

Lenguajes de Modelado para Sistemas Híbridos de Control

Alfonso Urquía

Departamento de Informática y Automática
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
Madrid, España
aurquia@dia.uned.es
<http://www.euclides.dia.uned.es/>

CIMS³, Universidad de Buenos Aires, Dic. 2016

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de
Modelado

Entornos de
modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Índice

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

- Introducción
- Modelado Orientado a Objetos
- Lenguajes de Modelado
- Entornos de Modelado
- Introducción al lenguaje Modelica
- Algunas líneas de investigación
- Lecturas

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de
Modelado

Entornos de
modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Introducción

Ciudades eficientes y Control de procesos

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Ciudad eficiente o “inteligente” - Numerosos sistemas interconectados en las áreas de transporte de personas y bienes, distribución de energía y agua, servicios de atención sanitaria y seguridad, etc.

- Despliegue de redes de sensores y actuadores
- Algoritmos para optimización, control y soporte a la decisión en tiempo real
 - Transporte/logística eficiente
 - Red eficiente de suministro de agua
 - Red eficiente de energía
 - Producción eficiente de bienes
 - Servicios (sanitarios, seguridad, etc.) eficientes
 - Etc.

Metodología Plantear un modelo matemático adecuado al propósito del estudio y estudiarlo empleando métodos numéricos.

Algunas aplicaciones:

- Profundizar en la **comprensión** del sistema, al permitir el estudio de su comportamiento aislando determinados efectos, y eliminando o introduciendo perturbaciones
- **Diseño** del sistema (p.e., dimensionado de componentes)
- Optimizar la **operación** de la planta
 - analizar diferentes condiciones de operación y estrategias de control, mecanismos de arranque y parada, situaciones y procedimientos de emergencia, etc.
 - simuladores de entrenamiento

M&S en Control de procesos

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

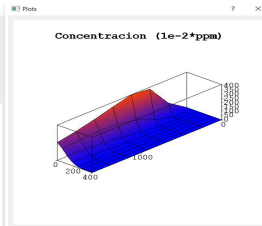
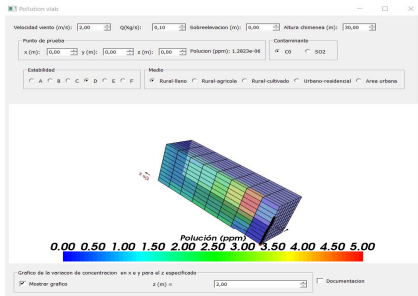
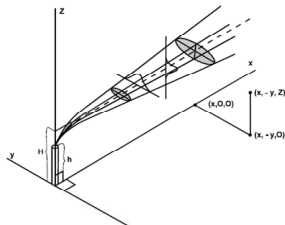
Modelica

Investigación

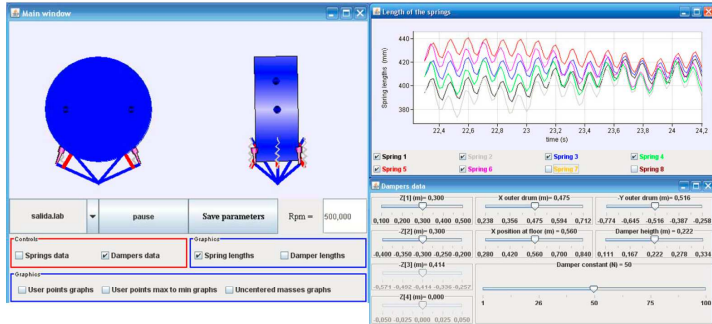
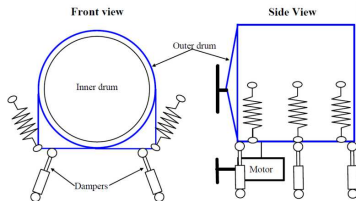
Lecturas



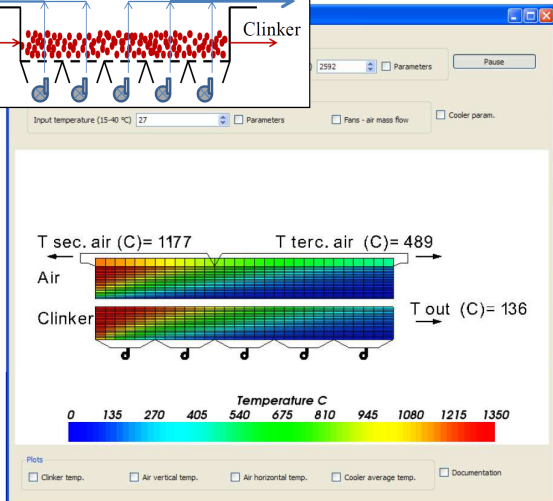
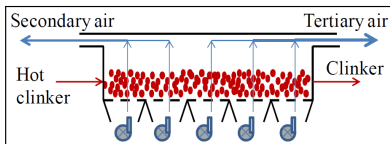
Etc.



M&S en Control de procesos



M&S en Control de procesos



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Modelado Orientado a Objetos

Modelado Orientado a Objetos

Índice

Introducción

Modelado OO

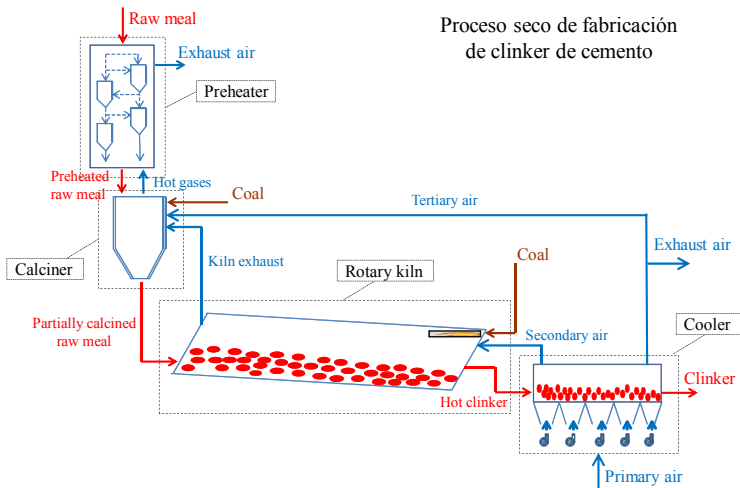
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Modelado Orientado a Objetos

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

- **Modularidad**

La metodología del modelado modular facilita:

- ❶ Describir cada submodelo independientemente de los otros.
- ❷ Conectar los submodelos.
- ❸ **Abstracción** = capacidad de usar un submodelo sin conocer sus detalles internos.

- **Interfaz / Descripción interna**

Distinguir entre la interfaz y la descripción interna facilita la abstracción.

- La *interfaz* describe la interacción entre el modelo y su entorno.
- La *descripción interna* contiene la información sobre la estructura y el comportamiento del modelo.

- **Encapsulado de la información**

= sólo las variables de la interfaz son accesibles desde otros modelos.

Modelado Orientado a Objetos

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

- **Modelado jerárquico**
Descripción del modelo progresando de menor a mayor nivel de detalle.
El modelo es dividido en submodelos, y estos son divididos en sub-submodelos, y así sucesivamente.
- **Clase e instancia de la clase**
 - Clase = descripción de un conjunto de objetos con propiedades similares.
Los modelos son representados mediante clases (un modelo describe un tipo de sistema).
 - La simulación se realiza sobre una instancia del modelo.

Modelado Orientado a Objetos

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

- Dos modos de reutilizar las clases:
 - **Composición**
Capacidad de definir nuevos modelos conectando modelos previamente definidos
 - **Especialización**
Capacidad de definir un nuevo modelo mediante “refinamiento” (añadiendo nuevos componentes o ecuaciones) de otros modelos definidos previamente. Por ejemplo, mediante herencia.

Modelado Orientado a Objetos

Índice

Introducción

Modelado OO

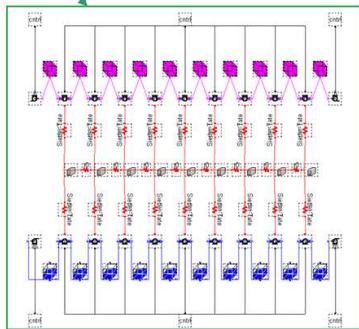
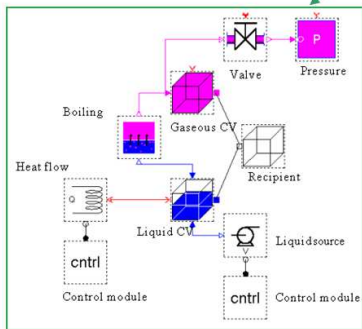
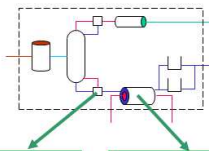
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Lenguajes de Modelado

Lenguajes de Modelado

- Paradigma del modelado físico.
 - 1 Definición de la estructura del sistema y división del sistema en subsistemas.
 - 2 Definición de la interacción entre los subsistemas.
 - 3 Descripción del comportamiento interno de cada subsistema, independientemente de los demás, en términos de balances de masa, energía y momento, etc.
- Modelo formulado como sistema **DAE híbrido**.
 - Ecuaciones diferenciales ordinarias respecto al tiempo y algebraicas, que pueden cambiar en los eventos.
 - Algoritmos.
 - Eventos en el estado y en el tiempo.
- Describir comportamiento empleando ecuaciones = **modelado no causal**.
- Modelado orientado a objetos.
- Entornos de modelado ...

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de
Modelado

**Entornos de
modelado**

Modelica

Investigación

Lecturas

Entornos de modelado

Análisis y Manipulaciones simbólicas

Índice

Introducción

Modelado OO

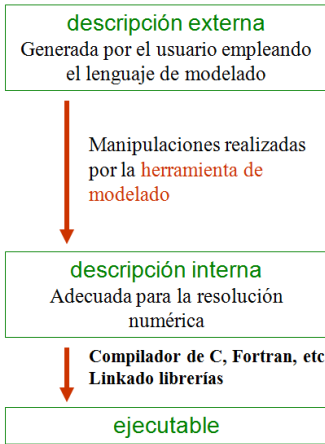
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



La descripción interna del modelo contiene:

- La descripción plana del conjunto de ecuaciones del modelo, simplificadas, ordenadas y manipuladas simbólicamente.
- Información relativa a la resolución numérica (por ejemplo, cuáles son las variables de estado, cómo deben cortarse los lazos algebraicos no lineales, etc.) y a los métodos numéricos a emplear.

Análisis y Manipulaciones simbólicas

Índice

Introducción

Modelado OO

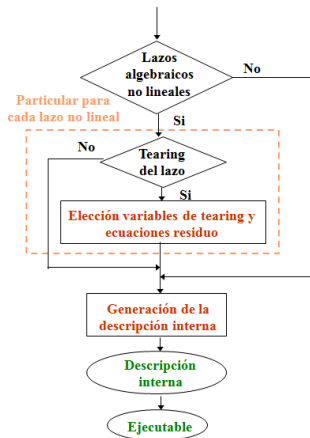
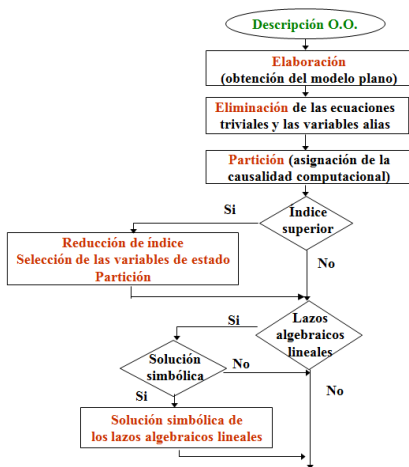
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

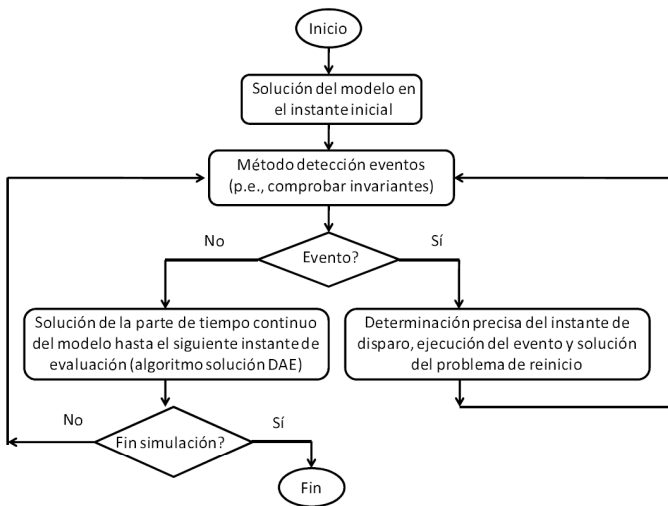
Modelica

Investigación

Lecturas



Simulación de modelos DAE híbridos



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

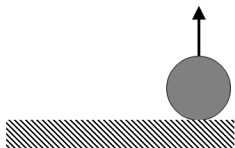
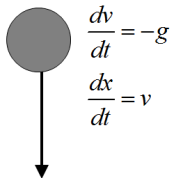
Modelica

Investigación

Lecturas

Simulación de modelos DAE híbridos

Caída libre de una pelota, con rebote en el suelo



Condición de disparo del evento: $x < 0$

Acción: $v_{despues} = -c \cdot v_{antes}$

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Simulación de modelos DAE híbridos

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

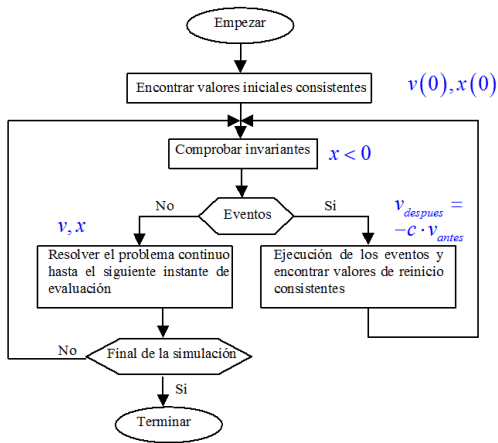
Lecturas

Resolución del problema de tiempo continuo

$$\left[\frac{dv}{dt} \right] = -g$$

$$\left[\frac{dx}{dt} \right] = v$$

$$\frac{dx}{dt}, \frac{dv}{dt} \xrightarrow{\text{integración numérica}} x, v$$



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Modelica

Evolución del lenguaje Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

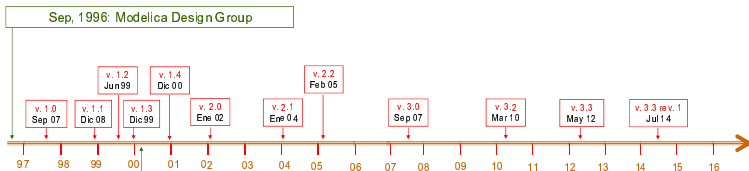
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Modelica International Conferences

1. Oct'00, Lund (Suecia)
2. Mar'02, Oberpfaffenhofen (Alemania)
3. Nov'03, Linköping (Suecia)
4. Mar'05, Hamburg-Harburg (Alemania)
5. Sep'06, Viena (Austria)
6. Mar'08, Bielefeld (Alemania)
7. Sep'09, Como (Italia)
8. Mar'11, Dresden (Alemania)
9. Sep'13, Munich (Alemania)
10. Mar'14, Lund (Suecia)
11. Sep'15, Versailles (Francia)
12. May'17, Praga (República Checa)

Algunas características

- Gratuito
- Orientado a objetos
- Concebido para describir modelos DAE híbridos
 - Ecuaciones (posiblemente con estructura variable)
 - algebraicas
 - diferenciales ordinarias respecto al tiempo
 - en diferencias
 - Algoritmos, funciones
 - Eventos en el tiempo y en el estado
- Existe un número considerable de librerías dominios eléctrico, mecánico, termohidráulico, químico, formalismos de eventos discretos, ...

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Entornos de modelado de Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Comerciales

- Dymola (hay una versión gratuita con capacidades limitadas)
- MathModelica System Designer
- SimulationX (hay versiones de estudiante y de evaluación)
- Etc.

Gratuitas

- OpenModelica
- Scilab/Scicos
- Etc.

<http://www.modelica.org/tools>

Las 7 clases

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

type	Nuevos tipos de variables
connector	Conjunto de variables de la interfaz
model	Clases de modelos
block	Modelos con interfaces causales
record	Conjuntos de parámetros
function	Funciones
package	Librerías (conjuntos de clases)

Modelo atómico de tiempo continuo

Índice

Introducción

Modelado OO

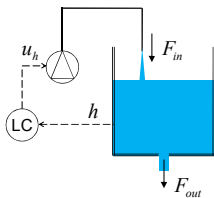
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Magnitudes

m	masa de líquido, [kg]
h, h_{ref}	nivel de líquido y consigna, [m]
e	error = $h_{ref} - h$, [m]
F_{in}, F_{out}	flujos máxicos de líquido, [kg/s]
a	área del orificio en la base, [m ²]
A	área de la base del depósito, [m ²]
k_f	parámetro de la fuente, [kg/(s·V)]
k_p	parámetros del controlador, [V/m]
g	aceleración gravitatoria, [m/s ²]
ρ	densidad del líquido, [kg/m ³]
u_h	voltaje de salida controlador, [V]

Comportamiento

$$\frac{dm}{dt} = F_{in} - F_{out}$$
$$m = \rho \cdot A \cdot h$$
$$F_{out} = a \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$
$$F_{in} = \max(0, k_f \cdot u_h)$$
$$e = h_{ref} - h$$
$$u_h = k_p \cdot e$$

Variabilidad

• Variables:

$$m, h, e, F_{in}, F_{out}, u_h$$

• Parámetros:

$$h_{ref}, a, A, k_f, k_p, \rho$$

• Constantes:

$$g$$

model depositoP

```
Real m(start=1e3, fixed=true), h, Fout, Fin, uh, e;  
parameter Real a=0.1, A=2, kf=100, kp=40, href=2, rho=760;  
constant Real g=9.81;  
equation  
  der(m) = Fin - Fout;  
  m = rho*A*h;  
  Fout = a*rho*sqrt(2*g*h);  
  Fin = max(0, kf*uh);  
  e = href - h;  
  uh = kp*e;  
end depositoP;
```

Sentencia if en sección equation

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

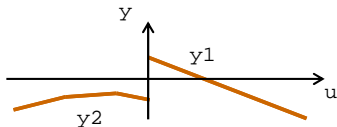
Investigación

Lecturas

$\langle \text{expr1} \rangle = \text{if } \langle \text{Condición_Booleana} \rangle \text{ then } \langle \text{expr2} \rangle \text{ else } \langle \text{expr3} \rangle;$

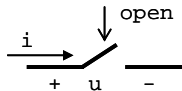
Ejemplo:

$y = \text{if } u > 0 \text{ then } y1 \text{ else } y2;$

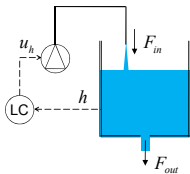


Ejemplo: interruptor ideal

$0 = \text{if } \text{open} \text{ then } i \text{ else } u;$



Sentencia if en sección equation



$$\frac{dm}{dt} = F_{in} - F_{out}$$

$$m = \rho \cdot A \cdot h$$

$$F_{out} = a \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

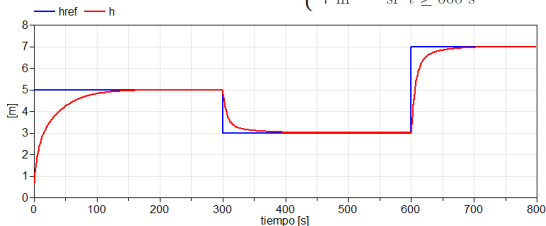
$$F_{in} = \text{máx}(0, k_f \cdot u_h)$$

$$e = h_{ref} - h$$

$$\frac{dI}{dt} = e$$

$$u_h = k_p \cdot e + \frac{1}{k_I} \cdot I$$

$$h_{ref} = \begin{cases} 5 \text{ m} & \text{si } t < 300 \text{ s} \\ 3 \text{ m} & \text{si } 300 \text{ s} \leq t < 600 \text{ s} \\ 7 \text{ m} & \text{si } t \geq 600 \text{ s} \end{cases}$$



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Sentencia if en sección equation

```
model depositoPI
import SI = Modelica.SIunits;
import Modelica.Math.*;
parameter SI.Area a=0.1 "Seccion del agujero";
parameter SI.Area A=2 "Sección del depósito";
SI.Height e "href-h, calculado en el controlador";
SI.MassFlowRate Fin "Flujo masico de entrada al deposito";
SI.MassFlowRate Fout "Flujo masico de salida del deposito";
constant SI.Acceleration g=9.81 "Aceleración gravitatoria";
SI.Height h "Nivel en el deposito";
SI.Height href "Consigna para el nivel";
Real I(unit="m.s", start=0, fixed=true) "Integral del error";
parameter Real kf(unit="kg/(s.V)") = 100 "Parámetro de la fuente";
parameter Real kI(unit="m.s/V") = 15 "Parám. integral controlador";
parameter Real kP(unit="V/m") = 2 "Parám. proporcional controlador";
SI.Mass m(start=1e3, fixed=true) "Masa de líquido en el depósito";
SI.Voltage uh "Voltaje de salida del controlador";
parameter SI.Density rho=760 "Densidad del líquido";
equation
der(m) = Fin - Fout;
m = rho*A*h;
Fout = a*rho*sqrt(2*g*h);
Fin = max(0, kf*uh);
e = href - h;
der(I) = e;
uh = kP*e + I/kI;
href = if time < 300 then 5 else if time < 600 then 3 else 7;
end depositoPI;
```

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Cláusula when en sección equation

```
when condición_Booleana then
    varTiempoDiscreto = expresión;
    reinit( varEstadoTiempoContinuo, expresión );
    ...
end when;
```

- El cuerpo de la cláusula se ejecuta cuando la condición Booleana cambia *false* \rightarrow *true*
- El cuerpo de la cláusula está compuesto de:
 - asignaciones a variables de tiempo discreto
 - sentencias reinit
- El orden en que se escriban las asignaciones y las sentencias reinit es indiferente (el orden no importa).
- Regla de asignación única.

Cláusula when en sección equation

Funciones `pre`, `sample`, `initial` y `terminal`

↓ Eventos: `instanteInicial + n*periodo`

```
when sample(instanteInicial, periodo) then  
    x = a*pre(x) + b*u;  
    y = c*pre(x) + d*u;  
end when;
```

```
when initial() then  
    ...  
end when;
```

```
when terminal() then  
    ...  
end when;
```

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

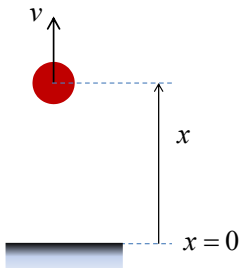
Modelica

Investigación

Lecturas

Cláusula when en sección equation

MOVIMIENTO VERTICAL 1-D



Modelo de tiempo continuo

$$\frac{dv}{dt} = -g$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

$$g = -9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

(aceleración gravitatoria)

Evento

Rebote:

$$(v) \rightarrow (-0.8 \cdot v)$$

Simule durante 10 s el movimiento de la pelota.

Use dos condiciones iniciales diferentes:

$$\{x(0) = 10 \text{ m}, v(0) = 0\} \text{ y } \{x(0) = 0, v(0) = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}\}.$$

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Cláusula when en sección equation

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

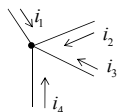
Modelica

Investigación

Lecturas

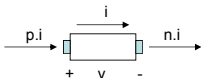
```
model pelotal
  Modelica.SIunits.Distance x(start=10, fixed=true);
  Modelica.SIunits.Velocity v(start=0, fixed=true);
  parameter Real c = 0.8 "Coef. rebote elástico";
  parameter Modelica.SIunits.Acceleration g = 9.8;
equation
  der(v) = -g;
  der(x) = v;
  when x <= 0 then
    reinit(v, -c*v);
  end when;
end pelotal;
```

Composición y herencia



$$v_1 = v_2 = v_3 = v_4$$
$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

```
connector Pin
  Real v;
  flow Real i;
end Pin;
```



```
partial model OnePort
  Pin p, n;
protected
  Real v;
  Real i;
equation
  v = p.v - n.v;
  i = p.i;
  i = -n.i;
end OnePort;
```

```
model Resistor "Ideal resistor"
  extends OnePort;
  parameter Real R(unit="Ohm");
equation
  v - R*i = 0;
end Resistor;
```

```
model Capacitor "Ideal capacitor"
  extends OnePort;
  parameter Real C(unit="F");
equation
  C*der(v) - i = 0;
end Capacitor;
```

```
model VSourceAC "AC Voltage source"
  extends OnePort;
  parameter Real VA=220 "Amplitude";
  parameter Real f(unit="Hz")=50 "Freq.";
  constant Real PI = 3.1415;
equation
  v - VA*sin(2*PI*f*time) = 0;
end VSourceAC;
```

```
model Ground
  Pin p;
equation
  p.v = 0;
end Ground;
```

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Composición y herencia

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

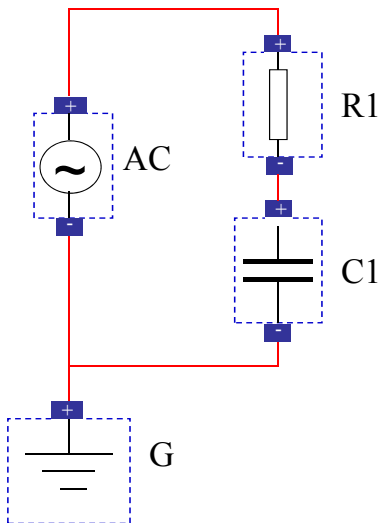
Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

```
model Circuit
  Resistor      R1(R=10);
  Capacitor     C1(C=0.1);
  VSourceAC    AC;
  Ground       G;
equation
  connect (AC.p, R1.p);
  connect (R1.n, C1.p);
  connect (C1.n, AC.n);
  connect (AC.n, G.p);
end Circuit;
```



Otras características

- Inicialización del modelo
- Selección de las variables de estado
- Variables y ecuaciones vectoriales y matriciales
- Modelos con estructura regular (vectores de clases)
- Algoritmos
- Funciones y funciones externas
- Parámetros
 - Valor de variables independientes del tiempo
 - Clase de los objetos
- Records (conjuntos de parámetros)
- Campos físicos
- annotation (documentación, ícón, diagrama, etc.)
- Lenguaje de script de Modelica (experimentos)

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de
Modelado

Entornos de
modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Investigación

P-DEVS, SIMAN, Arena ... en Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

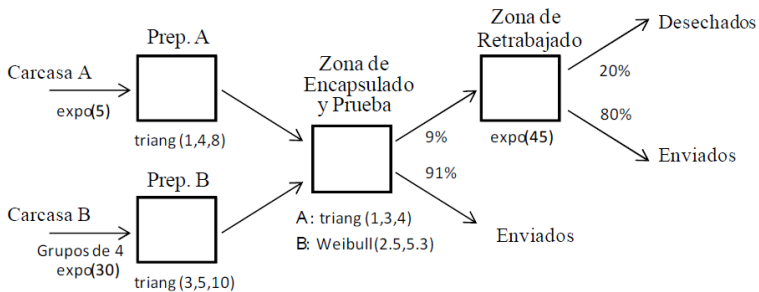
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

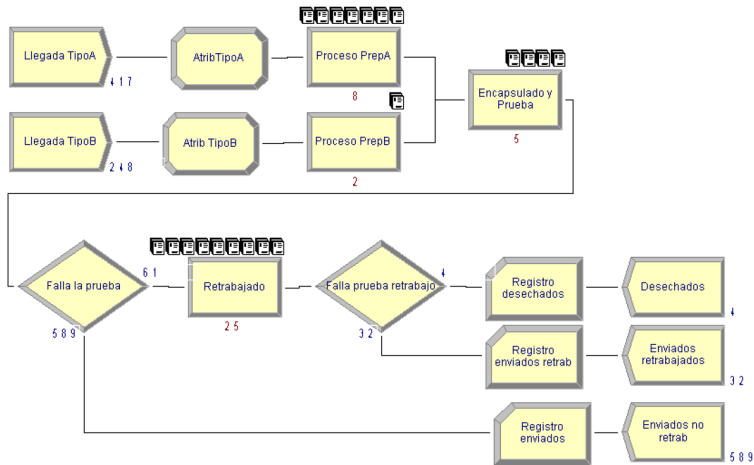
Modelica

Investigación

Lecturas



P-DEVS, SIMAN, Arena ... en Modelica



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Conexión entre componentes

- Modelica - Conservación de la energía
- DEVS, SIMAN, Arena, ... - Paso de mensajes

Limitaciones de Modelica (no fue concebido para eso!)

- No permite la transmisión simultánea de varios mensajes de un puerto a otro.
- No permite conectar múltiples puertos de salida a un mismo puerto de entrada y transmitir mensajes simultáneos.
- La estructura de la información transmitida es fija. Está determinada por el número de variables del conector.
- No permite describir estructuras de datos de tamaño variable.

Soluciones probadas

- **Transmisión directa**, incluyendo en el conector las variables necesarias para describir el mensaje. Esta solución no permite la recepción simultánea de varios mensajes a través de un mismo puerto de entrada.
- Almacenamiento en **fichero de texto**, usando éste como espacio intermedio de almacenamiento para los mensajes recibidos. Operaciones I/O a fichero ralentizan ejecución.
- Almacenamiento en **memoria dinámica**.

Conceptos

- **Mensaje** - unidad de información transmitida.
- **Buffer** - estructura de datos para almacenar los mensajes.
- **Canal** - relación entre el buffer en la fuente y en el destino.

P-DEVS, SIMAN, Arena ... en Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



P-DEVS, SIMAN, Arena ... en Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

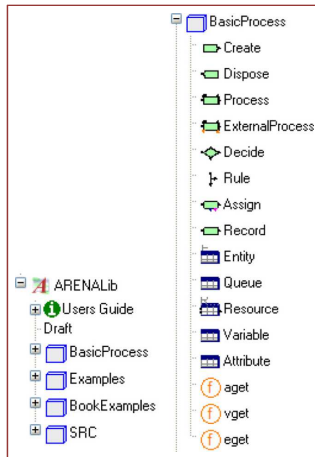
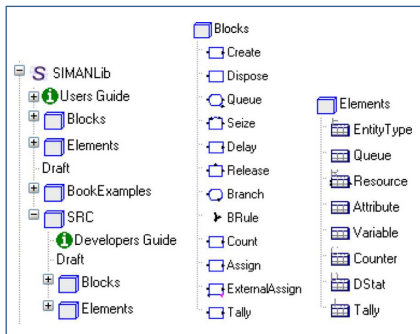
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Autómatas celulares en Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Modelica no fue concebido para modelar PDE.

Los sistemas dependientes de las coordenadas espaciales pueden modelarse como **autómatas celulares**.

Ventaja

- Algoritmo de la simulación conceptualmente simple.

Dificultades

- Muchas ecuaciones → traducción lenta, ejecutable voluminoso.
- Largas cadenas de eventos → simulación lenta (solución del problema de reinicio del modelo completo tras cada evento).

Autómatas celulares en Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Librería CellularAutomataLib2

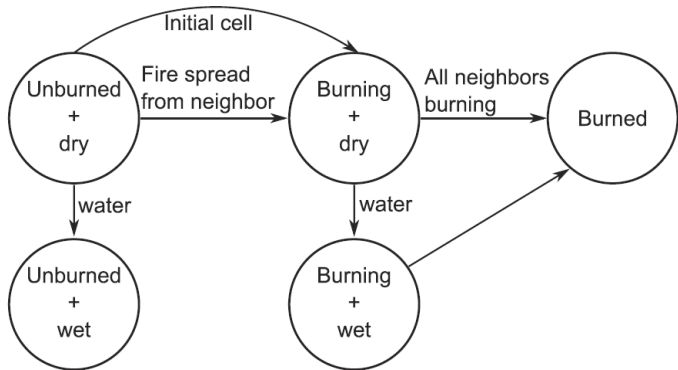
Programada usando funciones externas en C.

El código del autómatas es compilado junto con el código generado por el entorno de modelado, pero no interviene en la traducción del modelo.

Ventajas

- Se reduce el tiempo que emplea el entorno de modelado en la traducción.
- El código C generado es menos voluminoso.
- La simulación es más eficiente.

Autómatas celulares en Modelica



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Autómatas celulares en Modelica

Índice

Introducción

Modelado OO

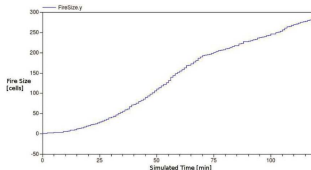
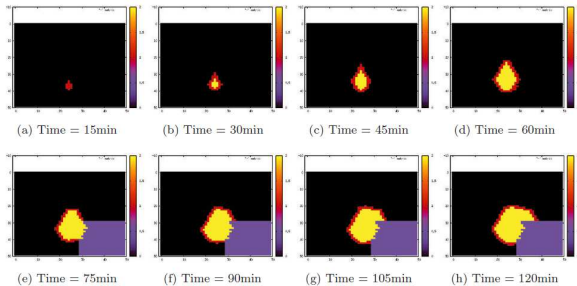
Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas



Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de
Modelado

Entornos de
modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

Lecturas introductorias

- K.J. Astrom, H. Elmqvist, S.E. Mattsson (1998). [Evolution of continuous-time modeling and simulation](#). 12th European Simulation Multiconference.
- Modelica Association (2000). [Modelica tutorial, ver. 1.4](#).
- S.E. Mattsson, H. Olsson, H. Elmqvist (2000). [Dynamic selection of states in Dymola](#). Modelica Workshop.
- S.E. Mattsson, H. Elmqvist, M. Otter, H. Olsson (2002). [Initialization of hybrid differential-algebraic equations in Modelica 2.0](#). 2nd Intl. Modelica Conference.
- M. Otter, H. Olsson (2001). [New features in Modelica 2.0](#). 2nd Intl. Modelica Conference.

Algunos libros

Índice

Introducción

Modelado OO

Lenguajes de Modelado

Entornos de modelado

Modelica

Investigación

Lecturas

- F. Cellier, E. Kofman (2006). [Continuous system simulation](#). Springer.
- P. Fritzson (2014). [Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3](#). Wiley.
- M. Tiller (2001). [Introduction to physical modeling with Modelica](#). Kluwer Academic Press.
- A. Urquía, C. Martín-Villalba (2016). [Métodos de simulación y modelado](#). Editorial UNED.