

# ÍNDICE

<b>Prefacio</b>	<b>17</b>
Organización de la Unidad Didáctica . . . . .	17
Cómo utilizar el libro . . . . .	18
Objetivos docentes . . . . .	18
<b>1. Introducción al modelado y la simulación</b>	<b>19</b>
1.1. Introducción . . . . .	23
1.2. Conceptos fundamentales . . . . .	24
1.2.1. Sistema, experimento y modelo . . . . .	24
1.2.2. Niveles en el conocimiento de los sistemas . . . . .	27
1.2.3. Marco formal para el modelado y la simulación . . . . .	29
1.2.4. Clasificaciones de los modelos matemáticos . . . . .	32
1.3. Modelado y simulación de tiempo discreto . . . . .	35
1.3.1. Descripción de modelos de tiempo discreto . . . . .	36
1.3.2. Simulación de modelos de tiempo discreto . . . . .	38
1.3.3. Autómatas celulares . . . . .	38
1.4. Modelado y simulación de eventos discretos . . . . .	43
1.4.1. Modelado orientado a la planificación de eventos . . . . .	44
1.4.2. Modelado orientado a los procesos . . . . .	48
1.4.3. Modelado de una oficina de atención al público . . . . .	49
1.5. Pasos en un estudio de simulación . . . . .	55

1.5.1.	Definición del problema y planificación del proyecto . . . . .	57
1.5.2.	Definición del sistema y formulación del modelo . . . . .	59
1.5.3.	Diseño de los experimentos . . . . .	63
1.5.4.	Datos de entrada . . . . .	64
1.5.5.	Traducción del modelo . . . . .	64
1.5.6.	Verificación y validación del modelo . . . . .	65
1.5.7.	Experimentación y análisis de los resultados . . . . .	66
1.5.8.	Documentación y aplicación de los resultados . . . . .	67
1.6.	Análisis de datos: introducción a R . . . . .	68
1.6.1.	El espacio de trabajo . . . . .	70
1.6.2.	Estructuras de datos . . . . .	72
1.6.3.	Gráficos . . . . .	75
1.6.4.	Manejo básico de los datos . . . . .	78
1.6.5.	Valor NA (Not Available) . . . . .	79
1.6.6.	Conversión del tipo de datos . . . . .	80
1.6.7.	Control del flujo . . . . .	81
1.6.8.	Definición de funciones . . . . .	82
1.7.	Lecturas recomendadas . . . . .	82
1.8.	Ejercicios de autocomprobación . . . . .	84
1.9.	Soluciones de los ejercicios . . . . .	87
<b>2.</b>	<b>Modelado mediante DEVS</b>	<b>99</b>
2.1.	Introducción . . . . .	103
2.2.	Modelos DEVS atómicos . . . . .	103
2.2.1.	Especificación formal . . . . .	104
2.2.2.	Comportamiento de modelos DEVS atómicos . . . . .	105
2.2.3.	Práctica del modelado . . . . .	109
2.3.	Modelos DEVS compuestos . . . . .	121

2.3.1.	Especificación formal . . . . .	121
2.3.2.	Comportamiento de modelos DEVS acoplados . . . . .	123
2.3.3.	Práctica del modelado . . . . .	125
2.4.	Simulación de modelos DEVS . . . . .	128
2.4.1.	Algoritmo DEVS-simulador . . . . .	130
2.4.2.	Algoritmo DEVS-coordinador . . . . .	133
2.4.3.	Algoritmo DEVS-coordinador-raíz . . . . .	137
2.5.	Lecturas recomendadas . . . . .	139
2.6.	Ejercicios de autocomprobación . . . . .	140
2.7.	Soluciones de los ejercicios . . . . .	148
<b>3.</b>	<b>Modelado con Arena</b> . . . . .	<b>165</b>
3.1.	Introducción . . . . .	169
3.2.	Comenzando con Arena . . . . .	169
3.3.	Modelado de los recursos . . . . .	180
3.3.1.	Planificación de la capacidad . . . . .	180
3.3.2.	Fallos en los recursos . . . . .	182
3.3.3.	Utilización de los recursos . . . . .	183
3.4.	Encapsulado y prueba de circuitos . . . . .	184
3.4.1.	Descripción del funcionamiento del sistema . . . . .	185
3.4.2.	Modelado del funcionamiento del sistema . . . . .	186
3.4.3.	Definición del experimento . . . . .	194
3.4.4.	Ejecución de la simulación . . . . .	194
3.4.5.	Planificación de la capacidad de la Zona de Retrabajado . . . . .	196
3.4.6.	Averías en la Zona de Encapsulado y Prueba . . . . .	201
3.5.	Modelado detallado . . . . .	207
3.5.1.	Rechazo (balking) . . . . .	208
3.5.2.	Conjuntos de objetos . . . . .	209

3.5.3.	Variables . . . . .	210
3.5.4.	Expresiones . . . . .	211
3.5.5.	Submodelos . . . . .	212
3.5.6.	Costes . . . . .	212
3.6.	Lecturas recomendadas . . . . .	213
3.7.	Ejercicios de auto comprobación . . . . .	214
3.8.	Soluciones de los ejercicios . . . . .	221
<b>4.</b>	<b>Modelado de las entradas aleatorias</b>	<b>249</b>
4.1.	Introducción . . . . .	253
4.2.	Conceptos básicos de probabilidad . . . . .	256
4.2.1.	El significado de “probabilidad” . . . . .	256
4.2.2.	Probabilidad condicionada . . . . .	258
4.2.3.	El teorema fundamental de la probabilidad . . . . .	258
4.2.4.	El concepto de variable aleatoria . . . . .	259
4.2.5.	Probabilidad acumulada y densidad de probabilidad . . . . .	260
4.2.6.	Cuantiles y mediana . . . . .	261
4.2.7.	Media, varianza y desviación estándar . . . . .	261
4.2.8.	Estimadores de la media y la varianza . . . . .	262
4.2.9.	Teorema del límite central . . . . .	264
4.2.10.	Intervalos de confianza para la media . . . . .	264
4.2.11.	Intervalos de confianza para la varianza de una distribución normal . . . . .	269
4.3.	Distribuciones de probabilidad . . . . .	272
4.3.1.	Parámetros de las familias de distribuciones teóricas continuas	272
4.3.2.	Distribuciones empíricas continuas . . . . .	273
4.3.3.	Distribuciones empíricas discretas . . . . .	275
4.3.4.	Desplazamiento y truncado de distribuciones . . . . .	275

4.4.	Independencia y homogeneidad de los datos . . . . .	277
4.4.1.	Análisis de la independencia de los datos experimentales . . .	277
4.4.2.	Análisis de la homogeneidad de los datos experimentales . . .	278
4.5.	Tarea I: Selección de la familia de distribuciones . . . . .	279
4.5.1.	Consideraciones teóricas . . . . .	279
4.5.2.	Estadísticos . . . . .	281
4.5.3.	Histogramas . . . . .	284
4.5.4.	Gráficas cuantil-cuantil . . . . .	286
4.6.	Tarea II: Estimación de los parámetros . . . . .	289
4.7.	Tarea III: Medida de la bondad del ajuste . . . . .	292
4.8.	Selección de la distribución en ausencia de datos . . . . .	294
4.9.	Procesos estocásticos de llegada . . . . .	297
4.9.1.	Procesos de Poisson . . . . .	298
4.9.2.	Procesos de Poisson no estacionarios . . . . .	299
4.9.3.	Procesos de Poisson compuestos . . . . .	301
4.9.4.	Modelado usando Arena . . . . .	302
4.10.	Modelado de las entradas usando Arena . . . . .	304
4.11.	Modelado de las entradas usando R . . . . .	308
4.11.1.	Funciones estadísticas . . . . .	308
4.11.2.	Histogramas . . . . .	310
4.11.3.	Gráficas Q-Q . . . . .	311
4.11.4.	Ajuste de los datos . . . . .	312
4.11.5.	Medida de la bondad del ajuste . . . . .	313
4.12.	Lecturas recomendadas . . . . .	313
4.13.	Ejercicios de autocomprobación . . . . .	315
4.14.	Soluciones de los ejercicios . . . . .	317
<b>5.</b>	<b>Generación de las entradas aleatorias</b>	<b>325</b>

5.1.	Introducción . . . . .	329
5.2.	Generación de números aleatorios . . . . .	330
5.2.1.	Generadores físicos . . . . .	331
5.2.2.	Generadores aritméticos . . . . .	335
5.2.3.	Generadores congruenciales lineales . . . . .	338
5.2.4.	Generadores congruenciales lineales mixtos . . . . .	340
5.2.5.	Generadores congruenciales lineales multiplicativos . . . . .	342
5.2.6.	Otros generadores congruenciales . . . . .	344
5.2.7.	Generadores combinados . . . . .	345
5.2.8.	Generadores de Tausworthe . . . . .	348
5.3.	Tests empíricos . . . . .	349
5.4.	Métodos para generar observaciones de variables aleatorias . . . . .	353
5.4.1.	Método de la transformación inversa . . . . .	353
5.4.2.	Composición . . . . .	358
5.4.3.	Convolución . . . . .	358
5.4.4.	Método de aceptación/rechazo . . . . .	359
5.5.	Observaciones de variables aleatorias continuas . . . . .	360
5.5.1.	Uniforme . . . . .	360
5.5.2.	Exponencial . . . . .	360
5.5.3.	Normal . . . . .	361
5.5.4.	Lognormal . . . . .	361
5.5.5.	Triangular . . . . .	361
5.5.6.	Distribución empírica . . . . .	362
5.6.	Observaciones de variables aleatorias discretas . . . . .	363
5.6.1.	Distribución Bernoulli . . . . .	363
5.6.2.	Distribución discreta uniforme . . . . .	363
5.6.3.	Distribución binomial . . . . .	363

5.6.4.	Distribución geométrica . . . . .	364
5.6.5.	Distribución negativa binomial . . . . .	364
5.6.6.	Distribución de Poisson . . . . .	364
5.6.7.	Distribución empírica . . . . .	365
5.7.	Generación de procesos de llegada . . . . .	366
5.7.1.	Proceso de Poisson estacionario . . . . .	366
5.7.2.	Proceso de Poisson no estacionario . . . . .	366
5.7.3.	Proceso de Poisson con llegadas en grupo . . . . .	367
5.8.	Lecturas recomendadas . . . . .	368
5.9.	Ejercicios de autocomprobación . . . . .	369
5.10.	Soluciones de los ejercicios . . . . .	372
<b>6.</b>	<b>Análisis de los resultados de la simulación</b>	<b>379</b>
6.1.	Introducción . . . . .	383
6.2.	Comportamiento transitorio y estacionario . . . . .	384
6.3.	Simulaciones con condición de finalización . . . . .	388
6.4.	Simulaciones en el estacionario . . . . .	390
6.4.1.	Método gráfico de Welch . . . . .	390
6.4.2.	Media de la distribución en el estacionario . . . . .	394
6.5.	Intervalos de confianza para varias magnitudes . . . . .	396
6.6.	Comparación entre dos sistemas . . . . .	398
6.7.	Comparación entre más de dos sistemas . . . . .	399
6.7.1.	Comparación con un estándar . . . . .	400
6.7.2.	Comparación de todos con todos . . . . .	401
6.8.	Análisis usando Arena . . . . .	402
6.8.1.	Simulación con terminación . . . . .	402
6.8.2.	Comparación de dos modelos . . . . .	404
6.8.3.	Comparación entre más de dos modelos . . . . .	406

6.8.4. Simulación en el estacionario . . . . .	410
6.9. Análisis usando R . . . . .	414
6.10. Lecturas recomendadas . . . . .	416
6.11. Ejercicios de autocomprobación . . . . .	417
6.12. Soluciones de los ejercicios . . . . .	419
<b>7. Diseño de experimentos y optimización</b>	<b>421</b>
7.1. Introducción . . . . .	425
7.2. Objetivos, respuestas y factores . . . . .	427
7.2.1. Objetivos del experimento . . . . .	427
7.2.2. Selección de las respuestas . . . . .	428
7.2.3. Selección de los factores experimentales . . . . .	430
7.3. Diseño experimental factorial completo . . . . .	432
7.3.1. Efectos principales . . . . .	433
7.3.2. Interacciones de dos factores . . . . .	433
7.3.3. Interacción entre más de dos factores . . . . .	438
7.3.4. Intervalos de confianza . . . . .	438
7.3.5. Modelado de la respuesta . . . . .	439
7.4. Diseño experimental factorial fraccional . . . . .	442
7.4.1. Diseño experimental $2^{k-p}$ . . . . .	442
7.4.2. Modelado de la respuesta . . . . .	443
7.5. Optimización . . . . .	445
7.5.1. Metodología de la superficie de respuesta . . . . .	445
7.5.2. Optimización usando Arena . . . . .	448
7.6. Lecturas recomendadas . . . . .	451
7.7. Ejercicios de autocomprobación . . . . .	452
7.8. Soluciones de los ejercicios . . . . .	455



<b>APÉNDICES</b>	<b>461</b>
<b>A. Distribuciones de probabilidad continuas</b>	<b>461</b>
Uniforme . . . . .	463
Exponencial . . . . .	464
Gamma . . . . .	465
Weibull . . . . .	466
Normal . . . . .	467
Lognormal . . . . .	468
Beta . . . . .	469
Triangular . . . . .	470
Equivalencias entre distribuciones . . . . .	471
Relaciones entre distribuciones . . . . .	472
<b>B. Distribuciones de probabilidad discretas</b>	<b>473</b>
Bernoulli . . . . .	475
Uniforme discreta . . . . .	476
Binomial . . . . .	476
Geométrica . . . . .	478
Binomial negativa . . . . .	479
Poisson . . . . .	480
Equivalencias entre distribuciones . . . . .	481
Relaciones entre distribuciones . . . . .	481
<b>Índice alfabético</b>	<b>483</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>489</b>