

Modelado y simulación

Aplicación a procesos logísticos
de fabricación y servicios

POLITEXT

Antoni Guasch - Miquel Àngel Piera
Josep Casanovas - Jaume Figueras

Modelado y simulación

Aplicación a procesos logísticos
de fabricación y servicios

EDICIONS UPC

La presente obra fue galardonada en el séptimo concurso
"Ajut a l'elaboració de material docent" convocado por la UPC.

Primera edición: febrero de 2002
Segunda edición: mayo de 2003

Diseño de la cubierta: Manuel Andreu

© Los autores, 2002

© Edicions UPC, 2002
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona
Tel.: 934 016 883 Fax: 934 015 885
Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
E-mail: edicions-upc@upc.es

Producción: CPET (Centre de Publicacions del Campus Nord)
La Cup. Gran Capità s/n, 08034 Barcelona

Depósito legal: B-22775-2003
ISBN: 84-8301-704-0

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

A Maria, Alba, Andreu i Guillem pel vostre amor i recolzament.
Per a vosaltres, pares, que m'heu ensenyat el camí a seguir.

A. Guasch

A Gemma, que sense entendre res, ho ha entès tot.
A Alba i Judit, les seves rialles també estan presents en aquestes planes.
A vosaltres pares, per tot el que m'heu donat.

M.A. Piera

A Rosa, Ada i Laura i als meus pares Josep i Pilar.
A les persones estimades. A Jaume Barceló per la seva amistat,
i la nostra passió comuna per la muntanya i per haver-me introduït a la simulació.

J. Casanovas

Vull agrair el suport incondicional de les persones estimades,
a tu Maite, pel teu amor i hores passades al meu costat,
i a vosaltres pares, per l'esforç i sacrifici esmerçat en el vostre fill.

J. Figueras

Prólogo

Siempre es difícil hacer la introducción a un libro, máxime cuando es académico ya que... ¿qué se puede decir que no esté dicho? Y si se expone alguna idea nueva, el lector se pregunta ¿por qué no lo explican los autores? ¿No pretenderán los autores del prólogo robar protagonismo a los autores legítimos? Así que empezaremos con aspectos generales sobre el tema del libro que se disponen a leer. El mundo de la simulación de procesos productivos, logísticos o de servicios ha sufrido un importante avance desde su inicio. En la actualidad la simulación de procesos estocásticos se utiliza cada vez más en el estudio detallado de sistemas crecientemente complejos, desde factorías industriales a terminales portuarias.

Está apareciendo una gran diversidad de programas que facilita la aproximación a problemas con un grado elevado de realismo y un mayor rigor metodológico. También existe un mayor interés por no dejar nada al azar en el diseño o explotación de cualquier proceso. Se intenta que los modelos de simulación puedan integrarse o sean útiles para apoyar su funcionamiento diario. Así, se espera que existan modelos que de forma virtual coloquen contenedores, estas cajas que vienen cargadas de sorpresas del ancho mundo, en una posición óptima y adecuada dentro de una terminal portuaria, mientras el buque que los transporta todavía está surcando el océano (y no se espera su llegada a puerto hasta la mañana siguiente).

Cabe destacar el enfoque práctico que los autores han sabido darle, buscando casos reales que sin duda ellos mismos han vivido. No es este el lugar de resaltar el bagaje profesional de los autores, sólo recordar una frase de Toni: *tenim els dits pelats*. Es decir, no sólo tienen las pestañas quemadas, como ocurre sin duda a menudo en el mundo académico, sino también las puntas de los dedos. Yo me atrevería a decir que hasta los zapatos los tienen gastados, cerrando así un círculo trinitario: estudiar, hacer, comprobar. Para estudiar y trabajar un tema es necesario, en efecto, gastar zapatos y hablar con los expertos allí donde se hallen.

Hay quien dice que para desarrollar un modelo las mejores horas son las nocturnas, cuando todo está oscuro y es posible, con la simple ayuda de un teclado y un ratón, crear un mundo ficticio que toma cuerpo entre las sombras. Se trata de un mundo artificial, mecánico, donde todo ocurre por un motivo. A medida que se hojean los diferentes capítulos del libro, en algún momento parece envolvernos el aroma del café, el mismo café que sin duda ha mantenido a los autores en vigilia durante largas horas, peleándose con el ordenador. A veces debe verse la relación con el ordenador como una lucha. Como dice siempre Miquel Àngel “hay que vencerlo” y que al final haga lo que estaba previsto. El sacrificio nocturno de los autores, y de sus familias, no ha sido en vano. Gracias a su trabajo es ahora posible repasar tranquilamente y a la luz del día, los principios de la simulación de procesos estocásticos.

Parece que ha sido sólo un sacrificio en horas, que no en malos ratos. En esta lucha con el ordenador las heridas no duelen, los distintos obstáculos sólo escuecen en el amor propio hasta que finalmente son superados. En ese momento todo encaja y el modelo de simulación toma vida propia. Es posible, en este sentido, establecer un paralelismo con la creación del doctor Frankenstein, aunque en este caso nadie corre peligro.

Desde una óptica más profesional, pensando en los expertos en simulación y a todos aquellos que buscarán en ella solución a sus problemas, éste es un texto idóneo para introducirse en el extenso mundo de la simulación. Estas afirmaciones no se presentan al vuelo ni gratuitamente, sino apoyadas en la experiencia y pagadas con el sudor de la frente. Sin duda, nuestros esfuerzos en el desarrollo de modelos de simulación orientados a eventos discretos habrían caído en un pozo profundo sin el apoyo moral, académico y profesional de los autores del libro. La mayor parte del trabajo se destina a evaluar el comportamiento de los sistemas: esto es la razón de ser del modelo y significa largas horas estudiando su evolución. De aquí nace otra máxima de los autores: el desarrollo de un modelo de simulación precisa huir de la superficialidad, y requiere reflexionar, investigar, entender y adquirir un compromiso con el rigor y la responsabilidad.

Para terminar agradecer, felicitar y saludar a los autores del libro.

David Vergés

Josep Canudas

Barcelona, enero 2002

Agradecimientos

Deseamos destacar en primer lugar a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) por el impulso y el apoyo recibido. El premio concedido para la elaboración de material docente ha permitido aglutinar y dar cuerpo a las energías e ilusiones de los autores que, desde hace tiempo, deseaban hacer una aportación al apasionante mundo de la simulación.

Nuestra gratitud a los profesores Jaume Barceló y Rafael M. Huber (Univ. Politècnica de Catalunya) y César de Prada (Univ. de Valladolid) por la formación y tutelaje recibidos, lo que nos permitió introducirnos y consolidar nuestra formación en esta área. Han sido muy valiosas las aportaciones y sugerencias de los profesores M. Santos (Univ. Complutense de Madrid), M. Berenguel (Univ. de Almería), A. Sanfeliu (Univ. Politècnica de Catalunya) y J.L. Villarroel (Univ. de Zaragoza). A los profesores J.J. Ramos, R. Moreno, R. Vilanova, J.M. Surís y muy especialmente al profesor I. Serra (U.A.B.) por haber sabido compartir tanto las ilusiones como los malos momentos que nos ha tocado pasar.

Queremos destacar a las personas y empresas que han confiado en la simulación y en nosotros para resolver sus problemas o avanzar en su proceso de formación. La lista no es exhaustiva, resaltamos aquellas personas que nos han forzado a alcanzar y superar el límite de nuestros conocimientos al plantearnos problemas de notable dificultad científica y práctica: E. Echeverría, J.A. Bautista, J. Dueñas y J. Gómez (Sidmed -Aceralia/Unisor-); S. Ametller (Sener); J. Moreno (Autoritat Portuaria de Barcelona); J. Benet, J. Garcia, A. Benito, J. Pages y J. Conrado (Grupo Damm); X. Gesé (Puertos del Estado); A. Casanovas (Almirall-Prodesfarma); X. Ferran (Indra) y J. Rivera (Consortio Hospitalario Parc Tauli).

Han sido muy valiosas las aportaciones y el apoyo de M. Bacardit, J. Vila, O. Hernández, V. Huerta, S. Francisco, J. Montero, P. Fonseca, Ll. Romeu y R. Anglès. También deseamos agradecer el apoyo de J.A. Muñoz de Drilco para que nuestros siempre exigentes estudiantes puedan disponer de licencias educacionales del software de simulación Arena y su interés para resolver nuestras, a veces no fáciles, dudas. Por último, esperamos que este libro satisfaga a nuestros lectores. Serán bienvenidos los comentarios o sugerencias que nos permita mejorar sus futuras versiones.

Antoni Guasch,
Miquel Angel Piera,
Josep Casanovas,
Jaume Figueras.
Barcelona, mayo de 2003

Índice

Prólogo.....	i
Agradecimientos	iii
Índice	v
1. Introducción a las técnicas de simulación digital.....	1
1.1. Tipos de sistemas.....	2
1.2. Tipos de modelos.....	3
1.3. Modelos de simulación de eventos discretos.....	7
1.4. Alternativas en la simulación de modelos de eventos discretos	7
1.4.1. Simulación del modelo estático	8
1.4.2. Simulación a mano	8
1.4.3. Simulación digital mediante un lenguaje de propósito general.....	12
1.4.4. Experimentación mediante un entorno de simulación	13
1.5. Ventajas y desventajas de la simulación.....	14
1.6. Campos de aplicación de la simulación orientada a eventos discretos	15
1.7. Ciclo de vida de un proyecto de simulación	16
1.8. Ejercicios	20
2. Modelado de sistemas orientados a eventos discretos.....	23
2.1. Formalización de modelos conceptuales	25
2.2. Modelos de flujos	27
2.3. Redes de colas	28
2.4. Redes de Petri	30
2.4.1. Definiciones.....	31
2.4.2. Programación <i>Bottom-Up</i>	39
2.4.3. Análisis de las redes de Petri	44
2.4.4. Algunas consideraciones sobre la formalización de modelos conceptuales en RdP.....	57
2.5. Las redes de Petri coloreadas.....	58
2.5.1. Definiciones.....	60
2.5.2. Ventajas del formalismo de RdPC.....	73
2.6. Otras aproximaciones formales para el modelado de sistemas de eventos discretos	74
2.7. Ejercicios	75
3. Modelos estadísticos en simulación	89

3.1. Definiciones.....	91
3.2. Descripción de un sistema con características estocásticas	93
3.3. Adquisición y análisis de datos.....	93
3.3.1. Técnicas para evaluar la independencia de los valores de una muestra.....	96
3.3.2. Técnicas para evaluar la estabilidad de la distribución.....	99
3.4. Distribución de probabilidad (histograma y diagrama de barras).....	100
3.5. Función de densidad de probabilidad	102
3.6. Función de distribución acumulativa	105
3.7. Distribuciones empíricas para variables aleatorias continuas.....	106
3.8. Análisis del ajuste de una distribución.....	108
3.8.1. Test de hipótesis	108
3.8.2. Técnicas heurísticas para determinar la calidad del ajuste.....	114
3.8.3. Qué hacer si no hay datos disponibles	115
3.9. Generación de datos aleatorios a partir de un modelo estadístico.....	116
3.9.1. Requerimientos y utilización en simulación	117
3.9.2. Métodos históricos.....	118
3.9.3. Métodos actuales	119
3.9.4. Tests sobre la calidad en la generación de números aleatorios.....	122
3.9.5. Métodos de generación de variables aleatorias: enumeración y principios básicos.....	124
3.10. Funciones de distribución más utilizadas	126
3.10.1. Funciones de distribución continuas.....	127
3.10.2. Funciones de distribución discretas	135
3.11. Ejercicios	140
4. Simulación de sistemas orientados a eventos discretos.....	145
4.1. Elementos de un modelo de simulación.....	147
4.1.1. Entidades, entidades temporales y recursos.....	147
4.1.2. Atributos	148
4.1.3. Actividades	148
4.1.4. Eventos	149
4.1.5. Colas.....	150
4.2. Simulación manual y medidas de comportamiento	152
4.2.1. Retardo promedio en la cola	156
4.2.2. Tamaño promedio de la cola.....	156
4.2.3. Grado de utilización de los recursos	158
4.2.4. Otras estadísticas de interés	158
4.3. Elementos de un simulador.....	159
4.4. Estrategias de simulación	162
4.4.1. Programación de eventos (<i>Event Scheduling</i>).....	162
4.4.2. Interacción de procesos (<i>Process Interaction</i>).....	166
4.4.3. Exploración de actividades (<i>Activity Scanning</i>).....	169
4.5. <i>Software</i> de simulación.....	177
4.5.1. Criterios para la evaluación de las herramientas de simulación.....	177
4.5.2. Entornos de simulación de eventos discretos.....	181

4.6. Ejercicios	182
5. Desarrollo de experimentos de simulación	187
5.1. Verificación, validación y acreditación en simulación	193
5.1.1. Principios para la validación, verificación y acreditación en simulación	197
5.1.2. Técnicas de VV&T	199
5.1.3. Validación.....	201
5.2. Diseño de experimentos.....	209
5.2.1. Introducción.....	209
5.2.2. Diseños clásicos: simples, factoriales completos y factoriales fraccionales	221
5.2.3. Criba de factores.....	225
5.3. Análisis de resultados	226
5.3.1. Simulaciones terminales	226
5.3.2. Simulación en el estado estacionario	229
5.3.3. Longitud de las ejecuciones de la simulación	229
5.3.4. Determinación de los intervalos de confianza	233
5.3.5. Técnicas para la reducción de la variancia	239
5.3.6. Análisis de sensibilidad	241
5.3.7. Optimización en simulación	242
5.3.8. Análisis de resultados multivariantes	244
5.4. Ejercicios	247
6. Aplicaciones.....	251
6.1. Fabricación y sistemas de manipulación de materiales.....	252
6.1.1. Medidas de comportamiento.....	252
6.1.2. Componentes de un proceso productivo	252
6.1.3. Fuentes de azar	253
6.1.4. Sistemas de manipulación de materiales.....	255
6.2. Transporte.....	256
6.2.1. Puertos	257
6.2.2. Ferrocarriles.....	260
6.2.3. Gestión de aeropuertos	261
6.3. Redes de distribución (<i>supply chain</i>).....	264
6.3.1. Componentes de una red de distribución	265
6.3.2. Tipos de modelos.....	265
6.3.3. Modelos de simulación	266
6.4. Otras aplicaciones.....	266
6.4.1. Sanidad	267
6.4.2. Planes de emergencia.....	267
6.4.3. Telecomunicaciones	268
6.4.4. Procesos administrativos	268
6.4.5. Actividades logísticas diversas	268
6.5. Ejemplos	269
6.5.1. <i>Drive-Through simulation</i>	269

6.5.2. Sistema de servicios a clientes.....	271
6.5.3. Célula flexible de fabricación.....	286
6.6. Ejercicios.....	299
A Introducción a la teoría de colas.....	313
A.1 Notación de Kendall.....	313
A.2 Medidas de comportamiento.....	314
B Modelado de sistemas con Arena.....	317
B.1 Modelo de un recurso limitado.....	317
B.2 Proceso robotizado simple.....	320
B.3 Línea de producción.....	323
B.4 Dos máquinas y dos cintas.....	324
B.5 Control de vehículos.....	327
B.6 Sistema de vehículos autoguiados (AGV).....	330
B.7 Metodología de programación.....	333
C Tablas.....	341
C.1 Función de distribución normal estándar.....	341
C.2 Puntos críticos de la distribución de Chi-cuadrado.....	342
C.3 Puntos críticos de la distribución t de Student.....	343
Índice de Contenidos.....	345
Acrónimos.....	349
Bibliografía.....	351

Índice de Contenidos

A

Abrazo Mortal	<i>Véase Bloqueo</i>
Acreditación	193
Actividad	7, 148, 151
<i>Activity Scanning</i>	<i>Véase Exploración de Actividades</i>
Aeropuertos	261
Agrupación	34
AGV	256
Alcanzabilidad	44
Análisis	19
Análisis de Resultados	226
Análisis Multivariantes	244
Árbol de Alcance	44
construcción	45
ejemplo	45, 46, 48
Árbol de Cobertura	51
ejemplo	51, 55, 64
Arena	14
Atributo	148

B

Basic	25
Bloqueo	54
ejemplo	54

C

C 25	
C++	12
Célula de Fabricación Flexible	286
Cintas Transportadoras	256
Cola	150, 151
evolución	157
retardo promedio	156

tamaño promedio	156
Comparación de Alternativas	236
Concurrencia	33
Conflictos	33
Construcción	16
árbol de alcance	45
modelo	19
Criba de Factores	225
CSL	25

D

Datos

recogida de	19
tratamiento	19
validez	203
<i>Deadlock</i>	<i>Véase Bloqueo</i>
Diagrama de Flujo	9
Diagrama de Simulación Manual	10
Diseño de Experimentos	209
Diseño Factorial	221
completo	222
fraccional	224
simple	221
Documentación	20, 206

E

Ejecución Secuencial	33
Elementos de un Simulador	159
Emergencias	16
Entidad	2, 7, 147, 151
permanente	7
temporal	7
Entorno de Simulación	13
Entornos	
aeroportuarios	261

ferroviarios	260		
peligrosos.....	267		
portuarios.....	257		
productivos	286		
sanitarios.....	267		
servicios	269, 271		
Entornos de Simulación.....	181		
Especificación.....	18		
Estado Estacionario	229		
Estrategias de un Simulador	162		
<i>Event Scheduling</i>	<i>Véase Programación de</i>		
Eventos			
Evento.....	3, 7, 149, 151		
clasificación.....	149		
Evolución de una Cola.....	157		
Experimentos			
diseño.....	209		
Exploración de Actividades.....	169		
ejemplo	172		
F			
Fabricación	16, 252, 286		
Factor			
criba	225		
Ferrocarriles.....	260		
FIFO	34		
Flujos			
modelo de,	27–28		
Formalismo.....	25		
modelo de flujos	28		
red de petri.....	57, 58		
red de petri coloreada	74		
redes de colas.....	30		
Fortran	25		
G			
GPSS	12, 25		
H			
Herramienta			
analítica.....	15		
Herramientas.....	25, 177		
metodológicas.....	25		
I			
Implementación	12, 20		
lenguaje de propósito general	12		
Interacción de Procesos.....	166		
ejemplo.....	167		
Intervalos de Confianza	233		
media.....	234		
K			
Kendall.....	29		
L			
LeanSIM	14		
Logística	16, 268		
Longitud de Ejecución	229		
M			
Manipulación	252		
Medidas de Comportamiento	152		
Metamodelos.....	242		
Método del Calendario.....	254		
Método del Tiempo de Trabajo.....	254		
Método Regenerativo.....	232		
Metodología	25		
Modelo	4		
conceptual	18, 24		
construcción de,	19		
continuo	6		
determinista.....	5		
discreto.....	6		
estático	8		
estocástico	5		
eventos discretos	7		
flujos	27–28		
formalismo	25		
formalización	25		
metodología	25		
otras aproximaciones	74		
redes de colas	30		
Modularidad.....	26		
N			
Negocios	16		
Nodo Transición	32		

activación.....	32	definición	60
Notación de Colas.....	29	ejemplo.....	58, 64
Notación de Kendall	29	guardas	62
Números Aleatorios.....	239	inicialización, expresiones de	61
O		nodo lugar	62
<i>Optimización</i>	242	ventajas y desventajas	73
P		Redes de Colas.....	30
Pascal.....	12	Redes de Distribución.....	264
Planes de Emergencia.....	267	Reducción de la Variancia	239
Proceso Productivo.....	252	Rendimiento	
Procesos Administrativos	268	medidas	219
<i>Process Interaction</i> Véase Interacción de		Repeticiones.....	229
Procesos		Replicaciones..... Véase Repeticiones	
Programación <i>Bottom-Up</i>	39, 57	S	
ejemplo	39	Sanidad	16, 267
Programación de Eventos	162	Sensibilidad.....	241
ejemplo	163	Servicios	16, 269, 271
Programación <i>Top-Down</i>	57	Siman	12
Proyecto.....	17	Simscrip.....	12, 25
ciclo de vida.....	20	Simulación	1
Prueba de Media Nula	235	alternativas	7
Puertos.....	257	campos de aplicación	15–16
R		elementos	159
Reachability..... Véase Alcanzabilidad		entorno de,	178
Recurso.....	147	entornos.....	181
Recursos	7	estado estacionario	229
Red de Petri	58	estática	8
acotada.....	47	estrategias.....	162
activación de transiciones	32	exploración de actividades	169
análisis	44	Interacción de Procesos.....	166
árbol de alcance	44	manual.....	12
árbol de cobertura	51	medidas de comportamiento	152
bloqueo	54	programación de eventos	162
comportamiento	32	proyectos de	20
definición.....	31	software.....	177
ejemplo ... 34, 36, 37, 39, 45, 46, 48, 51, 52,		terminal	226
54, 55		ventajas y desventajas	15
no acotada.....	52	Simulador.....	177
transición	32	elementos	159
Red de Petri Coloreada.....	73	estrategias.....	162
arco, expresiones de.....	61	exploración de actividades	169
		Interacción de Procesos.....	166
		programación de eventos	162

Sincronismo	57	Telecomunicaciones.....	268
Sincronización	33	Transporte	16
Sistema	2	V	
contiuo	2	Validación.....	19, 193, 201
discreto	2	proceso.....	202
estado.....	2, 31	Variables Antitéticas	240
eventos discretos.....	3, 23	Variables de Control	240
mixto.....	3	Vehículos de Transporte	256
Software		Verificación	19, 193
criterios evaluación.....	178	VV&T	
eficiencia.....	180	costes.....	208
facilidad	180	técnicas.....	199
fiabilidad.....	181	W	
funcionalidad	178	Witness	14
<i>Supply Chain</i>	<i>Véase</i> Redes de Distribución		
T			
Tabla de Simulación Manual	11		

Acrónimos

AdR:	Análisis de resultados
AdS:	Análisis de Sensibilidad
AR:	Análisis de Regresión
ANOVA:	Análisis de la variancia
BS:	Bifurcación Secuencial
CRN:	<i>Common random numbers</i> (números aleatorios comunes)
DdE:	Diseño de Experimentos
DoD:	Departamento de Defensa de USA
GNA:	Generador de Números Aleatorios
GVA:	Generador de Variables Aleatorias
IC:	Intervalo de Confianza
IEEE:	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineering</i>
MSR:	Métodos de Superficie de Respuesta
M&S:	Modelado y Simulación
RdP:	Red de Petri
RdPC:	Red de Petri Coloreada
RV:	Realidad Virtual
SCS:	<i>Society for Computer Simulation</i>
TRV's:	Técnicas de Reducción de la Variancia
V&V:	Verificación y Validación
VV&A:	Verificación, Validación y Acreditación
V&VI:	Verificación y Validación Independiente
VV&T:	Verificación, Validación y Testeo o pruebas
WSC:	Winter Simulation Conference, organizada anualmente por la SCS

Bibliografía

- [ALEX00] ALEXOPOULOS, C. y SEILA, A.F. "Output analysis for simulations". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 2000.
- [ANDR98] ANDRADOTTIR, S. "A review of simulation optimization techniques". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 1998.
- [ARTH00] ARTHUR, J.D. y NANCE, R.E. "Verification and validation without independence: a recipe for failure". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 2000.
- [BABI86] BABICH, W.A. *Software Configuration Management*. Addison-Wesley, Massachusetts, 1986.
- [BALC84] BALCI, O., SARGENT, R. "A bibliography on the credibility assessment and validation of simulation and mathematical models". *Simuletter*, 15,3. 1984.
- [BALC81] BALCI, O., SARGENT, R. "A methodology for risk analysis in the statistical validation of simulation models". *Communications of ACM*, 24. 1981.
- [BALC00a] BALCI, O., ORSMBY, W.F. "Well-defined intended uses: an explicit requirement for accreditation of modeling and simulation applications". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 2000
- [BALC00b] BALCI, O., ORSMBY, W.F., CARR III, J.T., SAADI, S.D. "Planning for verification, validation and accreditation of modeling and simulation applications". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 2000.
- [BANK99] BANKS, J. "What does industry need from simulation vendors un Y2K and after? A panel discussion". *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 1999.
- [BANK96] BANKS, J., CARSON, J.S. y NELSON, B.L. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice-Hall, 1996.
- [BARC00] BARCELO, J. "Putting the rush back in rush hour". *OR/MS Today*. April 2000.
- [BARN00] BARNARD, C.J., HAAFTEN, D.H.V. "Simulation model for shipment of waste to the waste isolation pilot plant". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [BAUS93] BAUSE, F. "QN + PN = QPN Combining Queueing Networks and Petri Nets". *Forschungsbericht* n. 461, des Fachbereichs Informatik der Universität Dortmund (Germany), 1993.

- [BETT97] BETTONVIL, B. y KLEIJNEN, J.P.C. "Searching for important factors in simulation models with many factors: sequential bifurcation". *EJOR*, vol. 96, 1997.
- [BILE96] BILES, W.E. "Discrete-Event Simulation". *System Modeling and Computer Simulation*, Kheir N.A., Dekker, 1996.
- [BOWM01] BOWMAN, R.A. y SCHMEE, J. "Pricing and managing a maintenance contract for a fleet of aircraft engines". *Simulation*, vol. 76, num. 2, 2001.
- [BRAD00] BRADY, D. "Enhancing modeling and simulation accreditation by structuring verification and validation results". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 2000.
- [BRAT87] BRATLEY, P., FOX, B., SCHRAGE, L. *A guide to simulation*. Springer-Verlag, 1987.
- [BRUZ99] BRUZZONE, A., GIRIBONE, P., REVETRIA, R. "Operative requirements and advances for the new generation simulators in multimodal container terminals". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 1999.
- [CARR92] CARRIE, A. *Simulation of Manufacturing Systems*. Wiley, 1992.
- [CARS86] CARSON, J.S. "Convincing Users of Model's Validity is a Challenging Aspect of Modeler's Job". *Industrial Engineering*, junio 1986.
- [CASA99] CASANOVAS, J., PÉREZ, W., FONSECA, P., MONTERO, J. "Simulation of reception, expedition and picking areas of a pharmaceutical products plan". *Proceedings ETFA '99*. IEEE, 1999.
- [CASS99] CASSANDRAS, C.G. y LAFORTUNE, S. *Introduction to Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [CENT98] CENTENO, M., REYES, M.F. "So you have your model: what to do next. A tutorial on simulation output analysis". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 1998.
- [CENT00] CENTENO, M., ALBACETE, C., TERZANO, D.O., CARRILLO, M. y OGAZON, T. "A simulation study of the radiology department at JM". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, SCS, 2000.
- [CHAR93] CHARNES, J.M., KELTON, W.D. "Multivariate autoregressive techniques for constructing confidence regions of the mean vector". *Mgt. Science*, 39, 1993.
- [CHAR95] CHARNES, J.M. "Analyzing multivariate output". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 1995.
- [CHWI00] CHWIF, L., RIBEIRO, M. y PAUL, R.J. "On Simulation Model Complexity". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [COLE93] COLEMAN, D.E., MONTGOMERY, D.C. "A systematic approach to planning for a designed industrial experiment". *Technometrics*, vol. 35-1, 1993.
- [CRAN74] CRANE, M.A., IGLEHART, D.L. "Simulating stable stochastic systems, I y II". *Journal of ACM*, vol. 21, 1974.

- [CRAN75] CRANE, M.A., IGLEHART, D.L. "Simulating stable stochastic systems, III: regenerative methods and discrete-event simulations". *Operations Research*, vol. 23, 1975.
- [DALA01] DALAL, M.A. "Simulation modeling at Union Pacific Railroad". *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [DIJK71] DIJKSTRA, E.W. "Hierarchical Ordering of Sequential Processes". *Acta Informatica* 1, pp. 115-138, 1971.
- [DONO95] DONOHUE, J.M. "The use of variance reduction techniques in the estimation of simulation metamodels". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. SCS, 1995.
- [DOUG97] DOUG, B. "A different shade of blue: how IBM transformed itself using the power of networked information". *Industry Week*, julio 1997.
- [DUBI00] KELTON, W.S., SADOWSKI, R.P. y SADOWSKI D.A. *Monte Carlo Applications in Systems Engineering*, John Wiley & Sons, 2000.
- [FORG83] FORGIONNE, G.A. "Corporate Management Science Activities". *Interfaces*, vol. 13, num. 3, pp. 20-23, 1983.
- [FRIE88] FRIEDMAN, L.W., PRESSMAN, I. "The metamodel in simulation analysis: can it be trusted?". *Journal of the Oper. Res. Soc.* 39, 1988.
- [FRIE96] FRIEDMAN, L.W. "The simulation metamodel". *Kluwer Academic Publishers*, 1996.
- [HARP89] HARPELL, J.L., LANE, M.S. y MANSOUR, A.H. "Operations Research in Practice: a Longitudinal Study". *Interfaces*, vol. 19, num. 3, pp. 65-74, 1989.
- [HARR91] HARRINGTON, H.J. *Business Process Improvement*. McGraw-Hill, 1991.
- [HELL98] HELLEKALEK, P. "Good random number generators are (not so) easy to find". *Mathematics and Computers in Simulation*, 46, 1998.
- [HILL91] HILLIER, F.S. y LIEBERMAN, G.J. *Introducción a la investigación de operaciones*, McGraw-Hill, 1991.
- [HUTC01] HUTCHISON, D.W., HILL, S.D. "Simulation optimization of airline delay with constraints". *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [INGL99] INGALLS, R.G. "CSCAT: The COMPAQ supply chain analysis tool". *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 1999.
- [IOAN99] IOANNOU, P.G. y MARTINEZ, J.C. "Who servers whom? Dynamic resource matching in an activity-scanning simulation system". *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 1999.
- [JAIN01] JAIN, R. "The art of computer systems performance analysis" *Wiley*, 1991
- [JAIN01] JAIN, S., ERVIN, E.C., LATHROP, A.P., WORKMAN, R.W. y COLLINS, L.M. "Analyzing the supply chain for a large logistics operation using simulation". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.

- [JENG97] JENG, M.D. "A Petri Net Synthesis Theory for Modeling Flexible Manufacturing Systems". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 27, n. 2, abril 1997.
- [JENS97] JENSEN, K. *Coloured Petri Nets*. vol. 1, Springer-Verlag, 1997.
- [JONG97] JONG, S.J., LEVARY, R.R. y FERRIS, M.E. "Planning preventive maintenance for a fleet of police vehicles". *Simulation*, vol. 68, num. 2, 1997.
- [JOUS01] JOUSTRA, P.E. "Simulation of check-in at airports". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 2001.
- [KELT95] KELTON, W.D. "A tutorial on design and analysis of simulation experiments". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. SCS, 1995.
- [KELT98] KELTON, W.S., SADOWSKI, R.P. y SADOWSKI, D.A. *Simulation With Arena*. McGraw-Hill, 1998.
- [KEND53] KENDALL, G. G. "Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and Their Analysis by the Method of Imbedded Markov Chains". *Annals of Mathematical Statistics* 24, pp. 338-354, 1953.
- [KLEI92] KLEIJNEN J.P.C. y ANNINK, B. "Pseudorandom number generators for supercomputers and classical computers: A practical introduction". *European Journal of Operations Research* 63. 1992.
- [KLEI92] KLEIJNEN, J.P.C. *Simulation: a statistical perspective*. John Wiley, 1992.
- [KLEI95a] KLEIJNEN, J.P.C. "Case study: statistical validation of simulation models". *EJOR*, 87-1, 1995.
- [KLEI95b] KLEIJNEN, J.P.C. "Sensitivity analysis and optimization in simulation: design of experiments and case studies" *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. SCS. 1995.
- [KLEIN98] KLEINDORFER, G.B., O'NEILL, L., GANESHAN, R. "Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science". *Management Science*, vol.44. n.8, 1998.
- [KNUT97] KNUTH, D.E. *The art of computing programming. Vol.2: Seminumerical algorithms*. Addison-Wesley. (3ª. Ed.) 1997.
- [KREU86] KREUTZER, W. *System Simulation: Programming Styles and Languages*, Addison-Wesley, 1986.
- [KUEI94] KUEI, C., MADU, C.N. "Polynomial metamodeling and Taguchi design in simulation with application to the maintenance float system", *EJOR*, 72, 1994.
- [KWON94] KWON, C., TEW, J.D. "Strategies for combining Antithetic Variates and Control Variates in Designed Simulation Experiments". *Management Science*, vol. 40, n.8, 1994.
- [LANE93] LANE, M.S. MANSOUR, A.H. y HARPELL, J.L., "Operations Research Techniques". *Interfaces*, vol. 23, num. 2, pp. 63-68, 1993.

- [LAW99] LAW, A.M., KELTON, W.D. *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 2000.
- [LECU94] L'ECUYER, P. "Uniform random number generation". *Annals of Operations Research*, 53. 1994.
- [LEBE98] LEBEDEV, A. y STAPLEST, P. "Simulation of materials handling systems in the mines: two case studies". *Simulation*, vol. 70, num. 3, 1998.
- [LEHM51] LEHMER, D.H. "Mathematical methods in large-scale mathematical units". Symp. on Large-Scale Digital Cal. Mach. Harvard Univ. Press. 1951.
- [LEWI89] LEWIS, P.A.W. y ORAV, E.J. *Simulation methodology for statisticians, operations analysts and engineers*. Pacific Grove Wadsworth and Brooks /Cole, 1989
- [LITT61] LITTLE, J.D.C. "A Proof of the Queueing Formula $L = \lambda W$ ". *Operations Research*, 9, pp. 383-387, 1961.
- [LIU01] LIU, J.S. *Monte Carlo Strategies in Scientific Computing*, Springer-Verlag, 2001.
- [MADU92] MADU, C., KUEI, C-H. "Group screening and Taguchi design in the optimization of multi-echelon maintenance float simulation metamodels". *Computers and operations research*, vol. 19-2.1992.
- [MARK81] MARKOWITZ, H.M. "Barriers to the practical use of simulation analysis". *Proceedings of the 1981 Winter Simulation Conference*, 1981.
- [MARS68] MARSAGLIA, G. "Random numbers fall mainly in the planes". *Proc. Natl. Acad. Sci. US*, 1968
- [MARS91] MARSAGLIA G., ZAMAN A. "A new class of random number generators". *The Annals of Applied Probability*. Vol.1, n.3. 1991
- [MATS94] MATSUNOMU, M. y KURITA, Y. "Twisted GFSR generators II". *ACM Trans. Modeling and Computer Simulation*, 4, 1994.
- [MCGR00] MCGRAW, R.M., y McDONALD; R.M. "Abstract Modeling for Engineering and Engagement Level Simulations". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [MONT91] MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley & Sons. 1991.
- [MIDD01] MIDDELKOP, D. y BOUWMAN, M. "Simone: large scale network simulation". *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [NANC99] NANCE, R.E. "Redundancy in Model Specification for Discrete Event Simulation". *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, vol. 9, n. 3, 1999.
- [NELS93] NELSON, B.L., HSU, J.C. "Control-variate models of Common Random Numbers for Multiple Comparisons with the Best". *Management Science*, vol. 39, n. 8, 1993.
- [NIED92] NIEDERREITER, H. "Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods". *SIAM*, 1992.

- [NIKO98] NOKOUKARAN, J. HLUPIC, V. y PAUL, R.J. "Criteria for simulation software evaluation". *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998.
- [ORMS99] OR/MS Today. "Simulation Survey", febrero 1999.
- [ORTN99] ORTNER, W. y STARY, C. "Virtualization of Organizations: Consequences for Workflow Modeling". *Proceedings of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 1999.
- [OVER82] OVERSTREET, C.M. *Model Specification and Analysis for Discrete Event Simulation*. Ph. D. Dissertation. Department of Computer Science, Virginia Tech, Blacksburg, VA. 1982.
- [ÖZD96] ÖZDEMIREL, N.E., GAZANTER, Y., GÜLSER, K. "Computer-aided planning and design of manufacturing simulation experiments". *Simulation*, SCS, sep. 1996.
- [PARK88] PARK S.K., MILLER K.W. "Random Number Generators: good ones are hard to find". *Communications of ACM*, vol.31. núm.10, 1988.
- [PARS01] PARSONS, D.J. y SIPRELLE, A.J. "A supply chain case study of a food manufacturing merger". *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001.
- [PAUL93] PAUL, R.J. "Activity Cycle Diagrams and the Three Phase Approach". *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, 1993.
- [PEDG95] PEDGEN C.D., SHANNON, R.E. y SADOWSKI, R.P. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. McGraw-Hill, 1995.
- [PETRI66] PETRI, C.A. *Kommunikation mit Automaten*, Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 2, 1962, Second Edition., New York: Griffiss Air Force Base, Technical Report RADC-TR-65-377, vol. 1, 1966
- [PIDD98] PIDD, M. Y CASTRO, R.B. "Hierarchical Modular Modelling in Discrete Simulation". *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998.
- [PIER02] PIERA, M.A., GUASCH, A. y CASANOVAS, J. *Simulación de sistemas orientados a eventos discretos*. Monografías de CEA-IFAC, 2002.
- [POOC00] POOCH, U.W. y WALL, J. *Discrete Event Simulation: A practical approach*. CRC Press, 2000.
- [PRAT97] PRAT, A., TORT-MARTORELL, X., GRIMA, P. y POZUETA, L. *Métodos estadísticos.. Control y mejora de la calidad*. Edicions UPC, 1997.
- [QMIP93] QMIPS GROUP in UTO+ZAR. "The Timed (Coloured) Petri Net Formalism: Position Paper". Formalisms: Principles and State-of-the-Art, *Proceedings of the Erlangen Workshop*, 1993.
- [RAAT93] RAATIKAINEN, K.E. "A sequential procedure for simultaneous estimation of several means". *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 3, 1993.

- [RAMI01] RAMIS, F.J., PALMA, J.L. y BAESLER, F.F. "The use of simulation for process improvement at an ambulatory surgery center". *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, SCS, 2001.
- [ROHR98] ROHRER, M.W. "Simulation of Manufacturing and Material Handling Systems". *Handbook of Simulation*. Ed. Banks, J. Wiley Interscience, 1998.
- [RIOS97] RIOS, D., RIOS, S. y MARTIN, J. *Simulación. Métodos y aplicaciones*. Ra-Ma, 1997.
- [RIPL97] RIPLEY, B.D. *Stochastic Simulation*. J. Wiley, 1997.
- [ROBI95] ROBINSON, S. "A heuristic technique for selecting the run-length of non-terminating steady-state simulations". *Simulation* 65:3, 1995.
- [ROSS99] ROSETTI, M.D., TRZCINSKI, G.F. y SYVERUD, S.A. "Emergency department simulation and determination of optimal attending physician staffing schedules". *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, SCS, 1999.
- [RUBI81] RUBINSTEIN, R.Y. *Simulation and the Monte Carlo Method*. Wiley, 1981
- [RUNC99] RUNCIMAN, N., VAGENAS, N. y BAIDEN, T. "Evaluation of underground development mining systems using discrete-event simulation". *Simulation*, vol. 72, num. 1, 1999.
- [SANC99] SANCHEZ, S.M. "ABC's of Output Analysis". *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, SCS, 1999.
- [SARG99] SARGENT, R.G. "Validation and Verification of Simulation Models" *Proc. of 1999 Winter Simulation Conference*, SCS, 1999.
- [SHAP01] SHAPIRO, J.F. *Modeling the Supply Chain*, Duxbury Press, 2001.
- [SCHR96] SCHRIBER, T.J. "Comparison 8: Canal-and-lock-system", *EUROSIM – Simulation News Europe*, 16, pp. 29-43. ASIM, Viena (Austria), 1996.
- [SCHR96] SCHRIBER, T.J. "Comparison 8: Canal-and-lock-system", *EUROSIM – Simulation News Europe*, 16, pp. 29-43. ASIM, Vienna (Austria), 1996.
- [SCHR00] SCHRIBER, T.J. y BRUNNER, D.T. "Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [SCHR83] SCHRUBEN, L. "Simulation Modeling with Event Graphs". *Communications of the ACM*, 26 (11), pp. 957-963, Noviembre 1983.
- [SILV89] SILVA, M., VALETTE R. *Advances in Petri Nets*, Springer-Verlag, pp. 374-417, 1989.
- [SIST98] SISTI, A. y FARR, S. "Model Abstraction Techniques: An Intuitive Overview". *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998.
- [SMIR48] SMIRNOV, N. "Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions". *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 19, 1948.

- [STUR26] STURGES, H. "The choice of a class-interval". *Journal of American Statistics*, vol. 21, pp. 65-66, 1926.
- [TARA00] TARANTO S.A., HARPER, A.M., EDWARDS, E.B. "Developing a National allocation model for cadaveric kidneys". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [THOM79] THOMAS, G. y DaCOSTA, J. "A Sample Survey of Corporate Operations Research". *Interfaces*, vol. 9, num. 4, pp. 102-111, 1979.ç
- [THOM95] THOMPSON P.A., MARCHANT, E.W. "Computer Model for the Evaluation of Large Building Populations". *Fire safety Journal* v 24 n 2, 1995.
- [TRON00] TRONE, J., GUERIN, A. y CLAY, A.D. "Simulation of waste processing, transportation and disposal operations". *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, 2000.
- [ULAM91] ULM, A.M. *Adventures of a Mathematician*, University of California Press, 1991.
- [VENK94] VENKATESH, S.J., SMITH, B.L., DEUERMEYER, B.L. y CURRY, G.L. "Deadlock Properties in Discrete Simulation Systems". *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, CA, 1994.
- [VERN87] VERNON, M., ZAHOEJAN, J. y LAZOWSKA, E.D. "A comparison of performance Petri Nets and Queuing Network Models". *Proceedings on the International Workshop on Modelling Techniques and Performance Evaluation*, París (Francia), 1987.
- [VINC98] VINCENT, S. "Input Data Analysis". *Handbook of Simulation*. Ed. Banks, J., John Wiley & Sons, 1998.
- [VISW92] VISWANADHAM, N., NARAHARI, Y. *Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems*. Prentice-Hall, New Jersey, 1992.
- [WILL01] WILLIAMS, E.J. y ZOTTOLO, M. "Upgrading Drive-Through Services of a Credit Union Via Simulation". *The International Workshop on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation*, Marsella 2001.
- [ZEIG00] ZEIGLER, B.P., PRAEHOFER, H. y KIM, T.G. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press, 2000.
- [ZHOU93] ZHOU, M., McDERMOTT, K. y PATEL, P.A. "Petri Net Synthesis and Analysis of a Flexible Manufacturing System Cell". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, n. 2, Marzo 1993.