...	262
Figura 3.48	Opción de “Creación/Selección” del área que se va a inicializar.....	262
Figura 3.49	Selección de variables que se desean inicializar.....	263
Figura 3.50	Selección de variable de inicialización.....	264
Figura 3.51	Comportamiento de las corrientes de energía, el nivel de líquido y la temperatura del reactor en la inicialización del sistema.....	265
Figura 3.52	Comportamiento de los flujos de entrada y salida del reactor en la inicialización del sistema	265
Figura 3.53	Especificaciones establecidas en la válvula de alivio	266
Figura 3.54	Selección del tipo de orificio de la válvula de alivio.....	267
Figura 3.55	Comportamiento dinámico de las corrientes de energía, el nivel de líquido y la temperatura del reactor con válvula de alivio	267
Figura 3.56	Comportamiento dinámico de los flujos de entrada y salida una vez alcanzado un nivel del 100% de líquido en el reactor	268

Índice de tablas

Tabla 1.1	Constantes de velocidad de reacción del Ejercicio 1.4	90
Tabla 2.1	Datos del caso de estudio	170
Tabla 2.2	Ecuaciones para realizar la linealización de las variables.....	178
Tabla 2.3	Parámetros encontrados y error medio de cada modelo evaluado	182
Tabla 2.4	Parámetros del sistema en lazo cerrado y error medio de cada modelo evaluado	188
Tabla 2.5	Fórmulas para calcular los parámetros de un controlador PID (lazo abierto)	200
Tabla 2.6	Parámetros de sintonización de Ziegler y Nichols para proceso en lazo cerrado	209
Tabla 2.7	Parámetros del controlador calculados por el método de Ziegler y Nichols (lazo cerrado).....	211
Tabla 3.1	Iconos y descripción de los estados posibles en la simulación con eventos	224
Tabla 3.2	Valores de los parámetros de la velocidad de reacción	252

Introducción

La *simulación dinámica* es la actividad de analizar y predecir el comportamiento transitorio de un proceso, es decir, el cambio de sus variables a lo largo del tiempo (Oh y Moon, 1998: 231). En los últimos años se ha considerado la simulación dinámica como una alternativa para generar información sobre la respuesta dinámica de un proceso, información necesaria para el diseño de equipos por lotes, de plantas y de sistemas de control, y para el ajuste de los mismos (Alsop y Ferrer, 2004: 2). Las ventajas de realizar las pruebas de una planta por medio de esta herramienta son obvias: generalmente los costos son mucho menores, no se necesitan ensayos en la planta, los datos de las pruebas están libres de ruido y de ciclos de válvulas, todas las variables de entrada del proceso se pueden someter a un cambio de tipo escalón y el tiempo del análisis puede ser minimizado en gran medida, especialmente para procesos con varias variables o de largos períodos de estabilización (Alsop y Ferrer, 2004: 2).

En Latinoamérica, en cursos de Control en pregrados de Ingeniería Química se emplean simuladores matemáticos como Simulink® para la resolución de ejercicios, si bien un reducido número de universidades usan herramientas como Hysys® y Aspen Plus® para la simulación del control de procesos. Es el caso de la Universidad de las Américas, en México, que se sirve del programa Hysys® para la resolución de problemas de simulación dinámica en los cuales se realiza control del proceso y se implementan lazos de control y sintonización.

En Colombia, algunas universidades, como la Universidad de América en Bogotá, ofrecen diplomados y especializaciones en las que se enseña simulación dinámica de procesos químicos con herramientas como Hysys® y Aspen Plus®; sin embargo, en ellas no se enfatiza la simulación del control de procesos con este tipo de herramientas. En otras universidades se han trabajado proyectos en los que se hacen simulaciones de control de procesos en Hysys®; por ejemplo, en el año 2005, se elaboró el proyecto “Aplicación de esquemas de control avanzados en el proceso de deshidratación del gas natural” en la Universidad Tecnológica de Pereira

(Duran y Castillo, 2004), y en 2009, el proyecto “Implementación de un sistema de control predictivo multivariable en un horno” en la Universidad Nacional de Colombia (Gómez y Correa, 2009). No obstante, estos proyectos se centraban en procesos específicos y no en la enseñanza del control.

En los cursos de Ingeniería Química y de Procesos de varias universidades colombianas se enseña simulación en estado estacionario y “reglas de dedo” para el dimensionamiento de equipos y para establecer otras variables que afectan el rendimiento dinámico de la planta. Sin embargo, muy poco o nada se instruye en la simulación dinámica de procesos, la cual incluye procesos discontinuos y arranque y paro de plantas, temas de amplia aplicación en la industria de procesos químicos.

Esta guía está dirigida a ingenieros familiarizados con la simulación de procesos químicos utilizando el programa Aspen Hysys®; en ella se enseñan los conceptos básicos de simulación dinámica mediante procesos sencillos; se describe, en detalle, cómo realizar simulaciones de sistemas controlados (On/Off y PID –proporcional, integral y derivativo–) y cómo sintonizar tales dispositivos de control. También se explica un procedimiento que permite obtener la función de transferencia de un sistema a partir de los datos suministrados por el programa; se ilustra cómo crear simulaciones que posean secuencias y los pasos a seguir para efectuar el arranque en frío de un sistema previamente simulado en Hysys®. A su vez, estos conceptos se encuentran acompañados de ejemplos que describen el procedimiento que se debe seguir para diseñar las simulaciones dinámicas.

Los ejercicios de esta guía fueron elaborados en el simulador Aspen Hysys®, Versión 8.0, y las imágenes y capturas de pantalla utilizadas fueron tomadas del mismo programa. No hace parte del alcance del presente texto la explicación profunda de los conceptos de control automático utilizados, ni la modelación empleando controladores diferentes al PID y al On/Off incluidos en el programa.

El enfoque es, por tanto, práctico, tomando diferentes casos de estudio que se desarrollan desde lo básico hacia lo complejo, ilustrando conceptos que les son comunes a todos los casos o, algunas veces, que se desarrollan dentro de un ejemplo particular.

El capítulo 1 ilustra, por medio de ejemplos, los principales pasos a seguir para realizar una simulación dinámica en Hysys® y describe las di-

ferentes opciones de simulación que ofrece el programa. En el capítulo 2 se presenta cómo se especifican y simulan procesos con controladores de tipo discreto (On/Off) y continuos (PID). Por último, en el capítulo 3 se explica cómo simular en Hysys® procesos con eventos (por etapas) y arranques de planta.