POLITEXT 118

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

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-8987-2002
ISBN: 84-8301-577-3

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 entés tot.
A Alba i Judit, les seves riatlles 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,
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 les hores passades al meu costat,
i a vosaltres pares, per l'esforç i sacrifici esmerçat en el vostre fill.
J. Figueras

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

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 pelat*s. 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

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

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 Frankestein, 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

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 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. Echeverria, J.A. Bautista, J. Dueñas y J. Gómez (Sidmed -Aceralia/Unisor-); S. Ametller (Sener); J. Moreno (Autoritat Portuaria de Barcelona); J. Benet, A. Benito, J. Pages y J. Conrado (Grupo Damm); X. Gesé (Puertos del Estado); A. Casanovas (Almirall-Prodesfarma); X. Ferran (Indra) y J. Rivera (Consorcio Hospitalario Parc Tauli).

Han sido muy valiosas las aportaciones y el apoyo de Marc Bacardit, Josep Vila, Oscar Hernández, Víctor Huerta, Susana Francisco, Jordi Montero, Pau Fonseca, Lluïsa Romeu y Rosa Anglès. También deseamos agradecer el apoyo de J.A. Muñoz de Drilco S.A. para que nuestros siempre exigentes estudiantes puedan disponer de licencias educaciones 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, enero de 2002

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Índice

PRÓLOGO ..... **III**

AGRADECIMIENTOS ..... **V**

ÍNDICE ..... **VII**

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 6
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 CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN 20
1.9 EJERCICIOS 21

2 MODELADO DE SISTEMAS ORIENTADOS A EVENTOS DISCRETOS **25**

2.1 FORMALIZACIÓN DE MODELOS CONCEPTUALES 27
2.2 MODELOS DE FLUJOS 29
2.3 REDES DE COLAS 30
2.4 REDES DE PETRI 32
2.4.1 Definiciones 33
2.4.2 Programación Bottom-Up 39
2.4.3 Análisis de las redes de Petri 44
2.4.4 Algunas consideraciones sobre la formalización de modelos conceptuales en RdP 56
2.5 LAS REDES DE PETRI COLOREADAS 57
2.5.1 Definiciones 59
2.5.2 Ventajas del formalismo de RdPC 72

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

2.6 OTRAS APROXIMACIONES FORMALES PARA EL MODELADO DE SISTEMAS DE EVENTOS DISCRETOS 72
2.7 EJERCICIOS 74

3 MODELOS ESTADÍSTICOS EN SIMULACIÓN 87

3.1 DEFINICIONES 89
3.2 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA CON CARACTERÍSTICAS ESTOCÁSTICAS 91
3.3 ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS 91
3.3.1 Técnicas para evaluar la independencia de los valores de una muestra 94
3.3.2 Técnicas para evaluar la estabilidad de la distribución 96
3.4 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD (HISTOGRAMA Y DIAGRAMA DE BARRAS) 98
3.5 FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD 100
3.6 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULATIVA 102
3.7 DISTRIBUCIONES EMPÍRICAS PARA VARIABLES ALEATORIAS CONTINUAS 104
3.8 ANÁLISIS DEL AJUSTE DE UNA DISTRIBUCIÓN 105
3.8.1 Test de hipótesis 106
3.8.2 Técnicas heurísticas para determinar la calidad del ajuste 112
3.8.3 Qué hacer si no hay datos disponibles 113
3.9 GENERACIÓN DE DATOS ALEATORIOS A PARTIR DE UN MODELO ESTADÍSTICO 114
3.9.1 Requerimientos y utilización en simulación 115
3.9.2 Métodos históricos 117
3.9.3 Métodos actuales 117
3.9.4 Tests sobre la calidad en la generación de números aleatorios 121
3.9.5 Métodos de generación de variables aleatorias: enumeración y principios básicos 123
3.10 FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN MÁS UTILIZADAS 125
3.10.1 Funciones de distribución continuas 125
3.10.2 Funciones de distribución discretas 134
3.11 EJERCICIOS 139

4 SIMULACIÓN DE SISTEMAS ORIENTADOS A EVENTOS DISCRETOS 143

4.1 ELEMENTOS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN 145
4.1.1 Entidades, entidades temporales y recursos 145
4.1.2 Atributos 146
4.1.3 Actividades 146
4.1.4 Eventos 147
4.1.5 Colas 148
4.2 SIMULACIÓN MANUAL Y MEDIDAS DE COMPORTAMIENTO 150
4.2.1 Retardo promedio en la cola 154
4.2.2 Tamaño promedio de la cola 154
4.2.3 Grado de utilización de los recursos 156
4.2.4 Otras estadísticas de interés 157
4.3 ELEMENTOS DE UN SIMULADOR 158
4.4 ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN 160
4.4.1 Programación de eventos (Event Scheduling) 160

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

4.4.2 Interacción de procesos (Process Interaction) *165*
4.4.3 Exploración de actividades (Activity Scanning) *168*
4.5 SOFTWARE DE SIMULACIÓN 176
4.5.1 Criterios para la evaluación de las herramientas informáticas *177*
4.5.2 Entornos de simulación de eventos discretos *179*
4.6 EJERCICIOS 180

5 DESARROLLO DE EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN 185

5.1 VERIFICACIÓN, VALIDACIÓN Y ACREDITACIÓN EN SIMULACIÓN 191
5.1.1 Principios para la validación, verificación y acreditación en simulación *194*
5.1.2 Técnicas de VV&T *197*
5.1.3 Validación *199*
5.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS 208
5.2.1 Introducción *208*
5.2.2 Diseños clásicos: simples, factoriales completos y factoriales fraccionales *220*
5.2.3 Criba de factores *224*
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS 225
5.3.1 Simulaciones terminales *226*
5.3.2 Simulación en el estado estacionario *228*
5.3.3 Longitud de las ejecuciones de la simulación *228*
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 253

6.1 FABRICACIÓN Y SISTEMAS DE MANIPULACIÓN DE MATERIALES 254
6.1.1 Medidas de comportamiento *254*
6.1.2 Componentes de un proceso productivo *255*
6.1.3 Fuentes de azar *255*
6.1.4 Sistemas de manipulación de materiales *257*
6.2 TRANSPORTE 258
6.2.1 Puertos *259*
6.2.2 Ferrocarriles *262*
6.2.3 Gestión de aeropuertos *263*
6.3 REDES DE DISTRIBUCIÓN (*SUPPLY CHAIN*) 267
6.3.1 Componentes de una red de distribución *267*
6.3.2 Tipos de modelos *268*
6.3.3 Modelos de simulación *268*
6.4 OTRAS APLICACIONES 269
6.4.1 Sanidad *269*
6.4.2 Planes de emergencia *270*

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

6.4.3 Telecomunicaciones *270*
6.4.4 Procesos administrativos *270*
6.4.5 Actividades logísticas diversas *271*
6.5 EJEMPLOS 271
6.5.1 Drive-Through simulation *271*
6.5.2 Sistema de servicios a clientes *274*
6.5.3 Modelado de la asignación de barcos a atraques *283*
6.5.4 Célula flexible de fabricación *288*
6.6 EJERCICIOS 301

A INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE COLAS 315

A.1 NOTACIÓN DE KENDALL 315
A.2 MEDIDAS DE COMPORTAMIENTO 316

B MODELADO DE SISTEMAS CON ARENA 319

B.1 MODELO DE UN RECURSO LIMITADO 319
B.2 PROCESO ROBOTIZADO SIMPLE 323
B.3 LÍNEA DE PRODUCCIÓN 325
B.4 DOS MÁQUINAS Y DOS CINTAS 327
B.5 CONTROL DE VEHÍCULOS 329
B.6 SISTEMA DE VEHÍCULOS AUTOGUIADOS (AGV) 333
B.7 METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN 336

C TABLAS 345

C.1 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN NORMAL ESTÁNDAR 345
C.2 PUNTOS CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE CHI-CUADRADO 346
C.3 PUNTOS CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT 347

ÍNDICE DE CONTENIDOS 349

ACRÓNIMOS 353

BIBLIOGRAFÍA 355

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Índice de Contenidos

A

Abrazo Mortal ..... *Véase* Bloqueo
Acreditación 191
Actividad 7, 146, 149
Activity Scanning ..... *Véase* Exploración de Actividades
Aeropuertos 263
Agrupación 35
AGV 258
Alcanzabilidad 45
Análisis 19
Análisis de Resultados 225
Análisis Multivariantes 244
Árbol de Alcance 44
  construcción 45
  ejemplo 45, 47, 49
Árbol de Cobertura 50
  ejemplo 51, 54, 63
Arena 14
Atributo 146

B

Basic 27
Bloqueo 52
  ejemplo 54

C

C 27
C++ 12
Célula de Fabricación Flexible 288
Cintas Transportadoras 258
Cola 148, 149
  evolución 155
  retardo promedio 154
  tamaño promedio 154
Comparación de Alternativas 236
Concurrencia 34
Conflictos 34
Construcción 16
  árbol de alcance 45
  modelo 19
Criba de Factores 224
CSL 27

D

Datos
  recogida de, ... 19
  tratamiento 19
  validez 201
Deadlock ..... *Véase* Bloqueo
Diagrama de Flujo 9
Diagrama de Simulación Manual 10
Diseño de Experimentos 208
Diseño Factorial 220
  completo 221
  fraccional 224
  simple 220
Documentación 20, 205

E

Ejecución Secuencial 34
Elementos de un Simulador 158
Emergencias 16
Entidad 2, 7, 145, 149
  permanente 7
  temporal 7

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Entorno de Simulación 13
Entornos
  aeroportuarios 263
  ferroviarios 262
  peligrosos 270
  portuarios 259, 283
  productivos 288
  sanitarios 269
  servicios 271, 274
Entornos de Simulación 179
Especificación 18
Estado Estacionario 228
Estrategias de un Simulador 160
Event Scheduling ..... *Véase* Programación de Eventos
Evento 3, 7, 147, 149
  clasificación 147
Evolución de una Cola 155
Experimentos
  diseño 208
Exploración de Actividades 168
  ejemplo 171

F

Fabricación 16, 254, 288
Factor
  criba 224
Ferrocarriles 262
FIFO 35
Flujos
  modelo de, ... 29–30
Formalismo 27
  modelo de flujos 30
  red de petri 56, 32–57
  red de petri coloreada 57–72
  redes de colas 32
Fortran 27

G

GPSS 12, 27

H

Herramienta
  analítica 15
Herramientas 20, 26
  metodológicas 26

I

Implementación 12, 20
  lenguaje de propósito general 12
Interacción de Procesos 165
  ejemplo 166
Intervalos de Confianza 233
  media 234

K

Kendall 31

L

LeanSIM 14
Logística 16, 271
Longitud de Ejecución 228

M

Manipulación 254
Medidas de Comportamiento 150
Metamodelos 242
Método del Calendario 256
Método del Tiempo de Trabajo 256
Método Regenerativo 232
Metodología 27
Modelo 4
  conceptual 18, 26
  construcción de, ... 19
  continuo 6
  determinista 5
  discreto 6
  estático 8
  estocástico 5
  eventos discretos 6
  flujos 29–30
  formalismo 27
  formalización 27
  metodología 27
  otras aproximaciones 72
  redes de colas 30–32
Modularidad 28

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

N

Negocios 16
Nodo Transición 33
  activación 34
Notación de Colas 31
Notación de Kendall 31
Números Aleatorios 240

O

Optimización 242

P

Pascal 12
Planes de Emergencia 270
Proceso Productivo 255
Procesos Administrativos 270
Process Interaction ..... *Véase* Interacción de Procesos
Programación *Bottom-Up* 39, 56
  ejemplo 39
Programación de Eventos 160
  ejemplo 162
Programación *Top-Down* 56
Proyecto 17
  ciclo de vida 16–20
Prueba de Media Nula 235
Puertos 259, 283

R

Reachability ..... *Véase* Alcanzabilidad
Recurso 145
Recursos 7
Red de Petri 32–57
  acotada 48
  activación de transiciones 34
  análisis 44
  árbol de alcance 44
  árbol de cobertura 50
  bloqueo 52
  comportamiento 34
  definición 33
  ejemplo 35, 37, 38, 39, 45, 47, 49, 51, 52, 54
  no acotada 52
  transición 33
Red de Petri Coloreada 57–72
  arco, expresiones de 60
  definición 59
  ejemplo 57, 61, 63, 66
  guardas 61
  inicialización, expresiones de 60
  nodo lugar 61
  ventajas y desventajas 72
Redes de Colas 30–32
Redes de Distribución 267
Reducción de la Variancia 239
Rendimiento
  medidas 217
Repeticiones 229
Replicaciones ..... *Véase* Repeticiones

S

Sanidad 16, 269
Sensibilidad 241
Servicios 16, 271, 274
Siman 12
Simscript 12, 27
Simulación 1
  alternativas 7
  campos de aplicación 15–16
  elementos 158
  entorno de, ... 21
  entornos 179
  estado estacionario 228
  estática 8
  estrategias 160
  exploración de actividades ..... *Véase* Interacción de Procesos 165
  manual 10–12
  medidas de comportamiento 150
  programación de eventos 160
  proyectos de 16–20
  software 176
  terminal 226
  ventajas y desventajas 14–15
Simulador 20
  elementos 158
  estrategias 160
  exploración de actividades ..... *Véase*

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Interacción de Procesos 165
programación de eventos 160
Sincronismo 56
Sincronización 34
Sistema 2
contiuo 2
discreto 2
estado 2, 33
eventos discretos 3, 25
mixto 3
Software
criterios evaluación 177
eficiencia 179
facilidad 178
fiabilidad 179
funcionalidad 177
Supply Chain ..... *Véase* Redes de Distribución

T

Tabla de Simulación Manual 11
Telecomunicaciones 270
Transporte 16

V

Validación 19, 191, 199
proceso 193, 200
Variables Antitéticas 240
Variables de Control 241
Vehículos de Transporte 258
Verificación 19, 191
proceso 193
VV&T
costes 206
técnicas 197

W

Witness 14

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Acrónimos

AdR: Análisis de resultados

AdS: Análisis de Sensibilidad

AR: Análisis de Regresión

ANOVA: Análisis de la variancia

BS: Bifurcación Secuencial

CRN: *Common random numbers* (números aleatorios comunes)

DdE: Diseño de Experimentos

DoD: Departamento de Defensa de USA

GNA: Generador de Números Aleatórios

GVA: Generador de Variables Aleatórias

IC: Intervalo de Confianza

IEEE: *Institute of Electrical and Electronic Engineering*

MSR: Métodos de Superficie de Respuesta

M&S: Modelado y Simulación

RdP: Red de Petri

RdPC: Red de Petri Coloreada

RV: Realidad Virtual

SCS: *Society for Computer Simulation*

TRV's: Técnicas de Reducción de la Variancia

V&V: Verificación y Validación

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

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

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

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 assesment 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.

[BARC96] BARCELO, J. *Simulación de sistemas siscretos*. ISDEFE, 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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[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 aircrat engines". Simulation, vol. 76, num. 2, 2001.

[BRAD00] BRADE, 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 JMH". *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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[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 powerof 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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[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". *Procedings 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. "Sensivity analysis an optimization in simulation: design of experiments and case studies" *Procedings 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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[LEHM51] LEHMER, D.H. “Mathematical methods in large-scale mathematical units”. Symp. on Large-Scale Digital Cal. Mach. Hardvard Univ. Press. 1951.

[LEWI89] LEWIS, P.A.W. y ORAV, E.J. *Simulation methodology forstaticians, operations analysts and engineers*. Pacific Grove Wandsworth and Brooks /Cole, 1989

[LITT61] LITTLE, J.D.C. “A Proof of the Queueing Formula L=λ 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. “Randon 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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[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.

[RIPL87] 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

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[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*"*. *Annuals 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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

[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.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

1 Introducción a las técnicas de simulación digital

La simulación digital es una técnica que permite imitar (o *simular*) en un ordenador el comportamiento de un sistema físico o teórico según ciertas condiciones particulares de operación. Para analizar, estudiar y mejorar el comportamiento de un sistema mediante las técnicas de simulación digital es necesario primero desarrollar un modelo conceptual que describa las dinámicas de interés, y luego implementarlo en un simulador para poder analizar los resultados.

Aunque la simulación digital es una técnica relativamente reciente y en constante evolución, el uso de la simulación como metodología de trabajo es una actividad muy antigua, y podría decirse que inherente al proceso de aprendizaje del ser humano. Es el caso, por ejemplo, de un niño pequeño jugando con unos objetos que no son más que representaciones, a escala, de objetos reales. Para poder comprender la realidad y toda la complejidad que un sistema puede conllevar, ha sido necesario construir artificialmente objetos y experimentar con ellos dinámicamente antes de interactuar con el sistema real. La simulación digital puede verse como el equivalente electrónico a este tipo de experimentación. Para ello será necesario construir objetos (modelos) que representen la realidad de tal modo que puedan ser interpretados por un ordenador.

A partir de esta primera definición -muy genérica- se desprende que el uso de las técnicas de simulación digital para la solución de problemas es un campo interdisciplinario muy amplio, tanto por la variedad de sistemas que pueden ser considerados, como por la diversidad de contextos que pueden describirse.

Estas técnicas han adquirido recientemente una importancia cada vez más relevante en la resolución de diferentes tipos de problemas prácticos; es usual encontrar aplicaciones en campos tales como ingeniería, economía, medicina, ciencias de la vida, así como ecología y ciencias sociales. De hecho, la formación en el desarrollo de modelos matemáticos y su ejecución en simuladores digitales está presente en muchas titulaciones universitarias.

Aunque existen diferentes enfoques posibles en la formación en el campo de la simulación digital, la orientación que pretenden dar los autores en el presente libro consiste en introducir una metodología de modelado de sistemas orientada a eventos discretos, así como los mecanismos que permiten a los simuladores ejecutar los modelos. Estos conocimientos son, en opinión de los autores, imprescindibles para un correcto uso de las técnicas de simulación.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

1.1 Tipos de sistemas

Para poder introducir el concepto de modelo de un sistema, así como presentar los tipos de modelos de simulación y sus principales características, es imprescindible definir previamente qué se entiende por sistema.

Un sistema puede definirse como una colección de objetos o entidades que interactúan entre sí para alcanzar un cierto objetivo. Nótese que la colección de objetos de un sistema puede ser tan solo un subconjunto de los objetos que deberían ser considerados en un sistema si el objetivo que se pretendiera alcanzar fuera otro.

Si se considera, por ejemplo, el estudio sobre el número de cajeros de que debe disponer un supermercado para ofrecer un buen servicio a sus clientes, los objetos del sistema consistirían principalmente en los clientes en espera de ser atendidos, y en los cajeros/as que realizan dicho servicio. En cambio, si se desea estudiar la atención a las necesidades de los clientes, el sistema debería contemplar adicionalmente entidades tales como los productos y su consumo.

El estado de un sistema puede ser definido como el conjunto mínimo de variables necesarias para caracterizar o describir todos aquellos aspectos de interés del sistema en un cierto instante de tiempo. A estas variables las denominamos *variables de estado*. Cabe reiterar que el número y tipo de éstas vienen condicionados por los objetivos de nuestro estudio. Así pues, en el sistema ejemplo descrito, las variables de estado podrían ser el estado de cada uno de los cajeros (en este caso, disponible u ocupado), y el número total de clientes en el supermercado.

Sin perder generalidad y considerando como finalidad de los experimentos tan solo el estudio del comportamiento de un sistema en el dominio temporal, se pueden clasificar los sistemas en: *continuos*, *discretos*, *orientados a eventos discretos* y *combinados,* atendiendo tan sólo a la relación entre la evolución de las propiedades de interés y la variable independiente tiempo.

- *Sistemas continuos*: las variables del estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo. Un ejemplo de este tipo de sistemas es la evolución de la temperatura en una habitación durante cualquier intervalo de tiempo, o bien la evolución del nivel de líquido en un tanque (figura 1.1).

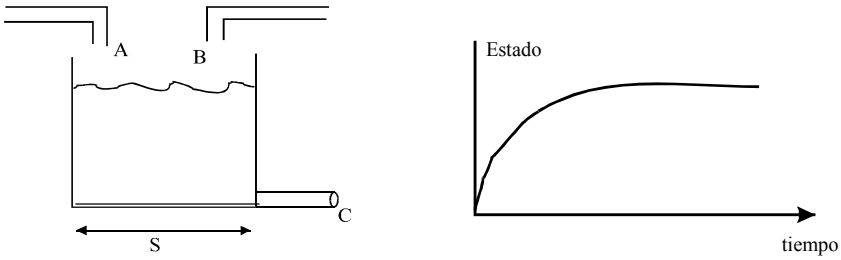


Figura 1.1 Evolución de un sistema continuo

- *Sistemas discretos*: se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un cierto instante o secuencia de instantes, y permanecen constantes el resto del tiempo. La

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio, obedece normalmente a un patrón periódico.

- *Sistemas orientados a eventos discretos*: al igual que los sistemas discretos, se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en una secuencia de instantes de tiempo y, podemos considerar que permanecen constantes el resto del tiempo. La secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio, obedece a un patrón aleatorio.
- *Sistemas combinados*: aquellos que combinan subsistemas que siguen filosofías continuas o discretas, respectivamente. Es el caso de los sistemas que poseen componentes que deben ser necesariamente modelados según alguno de dichos enfoques específicos.

EJEMPLO 1.1 Peaje de una autopista

Un proceso muy conocido que ilustra el comportamiento de un sistema orientado a eventos discretos, es el peaje de una autopista, al cual llegan coches de modo aleatorio y en el cual se desea prever el tiempo de espera de los coches en las colas en función del número de taquillas abiertas. Considerando, por ejemplo, los cambios de estado de una taquilla (libre, ocupado), puede observarse que los instantes de tiempo en los cuales aparecerá un cambio, obedecen a un patrón aleatorio. En la figura 1.2 (izquierda) se ha representado el estado de una de las taquillas de un peaje, indicando con el valor 1 que la taquilla se encuentra libre y con valor 0 que la taquilla se encuentra ocupada. En contraposición, en la misma figura (derecha) también se ha representado la evolución de la señal de control generada por un ordenador con un periodo de muestreo constante (sistema discreto).

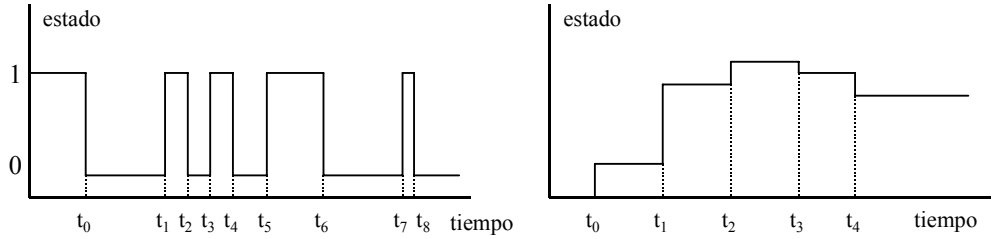


Figura 1.2 Evolución de un sistema discreto

1.2 Tipos de modelos

Existen otras alternativas a las técnicas de simulación digital para imitar (simular) el comportamiento de un sistema. Alternativas típicas son la construcción de un prototipo a escala del sistema real (plantas piloto, procesos en miniatura,...), la representación analógica del sistema mediante circuitos eléctricos, la descripción cualitativa del sistema, o la analogía con otros sistemas físicos o biológicos, como podría ser la experimentación de drogas en animales para prever sus efectos en las personas.

Todas estas técnicas tienen en común que, para imitar el comportamiento de un sistema, requieren (de algún modo) la descripción de las características internas (mecanismos) del sistema en cuestión para

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

prever su respuesta. La descripción de las características de interés de un sistema se conoce como *modelo del sistema*, y el proceso de abstracción para obtener esta descripción se conoce como *modelado***.**

Existen muchos tipos de modelos (modelos físicos, modelos mentales, modelos simbólicos) para representar los sistemas en estudio, pero puesto que uno de los objetivos para los cuales se van a desarrollar los modelos es su uso en entornos de simulación digital, es necesario que los modelos formalicen el conocimiento que se tiene del sistema de modo conciso, sin ambigüedades (interpretación única), y que puedan ser procesados por un ordenador. Estas características determinan el uso de *modelos simbólicos matemáticos* como herramienta para representar las dinámicas de interés de cualquier sistema en un entorno de simulación digital. Los modelos simbólicos matemáticos mapean las relaciones existentes entre las propiedades físicas del sistema que se pretende modelar en las correspondientes estructuras matemáticas. El tipo de formalización matemática que se utilice va a depender de las características intrínsecas de las dinámicas de interés que se quieran representar.

La descripción en términos matemáticos de un problema real no es una metodología de trabajo propia de la simulación digital, sino que es inherente a la mayoría de las técnicas que se utilizan para solventar cualquier tipo de problema, las cuales suelen seguir unas pautas que, de modo general, se han resumido en la figura siguiente:

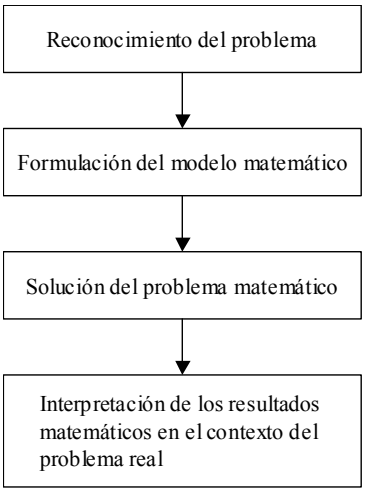


Figura 1.3 Etapas en la explotación de modelos matemáticos

Aunque existe una gran diversidad de metodologías para el desarrollo de modelos matemáticos de sistemas físicos, existen un conjunto de consideraciones que se deben tener en cuenta para garantizar una representación eficiente del sistema real:

- Un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, consecuentemente, representa tan sólo parcialmente la realidad.
- Un modelo se construye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

- Un modelo tiene que ser por necesidad un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger todos los aspectos esenciales del sistema en estudio.

Así pues, un buen modelo debe preservar ambas propiedades:

- Representar adecuadamente aquellas características del sistema que son de nuestro interés.
- Ser una representación abstracta de la realidad lo suficientemente sencilla como para facilitar su mantenimiento, adaptación y reutilización.

Atendiendo a las características que debe poseer un buen modelo, así como los objetivos del estudio de simulación, los modelos de simulación suelen clasificarse de diferentes formas:

Modelos estáticos respecto a *modelos dinámicos*

Los *Modelos Estáticos* suelen utilizarse para representar el sistema en un cierto instante de tiempo; y en su formulación no se considera el avance del tiempo. A título ilustrativo, considérese un modelo matemático simple de cantidad de material en un almacén de una fábrica:

Stock = Stock *inicial* + *Material entrada* - *Material consumido por la fábrica*

Este tipo de modelos es muy útil cuando el sistema se encuentra en equilibrio (no evoluciona respecto al tiempo). Si se cambia el punto de equilibrio alterando uno o más de los valores del sistema, el modelo permite deducir el resto de los valores, pero no muestra la manera en que cambiaron.

En contraposición a los modelos estáticos, los *modelos dinámicos* permiten deducir cómo las variables de interés del sistema en estudio evolucionan respecto al tiempo. Un ejemplo de modelo dinámico es la evolución de material en un *stock*, que depende de los flujos de entrada y salida, cada uno de los cuales conlleva implícito la evolución del tiempo.

Evolución del stock = *Flujo de entrada – Flujo de salida*

Las ecuaciones siguientes describen matemáticamente la evolución de un stock suponiendo que las variables de interés evolucionan de manera continua o discreta respectivamente, donde F_i y F_o representan los flujos de entrada y salida del almacén.

$$\frac{dS}{dt} = F_i(t) - F_o(t)$$

$$S(k+1) = S(k) + F_i(k) - F_o(k)$$

Modelos deterministas respecto a *modelos estocásticos*

Un modelo se denomina *determinista* si su nuevo estado puede ser completamente definido a partir del estado previo y de sus entradas. Es decir, ofrece un único conjunto de valores de salida para un conjunto de entradas conocidas.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Los *modelos estocásticos* requieren de una o más variables aleatorias para formalizar las dinámicas de interés. En consecuencia, el modelo no genera un único conjunto de salida cuando es utilizado para realizar un experimento, sino que los resultados generados son utilizados para estimar el comportamiento real del sistema.

Modelos continuos respecto a *modelos discretos*

Los *modelos continuos* se caracterizan por representar la evolución de las variables de interés de forma continua. En general suelen utilizarse ecuaciones diferenciales ordinarias si se considera simplemente la evolución de una propiedad respecto al tiempo, o bien ecuaciones en derivadas parciales si se considera también la evolución respecto al espacio.

De modo análogo a la definición de modelos continuos, los *modelos discretos* se caracterizan por representar la *evolución* de las variables de interés de forma discreta.

Es importante notar a partir de la clasificación de modelos realizada, que es posible describir un sistema continuo mediante un modelo discreto y, al revés, también es posible describir un sistema discreto mediante un modelo continuo. La decisión de utilizar un modelo continuo o un modelo discreto depende de los objetivos particulares de cada estudio y no tanto de las características del sistema. Así pues, por ejemplo, es posible encontrar modelos continuos de flujos de coches en una autopista donde se ha escogido una formulación continua cuando los objetivos del estudio se centran pongamos por caso en evaluar la evolución de los flujos ante un accidente o bien cuando se recorta un carril, en que el movimiento de un coche carece de importancia.

Antes de finalizar la presentación del concepto de modelo de un sistema, se introducen a continuación otras definiciones igualmente válidas en el contexto de este libro, así como algunas de las características que debe cumplir un buen modelo:

- Un modelo es un objeto o concepto que utilizamos para representar cualquier otra entidad (un sistema). Así pues, mediante un proceso de abstracción, se muestran en un formato adecuado las características de interés de un objeto (sistema) real o hipotético.
- Un modelo es una representación simplificada de un sistema que nos facilitará explicar, comprender, cambiar, preservar, prever y posiblemente controlar el comportamiento de un sistema.
- Un modelo es el sustituto de un sistema físico concreto.
- Un modelo debe representar el conocimiento que se tiene de un sistema de modo que facilite su interpretación, formalizando tan sólo los factores que son importantes para los objetivos de modelado.
- Un modelo debe ser tan sencillo como sea posible, porque el desarrollo de modelos universales es impracticable y poco económico, siempre y cuando represente adecuadamente los aspectos de interés.

1.3 Modelos de simulación de eventos discretos

Los Modelos de eventos discretos son *modelos dinámicos, estocásticos* y *discretos* en los que las variables de estado cambian de valor en instantes no periódicos del tiempo. Estos instantes de tiempo

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

se corresponden con la ocurrencia de un evento. Por tanto, *un evento se define como una acción instantánea que puede cambiar el estado del modelo*.

Otros elementos de interés de los modelos de eventos discretos son:

- *Actividades*: son las tareas o acciones que tienen lugar en el sistema. Están encapsuladas entre dos eventos. Por ejemplo, la reparación de una máquina, el procesado de una pieza o el transporte de un cliente. Las actividades generalmente tienen duración temporal y, normalmente, precisan del uso de recursos.
- *Entidades*: son el conjunto de objetos que constituyen o fluyen por el sistema. Pueden ser temporales o permanentes. En la bibliografía a menudo se emplea el concepto de *entidad* para aludir sólo a las entidades temporales, aunque en este libro el concepto es más amplio dado que también incluye a los recursos que nos permiten mantener la coherencia con los múltiples formalismos empleados en el proceso de abstracción del sistema.
- *Entidades temporales*: son los objetos que se procesan en el sistema, como por ejemplo las piezas, los clientes o los documentos. Entidades diferentes pueden tener características diferentes que denominaremos atributos: por ejemplo, precio, prioridad, estado o tamaño. Las entidades temporales son los objetos que llegan, se procesan y salen del sistema.
- *Recursos* o *entidades permanentes*: son los medios gracias a los cuales se pueden ejecutar las actividades. Los recursos definen quién o qué ejecuta la actividad. Los recursos pueden tener características como capacidad, velocidad, averías y reparaciones o tiempo de ciclo. Ejemplos de recursos son las máquinas, los elementos de transporte o las personas.

EJEMPLO 1.2

En el modelo del sistema del ejemplo 1.1 descrito anteriormente, los eventos que pueden ocurrir son:

- La llegada de un vehículo a la cola.
- Inicio del pago del peaje.
- Fin del pago y salida del sistema.

Las entidades temporales son los vehículos que pasan por el peaje. La actividad única del proceso es el pago en la taquilla y el recurso de interés es la taquilla o taquillas habilitadas.

1.4 Alternativas en la simulación de modelos de eventos discretos

Resumiendo algunos de los conceptos introducidos en las secciones anteriores, el modelo de un sistema representa las dinámicas de interés del sistema en un estudio particular, y la simulación consiste en realizar un experimento sobre el modelo del sistema de tal modo que los resultados generados por el simulador permitan prever con cierta exactitud los resultados que se obtendrían realizando el mismo experimento sobre el sistema real.

Con el objetivo de ilustrar diferentes alternativas para experimentar con el modelo de simulación de un sistema orientado a eventos discretos, considérese el sistema de procesado de órdenes ilustrado en

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

la figura 1.4, donde las tres actividades más significativas del sistema en estudio son: la recepción, el procesado y finalmente la expedición de las órdenes recibidas. Se considera que hay cuatro trabajadores por cada turno diario de 8 horas y que la franja horaria normal de trabajo es desde las 9 de la mañana hasta las 5 de la tarde. No obstante, la jornada laboral se alarga si no ha sido posible expedir todas las órdenes recibidas a lo largo del día.

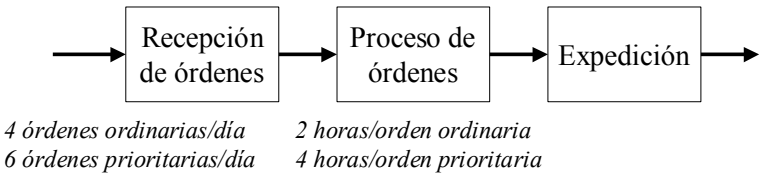


Figura 1.4 Esquema del procesado de órdenes

Los parámetros más significativos del sistema son:

- En promedio, se reciben 10 órdenes cada día.
- Hay dos tipos de órdenes, las ordinarias y las prioritarias: el 40% de las órdenes son ordinarias y el 60% restante son prioritarias.
- En promedio, una orden ordinaria requiere 2 horas de proceso y una orden prioritaria 4 horas.
- Solo se aceptan órdenes hasta la 1 del mediodía.

1.4.1 Simulación del modelo estático

A partir de una formulación estática del sistema en la que no interviene directamente el tiempo (basada en valores promedio), es posible analizar el comportamiento del sistema llegando a conclusiones erróneas, como que no existe ningún retraso en las órdenes y que los recursos humanos están aprovechados en un 100%:

órdenes ordinarias = 4 órdenes/día * 2 horas/orden = 8 horas/día

órdenes prioritarias = 6 órdenes/día * 4 horas/orden = 24 horas/día

capacidad necesaria = 8 + 24 = 32 horas/día

capacidad disponible = 4 trabajadores/día * 8 horas/día = 32 horas/día

porcentaje de utilización = capacidad necesaria/cap. disponible * 100=100%

1.4.2 Simulación a mano

Para realizar una simulación del modelo orientado a eventos discretos (modelo de simulación estocástico y discreto) es necesario formalizar los distintos eventos que afectan a las variables de interés del estudio, los instantes de tiempo en que pueden aparecer dichos eventos, así como las actividades que deben realizarse como consecuencia de la aparición de dichos eventos.

En la figura 1.5 se muestra en forma de organigrama las acciones asociadas al evento de llegada de una orden. Si todos los trabajadores están ocupados, la orden se espera en la cola. En caso contrario, se asigna un trabajador a la orden y se inicia su proceso.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

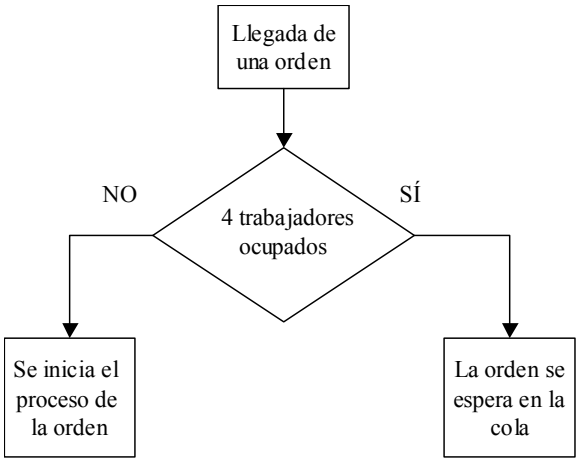


Figura 1.5 Diagrama de flujo del evento de llegada de una orden

En la figura 1.6 se representan las acciones ligadas al evento de expedición de una orden. Al finalizar el proceso de una orden, uno de los trabajadores queda libre. Si hay órdenes en cola, el trabajador selecciona la orden más prioritaria e inicia su procesado. En caso contrario, el trabajador permanece a la espera de la llegada de nuevas órdenes.

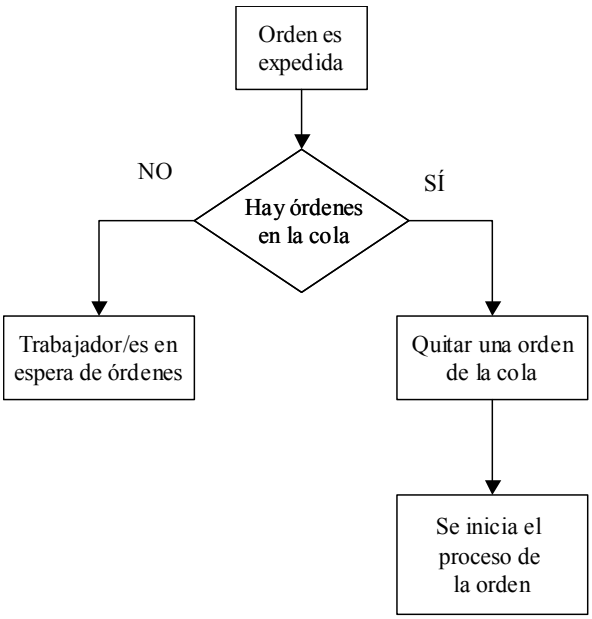


Figura 1.6 Diagrama de flujo del evento de expedición de una orden

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Para analizar el comportamiento del sistema se simula la dinámica del proceso en el cual la llegada de órdenes es aleatoria. La figura siguiente muestra para cada una de las órdenes la hora de llegada, el tiempo que está en cola, el tiempo de procesado y la hora de expedición.

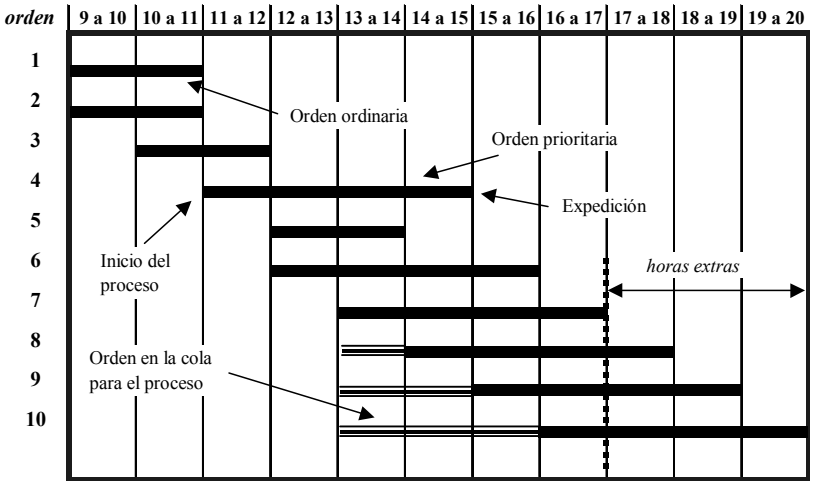


Figura 1.7 Diagrama de la simulación a mano

Las primeras dos órdenes llegan a las 9 de la mañana. La tercera orden llega una hora más tarde, a las 10 de la mañana. Dado que estas primeras órdenes son ordinarias y hay trabajadores para procesarlas, las tres órdenes son expedidas al cabo de dos horas. Más adelante, a las 13 horas, llega la orden número 8. En este instante, los cuatro trabajadores están ocupados. En consecuencia, no se puede iniciar su proceso hasta una hora más tarde después de ser expedida la orden número 5. Para completar las órdenes 8, 9 y 10 es preciso que 3 trabajadores alarguen su jornada de trabajo más allá de las 5 de la tarde.

A continuación se muestra también de forma tabular los resultados de la simulación a mano. La primera columna muestra en qué instante ocurre cada evento. En la cuarta columna se muestra el tipo de evento, evento de llegada de una orden o evento de expedición de una orden. En la columna número dos se muestra la orden que se recibe o expide y en la siguiente columna, la tercera, se muestra el tipo de orden, ordinaria o prioritaria. En la quinta columna se muestra en número de órdenes en la cola. En la sexta columna se muestra el número de órdenes en el sistema (desde que llega la orden hasta que ésta es expedida). La penúltima columna muestra el tiempo que está cada orden en la cola a la espera de ser procesada. La última columna muestra, en el evento de expedición, el tiempo total que ha estado la orden en el sistema, o sea, la suma del tiempo en la cola más el tiempo en proceso.

Las últimas cuatro columnas muestran estadísticas importantes para analizar el comportamiento del sistema. Estas estadísticas son recogidas cada vez que hay un evento. Por ejemplo, el número de órdenes en la cola alcanza su valor máximo a las 13 horas. Las últimas tres órdenes están en la cola una, dos y tres horas respectivamente.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.

Tiempo (hora)	*Número de orden*	*Tipo de orden*	*Tipo de evento*	*Número en cola*	*Número en sistema*	*Tiempo en cola*	*Tiempo en sistema*
9	1	Ordinaria	Llegada	0	1	-	-
9	2	Ordinaria	Llegada	0	2	-	-
10	3	Ordinaria	Llegada	0	3	-	-
11	1	Ordinaria	Expedición	0	2	-	2 h
11	2	Ordinaria	Expedición	0	1	-	2 h
11	4	Prioritaria	Llegada	0	2	-	-
12	3	Ordinaria	Expedición	0	1	-	2 h
12	5	Ordinaria	Llegada	0	2	-	-
12	6	Prioritaria	Llegada	0	3	-	-
13	7	Prioritaria	Llegada	0	4	-	-
13	8	Prioritaria	Llegada	1	5	-	-
13	9	Prioritaria	Llegada	2	6	-	-
13	10	Prioritaria	Llegada	3	7	-	-
14	5	Ordinaria	Expedición	2	6	-	2 h
15	4	Prioritaria	Expedición	1	5	-	4 h
16	6	Prioritaria	Expedición	0	4	-	4 h
17	7	Prioritaria	Expedición	0	3	-	4 h
19	8	Prioritaria	Expedición	0	2	1 h	5 h
19	9	Prioritaria	Expedición	0	1	2 h	6 h
20	10	Prioritaria	Expedición	0	0	3 h	7 h

Tabla 1.1 Tabla de la simulación manual del proceso de órdenes

A continuación se resume el comportamiento del proceso observado mediante la simulación manual:

tiempo de ciclo promedio para órdenes ordinarias = 8 h/4 órdenes = 2 h/orden

tiempo de ciclo promedio para las prioritarias = 30 h/6 órdenes = 5 h/orden

tiempo promedio en la cola = 6 h/10 órdenes = 0.6 h/orden

tiempo máximo en la cola = 3 h

nivel de servicio promedio = 7 órdenes a tiempo / 10 órdenes = 70%

3 trabajadores han tenido que trabajar un total de 6 horas extras para completar las órdenes

Aunque inicialmente parecía que el diseño del proceso era el adecuado, las llegadas aleatorias provocan colas y retardos posteriores en el procesado de las órdenes. En este ejemplo se ha observado que las llegadas aleatorias provocan desviaciones significativas respecto al comportamiento esperado inicialmente.

Para efectuar la simulación anterior, se ha supuesto conocido el número de órdenes que llegan en cada franja horaria. Sin embargo, en la práctica diaria, esta secuencia precisa de tiempos puede no ser conocida dado que:

- el proceso simulado todavía no existe en la realidad,
- o se desea simular el comportamiento de un sistema real según condiciones diferentes de operación.

© Los autores, 2002; © Edicions UPC, 2002.