

Simulación de Procesos y Aplicaciones

Simulación de Procesos y Aplicaciones

Agustín Jiménez Avelló · Manuel Castro Gil
José Manuel Costa García



INDUSTRIALES
ETSI | UPM
SECCIÓN DE PUBLICACIONES

DEXTRA
EDITORIAL



Consulte la página www.dextraeditorial.com

Diseño y fotografía de cubierta: ©TheIdeas · www.ideasjc.net

© Agustín Jiménez Avelló, Manuel Castro Gil,
José Manuel Costa García

© Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica
Superior de Ingenieros Industriales.
Universidad Politécnica de Madrid

© Dextra Editorial S.L.
C/Arroyo de Fontarrón, 271, 28010 Madrid
Teléfono: 91 773 37 10

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 expresa por escrito de Dextra Editorial. S.L.

ISBN: 978-84-16277-38-4
Depósito legal: M-10775-2015
Impreso en España. Printed in Spain

PRÓLOGO

El modelado y la simulación se han convertido en actividades centrales a todas las disciplinas de las ciencias y de la ingeniería. Se utilizan en el análisis de los sistemas físicos ya que permiten obtener una mejor comprensión y conocimiento de como funciona nuestro mundo real. También son importantes en el diseño de nuevos sistemas de ingeniería, cuando se pretende predecir la conducta del mismo antes de su construcción.

El modelado y la simulación son las únicas técnicas actualmente disponibles que permiten analizar sistemas no lineales de forma precisa, bajo diferentes condiciones experimentales.

El modelado describe la transición desde el propio sistema físico hasta una descripción abstracta de ese sistema mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales y/o en diferencias. Por su parte, la simulación se centra en el paso del modelo matemático, tal como se ha especificado en la etapa de modelado, a la obtención de la trayectoria que describe la evolución temporal del sistema.

El objetivo básico del modelado y la simulación es la imitación de la operación de un proceso o sistema real a lo largo del tiempo. Ya sea hecha a mano o utilizando un ordenador, toda simulación lleva a cabo la generación de una historia artificial de un sistema y la observación de esa historia artificial para sacar conclusiones de las características operativas del sistema real.

La conducta del sistema durante su evolución se estudia desarrollando un *modelo de simulación*. Este modelo normalmente se basa en un conjunto de hipótesis que toman en consideración la operación del sistema y el objetivo final que se persigue con su desarrollo (en este sentido todos los modelos tienen un carácter marcadamente finalista). Estas hipótesis se expresan mediante relaciones matemáticas, lógicas y/o simbólicas entre las entidades u objetos de interés del sistema.

Una vez desarrollado y validado el modelo, se puede utilizar para investigar una amplia variedad de preguntas acerca del sistema real del tipo ¿qué pasa si?

Es una buena estrategia primero simular los posibles cambios potenciales que se ha previsto realizar en los sistemas, con el fin de que se pueda predecir su impacto sobre su comportamiento.

La simulación se puede emplear también para estudiar sistemas en su etapa de diseño y antes de que realmente se construyan. De esta manera, las técnicas de modelado y simulación se pueden emplear tanto como herramientas de análisis para predecir el efecto de los cambios en sistemas ya existentes y como una herramienta de diseño para predecir el comportamiento de un nuevo sistema bajo diferentes circunstancias.

Desde esta perspectiva, el texto *Simulación de Procesos y Aplicaciones* proporciona un tratamiento de carácter introductorio y práctico de los métodos y conceptos que conforman el campo del modelado y la simulación. Sus autores han logrado, en mi opinión, un buen equilibrio no exento de dificultades entre los aspectos formativos y de información útil al suministrar al lector una panorámica de las herramientas software más ampliamente utilizadas en la actualidad. También se ha procurado presentar al mismo nivel de detalle los temas de ambos mundos, “continuo” y “discreto”. Es también de agradecer su puesta a la luz del día, pues no abundan los textos de estas materias escritos en español.

Dr. Sebastián Dormido Bencomo
Catedrático de Universidad
Departamento de Informática y Automática
Universidad Nacional de Educación a Distancia

COLABORADORES

En diversos capítulos de este volumen han colaborado diversas personas que han aportado su conocimiento especial de esos temas. A continuación se resumen sus nombres, así como se incluyen los mismos en los diversos capítulos.

D. Antonio Barrientos (cap. 15), D. Ernesto Gambao (cap. 9) y D. Ricardo Sanz (cap. 6)

Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial.

Universidad Politécnica de Madrid.

D. Manuel Rodríguez (cap. 5)

Departamento de Ingeniería Química Industrial.

Universidad Politécnica de Madrid.

D. Luis Femáncz Beites (cap. 10)

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad Politécnica de Madrid

D. Manuel Valcárcel (cap. 13)

Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia

D. Emilio Olías (cap. 14)

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

Universidad Carlós III de Madrid

D. José Carpio (cap. 13), D. Juan Vicente Míguez (cap. 14), José Antonio Rodríguez (cap. 8) y D. Joaquín Vaquero (cap. 14)

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control

Universidad Nacional de Educación a Distancia

Dña. Delva Batista de Chambers (cap. 10)
Universidad Tecnológica de Panamá

D. Eugenio Agudo (cap. 16)
D. José Enrique Martín (cap. 12)
D. Rafael Salamanca (cap. 16)

ÍNDICE

1. Modelado de sistemas

1.1. Introducción	1
1.2 Concepto de sistema y de modelo	1
1.3. Tipos de modelos	3
1.3.1. Elección del modelo	3
1.4. Modelado analítico	5
1.4.1 Sistemas continuos	5
1.4.2 Sistemas discretos	7
1.4.3 Sistemas muestreados	9
1.4.4. Sistemas por lotes	10
1.5. Modelado simbólico	11
1.5.1. Modelos basados en reglas	12
1.5.2. Modelos cualitativos	12
1.5.3. Modelos funcionales y causales	12

2. Objetivos y técnicas de simulación

2.1. Introducción	13
2.2. Aplicaciones de la simulación	14
2.3. Proceso de modelado y simulación	14
2.4. Tipos de simulación	15
2.5. Simulación de sistemas continuos	17
2.6. Simulación de sistemas por lotes	19
2.7. Simulación combinada	24
2.8. Simulación cualitativa	24
2.9. Lenguajes empleados en simulación	24
2.10. Uso y limitaciones de la simulación	25

3. Simulación de sistemas continuos. Simulación analógica

3.1. Introducción	27
3.2. Identificación y modelado de sistemas continuos	27
3.2.1. Modelos	28
3.2.2. Parametrización	28
3.2.3. Elección del modelo	28
3.2.4. Aplicaciones de la identificación de sistemas	29
3.3. Cálculo analógico	30
3.3.1. Computadores analógicos	30
3.3.2. Programación	35
3.3.3. Características	43

4. Simulación digital de sistemas continuos

4.1. Introducción	45
4.2. Métodos numéricos de resolución	46
4.2.1. Método de Taylor	47
4.2.2. Método de Euler	47
4.2.3. Interpolación polinomial	48
4.2.4. Fórmulas multipaso	49
4.2.5. Predictor-corrector	49
4.2.6. Adams-Moulton	50
4.2.7. Métodos de Runge-Kutta	51
4.2.8. Sistemas de ecuaciones diferenciales	54
4.2.9. Arranque de la simulación	55
4.2.10. Elección del paso de integración	55
4.2.11. Comparación entre métodos de análisis numérico	56
4.3. Estabilidad numérica	56
4.3.1. Inestabilidad debida a la ecuación	57
4.3.2. Inestabilidad debida al paso de integración	57
4.3.3. Inestabilidad debida al método	58
4.4. Algoritmo de simulación de sistemas continuos	59
4.5. Sistemas discretos	60
4.5.1. Algoritmo de simulación de sistemas discretos	61
4.6. Sistemas muestreados	62
4.6.1. Algoritmo de simulación de sistemas muestreados	63

5. Lenguajes de simulación de sistemas continuos y ejemplos

5.1. Introducción	65
5.1.1. Simulación actual. Evolución	65

5.1.2. Dificultades y carencias actuales	67
5.1.3. Requerimientos	67
5.1.4. Características de un simulador	68
5.2. Lenguajes de modelado de sistemas continuos	68
5.2.1. Clasificación	68
5.2.2. Origen	69
5.2.3. ACSL	70
5.2.4. SIMNON	74
5.2.5. EASY5	74
5.2.6. DYMOLA	77
5.2.7. SPEEDUP	78
5.2.8. SIMULINK	82
5.2.9. MODELICA	84
5.2.10. ECOSIM	84
5.2.11. Lenguajes en el entorno académico	86
5.2.12. Lenguajes de simulación estacionaria	87
5.3. Arquitectura de un simulador	88
5.4. Tendencias	89

6. Simulación simbólica

6.1. Introducción	91
6.2. Simulación basada en reglas	93
6.3. Objetivos de la simulación cualitativa	94
6.3.1. Objetivo generales	94
6.3.2. Objetivos de control	95
6.4 Características generales	96
6.5. Representaciones cualitativas	98
6.5.1. Terminología	98
6.5.2. Valores cualitativos	99
6.5.2.1. Variables y valores cualitativos	99
6.5.2.2. Niveles de abstracción múltiples	100
6.5.2.3. Valores incrementales cualitativos	102
6.5.3. Espacio de cantidades	103
6.5.3.1. Definiciones	103
6.5.3.2. Tipos de valores	104
6.5.3.3. Espacio de hitos	105
6.5.3.4. Especificación de espacio de cantidades	105
6.5.3.5. Relaciones de orden	106
6.5.4. Representación del tiempo	107
6.5.4.1. Eventos	108
6.5.4.2. Episodios	108

6.5.4.3. Historias	109
6.5.5. Restricciones	109
6.5.5.1. Tipos de restricciones	109
6.5.6. Regiones de funcionamiento	109
6.5.7. Modelos	110
6.6. Algoritmo de simulación	110
6.6.1. Introducción	110
6.6.2. Valores cualitativos	111
6.6.3. Proceso de simulación	111
6.6.3.1. Datos de partida	111
6.6.3.2. Resultados de la simulación	112
6.6.3.3. Algoritmo de simulación QSIM	112
6.6.4. Ejemplo de simulación	112
7. Simulación de sistemas por lotes	
7.1. Introducción	117
7.2. Conceptos básicos	118
7.3. Componentes de un simulador por lotes	119
7.4. Proceso de simulación por lotes	126
7.5. Simulación combinada	128
7.5.1. Tareas básicas en la simulación combinada	128
8. Generación de entradas de simulación	
8.1. Introducción	131
8.2. Ajuste de distribuciones a los datos de entrada	131
8.2.1. Selección de distribuciones probabilísticas de entrada	131
8.2.2. Distribuciones empíricas	132
8.2.3. Elección de una familia de distribuciones teóricas	133
8.2.4. Estimación de parámetros	134
8.2.5. Contrastes de ajuste	135
8.3. Generación de números y variables aleatorias	138
8.3.1. Generación de distribución uniforme $[0,1)$	139
8.3.2. Comprobación de la bondad de un generador	141
8.3.3. Generación de variables aleatorias	142
9. Lenguajes de simulación de sistemas por lotes	
9.1. Introducción	145
9.2. Herramientas Software disponibles para la simulación de sistemas por lotes	146

9.3. Características deseables en un software de simulación	147
9.4. Lenguajes de simulación por lotes	151
9.5. Paquetes de Simulación de Sistemas por lotes	153
10. Validación	
10.1. Introducción	155
10.2. Conceptos básicos de validación	156
10.3. Significado del modelo válido	159
10.4. Metodología y técnicas para realizar la validación	161
10.4.1. Validación formal del modelo	161
10.4.2. El empleo de pruebas estadísticas	163
10.4.2.1. Inspección parcial	164
10.4.2.2. Pruebas de hipótesis	164
10.4.2.3. Pruebas de significación de medias	166
10.4.2.4. Análisis de varianza	167
10.4.2.5. Intervalo de confianza	168
10.4.2.6. La prueba de Mann-Whitney	171
10.4.2.7. Comparación entre distribuciones de salida tipo serie temporal	174
10.5. Conclusiones	175
11. Ejecución y análisis de la salida	
11.1. Introducción	177
11.2. Ejecución de la simulación	177
11.3. Técnicas de reducción de la varianza	178
11.3.1. Números aleatorios comunes	178
11.3.2. Variables antitéticas	179
11.3.3. Variables de control	180
11.3.4. Otras técnicas	183
11.4. Diseño de experimentos	183
11.4.1. Metodología de la respuesta de la superficie	185
11.5. Optimización	186
11.5.1. Métodos de búsqueda	186
11.5.1.1. Método de variable simple, caso determinista	187
11.5.1.2. Método de variable simple, caso no determinista	192
11.5.1.3. Búsqueda multidimensional	195
11.6. Determinación del tamaño de la muestra y las reglas de parada ...	197

12. Análisis de sensibilidad e incertidumbre

12.1. Introducción	199
12.2. Metodología para el análisis de sensibilidad e incertidumbre	200
12.2.1. Tipos de incertidumbre y tipos de análisis de sensibilidad	200
12.2.2. Metodología general	201
12.2.3. Técnicas de muestreo	205
12.2.3.1. Muestreo aleatorio simple	205
12.2.3.2. Diseños factoriales	206
12.2.3.3. Muestreo hipercubo latino	207
12.3. Análisis de incertidumbres	208
12.3.1. Histogramas	209
12.3.2. Función de distribución empírica	209
12.3.3. Estimación de medias	209
12.3.4. Estimación de varianzas	211
12.4. Análisis de sensibilidad	211
12.4.1. Diagramas de dispersión	212
12.4.2. Análisis de regresión	213

13. Aplicaciones de la simulación en ingeniería eléctrica

13.1. Introducción	215
13.2. Modelos para planificación	216
13.2.1. Modelos generales de planificación energética	217
13.2.2. Modelos de planificación eléctrica	218
13.2.3. Previsión de la demanda eléctrica	218
13.2.3.1. Modelos de previsión basados en series temporales	219
13.2.4. Expansión del equipo generador y de la red	219
13.2.5. Gestión de las energías primarias y de los combustibles	219
13.3. Estudios clásicos de redes	220
13.3.1. Valores por unidad	220
13.3.2. Reparto de cargas	221
13.3.3. Cortocircuitos	222
13.3.4. Estabilidad transitoria	224
13.3.5. Transitorios electromagnéticos	225

14. Aplicaciones de la simulación en ingeniería eléctrica

14.1. Introducción	227
14.2. Simuladores digitales	227
14.2.1. Modelos de simuladores digitales	229
14.2.1.1. Modelos de puertas	229

14.2.1.2. Modelos descriptivos (VHDL)	229
14.2.1.3. Modelos físicos	231
14.2.1.4. Comparación entre modelos	231
14.2.2. Algoritmos de simulación	232
14.2.3. Utilización por los simuladores del tiempo	232
14.3. Simuladores analógicos y mixtos	232
14.3.1. SPICE y sus derivados	233
14.3.1.1. Modelos y componentes	235
14.3.2. Tipos de análisis	236
14.3.3. Simuladores mixtos	237
14.3.4. Prestaciones de un simulador de calidad	238
14.4. Simuladores de potencia	238
14.5. Proceso de simulación en un entorno CAEE	239
14.5.1. Captura de esquemas y elección de componentes	239
14.5.2. Compilación expansión	239
14.5.3. Simulación	240
14.5.4. Diseño del circuito impreso	240
14.5.5. Simulación térmica y de interferencias	240
14.5.6. Fabricación	240
14.5.7. Control de calidad	241
14.5.8. Testabilidad	241

15. Aplicaciones de la simulación en los sistemas de fabricación flexible

15.1. Introducción	243
15.2. Ejemplo. Un taller de mecanizado	244
15.3. Elementos de la simulación por lotes aplicada a los FMS	246
15.3.1. Piezas	246
15.3.2. Estaciones	246
15.3.3. Recursos	247
15.3.4. Almacenes	247
15.3.5. Transportes	248
15.3.6. Interrupciones	249
15.3.7. Planificador	249
15.4. Herramientas para la simulación de un FMS	250
15.5. Simulación de un almacén automático de despacho de pedidos ...	251
15.5.1. Simulador del subsistema de carga-descarga de estanterías	254
15.5.1.1. Reparto de productos en las estanterías	254
15.5.1.2. Reparto de un pedido de cajas	255
15.5.1.3. Determinación del orden de servicio de las cajas	256
15.5.1.4. Resultados de la simulación	257

16. Aplicaciones de la simulación al diseño y análisis de sistemas de comunicaciones

16.1. Introducción	261
16.2. Modelización de redes de computadores	262
16.3. ¿Qué es una simulación de un red informática?	263
16.4. Ventajas y desventajas en el uso de la simulación	266
16.5. Factores que intervienen en el uso de la simulación	267
16.6. Software de simulación para redes de comunicaciones	267
16.6.1. Características deseables	269
16.7. Elementos en un estudio de simulación de una red de comunicaciones	270
16.8. Resumen del programa de simulación COMNET III	271
16.8.1. Breve descripción	271
16.8.2. Características	271
16.8.3. Aplicabilidad	272
16.8.4. Construcción de modelos en COMNET III	273
16.8.5. COMNET III y el modelo OSI	277
16.8.6. Usos de COMNET III	277
16.9. Aplicación: Simulación de la red de la UNED	278
16.9.1. Objetivos de la simulación	278
16.9.2. Planificación del estudio	278
16.9.3. Pasos realizados	279
16.9.3.1. Recogida de datos para definir la topología del sistema	279
16.9.3.2. Recogida de datos para definir las cargas de trabajo	280
16.9.3.3. Realización del modelo	280
16.9.3.4. Determinación de los parámetros de la simulación	281
16.9.3.5. Simulación	282
16.9.3.6. Evaluación de resultados y alternativas	282
16.9.4. Conclusión	285

ANEXO. Conceptos básicos de estadística y probabilidad

A.1. Introducción	289
A.2. Distribuciones estadística	296
A.2.1. Distribuciones continuas	297
A.2.2. Distribuciones discretas	302

Bibliografía	305
---------------------------	------------