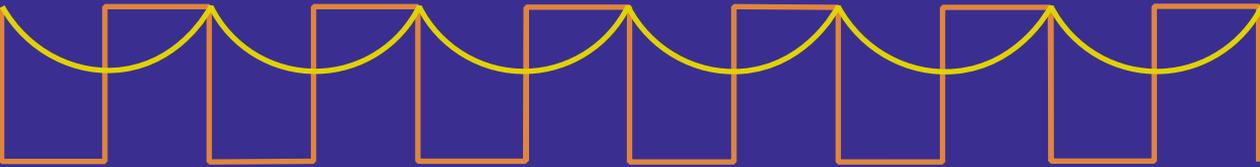


UNVirtualLab

Un laboratorio Virtual basado en OpenModelica

Oscar G. Duarte V.





UNVirtualLab
Un laboratorio virtual basado
en OpenModelica

UNVirtualLab

Un laboratorio virtual basado en OpenModelica

Oscar G. Duarte V.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

BOGOTÁ, D. C., 2018

© Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
© Vicerrectoría de Sede Bogotá
Dirección de Investigación y Extensión – DIEB
© Vicerrectoría de Investigación
Editorial Universidad Nacional de Colombia
© Oscar G. Duarte V.

Primera edición, septiembre de 2018
ISBN 978-958-783-521-2 (papel)
ISBN 978-958-783-523-6 (IBD)
ISBN 978-958-783-522-9 (digital)

Colección Ingenio Propio
Serie Investigación
Facultad de Ingeniería

Edición
Editorial Universidad Nacional de Colombia
direditorial@unal.edu.co
www.editorial.unal.edu.co

Coordinación editorial: María Carolina Suárez S.
Corrección de estilo: Pablo Castellanos
Diseño de la colección: Ángela Pilone Herrera
Diagramación en \LaTeX : Ana Patricia Chávez

Salvo cuando se especifica lo contrario, las figuras y tablas del presente volumen son propiedad del autor

Bogotá, D. C., Colombia, 2018

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales

Impreso y hecho en Bogotá, D. C., Colombia

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia

Duarte Velasco, Oscar Germán, 1969-
UNVirtualLab : un laboratorio virtual basado en OpenModelica / Óscar G. Duarte V. – Primera edición. – Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Vicerrectoría de Sede. Dirección de Investigación y Extensión (DIEB), Vicerrectoría de Investigación. Editorial, 2018.

1 CD-ROM (554 páginas): ilustraciones (principalmente a color), diagramas, figuras, fotografías. – (Colección Ingenio Propio. Serie Investigación)

Incluye referencias bibliográficas
ISBN 978-958-783-522-9 (e-book)

1. OpenModelica (Programa para computador) 2. Software libre y de código abierto 3. Simulación por computadores – Educación 4. Simulación (Matemáticas) – Métodos 5. Desarrollo de programas para computador I. Título II. Serie

CDD-23 378.0113 / 2018

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	31
I MODELADO Y SIMULACIÓN CON OPENMODELICA	39
1 MODELADO DE SISTEMAS DINÁMICOS	41
1.1 Sistemas, modelos, simulación	43
1.1.1 Construcción de modelos matemáticos	44
1.2 Técnicas de modelado matemático con fines de simulación	46
1.2.1 Técnicas analíticas específicas de cada dominio	46
1.2.2 Técnicas de espacio de estado	53
1.2.3 Técnicas variacionales	56
1.2.4 Diagramas de bloques y diagramas de flujo de señal	60
1.2.5 Grafos de enlaces de potencia	64
1.2.6 Modelado orientado a objetos	69
1.3 Comparación de las técnicas de modelado	75
1.4 El modelado para un laboratorio virtual	80
2 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ECUACIONES DIFERENCIALES ALGEBRAICAS	83
2.1 Análisis de DAEs	85
2.1.1 Condiciones iniciales	86
2.1.2 Índices	89
2.2 El proceso de simulación	91
2.3 Cálculo de condiciones iniciales	94
2.4 Algoritmos de tratamiento simbólico de DAEs	96
2.4.1 Ordenamiento y asignación de causalidad	96
2.4.2 El algoritmo de Tarjan	99
2.4.3 Algoritmos de rasgadura	107
2.4.4 Algoritmo de relajación	110
2.4.5 El algoritmo de Pantelides para la reducción del índice	112
2.5 Simulación de eventos discretos	114
2.6 Selección del método numérico	116
2.6.1 Algunas consideraciones sobre los métodos de simulación	123

3	EL LENGUAJE MODELICA	127
3.1	Características	132
3.1.1	Modelo de componentes y conectores	132
3.1.2	Orientación	135
3.1.3	Multidominio	140
3.1.4	Acausalidad	142
3.1.5	Modelo del tiempo	147
3.1.6	Interoperabilidad con lenguajes de programación	149
3.1.7	Documentación de los modelos	151
3.1.8	Reusabilidad	152
3.2	Algunos elementos del lenguaje	154
3.3	La Modelica Standard Library	156
4	LA SUITE OPENMODELICA	163
4.1	Arquitectura	165
4.2	La consola OMSHELL	167
4.3	El proceso de compilación	171
4.4	El compilador omc	175
4.4.1	Estructura interna del compilador	175
4.4.2	Uso del compilador	177
4.5	Ejecución del modelo compilado	179
4.5.1	Archivo de entrada	180
4.5.2	Archivo de resultados	181
4.6	El editor de modelos y documentos OMNotebook	183
4.7	El editor gráfico OmEdit	184
4.8	El <i>plugin</i> para MDT Eclipse	188
4.9	Otros módulos y desarrollos	189
II	UNVIRTUALLAB	191
5	LABORATORIOS VIRTUALES. ESTADO DEL ARTE	193
5.1	Características de los laboratorios virtuales	195
5.1.1	Orientación a la web	195
5.1.2	Naturaleza de los modelos	197
5.1.3	Dominio de los experimentos	198
5.1.4	Interactividad	198
5.1.5	Función del laboratorio	199
5.1.6	Disponibilidad de los modelos	200
5.1.7	Integración con LMS y compatibilidad SCORM	200

5.1.8	Licenciamiento y acceso	201
5.2	Clasificación y ejemplos	201
5.3	Laboratorios y aprendizaje de la ingeniería	203
5.3.1	Importancia de la experimentación	204
5.3.2	Importancia del modelado y de la simulación	205
5.3.3	La experimentación como estrategia de aprendizaje	207
5.4	Consideraciones en el diseño de laboratorios virtuales	210
6	UNVIRTUALLAB. ARQUITECTURA	215
6.1	Especificaciones	217
6.1.1	Características	217
6.1.2	Concepto de diseño	218
6.1.3	Especificaciones funcionales	222
6.1.4	Casos de uso	225
6.2	Modelo Entidad-Relación	228
6.3	Componentes	230
6.4	Interfaz	234
6.4.1	Estructura de páginas	234
6.5	Implementación en php	239
6.5.1	Clases enfocadas en el experimentador	239
6.5.2	Clases enfocadas en el administrador	244
6.6	Configuración de la interfaz	250
6.6.1	Internacionalización - I18n	250
6.6.2	Apariencia	251
6.6.3	Estilo de las figuras	254
7	MANUALES	257
7.1	Manual del administrador	259
7.1.1	Instalación del servidor	259
7.1.2	Copias de seguridad	268
7.1.3	Exportación e importación de modelos	268
7.2	Manual del modelador	270
7.2.1	Objetivos del OVA	271
7.2.2	Especificaciones funcionales	272
7.2.3	Modelo	272
7.2.4	Archivos comprimidos	274
7.2.5	Plantas de experimentación	276
7.2.6	Animaciones	282
7.2.7	Experimentos sugeridos	290

7.2.8	Documentación	292
7.2.9	Ayudas para la documentación	294
7.3	Manual del experimentador	296
III	PLANTAS EXPERIMENTALES, MODELOS Y EXPERIMENTOS	301
8	MOTOR ELÉCTRICO DE CORRIENTE CONTINUA E IMANES PERMANENTES	303
8.1	El modelo	304
8.1.1	Principios físicos	304
8.1.2	Forma constructiva y principio de operación	305
8.1.3	Modelo matemático	309
8.2	Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	312
8.3	La implementación	316
8.3.1	Listado de archivos	317
9	CALENTAMIENTO DE CABLES AÉREOS	319
9.1	El modelo	320
9.1.1	Modelo térmico estático	320
9.1.2	Modelo térmico dinámico	321
9.1.3	Modelo mecánico	323
9.2	Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	327
9.3	La implementación	340
9.3.1	Modelo térmico	341
9.3.2	Modelos mecánico y geométrico	342
9.3.3	Listado de archivos	344
10	EVOLUCIÓN DE ENFERMEDADES	363
10.1	El modelo	364
10.1.1	Modelo SIR	364
10.1.2	Modelo SIR con nacimientos y muertes	366
10.1.3	Modelo SIS	366
10.1.4	Modelo SIR-SI	367
10.1.5	Modelo SIR-SI con dos serotipos	368
10.1.6	Modelo del dengue	370
10.2	Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	373
10.3	La implementación	385
10.3.1	Ejemplo: implementación del modelo SIR	387
10.3.2	Listado de archivos	387

11 TRÁNSITO DE ESTUDIANTES A TRAVÉS DE UN PLAN DE ESTUDIOS	395
11.1 El modelo	396
11.1.1 Modelo reducido	402
11.1.2 Análisis del modelo reducido	402
11.1.3 Evolución del número de estudiantes	403
11.1.4 Número esperado de estudiantes	405
11.1.5 Efecto de los parámetros sobre el número esperado de estudiantes	405
11.1.6 Tiempos de graduación	408
11.1.7 Efecto de los parámetros sobre los tiempos de graduación	411
11.2 Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	413
11.3 La implementación	419
11.3.1 Listado de archivos	420
12 CENTRAL DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA	423
12.1 El modelo	424
12.1.1 Estructura de una central hidroeléctrica y transformaciones de energía	424
12.1.2 El embalse	425
12.1.3 El ducto	427
12.1.4 La turbina	427
12.1.5 El generador	428
12.1.6 Los lazos de control	431
12.1.7 La carga eléctrica	433
12.2 Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	435
12.3 La implementación	439
12.3.1 Listado de archivos	442
13 DINÁMICA DE SISTEMAS. MODELO DEL MUNDO	445
13.1 El modelo	446
13.1.1 Dinámica de sistemas	446
13.1.2 Modelo del mundo	449
13.2 Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	456
13.3 La implementación	461
13.3.1 Listado de archivos	463
14 IDENTIFICACIÓN ALGEBRAICA. MASA DESLIZANTE CON FRICCIÓN	467
14.1 El modelo	468
14.1.1 Primera integración	468

14.1.2	Segunda integración	469
14.1.3	Realizaciones	471
14.2	Plantas de experimentación y experimentos sugeridos	472
14.3	La implementación	476
14.3.1	Listado de archivos	477
A	LICENCIAMIENTO	483
A.1	Traducción no oficial	490
B	ESTRUCTURA DE TABLAS EN LA BASE DE DATOS	499
C	VALORES DE LAS PROPIEDADES DE LAS CLASES DE ADMINISTRACIÓN	505
D	PARÁMETROS DEL TEMA unvlbasic	517
E	VERSIÓN 1.0	533
	BIBLIOGRAFÍA	535

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Circuito de los ejemplos de modelado mediante diversas técnicas	47
Figura 1.2	Circuito de los ejemplos 1.5 y 1.7	63
Figura 1.3	Elementos de un grafo de enlace de potencia	66
Figura 2.1	Estructura del método de simulación de Euler hacia adelante	92
Figura 2.2	Estructura de un simulador numérico para DAEs	93
Figura 2.3	Aplicación del algoritmo de Tarjan al ejemplo 2.6, visualizado con grafos	104
Figura 2.4	Aplicación del algoritmo de Tarjan al ejemplo 2.6, visualizado matricialmente	105
Figura 2.5	Interacción entre variables de sistemas híbridos	115
Figura 2.6	Diagrama de flujo básico de un simulador híbrido	116
Figura 2.7	Simulación de algunos modelos de la parte III	123
Figura 3.1	Diagrama y resultados de simulación para el modelo del ejemplo 3.1	130
Figura 3.2	Conexión de dos componentes Modelica	132
Figura 3.3	Esquema de conexión de varios componentes Modelica	133
Figura 4.1	Interacción de los módulos de la <i>suite</i> OpenModelica	166
Figura 4.2	Captura de pantalla de la consola OMSHELL	167
Figura 4.3	Proceso de compilación, ejecución y visualización con OpenModelica	172
Figura 4.4	Interacción de algunos archivos en una simulación de OpenModelica	179
Figura 4.5	Apariencia de OMNotebook con una implementación del ejemplo 4.2	184
Figura 4.6	Ventanas de OMEdit	185
Figura 4.7	Apariencia de OMEdit con una implementación del ejemplo 4.4	187

Figura 4.8	Apariencia de eclipse con una implementación del modelo del ejemplo 4.2	189
Figura 5.1	Orientación de laboratorios virtuales	196
Figura 5.2	Modelo del aprendizaje de Kolb	212
Figura 6.1	UNVirtualLab como herramienta de aprendizaje	219
Figura 6.2	Archivos en una simulación de UNVirtualLab	220
Figura 6.3	Diagrama UML de actividades de una simulación en UNVirtualLab	221
Figura 6.4	Diagrama UML de casos de uso para el experimentador	226
Figura 6.5	Diagrama UML de casos de uso para el administrador	226
Figura 6.6	Diagrama UML de casos de uso para el administrador. Edición de experimentos	227
Figura 6.7	Diagrama Entidad-Relación de la base de datos	228
Figura 6.8	Módulos para el experimentador	231
Figura 6.9	Módulos para el experimentador avanzado	232
Figura 6.10	Módulos del servidor mínimo	233
Figura 6.11	Módulos del servidor con compilación	233
Figura 6.12	Diagrama UML de implementación. Módulos para el modelador	234
Figura 6.13	Página <i>about</i> . Estructura de bloques y código XML asociado	235
Figura 6.14	Estructura de la interfaz de experimentación	236
Figura 6.15	Estructura de las páginas de administración	238
Figura 6.16	Estructura de la interfaz para embeber el modelo y la documentación	239
Figura 6.17	Diagrama UML de clases	240
Figura 6.18	Diagrama UML de clases de administración	245
Figura 6.19	Diagrama UML de clases de manejo de sesiones	246
Figura 6.20	Anidación CSS	252
Figura 6.21	Anidación CSS para admimistración	252
Figura 6.22	Bloques <i>div</i> principales	253
Figura 6.23	Bloques <i>div</i> principales de administración	253
Figura 6.24	Regiones de las figuras asociadas a un modelo	255
Figura 7.1	Proceso de instalación de UNVirtualLab	259
Figura 7.2	Pantalla de UNVirtualLab para el usuario experimentador	263

Figura 7.3	Pantalla de UNVirtualLab para inicio de sesión de administrador	264
Figura 7.4	Pantalla de UNVirtualLab para el usuario administrador con sesión abierta	264
Figura 7.5	Pantalla de UNVirtualLab, ejemplo de Motor DC	268
Figura 7.6	Proceso iterativo de modelado	270
Figura 7.7	Un ciclo de modelado	271
Figura 7.8	Instrumentos asociados a un experimento	276
Figura 7.9	Gráfico SVG para la animación del ejemplo	290
Figura 8.1	Rotor de un motor DC de imanes permanentes.	303
Figura 8.2	Esquema de una forma constructiva de un motor DC de imanes permanentes	305
Figura 8.3	Líneas de campo magnético en un motor DC de imanes permanentes	306
Figura 8.4	Geometría de una espira	307
Figura 8.5	Fuerzas y torques en una espira	308
Figura 8.6	Fuerza electromotriz inducida en una espira	309
Figura 8.7	Diagrama de un motor DC de imanes permanentes acoplado a una carga mecánica	310
Figura 9.1	Línea de transmisión	319
Figura 9.2	Geometría de la catenaria	324
Figura 9.3	Modelo <i>Catenary</i>	343
Figura 10.1	<i>Aedes aegypti</i>	363
Figura 10.2	Diagrama del modelo SIR	366
Figura 10.3	Diagrama del modelo SIR con nacimientos y muertes	366
Figura 10.4	Diagrama del modelo SI	367
Figura 10.5	Diagrama del modelo SIR-SI	367
Figura 10.6	Diagrama del modelo SIR-SI con dos serotipos de virus	370
Figura 10.8	Diagrama del dengue	372
Figura 11.1	Ceremonia de graduación de ingenieros. Año 1964	395
Figura 11.2	Plan de estudios del modelo mínimo	396
Figura 11.3	Diagrama de flujo para el estado $x_j(k)$	397
Figura 11.4	Respuesta al escalón del modelo. $\alpha = 0,85$ $\beta = 0,03$ $\sigma = 0,01$	404

Figura 11.5	Efecto de la variación de los parámetros sobre el número de estudiantes	407
Figura 11.6	Superficie de población de referencia	408
Figura 11.7	Respuesta al impulso del modelo. $\alpha = 0,85$ $\beta = 0,03$ $\sigma = 0,01$	410
Figura 11.8	Efecto de la variación de los parámetros sobre el tiempo de graduación	412
Figura 12.1	Central hidroeléctrica de Cheoah	423
Figura 12.2	Diagrama esquemático de una central hidroeléctrica	425
Figura 12.3	Casa de máquinas y rotor de la central Hoover	429
Figura 12.4	Diagrama de una máquina sincrónica	430
Figura 12.5	Sistema trifásico de tensiones inducidas en el circuito de armadura	430
Figura 12.6	Circuito equivalente de una máquina sincrónica	432
Figura 12.7	Estrategia de control de generación	433
Figura 12.8	Implementación del modelo de una central hidroeléctrica	440
Figura 12.9	Curva de demanda de potencia	441
Figura 13.1	<i>Model of the World and Gdańsk society</i> de Anton Möeller	445
Figura 13.2	Símbolos empleados en un diagrama de estructuras	448
Figura 13.3	Dinámica general de la población	450
Figura 13.4	Dinámica general del capital	451
Figura 14.1	Masa deslizante	467
Figura 14.2	Diagrama de bloques del proceso de estimación básico	471
Figura 14.3	Diagrama de bloques del proceso de estimación con filtrado de señal	471
Figura 14.4	Esquema de la implementación	479

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	VARIABLES del modelo del ejemplo 1.7	77
Tabla 1.2	Parámetros del modelo del ejemplo 1.7	78
Tabla 2.1	Numeración de ecuaciones y variables en el ejemplo 2.6	102
Tabla 2.2	Ecuaciones y variables del ejemplo 2.6, una vez ordenadas con el algoritmo de Tarjan	103
Tabla 2.3	Ecuaciones de asignación en el ejemplo 2.6	106
Tabla 2.4	Modelos y variables simulados en el ejemplo 2.11	119
Tabla 2.5	Comparación experimental del desempeño de algunos métodos de simulación numérica	120
Tabla 2.6	Comparación experimental del desempeño del método <code>dassl</code>	124
Tabla 2.7	Comparación experimental del desempeño del método <code>euler</code>	125
Tabla 2.8	Comparación experimental del desempeño del método <code>rungekutta</code>	125
Tabla 2.9	Comparación experimental del desempeño del método <code>inline-rungekutta</code>	126
Tabla 2.10	Comparación experimental del desempeño del método <code>dasslwort</code>	126
Tabla 3.1	Paquetes y subpaquetes de la Modelica Standard Library	157
Tabla 4.1	Comandos disponibles más usuales en una sesión interactiva	168
Tabla 4.2	Principales argumentos del comando <code>simulate</code>	169
Tabla 4.3	Métodos de integración disponibles en <code>omc</code>	173
Tabla 5.1	Subtópicos CDIO relacionados directamente con habilidades de experimentación	205
Tabla 5.2	Listado de habilidades CDIO relacionadas con el modelado y la simulación	206

Tabla 5.3	Características de diseño de un ambiente virtual de aprendizaje	210
Tabla 5.4	Niveles de autonomía y tipos de actividad de laboratorio	213
Tabla 6.1	Características de los módulos de la versión 2.0 de UNVirtualLab	232
Tabla 6.2	Funcionalidad de los bloques de UNVirtualLab	237
Tabla 6.3	Clases orientadas al experimentador	242
Tabla 6.3	Clases orientadas al experimentador	243
Tabla 6.3	Clases orientadas al experimentador	244
Tabla 6.4	Tipo de datos válidos para la clase adminblock	247
Tabla 6.5	Clases orientadas al administrador	249
Tabla 7.1	Variables de configuración de UNVirtualLab en el archivo <code>config/unv1config.txt</code>	267
Tabla 7.2	Propiedades de los controles de cada experimento	276
Tabla 7.3	Propiedades de los controles en el ejemplo	280
Tabla 7.4	Ejemplo de implementación de algunos tipos de animación SVG	283
Tabla 7.5	Usos y consideraciones de diseño para actividades de laboratorio	291
Tabla 7.6	Experimentos sugeridos para el ejemplo de la sección 7.2	293
Tabla 7.7	Listado de preguntas frecuentes relativas a UNVirtualLab	296
Tabla 8.1	Parámetros del experimento 1	314
Tabla 8.2	Figuras del experimento 1	315
Tabla 8.3	Animaciones del experimento 1	316
Tabla 8.4	Variables de resultados del experimento 1	316
Tabla 8.5	Archivos del modelo	317
Tabla 9.1	Parámetros del experimento 2	329
Tabla 9.2	Figuras del experimento 2	330
Tabla 9.3	Variables de resultados del experimento 2	330
Tabla 9.4	Parámetros del experimento 3	333
Tabla 9.5	Figuras del experimento 3	333
Tabla 9.6	Variables de resultados del experimento 3	333
Tabla 9.7	Parámetros del experimento 4	336
Tabla 9.8	Figuras del experimento 4	336
Tabla 9.9	Variables de resultados del experimento 4	337

Tabla 9.10	Parámetros del experimento 5	339
Tabla 9.11	Figuras del experimento 5	340
Tabla 9.12	Variables de resultados del experimento 5	340
Tabla 9.13	Parámetros en el registro ConductorData	340
Tabla 9.14	Parámetros en el registro SpanData	341
Tabla 9.15	Parámetros en el registro TimeData	341
Tabla 9.16	Funciones para el modelo térmico	341
Tabla 9.17	Funciones para los modelos mecánico y geométrico	342
Tabla 9.18	Parámetros para la implementación por defecto	344
Tabla 9.19	Archivos del modelo	344
Tabla 10.1	Parámetros del experimento 6	374
Tabla 10.2	Figuras del experimento 6	375
Tabla 10.3	Variables de resultados del experimento 6	376
Tabla 10.4	Parámetros del experimento 7	377
Tabla 10.5	Figuras del experimento 7	377
Tabla 10.6	Variables de resultados del experimento 7	378
Tabla 10.7	Parámetros del experimento 8	380
Tabla 10.8	Figuras del experimento 8	380
Tabla 10.9	Variables de resultados del experimento 8	381
Tabla 10.10	Parámetros del experimento 9	383
Tabla 10.11	Figuras del experimento 9	384
Tabla 10.12	Variables de resultados del experimento 9	385
Tabla 10.13	Archivos del modelo	387
Tabla 11.1	Parámetros del experimento 10	414
Tabla 11.2	Figuras del experimento 10	415
Tabla 11.3	Variables de resultados del experimento 10	416
Tabla 11.4	Parámetros del experimento 11	418
Tabla 11.5	Figuras del experimento 11	418
Tabla 11.6	Variables de resultados del experimento 11	419
Tabla 11.7	Archivos del modelo	420
Tabla 12.1	Parámetros del experimento 12	437
Tabla 12.2	Figuras del experimento 12	438
Tabla 12.3	Animaciones del experimento 12	439
Tabla 12.4	Variables de resultados del experimento 12	439
Tabla 12.5	Archivos del modelo	442

Tabla 13.1	Parámetros del experimento 13	458
Tabla 13.2	Figuras del experimento 13	459
Tabla 13.3	Variables de resultados del experimento 13	460
Tabla 13.4	Obtención de los escenarios de Meadows	462
Tabla 13.5	Archivos del modelo	463
Tabla 14.1	Parámetros del experimento 14	474
Tabla 14.2	Figuras del experimento 14	475
Tabla 14.3	Variables de resultados del experimento 14	475
Tabla 14.4	Archivos del modelo	477
Tabla B.1	Tablas y campos en la base de datos	499
Tabla C.1	Contenido de la propiedad table para las clases de administración	506
Tabla C.2	Contenido del arreglo Fields para las clases de administración	506
Tabla C.3	Contenido del arreglo Relations1N para las clases de administración	511
Tabla C.4	Contenido del arreglo Relations1N1N para las clases de administración	513
Tabla C.5	Contenido del arreglo Relations1NN1 para las clases de administración	515
Tabla D.1	Clases y parámetros CSS. Theme unvlbasic. Archivo style.css	518
Tabla D.2	Valores de los parámetros CSS en el theme unvlbasic en el archivo style.css	522
Tabla D.3	Clases y parámetros CSS. Theme unvlbasic. Archivo styleSVG.css	531
Tabla D.4	Valores de los parámetros CSS en el theme unvlbasic en el archivo styleSVG.css	532

LISTA DE EJEMPLOS

Ejemplo 1.1	Modelado analítico con técnicas específicas de un dominio	49
Ejemplo 1.2	Modelado para simulación con técnicas de un dominio	51
Ejemplo 1.3	Modelado en espacio de estado	54
Ejemplo 1.4	Modelado basado en el lagrangiano	58
Ejemplo 1.5	Modelado con diagramas de bloques	61
Ejemplo 1.6	Modelado con grafos de enlace de potencia	67
Ejemplo 1.7	Modelado orientado a objetos	72
Ejemplo 2.1	Restricciones ocultas	87
Ejemplo 2.2	Índice de diferenciación	89
Ejemplo 2.3	Método de Euler hacia adelante	92
Ejemplo 2.4	Condiciones iniciales consistentes	95
Ejemplo 2.5	Matriz de incidencia	98
Ejemplo 2.6	Algoritmo de Tarjan	101
Ejemplo 2.7	Algoritmo de rasgadura	108
Ejemplo 2.8	Algoritmo de relajación	111
Ejemplo 2.9	Algoritmo de Pantelides	113
Ejemplo 2.10	Ecuaciones <i>stiff</i>	118
Ejemplo 2.11	Desempeño de los métodos numéricos de simulación	118
Ejemplo 3.1	Simulación de un modelo Modelica	130
Ejemplo 3.2	Ejemplo mínimo	131
Ejemplo 3.3	Conexión de componentes	133
Ejemplo 3.4	Conectores	134
Ejemplo 3.5	Clases e instancias	136
Ejemplo 3.6	Jerarquía de clases	139
Ejemplo 3.7	Multidominio	141
Ejemplo 3.8	Acausalidad	143
Ejemplo 3.9	Causalidad	145
Ejemplo 3.10	Modelo discreto	147
Ejemplo 3.11	Modelo híbrido	148
Ejemplo 3.12	Funciones externas	150
Ejemplo 3.13	Documentación textual y gráfica	152
Ejemplo 3.14	Librerías	153
Ejemplo 4.1	Interpretación de comandos Modelica	168

Ejemplo 4.2	Definición en línea de modelos Modelica	169
Ejemplo 4.3	Uso de librerías y modelos externos	171
Ejemplo 4.4	Traducción de código Modelica	173
Ejemplo 4.5	Generación de código C a partir de un archivo simple	177
Ejemplo 4.6	Generación de código C a partir de un archivo que usa la librería Modelica	177
Ejemplo 4.7	Instrucciones Modelica	178
Ejemplo 4.8	Archivo de entrada	180
Ejemplo 4.9	Archivo de resultados en formato csv	182
Ejemplo 4.10	Archivo de resultados en formato plt	182
Ejemplo 4.11	OMNotebook	183
Ejemplo 4.12	OMEdit	186
Ejemplo 4.13	El <i>plugin</i> MDT para Eclipse	188
Ejemplo 7.1	Objetivos de aprendizaje	271
Ejemplo 7.2	Especificaciones funcionales	272
Ejemplo 7.3	Modelado	273
Ejemplo 7.4	Preparación de archivos	275
Ejemplo 7.5	Planta de experimentación	279
Ejemplo 7.6	Animación 2D	289
Ejemplo 7.7	Experimentos sugeridos	292
Ejemplo 7.8	Documentación	294
Ejemplo 7.9	Ayuda para la generación de documentación	296

LISTA DE ARCHIVOS

1.1	LLC/LLC.mo	73
1.2	LLC/LLCextends.mo	75
2.1	rc.mo	101
3.1	primerOrden.mo	131
3.2	rc.mo	134
3.3	LossyGearDemo1.mo	138
3.4	bloquesMath.mo	140
3.5	duffing1.mo	144
3.6	duffing2.mo	144
3.7	duffing3.mo	145
3.8	gTest1.mo	146
3.9	gTest2.mo	146
3.10	discreto.mo	148
3.11	hibrido.mo	149
3.12	selector.mo	150
3.13	extSelector.c	151
3.14	rcOMedit.mo	152
3.15	osciladores/package.mo	154
3.16	oscTest.mo	154
4.1	rc.mo	174
4.2	rc.c	175
4.3	test.mo	177
4.4	rc.mo	178
4.5	rc.mos	178
7.1	DCmotor.mo	274
7.2	figs/ejeSvg/ejemploBase.svg	284
7.3	figs/ejeSvg/ejemploMueveX.svg	284
7.4	figs/ejeSvg/ejemploMueveY.svg	285
7.5	figs/ejeSvg/ejemploMotion.svg	285
7.6	figs/ejeSvg/ejemploHeight.svg	286
7.7	figs/ejeSvg/ejemploWidth.svg	286
7.8	figs/ejeSvg/ejemploRota.svg	287

7.9	figs/ejeSvg/ejemploRotaPunto.svg	288
7.10	figs/ejeSvg/ejemploColor.svg	288
7.11	figs/ejeSvg/ejemploTextoBase.svg	289
7.12	figs/ejeSvg/ejemploTexto.svg	289
8.1	DCmotor.mo	317
9.1	AirConductivity.mo	345
9.2	AirDensity.mo	345
9.3	AirViscosity.mo	346
9.4	AngleFactor.mo	346
9.5	Catenary.mo	347
9.6	CatenaryLenght.mo	348
9.7	CatenarySa.mo	348
9.8	CatenarySag.mo	348
9.9	CatenaryStateChange.mo	349
9.10	CatenaryX.mo	349
9.11	CatenaryXbar.mo	349
9.12	Conductor.mo	349
9.13	ConductorData.mo	350
9.14	ConvectionFlow.mo	350
9.15	ConvectionHeatFlow.mo	351
9.16	Curve.mo	351
9.17	DynamicCurve.mo	352
9.18	ElectricalCatenary.mo	353
9.19	FilmTemperature.mo	353
9.20	ForcedConvection.mo	353
9.21	ForcedConvectionHigh.mo	354
9.22	ForcedConvectionLow.mo	355
9.23	MyElectricalLine.mo	355
9.24	MyStandAloneLine.mo	356
9.25	NaturalConvection.mo	356
9.26	Rating.mo	357
9.27	SagAnalysis.mo	358
9.28	SolarAltitude.mo	358
9.29	SolarAzimuth.mo	359
9.30	SolarFlux.mo	360
9.31	SolarHeatFlow.mo	360
9.32	SpanData.mo	361

9.33	StandAloneCatenary.mo	361
9.34	StandAloneHeatingResistor.mo	361
9.35	TimeData.mo	361
9.36	asinh.mo	362
9.37	package.mo	362
10.1	SIR.mo	388
10.2	SIRn.mo	388
10.3	SIS.mo	389
10.4	compartimento.mo	389
10.5	dengue.mo	391
10.6	dosserotipos.mo	391
10.7	humano.mo	392
10.8	interaccion.mo	393
10.9	package.mo	393
10.10	vector.mo	394
11.1	asignatura.mo	420
11.2	ingresoConstante.mo	421
11.3	ingresoPulso.mo	421
11.4	package.mo	421
11.5	plan.mo	422
12.1	HidroPI.mo	444
13.1	MyWorld3.mo	466
14.1	identificador.mo	478
14.2	identificadorBase.mo	478
14.3	identificadorFriccion.mo	478
14.4	idmasa.mo	478
14.5	masa.mo	480
14.6	ext_initRandNormal.c	480
14.7	ext_RandNormal.c	481

LISTA DE EXPERIMENTOS Y PRÁCTICAS

Planta de experimentación 1. Motor eléctrico DC de imanes permanentes		312
Experimento 1.1	Segunda ley de Newton de la rotación	313
Experimento 1.2	Tiempo de asentamiento de la velocidad angular	313
Experimento 1.3	Velocidad angular estacionaria	313
Experimento 1.4	Efectos de la carga mecánica en el circuito eléctrico	314
Experimento 1.5	Simulación de dispositivos	314
Experimento 1.6	Suma de potencias	314
Planta de experimentación 2. Calentamiento de un cable aéreo desnudo		327
Experimento 2.1	Tiempos de respuesta	328
Experimento 2.2	Fuentes de calentamiento y enfriamiento	328
Experimento 2.3	Ubicación geográfica	328
Experimento 2.4	Estaciones	328
Experimento 2.5	Margen de cargabilidad	329
Planta de experimentación 3. Capacidad de carga		331
Experimento 3.1	Efecto de las condiciones ambientales	332
Experimento 3.2	Condición límite	332
Experimento 3.3	Capacidad horaria	332
Experimento 3.4	Capacidad de carga por flecha	332
Planta de experimentación 4. Análisis de flecha		334
Experimento 4.1	Flecha vs temperatura de conductor	334
Experimento 4.2	Análisis de sensibilidad	335
Experimento 4.3	Aproximaciones de línea recta	335
Experimento 4.4	Efecto del conductor	335
Experimento 4.5	Efecto del vano	335
Planta de experimentación 5. Catenaria		337
Experimento 5.1	Robustez del algoritmo	338
Experimento 5.2	Condiciones de tendido	338
Experimento 5.3	Longitudes	338
Experimento 5.4	Tipos de conductor	338
Experimento 5.5	Calibre	339

Planta de experimentación 6. Modelo Susceptible-Infectado-Recuperado		373
Experimento 6.1	Estado estacionario	373
Experimento 6.2	Tiempos de respuesta	373
Experimento 6.3	Infección máxima	374
Experimento 6.4	Tiempo de infección máxima	374
Planta de experimentación 7. Modelo Susceptible-Infectado-Recuperado con nacimientos		376
Experimento 7.1	Frecuencia	376
Experimento 7.2	Linealización S-R	376
Experimento 7.3	Infección mínima	377
Planta de experimentación 8. Modelo Susceptible-Infectado-Susceptible		379
Experimento 8.1	Estado estacionario	379
Experimento 8.2	Tiempos de respuesta	379
Experimento 8.3	Nacimientos y muertes	380
Planta de experimentación 9. Modelo SIR para humanos y SI con dos cepas para mosquito		381
Experimento 9.1	Tiempos de vida	381
Experimento 9.2	Poblaciones iniciales	382
Experimento 9.3	Infección máxima	382
Experimento 9.4	Entrada del serotipo 2	382
Experimento 9.5	Modelo del dengue	382
Experimento 9.6	Una única cepa	383
Planta de experimentación 10. Respuesta al escalón		413
Experimento 10.1	Número estable de estudiantes	413
Experimento 10.2	Tiempo de estabilización	413
Experimento 10.3	Condiciones equivalentes de referencia	414
Experimento 10.4	Ingresos vs traslados	414
Experimento 10.5	Poblaciones por semestre	414
Planta de experimentación 11. Respuesta al impulso		416
Experimento 11.1	Tiempo medio de graduación	417
Experimento 11.2	Dispersión del tiempo de graduación	417
Experimento 11.3	Tasa de graduación	417
Experimento 11.4	Traslados	417
Experimento 11.5	Condiciones equivalentes de referencia	418

Planta de experimentación 12. Central hidroeléctrica con control PI de frecuencia		435
Experimento 12.1	Control de frecuencia	435
Experimento 12.2	Efecto de la demanda	436
Experimento 12.3	Embalse	436
Experimento 12.4	Planta sin control de frecuencia	436
Experimento 12.5	Oscilaciones de frecuencia	436
Experimento 12.6	Planta con control proporcional	437
Planta de experimentación 13. World3		456
Experimento 13.1	Recursos disponibles	456
Experimento 13.2	Eficiencia en la obtención de recursos no renovables	456
Experimento 13.3	Control de la contaminación	457
Experimento 13.4	Obsolescencia tecnológica	457
Experimento 13.5	Escenarios de Meadows	457
Experimento 13.6	Sensibilidad y robustez	457
Planta de experimentación 14. Masa con fricción		472
Experimento 14.1	Ruido en las mediciones	472
Experimento 14.2	Estímulo	472
Experimento 14.3	Fricción	473
Experimento 14.4	Reinicio de la identificación	473
Experimento 14.5	Filtrado de señales	473
Experimento 14.6	Filtrado de mediciones	473
Experimento 14.7	Tiempo mínimo de identificación	473

