

# Conversión de modelos PowerDEVS al lenguaje Modelica

Tesina de grado para la obtención del  
grado de Licenciado en Ciencias de la  
Computación

*Tesinista :*  
Luciano Andrade

*Director :*  
Federico Bergero

*Co-Director:*  
Ernesto Kofman



10 de diciembre de 2015

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Organización del trabajo . . . . .	5
1.3. Trabajo relacionado . . . . .	5
<b>2. Conceptos Previos</b>	<b>7</b>
2.1. Modelado y Simulación . . . . .	8
2.1.1. Sistemas Continuos y Discretos . . . . .	8
2.1.2. Métodos de integración numérica . . . . .	8
2.2. Un ejemplo . . . . .	9
2.3. Modelica . . . . .	10
2.4. Métodos de integración QSS . . . . .	11
2.5. $\mu$ -Modelica . . . . .	13
2.6. Stand-Alone QSS solver . . . . .	13
2.7. Formalismo DEVS . . . . .	15
2.7.1. Atómicos . . . . .	15
2.7.2. Acoplados . . . . .	17
2.7.3. Modelos DEVS parametrizados . . . . .	20
2.7.4. Modelos Vectoriales . . . . .	20
2.8. PowerDEVS . . . . .	21
<b>3. Conversión de modelos DEVS</b>	<b>24</b>
3.1. Modelos DEVS . . . . .	25
3.1.1. Archivos PDS . . . . .	25
3.2. Modelos Atómicos . . . . .	28
3.2.1. Modelos Continuos . . . . .	28
3.2.2. Modelos Discontinuos . . . . .	28
3.2.3. Protocolo . . . . .	29
3.3. Modelos Acoplados Planos . . . . .	32
3.4. Modelos Acoplados Jerárquicos . . . . .	34
3.5. Modelos Vectoriales . . . . .	40
3.6. Transformaciones Extras . . . . .	40
3.7. Preservación de la Semántica . . . . .	41

<b>4. Detalles de la implementación</b>	<b>42</b>
4.1. Programa Principal . . . . .	43
4.2. Aplanado de modelos acoplados . . . . .	44
4.3. Transformación Principal . . . . .	45
4.4. Transformaciones para $\mu$ -Modelica . . . . .	46
<b>5. Ejemplos y Resultados</b>	<b>49</b>
5.1. Comparación de desempeño . . . . .	50
5.2. Ecuaciones Lotka-Volterra . . . . .	50
5.3. Líneas de Transmisión . . . . .	51
5.4. Inversores Lógicos . . . . .	52
5.5. Advection-Diffusion-Reaction . . . . .	54
5.6. Convertidor de Voltaje . . . . .	55
5.7. Resultados . . . . .	56
<b>6. Conclusiones y Trabajos futuros</b>	<b>58</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	59
6.2. Trabajos Futuros . . . . .	59
<b>A. Modelos Creados</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>75</b>

## Resumen

El modelado y simulación se ha convertido en una actividad central de todas las disciplinas ingenieriles y científicas y son utilizados en el análisis de sistemas ayudándonos a ganar un mejor entendimiento de su funcionamiento. Son importantes para el diseño de nuevos sistemas donde podemos predecir el comportamiento del sistema antes de que sea construido. El modelado y simulación es la única técnica disponible que nos permiten analizar sistemas arbitrarios no lineales bajo una variedad de condiciones experimentales.

PowerDEVS es un entorno integrado para el modelado y simulación basado en el formalismo DEVS, permite definir modelos atómico en C++ que pueden ser conectados gráficamente en bloques jerárquicos para crear sistemas más complejos. El entorno automáticamente transforma el modelo a código C++ que ejecuta la simulación.

QSS-Solver es una implementación independiente de los métodos de integración por cuantificación de estados (o QSS por sus siglas en inglés Quantized State System) para simulaciones de sistemas continuos e híbridos. En general los métodos QSS son más rápidos que los métodos DEVS.

En este trabajo se presenta una aplicación capaz de convertir modelos, descritos en PowerDEVS en código Modelica, más específicamente código  $\mu$ -Modelica (un subconjunto de Modelica), permitiendo ejecutar este modelo (convertido) con alguno de los compiladores Modelica, OpenModelica o Dymola, o “QSS Solver”, este último nos permite ganar al menos un orden de magnitud en los tiempos incurridos en la simulación.

# Capítulo 1

## Introducción

## 1.1. Motivación

El modelado y simulación[1] se ha convertido en una actividad central de todas las disciplinas ingenieriles y científicas y son utilizados en el análisis de sistemas, ayudándonos a ganar un mejor entendimiento de su funcionamiento.

Son importantes para el diseño de nuevos sistemas donde podemos predecir el comportamiento del mismo antes de que sea construido. El modelado y simulación es la única técnica disponible que nos permite analizar sistemas arbitrarios no lineales bajo una variedad de condiciones experimentales.

Veamos algunas razones por las cuales la utilización de simulaciones es deseable o incluso requerido:

- El sistema físico no se encuentra construido. Por lo que se utilizan simulaciones para determinar si debe construirse o si proveerá los resultados esperados.
- El experimento puede ser peligroso. Se realizan simulaciones para determinar si el experimento real “explotará”, poniendo al experimentador y/o el sistema en peligro de muerte y/o destrucción.
- El costo del experimento es demasiado alto o las herramientas necesarias no se encuentran disponibles o son muy costosas. También es posible que el sistema se encuentra siendo utilizado y tomar el tiempo para realizar el experimento conllevaría un costo inaceptable.
- Los tiempos del sistema no son compatibles con los tiempos del experimentador, ya sea porque es demasiado rápido (por ejemplo una explosión) o porque es demasiado lento (por ejemplo la colisión de dos galaxias). Las simulaciones nos permiten acelerar o desacelerar el tiempo.
- Variables de control, de estado y/o del sistema pueden no ser accesibles. Usualmente simulaciones son utilizadas debido a que nos permite controlar todas las variables de entrada y todos los estados, mientras que en el sistema real, algunas entradas (ruidos, por ejemplo) no son manipulables y algunas variables internas del sistema no son accesibles a la medición directa. Las simulaciones también nos permiten manipular el modelo en formas que no podríamos manipular el sistema real, por ejemplo, podemos decidir cambiar la masa de un objeto de 50 kg a 400 kg y repetir la simulación. En un sistema físico, la modificación anterior es imposible o requiere una costosa y larga alteración del sistema.
- Eliminación de perturbaciones. Usualmente, se llevan adelante simulaciones que nos permiten eliminar perturbaciones que son inevitables en

el sistema real. Lo que nos permite aislar efectos particulares, y puede conducir a mejores apreciaciones sobre el comportamiento general del sistema.

- Eliminación de efectos de segundo orden. Usualmente, se utilizan simulaciones porque nos permite eliminar efectos de segundo orden (como no linealidades de componentes del sistema). Nuevamente esto ayuda a obtener un mejor entendimiento del comportamiento general del sistema.

Es por esto que cuando simulamos un modelo es deseable que pueda ser simulado de la forma más rápida y eficiente posible.

Para realizar la simulación debemos generar el modelo, es decir, la descripción de nuestro sistema de forma que sea posible compilarse en código de maquina para poder ser ejecutado (pasando por un lenguaje de propósito general, usualmente C o C++).

Una forma de describir el modelo es como una Ecuación Diferencial Ordinaria (o ODE, por sus siglas en ingles Ordinary Differential Equations) de la forma

$$\dot{x} = f(x, u, t)$$

donde  $x$  representa las variables del sistema,  $u$  el estado inicial y  $t$  el tiempo. Este modelo, puede ser convertido en un modelo Modelica[2][3] de forma textual o gráfica, dependiendo de las herramientas con las que contemos y como nos resulte más simple de describir.

PowerDEVS[4] es una herramienta de simulación de sistemas híbridos, basado en el formalismo DEVS[1], con una interfaz gráfica orientada a bloques, donde los bloques pueden ser conectados entre sí, modificado sus parámetros. Además permite conectarse con el entorno Scilab para poder utilizar expresiones y herramientas de cálculo provistas por este entorno.

Nos interesa poder utilizar el entorno PowerDEVS, debido a que no sólo la interfaz gráfica es más amena para usuarios que no están necesariamente habituados a la programación, sino que también deseamos utilizar los modelos ya definidos en esta herramienta.

Contamos además con la herramienta “QSS-Solver”[5], la cual nos permitirá ejecutar simulaciones un orden de magnitud más rápido, que otras implementaciones.

Por lo cual en este trabajo nos proponemos mostrar una aplicación capaz de convertir modelos descriptos en la herramienta PowerDEVS a modelos en el lenguaje Modelica, más específicamente en  $\mu$ Modelica[5], capaz de ser ejecutados en el QSS-Solver, obteniendo lo mejor de los dos mundos, un entorno de modelado amigable y el menor tiempo de simulación posible.

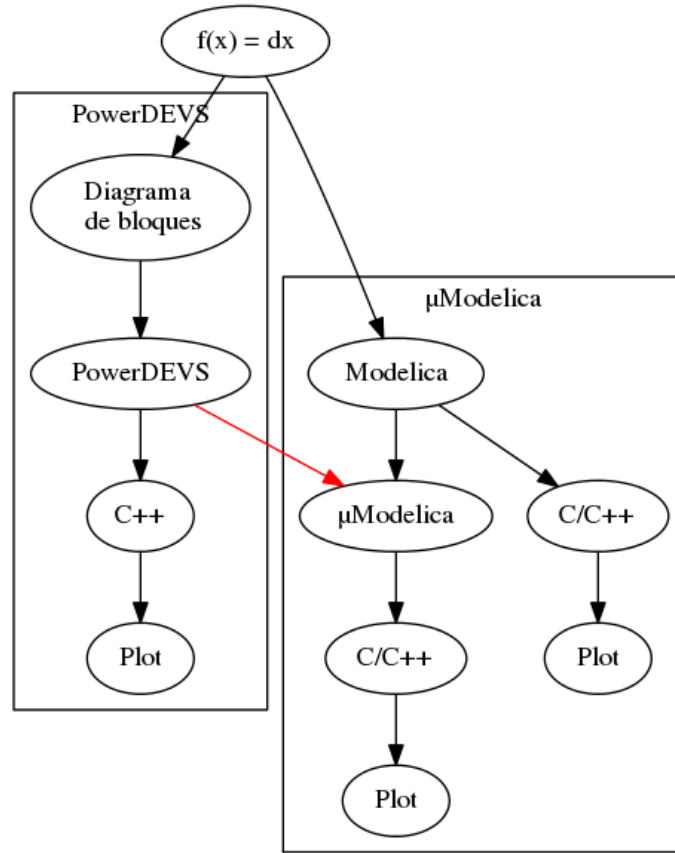


Figura 1.1: Esquema de conversiones

En la Figura 1.1, se muestran las dos principales estrategias (PowerDEVS y Modelica) para realizar una simulación. En el caso de PowerDEVS, el primer paso es convertir el sistema en diagramas de bloques, luego en un modelo DEVS, en PowerDEVS el cual puede automáticamente convertirlo a C++ y luego obtener los resultados ejecutando este modelo.

Desde la perspectiva de Modelica (o  $\mu$ -Modelica), debemos pasar el sistema a Modelica (o  $\mu$ -Modelica) y luego el compilador se encargará de generar código (usualmente C o C++) capaz de correr la simulación y obtener resultados.

El actual trabajo está representado por la flecha que sale de PowerDEVS hacia  $\mu$ -Modelica, permitiendo especificar el modelo en diagramas de bloques y ejecutar la simulación en el QSS-Solver, en el lenguaje  $\mu$ -Modelica, o en otra aplicación capaz de ejecutar código Modelica <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>dado que  $\mu$ -Modelica es un subconjunto de Modelica



## 1.2. Organización del trabajo

El presente trabajo se organiza en 6 capítulos:

1. *Introducción* : en la cual ya vimos una visión general del objetivo así como las herramientas que utilizaremos y algunas herramientas relacionadas
2. *Conceptos previos* en este capítulo veremos los fundamentos matemáticos y profundizaremos sobre las dos herramientas principales que conciernen este trabajo.
3. *Conversión de modelos DEVS* : en este capítulo veremos en detalles la conversión de un modelo desde su formulación matemática, en su modelo en PowerDEVS y veremos las conversiones necesarias para llevar adelante la conversión a  $\mu$ -Modelica.
4. *Detalles de la implementación* : en este capítulo se muestra los componentes de software que forman la aplicación y descripción en pseudo-código de los principales componentes.
5. *Ejemplos y Resultados* : en este capítulo veremos varios ejemplos y realizaremos una comparación de los resultados obtenidos a partir de comparar los tiempos de simulaciones de los modelos originales, en PowerDEVS, y los modelos convertidos en  $\mu$ -Modelica.
6. *Conclusiones y Trabajos futuros* :, por último revisaremos nuestras conclusiones y propondremos trabajos a futuro.

## 1.3. Trabajo relacionado

En [5] se describe una extensión del Compilador OpenModelica el cual traslada modelos regulares Modelica a un subconjunto más simple  $\mu$ -Modelica, el cual puede ser interpretado directamente por el QSS-Solver.

ModelicaDEVS [6] es una librería Modelica que permite describir simulaciones DEVS, ofrece una re-implementación de PowerDEVS dentro del marco de Modelica.

DESLib [7] es una librería para la descripción de modelos Parallel DEVS y Modelado orientado a proceso en Modelica. La librería contiene cuatro paquetes que pueden ser utilizados para modelar sistemas de eventos discretos:

- RandomLib puede generar números y variables aleatorias, siguiendo distribuciones de probabilidades discretas y continuas.
- DEVSLib puede ser utilizado para modelar sistemas de eventos discretos (DEVS) siguiendo el formalismo de Parallel DEVS.

- SIMANLib y ARENALib puede ser utilizado para modelar sistemas de eventos discretos (DEVS) siguiendo el enfoque orientado al proceso.

Estas dos librerías llevan los formalismos DEVS hacia Modelica, pero no utilizan la herramienta PowerDEVS, ni se ejecutan en QSS-Solver. Podríamos desarrollar los modelos utilizando estas librerías y ejecutar la simulación del modelo convertido en  $\mu$ -Modelica con el QSS-Solver, pero esto no permite re-utilizar los modelos desarrollados en PowerDEVS.

M/CD++ [8] es una herramienta para convertir simulaciones de un subconjunto de Modelica, a simulaciones DEVS, este trabajo funciona en sentido opuesto a nuestro trabajo, es decir convirtiendo modelos Modelica en modelos DEVS, por lo que no utiliza PowerDEVS y no ejecuta la simulación en el QSS-Solver.

## Capítulo 2

# Conceptos Previos

En este capítulo, basado en [9], [10], [4], [11], introducimos algunos conceptos básicos de modelado y simulación de sistemas, formalismos necesarios para poder comprender este trabajo.

## 2.1. Modelado y Simulación

El Modelado y Simulación[1] de un sistema es el proceso por el cual se desarrolla un modelo, el cual es luego ejecutado, de forma de obtener datos sobre el comportamiento del sistema. El modelo debe conservar las principales características del sistema, pero al mismo tiempo ser significativamente más simple, de forma que al momento de simularlo sea más eficaz utilizar la simulación que el sistema en sí.

### 2.1.1. Sistemas Continuos y Discretos

Se considera un sistema continuo si las variables de éste son conocidas en cada instante de tiempo, mientras que se considera discreto si las variables son conocidas en instantes de tiempo determinados.

En general, los sistemas en estudio serán continuos, pero deberemos utilizar sistemas discretos para simularlo, puesto que la simulación en computadora así lo requiere, dado que la misma computadora es un sistema discreto.

### 2.1.2. Métodos de integración numérica

Un sistema continuo puede ser descrito por una ecuación diferencial ordinaria de la forma:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (2.1)$$

donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estados,  $u \in \mathbb{R}^m$  es una función de entradas conocidas,  $t$  representa el tiempo, y con sus condiciones iniciales:

$$x(t = t_0) = x_0 \quad (2.2)$$

Sea  $x_i(t)$  la trayectoria del estado  $i$ -ésimo expresada como función de tiempo simulado. Mientras que la ecuación (2.1) no contenga discontinuidades  $x_i(t)$  será una función continua con derivada continua. Esta puede ser aproximada con la precisión deseada mediante series de Taylor en cualquier punto de su trayectoria.

Denominando  $t^*$  al instante de tiempo en torno al cual se aproxima la trayectoria mediante una serie de Taylor, y siendo  $t^* + h$  el instante de

tiempo en el cual se quiere evaluar la aproximación, entonces, la trayectoria en dicho punto puede expresarse como sigue:

$$x_i(t^* + h) = x_i(t^*) + \frac{dx_i(t^*)}{dt} \cdot h + \frac{d^2x_i(t^*)}{dt^2} \cdot \frac{h^2}{2!} + \dots \quad (2.3)$$

Reemplazando con la ecuación de estado 2.1, la serie (2.3) queda:

$$x_i(t^* + h) = x_i(t^*) + f_i(t^*) \cdot h + \frac{d^2x_i(t^*)}{dt^2} \cdot \frac{h^2}{2!} + \dots \quad (2.4)$$

Los distintos algoritmos de integración difieren en la manera de aproximar las derivadas superiores de  $f$  y en el número de términos de la serie de Taylor que consideran para la aproximación, entre los principales métodos podemos mencionar Runge-Kutta[12], DASSL[13], DOPRI[14], etc.

## 2.2. Un ejemplo

Introducimos un modelo de ejemplo, el cual mostraremos paso a paso, a lo largo de este trabajo, como se lleva adelante la transformación de modelos: el sistema de ecuaciones de Lotka-Volterra, también conocidas como ecuaciones depredador-presa o presa-depredador, son un par de ecuaciones diferenciales de primer orden no lineales que se usan para describir la dinámica de sistemas biológicos en el que dos especies interactúan, una como presa y otra como depredador.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(\alpha - \beta y) \\ \frac{dy}{dt} &= -y(\gamma - \delta x) \end{aligned}$$

donde:

- $y$  es el número de algún depredador (por ejemplo, un lobo)
- $x$  es el número de sus presas (por ejemplo, conejos)
- $\frac{dy}{dt}$  y  $\frac{dx}{dt}$  representa el crecimiento de las dos poblaciones en el tiempo
- $t$  representa el tiempo
- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$  son parámetros que representan las interacciones de las dos especies.

## 2.3. Modelica

Modelica[2][3] es un lenguaje orientado a objetos desarrollado para describir de manera sencilla modelos de sistemas dinámicos eventualmente muy complejos. Además de las características básicas de todo lenguaje orientado a objetos, contiene herramientas específicas que permiten describir las relaciones constitutivas de los distintos componentes de cada modelo y las relaciones estructurales que definen la interacción entre dichos componentes. De esta manera, el lenguaje permite asociar cada componente de un sistema a una instancia de una clase. Adicionalmente, los componentes típicos de los sistemas de distintos dominios de la física y de la técnica pueden agruparse en librerías de clases para ser reutilizados. De hecho, existe una librería estándar de clases de Modelica, que contiene los principales componentes básicos de sistemas eléctricos, mecánicos (traslacionales, rotacionales y multicuerpos), térmicos, state graph, y diagramas de bloques. Otras librerías (disponibles en la web) contienen componentes de sistemas hidráulicos, bond graphs, redes de Petri, etc. Por otro lado, las herramientas que provee Modelica para expresar relaciones estructurales de un modelo permiten construir la estructura del mismo de una manera totalmente gráfica, lo que a su vez permite describir un sistema mediante un diagrama muy similar al del sistema físico idealizado. Como con todo lenguaje, para poder simular un modelo descrito en Modelica es necesario utilizar un compilador. Actualmente existen tres compiladores que implementan la mayoría del lenguaje Modelica: Dymola, MathModelica y OpenModelica. Los dos primeros son herramientas comerciales mientras que OpenModelica es de código abierto, todas cuentan con interfaces gráficas para construir los modelos, edición de código y compiladores para generar el código de las simulaciones.

```
1 class LotkaVolterra
2   Real x(start = 0.5);
3   Real y(start = 0.5);
4   parameter Real a = 0.1;
5   parameter Real b = 0.1;
6   parameter Real c = 0.1;
7   parameter Real d = 0.1;
8   equation
9     0 = x * (a - b * y) - der(x);
10    0 = der(y) + y * (d - c * x);
11 end LotkaVolterra;
```

Listado 2.1: LotkaVolterra.mo

Continuando con el ejemplo del sistema de ecuaciones de Lotka-Volterra, en el Listado 2.1 se muestra el modelo equivalente en Modelica, en el se

pueden observar algunas particularidades del lenguaje.

En la línea 1 se puede ver el modelo, en este caso una “clase” y su nombre LotkaVolterra. Modelica, utiliza 7 clases restringidas: **block**, **connector**, **function**, **model**, **package**, **record** y **type**. Cada una de estas clases restringidas permite declarar clases más específicas y cualquiera de ellas puede reemplazarse por **class**, pero siempre es mejor especificar de que tipo de clase se trata para mejorar la legibilidad y facilitar la depuración de código.

Las siguientes dos líneas declaran las variables  $x$  e  $y$  del tipo **Real**, ambas con valor de inicio 0.5, las líneas 4 a 7, declaran los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ . A diferencia de  $x$  e  $y$ , estos parámetros no pueden cambiar durante la simulación, pero pueden cambiar de simulación en simulación.

Esta primera parte (líneas 2 a 7) del modelo constituye la sección de declaraciones a continuación, se encuentra la sección de ecuaciones (luego de la palabra clave **equation**), esta sección describe el sistema de ecuaciones de nuestro modelo, donde la expresión  $\text{der}(x)$  representa la derivada  $x$  respecto del tiempo y análogamente con  $y$ .

Por supuesto Modelica es un lenguaje mucho más extenso de lo que hemos descripto, pero los conceptos que utilizamos a lo largo de este trabajo son los expresados en la presente sección.

## 2.4. Métodos de integración QSS

Los métodos Quantized State System [9][5][6][12], pueden aproximar Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE por sus siglas en inglés) mediante modelos de eventos discretos cuantificando los estados del sistema, a diferencia de los métodos mencionados en la sección 2.1.2, los cuales realizan la integración sobre el tiempo.

Formalmente, el método QSS de primer orden (llamado QSS1) aproxima la ecuación 2.1 por:

$$\dot{x}(t) = f(q(t), v(t)) \quad (2.5)$$

donde  $q$  es el vector de estados cuantificados y sus componentes están relacionadas una a una con las del vector de estados  $x$  siguiendo una función de cuantificación con histéresis:

$$q_j(t) = \begin{cases} x_j(t) & \text{si } |x_j(t) - q_j(t^-)| \geq \Delta Q_j \\ q_j(t^-) & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (2.6)$$

donde  $q_j(t^-)$  es el límite por izquierda de  $q_j$  en  $t$ .



Figura 2.1: Variables Relacionadas con una Función de Cuantificación con Histéresis de orden cero.

En la Figura 2.1 vemos la relación entrada-salida de una función de cuantificación de orden cero.

Las variables  $q_j$  son llamadas variables cuantificadas y pueden ser vistas como una aproximación constante por trozos de la variable de estado correspondiente  $x_j$ . De la misma forma las componentes de  $v(t)$  son aproximaciones constantes por trozos de las componentes correspondientes de  $u(t)$ . Los pasos de integración en los métodos QSS sólo se producen cuando una variable cuantificada  $q_j(t)$  cambia, esto es, cuando la variable de estado correspondiente  $x_j(t)$  difiere de  $q_j(t^-)$  en un quantum. Ese cambio implica también que algunas derivadas de estado (aquellas que dependen de  $x_j$ ) también son modificadas.

Luego, cada paso involucra un cambio en sólo una variable cuantificada y en algunas derivadas de estado. Por lo tanto cuando un gran sistema sparse<sup>1</sup>, los métodos QSS explotan intrínsecamente este hecho realizando cálculos sólo donde y cuando ocurren los cambios. Otra ventaja importante de los métodos QSS es que tratan las discontinuidades de una manera muy eficiente. Dependiendo del orden del método, las variables de estado siguen trayectorias lineal por trozos, parabólica por trozos o constante por trozos, la ocurrencia de una discontinuidad implica sólo algunos cálculos locales para re-computar las derivadas de estados que están directamente afectadas por ese evento. Estas ventajas resultan en una aceleración notable en el tiempo de simulación contra los algoritmos de integración numérica clásicos. En modelos con discontinuidades frecuentes como sistemas de electrónica de

<sup>1</sup>Un sistema es sparse si posee sólo actividad en unos pocos estados mientras que el resto del sistema se mantiene intacto



potencia, los métodos de alto orden que veremos a continuación, pueden simular hasta 20 veces más rápido que los métodos convencionales.

## 2.5. $\mu$ -Modelica

El lenguaje  $\mu$ -Modelica[5] se define como un subconjunto del lenguaje estandar Modelica, con las siguientes restricciones:

- El modelo es plano, es decir no permite clases.
- Todas las variables pertenecen al tipo predefinido Real y solo hay tres categorías de variables: estado continuo, estado discreto y variables algebraicas.
- Los parámetros también son de tipo Real.
- Solo arreglos unidimensionales están permitidos, mientras que índices en los arreglos dentro de cláusulas **for** están restringidos a la forma  $\alpha \cdot i + \beta$ , donde  $\alpha$  y  $\beta$  son expresiones enteras e  $i$  es el índice de la iteración.
- La sección de ecuaciones está compuesta de:
  - Definición de variables de estados:  $der(x) = f(x(t), d, a(t), t)$ ; ODE en forma explícita
  - Definición algebraica :  $a_2 = g(a_1)$ ;

con la restricción de que cada variable algebraica solo puede depender de variables estado y de variables algebraicas previamente definidas.

- Las discontinuidades son expresadas solo con las clausulas *when* y *elsewhen* dentro de la sección *algorithm*. Las condiciones dentro de las dos clausulas solo pueden ser relaciones ( $<$ ,  $\leq$ ,  $>$ ,  $\geq$ ) y, dentro de la clausula, solo asignaciones de variables discretas y *reinit* de estados continuos son permitidos.

Estas restricciones son necesarias ya que el QSS-Solver necesita conocer la estructura del sistema para que luego de cada cambio de estado, solo deba evaluar las variables que explícitamente dependan de ella.

## 2.6. Stand-Alone QSS solver

Como mencionamos antes los métodos QSS de integración reemplazan la discretización del tiempo de los métodos clásicos por una cuantificación de las variables del sistema. De esta forma, estos métodos generan aproximaciones del sistema continuo y tienen algunas ventajas sobre sus contra

partes clásicas. La forma más simple de implementar algoritmos QSS es mediante el uso de un simulador DEVS, de hecho PowerDEVS implementa la totalidad de la familia de algoritmos QSS. Estas implementaciones aunque simples, son ineficientes, pues a diferencia de los sistemas DEVS no requieren de la sincronización y transmisión de eventos, permitiendo liberar parte de la carga computacional.

Estas desventajas motivaron el desarrollo del *Stand-Alone QSS solver* [5], implementado como un conjunto de módulos en lenguaje C. Este implementa toda la familia de métodos QSS y permite que los modelos contengan discontinuidades de tiempo y estado.

Un requerimiento impuesto por los métodos QSS es que hace uso de información estructural del modelo. Cada paso en un método QSS involucra un cambio en una variable de estado y en la derivada del estado que depende de él. Debido a esto el modelo debe proveer no solo la expresión para calcular las derivadas del estado (como en un clásico ODE solver) sino además una matriz de incidencias para informar al solver las que derivadas de estado han cambiado luego de cada paso.

Como sería muy incomodo para el usuario proveer esta información estructural, el solver tiene una interfaz que automáticamente obtiene la matriz de incidencia desde una definición estándar de modelos.

La interfaz permite al usuario describir el modelo utilizando ( $\mu$ -Modelica) y automáticamente genera el código C del modelo incluyendo la estructura.

Continuando con nuestro ejemplo sobre el sistema Lotka Volterra, incluimos el modelo anterior, esta vez modificado para que sea  $\mu$ -Modelica valido. Se puede apreciar un bloque extra `initial algorithm` el cual inicializa las variables (en lugar de utilizar la inicialización estándar), además fue necesario escribir las ecuaciones de la forma `var=f()` para que el modelo sean  $\mu$ -Modelica valido.

```

1  model lotka_volterra
2    Real x(start = 0.5);
3    Real y(start = 0.5);
4    parameter Real a = 0.1;
5    parameter Real b = 0.1;
6    parameter Real c = 0.1;
7    parameter Real d = 0.1;
8    initial algorithm
9      x := 0.5;
10     y := 0.5;
11  equation
12    der(x) = x * (a - b * y);
13    der(y) = - y * (d - c * x);
14    annotation(
15      experiment(
16        MMO_Description="Lotka Volterra model",
17        MMO_Solver=QSS3,
18        MMO_Output={x[:]},
19        StartTime= 0.0,
20        StopTime= 300.0,
21        Tolerance={ 1e-3},
22        AbsTolerance={ 1e-6}
23      ));
24  end lotka_volterra;

```

Listado 2.2: LotkaVolterra.mo

## 2.7. Formalismo DEVS

DEVS[1] es un formalismo para modelar y analizar sistemas de eventos discretos (es decir, sistemas en los cuales en un lapso finito de tiempo, ocurren una cantidad finita de eventos). Un modelo DEVS puede ser visto como un autómata que procesa una serie de eventos de entrada y genera una serie de eventos de salida. Este procesamiento está regido por la estructura interna de cada una de las partes que componen el modelo general. Un modelo DEVS está descrito por dos clases de componentes, modelos atómicos y modelos acoplados.

### 2.7.1. Atómicos

Un modelo atómico representa la unidad “indivisible” de especificación, en el sentido que es la pieza fundamental y más básica de un modelo DEVS.

Formalmente un modelo atómico está conformado por la 7-upla:

$$(X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, t_a) \quad (2.7)$$

Donde:

- $X$  es el conjunto de valores de entrada que acepta el modelo atómico, es decir un evento de entrada tiene como valor un elemento del conjunto  $X$ .
- $Y$  es el conjunto de valores de los eventos de salida que puede emitir el modelo atómico.
- $S$  es el conjunto de estados internos del modelo, en todo momento el modelo atómico está en un estado dado, que es un elemento del conjunto  $S$ .
- $t_a$  es una función  $S \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ , que indica cuánto tiempo el modelo atómico permanecerá en un estado dado, si es que no se recibe ningún evento de entrada. Esta función se denomina *Función de Avance de Tiempo*.
- $\delta_{int}$  es una función  $S \rightarrow S$ , que indica la dinámica del sistema en el momento que el modelo atómico realiza una transición interna. Sería el análogo a una tabla de transición en otros autómatas, es la *Función de Transición Interna*.
- $\delta_{ext}$  es una función  $(S \times \mathbb{R}_0^+ \times X) \rightarrow S$ , que indica el cambio de estado ante la presencia de un evento externo, esta es la *Función de Transición Externa*.
- $\lambda$  es una función  $S \rightarrow Y$  llamada *Función de Salida*, que indica qué evento se debe emitir al salir de un estado por una transición interna.

Los conjuntos  $S$ ,  $X$  e  $Y$  son arbitrarios, y en general infinitos. Cada posible estado  $s$  ( $s \in S$ ) tiene asociado un Avance de Tiempo calculado por la Función de Avance de Tiempo  $t_a(s)$ . En la Figura 2.2 vemos la evolución de un modelo atómico. Si el estado cambia a  $s_1$  en el tiempo  $t_1$ , tras  $t_a(s_1)$  unidades de tiempo (o sea, en tiempo  $t_a(s_1) + t_1$ ) el sistema realizará una transición interna cambiando a un nuevo estado  $s_2$  dado por  $s_2 = \delta_{int}(s_1)$ .

Cuando el estado va de  $s_1$  a  $s_2$  se produce un evento de salida con valor  $y_1 = \lambda(s_1)$ . La función  $\lambda(\lambda : S \rightarrow Y)$ . Así, las funciones  $t_a$ ,  $\delta_{int}$  y  $\lambda$  definen el comportamiento autónomo de un modelo DEVS.

Cuando llega un evento de entrada el estado cambia instantáneamente. El nuevo valor del estado no sólo depende del valor del evento de entrada

sino también del valor anterior del estado y del tiempo transcurrido desde la última transición.

Cuando llega el evento  $x1$  en el instante  $t3$  mientras se encuentra en el estado  $s2$ , despues de haber transcurrido el tiempo  $e$  (notar que  $ta(s2) > e$ ) se transiciona al estado  $s3 = \delta_{ext}(s2, e, x1)$  , luego de  $ta(s3)$  se transiciona a  $s4$  y se emite el  $y2$

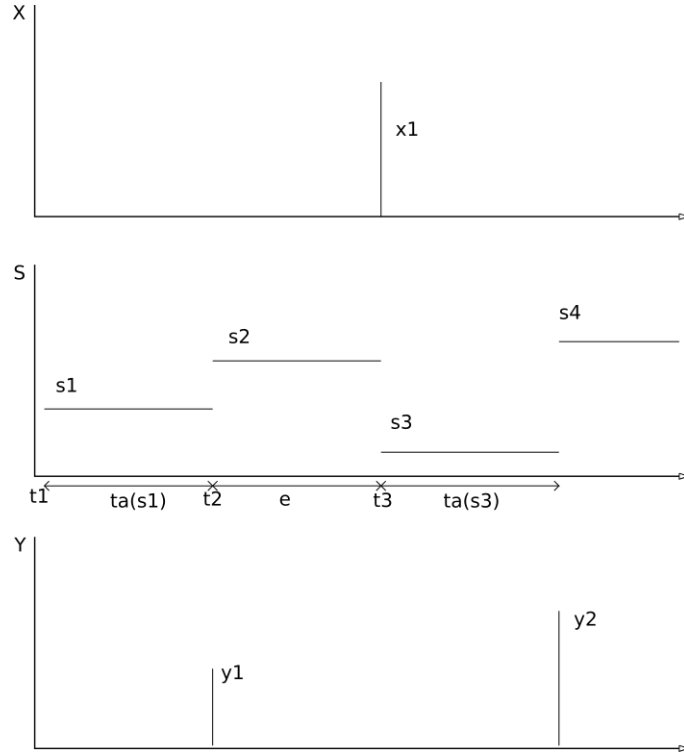


Figura 2.2: Comportamiento de un modelo DEVS atómico

### 2.7.2. Acoplados

La descripción de un sistema puede ser completamente realizada utilizando un modelos atómico, aunque esto resulta un poco incómodo y confuso. Los conjuntos de estados y las funciones de transición se vuelven inmanejables en sistemas complejos, y nunca podemos asegurar haber cubierto todos los posibles estados.

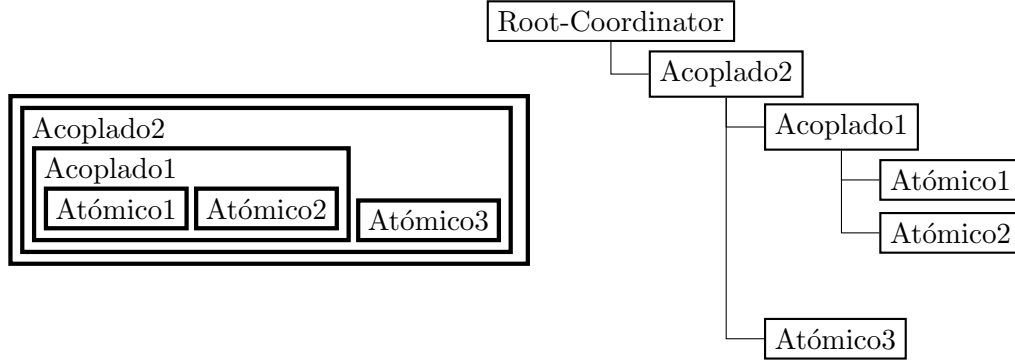


Figura 2.3: Ejemplo de un modelo jerárquico.

A modo de ejemplo, se puede ver en la Figura 2.3 una jerarquía mostrando las relaciones entre los modelos acoplados y atómicos.

Para abordar este problema, el formalismo DEVS introduce lo que se llaman modelos acoplados, que es una forma de agrupar modelos DEVS y generar nuevos modelos a partir de este agrupamiento. Hay dos formas de acoplamiento, la más general, en la cual se utilizan funciones de traducción entre los sub-sistemas y otra clase que adopta el uso de puertos para la comunicación entre sub-sistemas. Aunque estas dos formas son equivalentes entre sí, describiremos la segunda clase, ya que es la más simple y es la utilizada en el presente trabajo. Formalmente un modelo acoplado está representado por la octo-upla:

$$N = (X_N, Y_N, D, M_d, EIC, EOC, IC, Select) \quad (2.8)$$

donde cada componente es:

- $X_N$  es el conjunto de eventos de entrada al modelo acoplado, representado por el producto cartesiano del conjunto de puertos de entrada  $InPorts$  y el conjunto de posibles valores para cada puerto. O sea un evento de entrada al modelo acoplado está representado por un par  $(p, v)$  donde  $p \in InPorts$  y  $v \in X_p$ .
- $Y_N$  es el conjunto de eventos que el modelo acoplado puede emitir, representado por el producto cartesiano del conjunto de puertos de salida  $OutPorts$  y el conjunto de posibles valores para este puerto, o sea un evento de salida del modelo acoplado está representado por un par  $(p, v)$  donde  $p \in OutPorts$  y  $v \in Y_p$ .
- $D$  es el conjunto de los índices a los modelos DEVS (atómicos y acoplados) que conforman este modelo.
- $M_d$  con  $d \in D$ , es el conjunto de los modelos atómicos y/o acoplados (son justamente los modelos que “acopla” o “agrupa” este modelo acoplado).

- EIC y EOC son los conjuntos de conexiones entre los modelos internos y los puertos del modelo acoplado:
  - EIC (o External Input Coupling) son las conexiones de entrada al acoplado, es decir, conecta un puerto de entrada del acoplado con un puerto de entrada de un modelo perteneciente al acoplado.
  - EOC (o External Output Coupling) son las conexiones de salida del acoplado. Conecta un puerto de salida de un modelo interno del acoplado con un puerto de salida del acoplado.
- $IC$  representa las conexiones internas del modelo acoplado.
- Select es una función  $(\mathcal{P}((D)) \rightarrow D)$  que decide qué modelo realizará primero su transición interna, si se da el caso de eventos simultáneos. Es una función de “desempate” que en ciertos modelos es necesaria.

Formalmente:

$$\begin{aligned}
 EIC &\in \{((N, ip_N), (d, ip_d)) | ip_N \in InPorts, d \in D, ip_d \in InPorts_d\} \\
 EOC &\in \{((d, op_d), (N, op_N)) | op_N \in OutPorts, d \in D, op_d \in OutPorts_d\}
 \end{aligned}$$

donde  $N$  es el modelo acoplado.

$$IC \in \{((a, ip_a), (b, ip_b)) | a, b \in D, ip_a \in OutPorts_a, ip_b \in InPorts_b\}$$

donde no se permite que  $a = b$ .

$InPorts$  y  $Outports$  son conjuntos que describen los posibles puertos de entrada y salida respectivamente. En general se utilizan números enteros para representar los puertos posibles por lo cual  $InPorts = \mathbb{N}$  y  $Outports = \mathbb{N}$ . Los modelos acoplados son en sí mismos modelos DEVS válidos; formalmente el acoplamiento (como lo definimos antes) es una operación cerrada sobre el conjunto de modelos DEVS. Acoplar modelos DEVS forma nuevos modelos DEVS. Sin esta cualidad el acoplamiento resultaría inútil desde el punto de vista del formalismo. También trae muchas ventajas a la hora de describir modelos DEVS y a la hora de simularlos. El acoplamiento da lugar a una estructura jerárquica de desarrollo.

$EIC$ ,  $EOC$  y  $IC$  son conjunto de pares, de pares, como se encuentran conectados los modelos (atómicos o acoplados) a través de sus puertos con los puertos de entrada, salida y con otros modelos (atómicos o acoplados) respectivamente. Tanto los puertos como los modelos son señalados por números dentro de PowerDEVS, por lo que estos conjuntos están comprendidos por elementos de la forma  $(m_a, p_a), (m_b, p_b)$ , donde  $m_a$  y  $m_b$  son modelos (atómicos o no) en el actual modelo y  $p_a$  y  $p_b$  son sus correspondientes puertos.

### 2.7.3. Modelos DEVS parametrizados

Definiremos primero los modelos DEVS parametrizados[15] como un paso previo hacia el formalismo DEVS vectorial (Vectorial DEVS o VEC-DEVS), el cual es una herramienta que nos facilitará representar modelos de gran escala en forma gráfica, en particular este formalismo se encuentra implementado en la herramienta PowerDEVS.

Formalmente : dado un modelo DEVS atómico  $M$  obtenemos un Modelo DEVS Parametrizado:

$$M(p) = \{X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta, p\} \quad (2.9)$$

donde  $p \in P$  es un parámetro que pertenece a un conjunto de parámetros arbitrario tal que  $\delta_{int}$  ,  $\delta_{ext}$  ,  $\lambda$  y  $ta$  dependen también de  $p$ . Notar que dos modelos DEVS  $M(p_1)$ ,  $M(p_2)$  con  $p_1 \neq p_2$  pueden exhibir distintos comportamientos aunque compartan los mismos conjuntos de entrada, salida y de estados ( $X$ ,  $Y$  , y  $S$ , respectivamente).

### 2.7.4. Modelos Vectoriales

Dado el modelo escalar DEVS Parametrizado:

$$M(p) = \{X, Y, S, \lambda_{int}, \lambda_{ext}, \lambda, ta, p\} \quad (2.10)$$

definimos un modelo Vectorial DEVS[15] como la estructura:

$$V_D = \{N, X_V, Y_V, P, \{M_i\}\}, \quad (2.11)$$

donde:

- $N \in \mathbb{N}$  es la dimensión del modelo vectorial.
- $X_V = X \times Index \cup \{-1\}$  es el conjunto de eventos de entradas vectorial donde  $X$  es el conjunto de eventos de entrada del modelo escalar e  $Index = 1, \dots, N$  es el conjunto de índices que indican cuál de los modelos DEVS atómicos recibirá el evento.
- $Y_V = Y \times Index$  es el conjunto de eventos de salida vectorial donde  $Y$  es el conjunto de eventos de salida del modelo escalar e  $Index = 1, \dots, N$  es el conjunto de índices que indica que modelo escalar de los  $N$  , emitió el evento.
- $P$  es un conjunto de parámetros arbitrario.
- Para cada índice  $i \in Index$ ,  $p(i) \in P$  es un parámetro y  $M_i = M(p(i))$  es el modelo DEVS Parametrizado escalar.



## Interfaz entre DEVS Vectorial y DEVS

Para conectar bloques vectoriales y bloques escalares es necesarios bloques que hagan de interfaz entre los dos formalismo, además, introducimos un bloque necesario para realizar modelos más complejos y conectar los diferentes componentes de un modelo vectorial entre sí.

- Escalar a Vector (Scalar to Vector): Este bloque simplemente agrega el índice  $i$  al evento escalar que recibe, transformándolo en un evento vectorial. Este modelo también posee un comportamiento especial para enviar el mismo evento en todas las componentes vectoriales al mismo tiempo, cuando  $i = -1$ , cada evento de entrada es transmitido para todas las componentes del vector salida.
- Vector a escalar (Vector to Scalar): Este bloque tiene un parámetro  $i$  que contiene el índice del vector de eventos a retransmitir, cuando recibe un evento con índice  $j = i$ , remueve el índice y retransmite el evento escalar.
- Index Shift: El modelo más simple es el Index Shift. Cuando se recibe un evento con el valor  $(x, i)$ , emite un evento de salida  $(x, i + sh)$ , donde  $sh$  es un parámetro entero.

Es importante ver que los mensajes entre bloques vectoriales son un par donde uno de sus componentes es un número natural, que funciona como índice, el cual nos permite determinar en que posición del vector se encuentra la otra componente.

En este trabajo a todos estos bloques se la ha agregado la dimensión  $N$  como parámetro, esto es necesario para realizar la conversión de los modelos, de forma que no existan desconexiones a nivel Modelica, lo cual se reflejaría en un modelo con menos ecuaciones que variables, es decir un modelo no balanceado.

## 2.8. PowerDEVS

PowerDEVS[4] es un programa, concebido para ser utilizado por expertos programadores DEVS, así como usuarios finales que solo quieren conectar bloques y simular.

PowerDEVS esta compuesto por varios programas independientes:

- El *editor de modelos*, es desde el punto de vista del usuario, el principal programa de PowerDEVS, pues provee la interfaz gráfica y enlaces para las demás aplicaciones. Además de construir, manejar modelos y librerías, permite lanzar las simulaciones (lanzando el *Pre procesador*) y editar los bloques elementales hasta su definición atómica de modelo (invocando el *Editor Atómico*). La ventana principal del *Editor de*



Figura 2.4: Interfaz gráfica de PowerDEVS

*Modelo* permite al usuario crear y abrir modelos y librerías. También permite a las librerías ser exploradas y a los bloques ser arrastrados de las librerías a los modelos. La ventana del Modelo provee todas las funcionalidades típicas para la edición gráfica para poder copiar, cambiar el tamaño, rotar, etc. mientras que las conexiones pueden ser dibujadas entre los diferentes puertos. La ventana de Edición de Bloques, nos permite configurar la apariencia gráfica y elegir los parámetros del bloque y, en el caso de los modelos atómicos, seleccionar el archivo que contiene el código asociado con la definición DEVS.

- El *Editor de Modelos Atómicos* facilita la edición del código C++ correspondiente a cada modelo atómico DEVS, el usuario debe definir las variables que forman el estado y parámetros y 6 funciones en sus correspondientes solapas, Init, Time Advance, Internal transition, External transition, Output y Exit . Cuando el modelo se guarda, el código es guardado en los archivos .cpp y .h.
- El *Pre procesador* toma un archivo .pdm (o .pds) producido por el *Editor de Modelos* y produce el programa que corre la simulación. Básicamente traduce el archivo .pdm a un archivo de cabecera .h que enlaza el simulador y el coordinador de acuerdo a la estructura del modelo pasando además los parámetros definidos para el modelo. El *Pre procesador* produce además un Makefile (Makefile.include) el cual invoca el compilador para generar el programa que implementa la simulación.
- La *interfaz de simulación* corre el programa que implementa la simu-

lación y permite variar parámetros de la simulación como tiempo final, números de simulación a ejecutar y el modo de simulación (normal, cronometrada, pasa o paso, etc.).

- Una instancia de Scilab, que actúa como un espacio de trabajo, donde los parámetros pueden ser leídos, y los resultados pueden ser exportados.

En la Figura 2.5 se puede ver el modelo Lotka Volterra que acompaña la instalación de PowerDEVS, este modelo (aunque no visible en la figura) tiene valores iguales a los expresados en el modelo equivalente anteriormente presentado en el Listado 2.1. Las dos conexiones contra el bloque `GnuPlot 0` representa las variables `x` e `y` es decir presa y depredadores. Ambas variables son el resultado de la integración por lo que los integradores `QSS Integrator 0` y `QSS Integrator 1` contienen en sus puerto de entrada los valores  $dx/dt$  y  $dy/dt$ . Los bloques `WSum 0` y `WSum 1`, tiene valores constantes ( $K$ ) de forma que el valor de salida ( $y$ ) queda definido como  $y = K[0] * u_0 + K[1] * u_1 + \dots + K[7] * u_7$  y en nuestro modelo son  $K[0] = 0,1$  y  $K[1] = -0,1$  en ambos bloques `WSum 0` y `WSum 1`, replicando nuestra la ecuación de nuestro modelo.



Figura 2.5: Modelo Lotka Volterra descrito en PowerDEVS

## Capítulo 3

# Conversión de modelos DEVS

En este capítulo se describen en detalles los pasos que componen la transformación, se utilizará el modelo ya presentado e introducimos un modelo PowerDEVS con componentes vectoriales con el fin de ilustrar la transformación de estos componentes.

## **3.1. Modelos DEVS**

### **3.1.1. Archivos PDS**

PowerDEVS trabaja principalmente con dos archivos, .PDM y .PDS. Los archivos PDM son utilizados, principalmente, por el editor de modelos, pues contiene información estructural, así como información de posición de los modelos dentro del editor, sus parámetros, lo cual indica nombre, tipo y valor, descripción de los modelos, la cantidad de puertos de cada modelo y las conexiones entre los modelos, los detalles de cómo esas conexiones son visualizadas por líneas y los detalles del recorrido de esas líneas. Todos estos elementos son utilizados en primera medida por el editor de modelos, pero también son utilizados para generar el archivo PDS el cual genera el código de la simulación. El archivo PDS contiene información estructural del modelo necesaria para realizar la simulación. En los listados 3.1 y 3.2 se puede ver el archivo que contiene la simulación generada para el modelo Lotka Volterra que corresponde al modelo presentado en la Figura 2.5 de la página 23.

```

1 Root-Coordinator
2 {
3   Simulator
4   {
5     Path = qss/qss_multiplier.h
6     Parameters = "Purely static","1e-6","1e-3"
7   }
8   Simulator
9   {
10    Path = qss/qss_integrator.h
11    Parameters = "QSS3","1e-6","1e-3","0.5"
12  }
13  Simulator
14  {
15    Path = qss/qss_integrator.h
16    Parameters = "QSS3","1e-6","1e-3","0.5"
17  }
18  Simulator
19  {
20    Path = qss/qss_wsum.h
21    Parameters =
↵ "0.1","-0.1","0","0","0","0","0","0",2.000000e+00
22  }
23  Simulator
24  {
25    Path = qss/qss_wsum.h
26    Parameters =
↵ "0.1","-0.1","0","0","0","0","0","0",2.000000e+00
27  }
28  Simulator
29  {
30    Path = sinks\gnuplot.h
31    Parameters = 2.000000e+00,"set xrange [0:%tf] @ set grid @
↵ set title 'Lotka Volterra Model',"with lines title
↵ 'Preys',"with lines title 'Predators',"","",""
32  }

```

Listado 3.1: Estructura del archivo lotka\_volterra.pds, modelos atómicos (continua).

```

33  EIC
34  {
35  }
36  EOC
37  {
38  }
39  IC
40  {
41    (3,0);(1,0)
42    (4,0);(2,0)
43    (0,0);(4,0)
44    (0,0);(3,1)
45    (1,0);(5,0)
46    (1,0);(0,0)
47    (1,0);(3,0)
48    (2,0);(5,1)
49    (2,0);(0,1)
50    (2,0);(4,1)
51  }
52  }

```

Listado 3.2: (continuación) conexiones del archivo `lotka_volterra.pds`.

Se puede observar un elemento **Root-Coordinator** el cual contiene (marcado entre llaves) una lista de **Simulators** que representan los modelos atómicos y/o **Coordinator** que representan los modelos acoplados y tres listas de conexiones **EIC**, **EOC** e **IC**, conexiones de entrada externa (External Input Connections), conexiones de salida externa (External Output Connections) y conexiones internas (Internal Connections).

La lista de conexiones internas (**IC**) es una lista de par de pares de números naturales, de la forma  $(a, b); (c, d)$ . Donde el primer par se refiere al origen de la conexión (puerto  $b$ ) del modelo  $a$  y el segundo al fin de la conexión (puerto  $d$ ) del modelo  $c$ , ambos modelos se refieren a la lista de modelos (atómicos o acoplados) del actual modelo. Por ejemplo el par  $(3, 0); (1, 0)$  indica que el puerto 0 del cuarto modelo (posición 3) está conectado al puerto 1 (segundo puerto) del primer modelo (posición 0).

Tanto **EIC** y **EOC** siguen el mismo patrón excepto que rempazan el modelo de los puertos de salida y entrada respectivamente por 0. Por ejemplo el par  $(6, 0); (0, 1)$  en **EOC** indica que el puerto 0 del modelo 6 (séptima posición) se encuentra conectado con el puerto 1 del modelo acoplado, y un par  $(0, 0); (2, 1)$  en **EIC** indica que el primer puerto (puerto 0) se encuentra conectado con el modelo 2 (tercera posición) en su puerto 1.

Los modelos acoplados, dado que también son modelos **DEVS**, replican

la estructura del Listado 3.1.

Para poder leer esta estructura se cuenta con la librería de PowerDEVS<sup>1</sup> la cual nos permite acceder a la estructura desde C++.

## 3.2. Modelos Atómicos

Dado que cada modelo atómico implementa su propia transición interna, en el caso de PowerDEVS en C++, esta “transición” debe ser provista para cada tipo de modelo atómico con anticipación y adherir a las convenciones que se describen en la sección 3.2.3, por supuesto esta actividad requiere el conocimiento del modelo atómico PowerDEVS y de Modelica.

### 3.2.1. Modelos Continuos

Los modelos continuos son descriptos en general como una ecuación matemática, desde el punto de vista de Modelica, esto se describe en la sección `equation`, la cual utiliza la declaraciones realizadas anteriormente, como vimos en la sección 2.3.

```
class WSum
    parameter Real p[9]={0,0,0,0,0,0,0,0,0};
    parameter Integer n= integer(p[9]);
    parameter Real w[n] = p[1:n];
    Real u[n];
    Real y[1];
equation
    y[1]=u*w;
end WSum;
```

Listado 3.3: Modelo atómico sumador

En el Listado 3.3 el sumador desarrollado para este trabajo, el cual realiza la suma ponderada por los parámetros `w` de los valores de entrada, `u`, en este caso el `*` es el producto interno, el cual es igualado (no asignado) a la variable de salida `y`, definiendo la ecuación que representa el modelo.

### 3.2.2. Modelos Discontinuos

Los modelos discontinuos deben ser modelados con construcciones especiales, en particular se utiliza la construcción `when...elsewhen`, la cual nos permite definir cuando un conjunto de ecuaciones son validas. También

---

<sup>1</sup><http://sourceforge.net/p/powerdevs/code/HEAD/tree/>



podemos utilizar el bloque `algorithm` para realizar el cálculo necesario para evaluar la condición en la construcción `when...elsewhen`.

```

model qss_switch
  parameter Real p[1] = {0};
  parameter Real level = p[1];
  Real u[3];
  Real y[1];
  discrete Real d;
equation
  y[1] = u[1] * d + u[3] * (1 - d);
initial algorithm
  if u[2] > level then
    d := 1;
  elseif u[2] < level then
    d := 0;
  end if;
algorithm
  when u[2] > level then
    d := 1;
  elseif u[2] < level then
    d := 0;
  end when;
end qss_switch;

```

Listado 3.4: Modelo atómico Switch

En el Listado 3.4 se puede ver las construcciones `algorithm` e `initial algorithm` las cuales determinan el valor de `d`, el cual varia entre 0 y 1 dependiendo si `u[2]` ha superado o no el valor de referencia `level` establecido como parámetro.

### 3.2.3. Protocolo

Internamente los modelos atómicos son identificados por el parámetro `Path` en el archivo PDS. Para realizar la traducción de este modelo se utiliza un modelo Modelica el cual debe seguir la siguiente especificación:

- El código debe ser Modelica ( $\mu$ -modelica) válido y estar ubicado en el mismo directorio (y nombre del archivo) del código C que el modelo atómico PowerDEVS, con el mismo nombre que el archivo `.h`, pero con extensión `.mo`, es decir un modelo con `vector\qss_sum_vec.h` utilizará un modelo `vector/qss_sum_vec.mo` <sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>El nombre de los archivos se reemplaza “\” por “/” para permitir algunos modelos cuyos `Path` contiene ese separadores de directorios

- Los parámetros del modelo DEVS deben ser pasados en el parámetro  $p$ , el cual es un arreglo de reales.
- Los valores de entrada del modelo son asociados a la variable  $u$ .
- Los valores de salida del modelos son asociados a la variable  $y$ .

Tanto  $p$ ,  $u$  e  $y$  son arreglos de Reales en el caso escalar, si el modelo es vectorial, entonces  $u$  e  $y$  son arreglos de dos dimensiones (ver la sección 3.5).

Por ejemplo el código del integrador, originalmente ubicado en el archivo `qss_integrator.h` de PowerDEVS, se ubica en el archivo `qss_integrator.mo` mostrado en el Listado 3.5, ambos dentro del directorio `qss`. En el se puede ver que tiene un puerto de entrada, `Real u[1]`, y un puerto de salida, `Real y[1]`. Si bien el integrador tiene cuatro parámetros, el único utilizable dentro del modelo Modelica es la entrada 4, `p[4]`, el cual es el utilizado como valor inicial de integración.

```
class QSSIntegrator
  parameter Real p[4]={0,0,0,0,0,0,0,0};
  parameter Real x0 = p[4];
  Real u[1];
  Real y[1](start = {x0});
equation
  der(y[1]) = u[1];
end QSSIntegrator;
```

Listado 3.5: Modelo `qss_integrator.mo`

El modelo Lotka Volterra cuenta con dos integradores (con los mismos parámetros) representados en el Listado 3.6. En éste se puede ver el valores de `Path` y `Parameters` que componen todos los modelos atómicos (por supuesto con los valores diferentes).

```
...
Simulator
{
  Path = qss/qss_integrator.h
  Parameters = "QSS3","1e-6","1e-3","0.5"
}
...
```

Listado 3.6: Extracto del modelo Lotka Volterra, modelo atómico de un integrador.

Luego de remplazar los parámetros en la variable `p`, se prefijan todas las variables del modelo<sup>3</sup> por el nombre del modelo y su posición en este caso con el prefijo “`QSSIntegrator_1_`”, de esta forma podremos combinar varios modelos atómicos de forma que no existan “colisión” de nombres de variables, es decir dos variables de distintos modelos atómicos con el mismo nombre en Modelica.

```
class QSSIntegrator
  parameter Real QSSIntegrator_1_p[4]={0,1e-6, 1e-3, 0.5};
  parameter Real QSSIntegrator_1_x0 = p[4];
  Real QSSIntegrator_1_u[1];
  Real QSSIntegrator_1_y[1](start = {QSSIntegrator_1_x0});
equation
  der(QSSIntegrator_1_y[1]) = QSSIntegrator_1_u[1];
end QSSIntegrator;
```

Listado 3.7: Transformación parcial de un modelo atómico de un integrator en el modelo de ejemplo Lotka Volterra.

Los parámetros son remplazados en el modelo, evaluándolos en Scilab<sup>4</sup>, lo que los transforma en `float`, los cuales son presentados como reales (`Real`) en el código.

Los modelos (atómicos) no encontrados son ignorados en la traducción y se reportan en el registro (archivo `.log`) de la conversión, todas las conexiones entrantes y salientes del modelo son ignoradas. Esto puede causar problemas si ignoramos (no traducimos) los modelos “fundamentales”, aunque si podemos ignorar modelos que funcionan como salida, en nuestro caso ignoramos el modelo que es utilizado para realizar las gráficas en GNUPlot<sup>5</sup>.

Esta transformación se repite para todos los modelos atómicos del archivo `.PDS` dentro del `Root-Coordinator`. Los modelos acoplados (dentro de un `Coordinator`) deben ser transformados a un conjunto de atómicos equivalentes “Plano”, mediante la transformación descrita en la siguiente sección.

Siguiendo con nuestro ejemplo se puede ver el modelo del integrador en Modelica (con parámetros en cero) en el Listado 3.5, los valores de los parámetros encontrados dentro del archivo PDS en el Listado 3.6, y por último el resultado de la sustitución en el Listado 3.7.

<sup>3</sup>La única variable que no se prefijada es `time`

<sup>4</sup>Para realizar la evaluación en Scilab se utiliza el mismo mecanismo que provee (y utiliza) PowerDEVS.

<sup>5</sup><http://www.gnuplot.info/>

### 3.3. Modelos Acoplados Planos

Llamamos *Modelos Acoplados Planos* a los Modelos que sólo contienen *Modelos Atómicos*. Es decir que no contienen Modelos acoplados.

Cada uno de los modelos atómicos que incluye se transforma de la misma forma que describimos en la sección anterior y dado que no existen “colisiones” de nombres de variables, podemos combinar las diferentes secciones en un modelo compuesto el cual tendrá todas las secciones `equation`, `initial equation` y declaraciones de cada uno de los modelos. Luego cada conexión entre Modelos Atómicos es replicada en el código de Modelica resultante. Los modelos Atómicos cuya entrada (o salida) son escalares son conectados con una ecuación del tipo  $u = y$ , mientras que los modelos vectoriales son conectados con la misma ecuación, solo que dentro de un `for`, el cual itera sobre su dimensión.

```
1 model lotka_volterra
2   Real qss_multiplier_0_u[2];
3   Real qss_multiplier_0_y[1];
4   parameter Real QSSIntegrator_1_p[4] = {0,1e-06,0.001,0.5};
5   parameter Real QSSIntegrator_1_x0 = 0.5;
6   Real QSSIntegrator_1_u[1];
7   Real QSSIntegrator_1_y[1] (start = {QSSIntegrator_1_x0});
8   parameter Real QSSIntegrator_2_p[4] = {0,1e-06,0.001,0.5};
9   parameter Real QSSIntegrator_2_x0 = 0.5;
10  Real QSSIntegrator_2_u[1];
11  Real QSSIntegrator_2_y[1] (start = {QSSIntegrator_2_x0});
12  parameter Real WSum_3_p[9] = {0.1,(-0.1),0,0,0,0,0,0,2};
13  parameter Integer WSum_3_n = integer(2);
14  parameter Real WSum_3_w[WSum_3_n] = WSum_3_p[1:WSum_3_n];
15  Real WSum_3_u[WSum_3_n];
16  Real WSum_3_y[1];
17  parameter Real WSum_4_p[9] = {0.1,(-0.1),0,0,0,0,0,0,2};
18  parameter Integer WSum_4_n = integer(2);
19  parameter Real WSum_4_w[WSum_4_n] = WSum_4_p[1:WSum_4_n];
20  Real WSum_4_u[WSum_4_n];
21  Real WSum_4_y[1];
```

Listado 3.8: Modelo Lotka Volterra convertido de PowerDEVS a  $\mu$ -Modelica (continua)

```

22  equation
23      qss_multiplier_0_y[1] = qss_multiplier_0_u[1]*qss_multiplier_0_u[2];
24      der(QSSIntegrator_1_y[1]) = QSSIntegrator_1_u[1];
25      der(QSSIntegrator_2_y[1]) = QSSIntegrator_2_u[1];
26      WSum_3_y[1] = WSum_3_u*WSum_3_w;
27      WSum_4_y[1] = WSum_4_u*WSum_4_w;
28      qss_multiplier_0_u[1] = QSSIntegrator_1_y[1];
29      qss_multiplier_0_u[2] = QSSIntegrator_2_y[1];
30      QSSIntegrator_1_u[1] = WSum_3_y[1];
31      WSum_3_u[2] = qss_multiplier_0_y[1];
32      WSum_3_u[1] = QSSIntegrator_1_y[1];
33      QSSIntegrator_2_u[1] = WSum_4_y[1];
34      WSum_4_u[1] = qss_multiplier_0_y[1];
35      WSum_4_u[2] = QSSIntegrator_2_y[1];
36  end lotka_volterra;

```

Listado 3.9: (continuación) Modelo Lotka Volterra convertido de PowerDEVS a  $\mu$ -Modelica

En el Listado 3.8 y 3.9 se puede ver el resultado de la conversión del modelo Lotka Volterra, en el se puede apreciar en las líneas 2 a 21 correspondientes a las declaraciones de las variables de los modelos atómicos y de las líneas 22 a 27 correspondientes a las ecuaciones de estos modelos y de la línea 28 a 35 son las ecuaciones correspondientes a las conexiones entre modelos atómicos.

En las líneas de conexiones (líneas 28 a 35) se puede ver cómo se utilizan las variables *u* e *y* (prefijadas con sus correspondientes nombres de modelos atómicos y posición). Tanto los puertos de entrada, *u*, como los puertos de salida, *y*, son representados en Modelica como arreglos, permitiendo a modelos que cuentan con más de un puerto reflejar este hecho, asociando cada puerto a la posición correspondiente del arreglo. Cabe mencionar que existe un desfase, ya que los puertos en PowerDEVS son enumerados desde el cero, mientras que Modelica inician los arreglos en uno, por lo que el puerto *n* corresponde a la variable *u[n+1]* si es un puerto de entrada e *y[n+1]* si es un puerto de salida.

En el ejemplo Lotka Volterra no hay modelos atómicos vectoriales, veremos más adelante un ejemplo vectorial, pero es oportuno mencionar que los modelos vectoriales difieren en la forma en que se conectan, dado que la conexión debe realizarse iterando, con un **for**, sobre la primera dimensión del arreglo que representa el puerto. En el caso escalar, que es el caso por omisión, sólo alcanza con igualar las variables mencionadas.

### 3.4. Modelos Acoplados Jerárquicos

En la sección anterior mostramos cómo son convertidos modelos acoplados planos. Para convertir un modelo acoplado jerárquico, es decir un modelos con más modelos acoplados internos, vamos a generar un modelo acoplado plano, equivalente al modelo jerárquico inicial.

Para realizar el aplanado, se recorre recursivamente los modelos acoplados:

- por cada modelo acoplado si solo tiene modelos atómicos, es remplazado por los modelos atómicos internos, los cuales se encuentran conectados sin modificaciones excepto por las conexiones externas, las cuales son reasignadas de forma de mantener las conexiones.
- si el modelo acoplado contiene otros modelos acoplados entonces aplanamos ese modelo recursivamente.

De esta forma obtenemos un modelo con solo modelos atómicos el cual podemos convertir con el procedimiento anteriormente descrito.

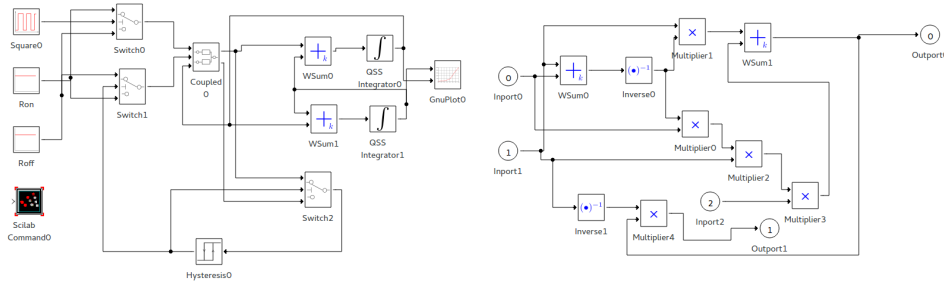


Figura 3.1: Ejemplo de modelo acoplado(derecha), junto a un detalle del modelo Coupled0

En la Figura 3.1 se observa a la derecha el modelo de un convertidor de potencia, el cual introduciremos con mayores detalles en una sección posterior, y a la izquierda el modelo acoplado Coupled0.



Figura 3.2: Modelo convertidor de potencia, jerarquía original (izquierda) y aplanada (derecha). Junto al nombre, está la posición que ocupan dentro del modelo acoplado que los contiene.

En la Figura 3.2 se puede observar la forma en que se modifican las jerarquías. Se puede ver como se mueven los modelos atómicos a la jerarquía superior y se modifican las conexiones de forma que se mantengan los enlaces, es decir todas las conexiones entre modelos atómicos listados, después del modelo acoplado, deben ser ajustadas para tomar en cuenta los nuevos modelos atómicos agregados. En el lado derecho de la Figura 3.2, se puede

ver como fueron modificada las posiciones de los modelos atómicos en relación a como se encontraban antes de ser aplanados en el lado izquierdo de la Figura 3.2.

1	IC	1	EIC
2	{	2	{
3	(13,0);(1,0)	3	(0,2);(4,1)
4	(12,0);(2,0)	4	(0,0);(2,1)
5	(8,0);(4,1)	5	(0,0);(0,1)
6	(4,0);(3,0)	6	(0,1);(3,1)
7	(5,0);(3,1)	7	(0,1);(5,0)
8	(3,1);(11,2)	8	(0,1);(7,0)
9	(11,0);(10,0)	9	(0,1);(0,0)
10	(2,0);(9,0)	10	}
11	(2,0);(12,0)	11	EOC
12	(2,0);(13,1)	12	{
13	(3,0);(11,0)	13	(6,0);(0,1)
14	(3,0);(13,0)	14	(8,0);(0,0)
15	(10,0);(11,1)	15	}
16	(10,0);(5,1)	16	IC
17	(1,0);(3,2)	17	{
18	(1,0);(12,1)	18	(0,0);(1,0)
19	(1,0);(9,1)	19	(7,0);(8,0)
20	(6,0);(5,2)	20	(2,0);(3,0)
21	(6,0);(4,0)	21	(3,0);(4,0)
22	(7,0);(5,0)	22	(5,0);(6,0)
23	(7,0);(4,2)	23	(4,0);(8,1)
24	}	24	(1,0);(2,0)
		25	(1,0);(7,1)
		26	(8,0);(6,1)
		27	}

Listado 3.10: Conexiones del modelo acoplado convertidor de potencia, a la derecha, las conexiones del primera nivel (**Root Coordinator**), a la izquierda, las conexiones, externas de entrada (EIC) y salida (EOC) y las conexiones internas (IC) del modelo acoplado (**Coupled0**).

En el modelo aplanado, se modificarán del Listado 3.10 las conexiones de forma que se respeten las conexiones entre los modelos atómicos, si pasan por un puerto de salida o de entrada. Vemos tres tipos de conexiones que deben ser modificadas:

- Conexiones que involucran modelos atómicos ubicados después del modelo acoplado y no están relacionadas con el modelo acoplado, estas conexiones deben ser modificadas dado que insertaremos los modelos



atómicos del modelo acoplado que estamos aplanando, y los modelos ubicados después del modelo acoplado serán desplazados.

1	IC	1	IC
2	{	2	{
3	(13,0);(1,0)	3	(21,0);(1,0)
4	(12,0);(2,0)	4	(20,0);(2,0)
5	(8,0);(4,1)	5	(16,0);(12,1)
6	(11,0);(10,0)	6	(19,0);(18,0)
7	(2,0);(9,0)	7	(2,0);(17,0)
8	(2,0);(12,0)	8	(2,0);(20,0)
9	(2,0);(13,1)	9	(2,0);(21,1)
10	(10,0);(11,1)	10	(18,0);(19,1)
11	(10,0);(5,1)	11	(18,0);(13,1)
12	(1,0);(12,1)	12	(1,0);(20,1)
13	(1,0);(9,1)	13	(1,0);(17,1)
14	(6,0);(5,2)	14	(14,0);(13,2)
15	(6,0);(4,0)	15	(14,0);(12,0)
16	(7,0);(5,0)	16	(15,0);(13,0)
17	(7,0);(4,2)	17	(15,0);(12,2)
18	}	18	}

Listado 3.11: Conexiones internas, como se encontraban originalmente a la izquierda y modificadas a la derecha

En el Listado 3.11 se puede ver, a la derecha, las conexiones que fueron afectadas y, a la izquierda como fueron afectadas. En nuestro ejemplo se sumó 8 al número de puerto (ya que insertaremos esa cantidad de modelos) a los modelos mayores que 3 (ya que el modelos acoplado que estamos aplanando se encuentra en esa posición).

- Agregamos las conexiones internas del modelo acoplado que eliminaremos al modelo acoplado **Root-Coordinator**, estas conexiones deben ser modificadas ya que los modelos atómicos son insertados en la posición del modelo acoplado eliminado.

IC	IC
{	{
(0,0);(1,0)	(3,0);(4,0)
(7,0);(8,0)	(10,0);(11,0)
(2,0);(3,0)	(5,0);(6,0)
(3,0);(4,0)	(6,0);(7,0)
(5,0);(6,0)	(8,0);(9,0)
(4,0);(8,1)	(7,0);(11,1)
(1,0);(2,0)	(4,0);(5,0)
(1,0);(7,1)	(4,0);(10,1)
(8,0);(6,1)	(11,0);(9,1)
}	}

Listado 3.12: Conexiones internas del modelo acoplado a eliminar, a la izquierda como aparecen originalmente, a la derecha como serán insertadas

En el Listado 3.12 se pueden ver las conexiones como se encontraban originalmente (izquierda) y como serán insertadas (derecha). Estas son el resultados de desplazar los modelos, en nuestro ejemplo 3 posiciones, por lo que sumamos ese desplazamiento a los modelos.

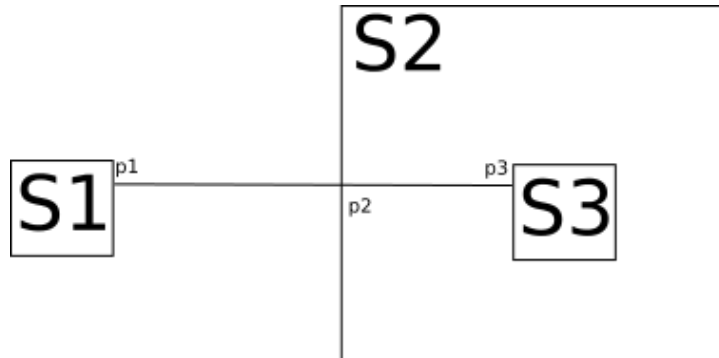


Figura 3.3: Esquema de conexiones, el modelo S1 y S3 son modelo atómico, S2 es el modelo acoplado que estamos aplanando.

Se puede ver en la Figura 3.3 un esquema de conexiones, donde el modelo S2 es un modelo acoplado que contiene el modelo S3. El modelo atómico S1 se conecta a través del puerto p2. Entonces, si consideramos que p2 es un puerto de entrada externa, veremos las siguientes conexiones:

- IC : (S1,p1);(S2,p2)
- EIC : (0,p2);(S3,p3)

entonces la conexión en el modelo aplanado es  $(S1, p1); (S3, p3)$  y  $S1$  debe ser desplazado según la cantidad de modelos que contiene  $S2$  y  $S3$  deberá ser desplazado según la posición de  $S2$ .

Si consideramos que  $p2$  es un puerto de salida las conexiones serán:

- IC :  $(S2, p2); (S1, p1)$
- EOC :  $(S3, p3); (0, p2)$

entonces la conexiones en el modelo aplanado es  $(S3, p3); (S1, p1)$  e igual que en el caso anterior,  $S1$  debe ser desplazado según la cantidad de modelos que contiene  $S2$  y  $S3$  deberá ser desplazado según la posición de  $S2$ .

IC	EOC	IC
{	{	{
$(3, 1); (11, 2)$	$(6, 0); (0, 1)$	$(9, 0); (19, 2)$
$(3, 0); (11, 0)$	$(8, 0); (0, 0)$	$(11, 0); (19, 0)$
$(3, 0); (13, 0)$	}	$(11, 0); (21, 0)$
}		}

Listado 3.13: Conexiones internas desde el modelo acoplado hacia otro modelo (izquierda), conexiones externas de salida (centro), conexiones internas a agregar al modelo aplanando(derecha).

IC	EIC	IC
{	{	{
$(4, 0); (3, 0)$	$(0, 2); (4, 1)$	$(12, 0); (5, 1)$
$(5, 0); (3, 1)$	$(0, 0); (2, 1)$	$(12, 0); (3, 1)$
$(1, 0); (3, 2)$	$(0, 0); (0, 1)$	$(13, 0); (6, 1)$
}	$(0, 1); (3, 1)$	$(13, 0); (8, 0)$
	$(0, 1); (5, 0)$	$(13, 0); (10, 0)$
	$(0, 1); (7, 0)$	$(13, 0); (3, 0)$
	$(0, 1); (0, 0)$	$(1, 0); (7, 1)$
	}	}

Listado 3.14: Conexiones internas hacia el modelo acoplado (izquierda), conexiones externas de entrada(centro), conexiones internas a agregar al modelo aplanando(derecha).

Agregando las conexiones que aparecen a la derecha de los Listados 3.13 y 3.14 se eliminan el modelo acoplado y se preservan las conexiones, y recorriendo el esquema jerárquico de modelos en profundidad, aplanando los modelos acoplados más profundos primero, podemos utilizar el algoritmo de forma de aplanar el modelo más profundo únicamente.

### 3.5. Modelos Vectoriales

Como ya mencionamos, los modelos vectoriales son modelos atómicos en los cuales las entradas y/o salidas son vectoriales. En los modelos Modelica, las variables `u` e `y` representan, en este trabajo, los puertos de entrada y salida respectivamente, por lo que serán del tipo arreglo de arreglos de reales, mientras que en los modelos atómicos no vectoriales (escalares) tienen variables que representan los puertos de entrada y salida como arreglos de reales.

En el momento en que las estructuras del modelo acoplado son transformadas a Modelica, es decir cuando se agregan las ecuaciones de igualdad entre las variables de entrada y salida de diferentes modelos, es decir las conexiones internas, en PowerDEVS, no existe una forma de determinar si un modelo es vectorial o no, por lo que debemos indicarlo dentro del modelo Modelica. Si no lo hacemos agregaremos una ecuación que iguale un arreglo con una entrada de un arreglo. Para prevenir este problema utilizamos el mecanismo de anotaciones (`annotation`), provisto por Modelica para agregar datos sobre el modelo.

Las posibles combinaciones de entrada y salida son :

- `annotation(PD2M0 = {Scalar, Scalar});` entrada y salida son escalares, este es el caso por omisión y no es necesario declararlo.
- `annotation(PD2M0 = {Scalar, Vector});` entrada escalar y salida vectorial
- `annotation(PD2M0 = {Vector, Scalar});` entrada escalar y salida vectorial
- `annotation(PD2M0 = {Vector, Vector});` entrada y salida vectoriales.

De esta forma podemos realizar la conexiones correctamente y generar un error en caso de encontrar una conexión escalar con una vectorial.

### 3.6. Transformaciones Extras

Existen dos tipos de transformaciones extras que deben ser aplicadas con el fin de que el código generado sea  $\mu$ -Modelica, en particular estas transformaciones se agrupan en dos:

- Causalización de variables, este es un programa descrito en [16]
- Transformaciones de Modelica a  $\mu$ -Modelica, si bien existe un programa con esta finalidad, éste no implementa (al momento de escribir este texto) las transformaciones que necesitamos, por lo que son

descriptas en la sección 4.4. Involucra las construcciones de Modelica `if...then...else`, producto interno de dos vectores y arreglos bidimensionales.

### 3.7. Preservación de la Semántica

En caso de las transformaciones extras, no solo se encuentran dentro del mismo lenguaje, sino que las construcciones, `if...then...else`, producto interno de dos vectores y arreglos bidimensionales, son expandidas según su definición, por lo que conservan la misma semántica.

Con respecto a la estructura del Modelo PowerDEVS, las conexiones entre los modelos atómicos convierten una o  $N$  conexiones en PowerDEVS, en una o  $N$  igualdades en Modelica, dependiendo si el modelo es escalar o vectorial. La transformación de conexión a igualdad, es la transformación que más nos sirve pues, por un lado, estamos tratando de eliminar el pasaje de eventos entre puertos para liberar recursos computacionales y, por el otro, es una estrategia utilizada en el modelado de sistemas en PowerDEVS.

El aplanado es, por construcción, el procedimiento que sigue el evento según esta conectado, es decir si un modelo  $a$ , esta conectado a un modelo  $b$  a través de a un puerto (de entrada o salida), la conexión del modelo aplanado es la conexión entre  $a$  y  $b$ .

Por último, la traducción entre modelos atómicos, como es realizada a mano y con anticipación a la conversión automática, depende de la capacidad de quien realiza esta traducción.

## Capítulo 4

# Detalles de la implementación

A continuación se presenta el pseudo código que implementa las transformaciones descritas en este trabajo. El código completo puede encontrarse en <https://github.com/lucciano/pd2mo>, el cual utiliza dos librerías, Modelica C Compiler <sup>1</sup> la cual nos permite manipular la estructura de los modelos y evaluar los parámetros, y librería de PowerDEVS <sup>2</sup> para leer los archivos PDS.

## 4.1. Programa Principal

El Programa principal esta en el archivo main.cpp, el cual es responsable de la interfaz con el usuario (línea de comando) y de lanzar la transformación de la simulación, así como establecer los archivos desde donde se lee y hacia donde se escriben la simulación de PowerDEVS y Modelica, respectivamente.

La transformación de la simulación se encuentra separada en distintos módulos los cuales funcionan como una línea aplicándose uno detrás del otro, lo cual se intenta describir en la Figura 4.1.

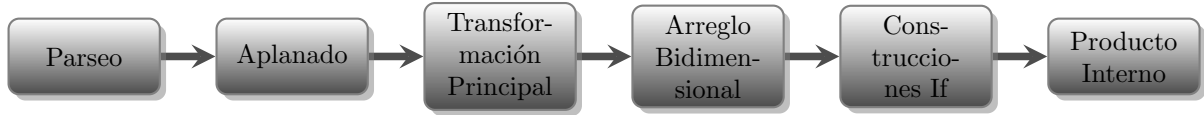


Figura 4.1: Esquema de transformaciones aplicadas

---

### Procedimiento 1 main(src\_infile)

---

```

1: modelCoupled *cm ← parsePDS(QString::fromStdString(src_infile));
2: modelCoupled *qm ← flatter::flat(cm);
3: modelname = replace(src_infile, ".pds", );
4: outfile = replace(src_infile, ".pds", ".mo");
5: oFlogfile = replace(src_infile, ".pds", ".log");
6: Pd2Mo q ← Pd2Mo();
7: q.transform(qm, modelname, &outfile, &oFlogfile);
8: AST_StoredDefinition sd ← parseFile(src_outfile,&r);
9: mda *m ← new mda();
10: If *i ← new If();
11: outfile    <<    m→VISITCLASS(prod→visitClass(    i→visitClass(
    *sd→models()→begin())) << endl;

```

---

<sup>1</sup><http://sourceforge.net/projects/modelicacc/>

<sup>2</sup><http://sourceforge.net/projects/powerdevs/>

## 4.2. Aplanado de modelos acoplados

La clase *flatter* implementa el aplanado de los modelos acoplados descrito en la sección 3.4.

---

**Procedimiento 2** *flatter::flat*

---

```
1: for ModeloHijo en Lista de Modelos do
2:   if Tipo de ModeloHijo es COUPLED then
3:     for ModeloHijo2 en Lista de ModeloHijo→ModeloHijo do
4:       if Tipo de ModeloHijo2 es ATOMIC then
5:         Copiamos el ModeloHijo2 al ModeloResultado;
6:       else
7:         Copiamos el aplanado de ModeloHijo2;
8:       end if
9:       posicionModelo  $\leftarrow$  Posición del ModeloHijo en el Modelo
10:      for Conexión Interna ic del Modelo do
11:        (x,u);(y,v)  $\leftarrow$  ic     $\triangleright$  Si la conexión involucra un modelo
        “aun no procesado”
12:        if x > posicionModelo then
13:          x  $\leftarrow$  x + posicionModelo
14:        end if
15:        if y > posicionModelo then
16:          y  $\leftarrow$  y + posicionModelo
17:        end if
18:        if Si la conexión involucra como destino el modelo acoplado
        ModeloHijo then  $\triangleright$  Se crea
        una nueva conexión (en ModeloResultado) entre los modelos agregado
        recientemente según la conexión del puerto de entrada del ModeloHijo
        y el origen de la conexión
19:          for Conexión Externa Entrante eic del ModeloHijo do
20:            (0,u1);(x1,v1)  $\leftarrow$  eic
21:            if u1 == v then
22:              icadd  $\leftarrow$  (x,u);(x1+posicionModelo,v1)
23:              Agregamos icadd a las conexión del Modelo
24:            end if
25:          end for
26:          La conexión se marca para ser borrada;
27:        end if
```

---



---

**Procedimiento 3** flatter::flat (cont.)

---

```
28:         if Si la conexión involucra como origen el modelo acoplado
        ModeloHijo then ▷ Se crea una nueva conexión (en ModeloResultado)
        entre los modelos agregado recientemente según la conexión del puerto
        de salida del ModeloHijo y el destino de la conexión
29:             for Conexión Externa Saliente eoc del ModeloHijo do
30:                 (x1,u1);(0,v1) ← eic
31:                 if v1 == u then
32:                     icadd ← (x1+posicionModelo,u1);(y,v)
33:                     Agregamos icadd a las conexión del Modelo
34:                 end if
35:             end for
36:             La conexión se marca para ser borrada;
37:         end if
38:         if Si la conexión fue marcada para ser borrada then
39:             Se borra la conexión
40:         end if
41:     end for
42: end for
43: else
44:     Copiamos el nodo ModeloHijo al ModeloResultado
45:     Copiamos las conexiones del ModeloHijo y cualquier otro Mode-
    loHijo que ya haya sido procesado
46: end if
47: end for
48: return ModeloResultado
```

---

### 4.3. Transformación Principal

La clase *Pd2Mo* implementa las principales partes de la transformación, la cual incluye abrir el archivo PDS, e invocar el aplanado, obtener los diferentes modelos Modelica que representan los modelos atómico, prevenir la colisión de nombres, crear el modelo final y realizar las conexiones.

---

**Procedimiento 4** Pd2Mo::transform()

---

```
1: modelCoupled *model  $\leftarrow$  parsePDS(qfilename);
2: AST_ClassList classList  $\leftarrow$  getAsClassList(model);
3: int j  $\leftarrow$  0
4: for class en classList do
5:   if La clase esta traducida a  $\mu$ Modelica then
6:     Prefijamos las variables con el nombre del modelo class y la po-
       sición j que ocupan en la lista;
7:     Remplazamos la entrada class dentro de la lista por su copia
       producida en el paso anterior;
8:   end if
9: end for
10: Creamos un modelo modeloMo;
11: for class en classList do
12:   Combinamos el modelo class con el modeloMo;
13: end for
14: for ic en Conexión Interna del Modelo do
15:   (x,u)(y,j)  $\leftarrow$  ic
16:   u  $\leftarrow$  u + 1  $\triangleright$  Se incrementa el orden de los puertos ya que en
       Modelica los arreglos comienzan en 1
17:   j  $\leftarrow$  j + 1
18:   if los modelos de ic son Escalares then
19:     Se agrega la ecuación que representa la conexión entre el modelo
       x con el puerto u y el modelo y con el puerto j;
20:   else if los modelos de ic son Vectoriales then
21:     Se agregan N ecuaciones indexadas por i que representan la co-
       nexión vectorial entre los modelos u y j mediante una sentencia For;
22:   else
23:     No se conoce la conexión;
24:   end if
25: end for
```

---

#### 4.4. Transformaciones para $\mu$ -Modelica

Tanto la clase *mda*, *prodint* e *If* son implementadas con el patrón de diseño de visitantes sobre el árbol sintáctico abstracto<sup>3</sup>, por lo que cada clase es implementada heredando de una clase común (*Traverser*), la cual retorna una copia del AST y remplaza una parte de este según sea el objetivo de la clase.

Estas transformaciones son necesarias dado que al momento de realizar

---

<sup>3</sup>un árbol de sintaxis abstracta (AST), o simplemente un árbol de sintaxis, es una representación de árbol de la estructura sintáctica abstracta (simplificada) del código fuente escrito en cierto lenguaje de programación.

este trabajo algunas expresiones Modelica no eran soportadas por el QSS-Solver.

- *mda*: Remplaza expresiones de la forma  $X[N,k]$ , donde  $k \in \mathbb{N}$  o evalúa a una variable que evalúa a una expresión  $\in \mathbb{N}$ . Son remplazados por  $X_k[N]$  en las secciones `equation`, `algorithm`, `initial algorithm` y declaraciones para hacer el código Modelica válido. En otras palabras remplaza arreglos bidimensionales por arreglos unidimensionales.

```
Real IndexShift_2_u[IndexShift_2_N,1];
```

⇓

```
Real IndexShift_2_u_1[IndexShift_2_N];
```

- *prodint*: Remplaza expresiones de la forma  $u[i, 1 : nin] * w$  por expresiones de la forma  $u[i,1] * w[1] + u[i,2] * w[2] \dots + u[i,nin] * w[nin]$ , donde  $nin \in \mathbb{N}$  o evalúa a una variable que evalúa a una expresión  $\in \mathbb{N}$ , es decir expande la operación de producto interno (\*) entre los dos vectores.

```
VectorSum_3_y_1[VectorSum_3_i] =  
    VectorSum_3_u[VectorSum_3_i, 1:VectorSum_3_nin] *  
    ↪ VectorSum_3_w;
```

(Donde `VectorSum_3_nin` = 4 y `VectorSum_3_w` tiene dimensión 4, lo que es necesario para que quede definido el producto de dos vectores en modelica.)

⇓

```
VectorSum_3_y_1[1,VectorSum_3_i] =  
    ↪ VectorSum_3_u[1,VectorSum_3_i]*VectorSum_3_w[1]+  
    ↪ VectorSum_3_u[2,VectorSum_3_i]*VectorSum_3_w[2]+  
    ↪ VectorSum_3_u[3,VectorSum_3_i]*VectorSum_3_w[3]+  
    ↪ VectorSum_3_u[4,VectorSum_3_i]*VectorSum_3_w[4];
```

- *If*: Reemplaza ecuaciones de la forma  $if(v)\{eq_1\}else\{eq_2\}$  si  $v$  evalúa a un booleano (a partir de parámetros o constantes, es decir en análisis estático) se reemplaza por  $eq_1$  o  $eq_2$  si  $v$  es verdadero o falso respectivamente.

```

if IndexShift_2_Shift > 0 then
  for IndexShift_2_i in
    ↪ 1:IndexShift_2_N-IndexShift_2_Shift loop
      IndexShift_2_y_1[IndexShift_2_i+IndexShift_2_Shift]
    ↪ = IndexShift_2_u_1[IndexShift_2_i];
  end for;
  for IndexShift_2_i in 1:IndexShift_2_Shift loop
    IndexShift_2_y_1[IndexShift_2_i] = 0;
  end for;
else
  for IndexShift_2_i in
    ↪ 1:IndexShift_2_N-IndexShift_2_Shift loop
      IndexShift_2_y_1[IndexShift_2_i] =
        IndexShift_2_u_1[IndexShift_2_i -
    ↪ +IndexShift_2_Shift];
  end for;
  for IndexShift_2_i in IndexShift_2_N +
    ↪ IndexShift_2_Shift : IndexShift_2_N loop
    IndexShift_2_y_1[IndexShift_2_i] = 0;
  end for;
end if;

```

(Con Shift > 0)

⇓

```

for IndexShift_2_i in
  ↪ 1:IndexShift_2_N-IndexShift_2_Shift loop
    IndexShift_2_y_1[IndexShift_2_i+IndexShift_2_Shift] =
  ↪ IndexShift_2_u_1[IndexShift_2_i];
  end for;
  for IndexShift_2_i in 1:IndexShift_2_Shift loop
    IndexShift_2_y_1[IndexShift_2_i] = 0;
  end for;

```

## Capítulo 5

# Ejemplos y Resultados

En este capítulo comparamos los resultados de la ejecución de 5 modelos, los tiempos de ejecución de cada modelo en PowerDEVS comparándolos con el modelo transformado en QSS-Solver. Los modelos ejecutados, tanto los originales en PowerDEVS como los modelos transformados en  $\mu$ -Modelilca se encuentran en <https://github.com/lucciano/pd2mo/tree/master/doc/tesina/src>

## 5.1. Comparación de desempeño

A continuación por cada uno de los modelos se muestra su modelo en PowerDEVS seguido de dos gráficas (ambas son generadas con GNUPlot). A la izquierda se muestra el resultado de la simulación de PowerDEVS y a la derecha el resultado del modelo transformado en el QSS-Solver.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en una PC Intel® Core™ i7-3632QM CPU @ 2.20GHz con 16 GB de memoria RAM. Los tiempos observados no deben ser considerados como absolutos ya que variarán de un sistema a otro, aunque las mejoras relativas se mantendrán.

## 5.2. Ecuaciones Lotka-Volterra

El sistema de ecuaciones Lotka-Volterra fue presentado en la página 9, el cual es un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, no lineales, utilizadas para describir dinámicas de sistemas biológicos en el cual dos especies interactúan, una como presa y otra como depredador y se definen como:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x(\alpha - \beta y) \\ \frac{dy}{dt} &= y(\gamma - \delta x)\end{aligned}$$

donde:

- $y$  es el número de algún predador (por ejemplo, un lobo);
- $x$  es el número de sus presas (por ejemplo, conejos);
- $t$  representa el tiempo; y
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  son parámetros que representan las interacciones de las dos especies.

Este sistema es representado en PowerDEVS por el modelo de la Figura 5.1:

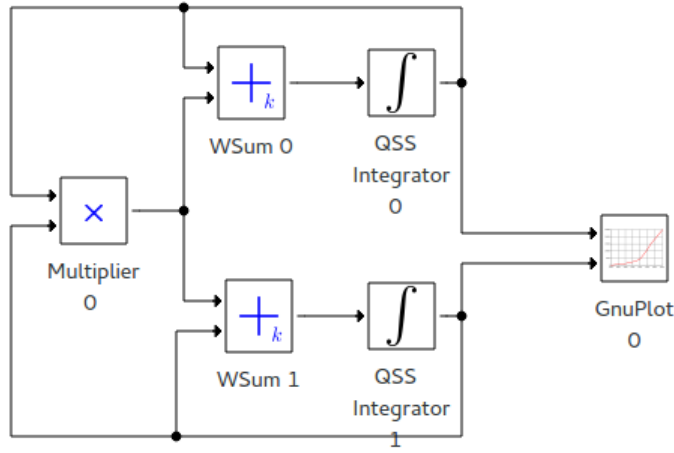


Figura 5.1: Modelo PowerDEVS del Sistema Lotka Volterra

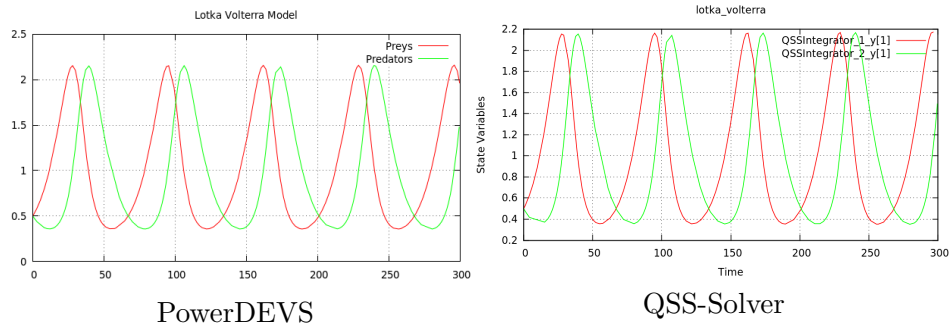


Figura 5.2: Resultados de la simulación del Modelo Lotka Volterra

En la Figura 5.2 se pueden ver los dos resultados de la simulación de 300 segundos. A la izquierda el resultado en PowerDEVS, el cual tomó 11 ms, y a la derecha el resultado en QSS-Solver el cual tomó 2.75 ms.

### 5.3. Líneas de Transmisión

El siguiente sistema de ecuaciones representa un modelo de una línea de transmisión formada por  $N$  secciones de circuitos LC:

$$\begin{aligned} \frac{dv_j}{dt} &= \frac{i_j - i_{j+1}}{C} \\ \frac{di_j}{dt} &= \frac{v_{j-1} - v_j}{L} \end{aligned} \quad (5.1)$$

para  $j = 2 \dots N$

Consideramos un pulso de entrada:

$$v_0(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t < 1 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (5.2)$$

En la Figura 5.3 se puede ver el modelo de PowerDEVS para la simulación del modelo de Líneas de Transmisión.

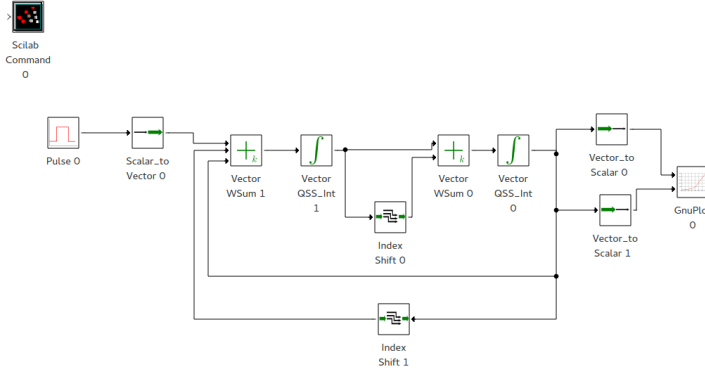


Figura 5.3: Modelo PowerDEVS de Líneas de Transmisión

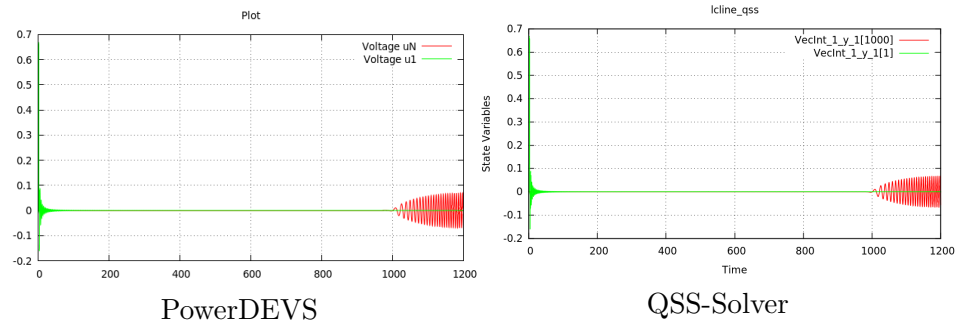


Figura 5.4: Resultados de la simulación de Líneas de Transmisión

En la Figura 5.4 se puede ver el resultado de la simulación de 20 minutos (1200 s) del Modelo de Líneas de Transmisión con 1000 segmentos en PowerDEVS, la cual tomó 76402 ms a la izquierda, mientras que a la derecha se encuentra el resultado del modelo convertido ejecutado en QSS-Solver con los mismos parámetros, el cual tomó 34982.5 ms.

## 5.4. Inversores Lógicos

El siguiente modelo representa una cadena de  $m$  inversores lógicos,



$$\frac{d\omega_1}{dt} = U_{op} - \omega_1(t) - \Upsilon g(u_{in}(t), \omega_1(t))$$

$$\frac{d\omega_j}{dt} = U_{op} - \omega_j(t) - \Upsilon g(\omega_{j-1}(t), \omega_j(t)) \text{ donde } j = 2, 3, \dots, m$$

donde :

$$g(u, v) = (\max(u - U_{thres}, 0))^2 - (\max(u - v - U_{thres}, 0))^2$$

Se utilizaron los parametros:  $\Upsilon = 100$ ,  $U_{thres} = 1$ , y  $U_{op} = 5$ . Las condiciones iniciales son :  $w_j = 6,247 \cdot 10^{-3}$  para valores impares de  $j$  y  $w_j = 5$  para valores pares de  $j$ . La entrada es una señal periodica trapezoidal, con parametros  $V_{up} = 5V$ ,  $V_{low} = 0V$ ,  $T_{down} = 10$ ,  $T_{up} = 5$ ,  $T_{rise} = 5$ , y  $T_{fall} = 2$ . El cual es representado por el modelo PowerDEVS de la Figura 5.5.

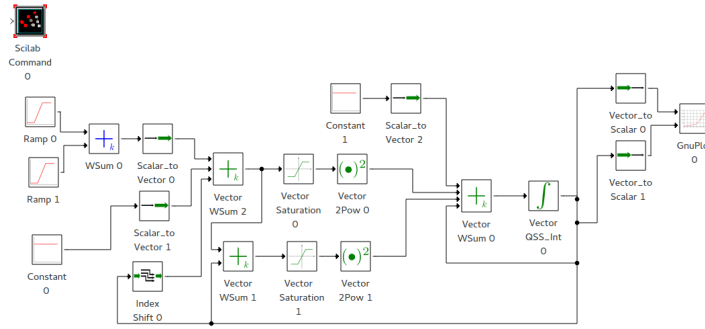


Figura 5.5: Modelo PowerDEVS de Inversores Lógicos

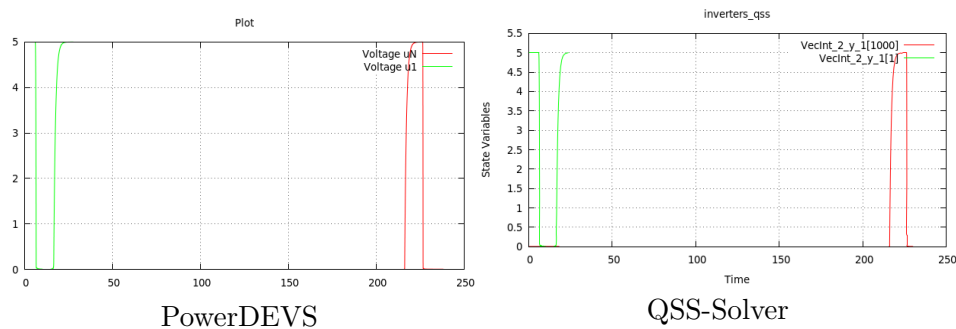


Figura 5.6: Resultados de la simulación de Inversores

En la Figura 5.6 se puede ver el resultado de la simulación del modelo de 1000 inversores durante 250 segundos, lo cual tomó 25046 ms en PowerDEVS en la izquierda, mientras que en QSS-Solver tomó 7694.44 ms

## 5.5. Advection-Diffusion-Reaction

El modelo de ecuaciones Advection-diffusion-reaction (ADR) provee las bases para describir fenómenos de transferencias de calor y masa, donde la cantidad de interés  $u(x, t)$  puede ser temperatura en la conducción de calor o concentración de una sustancia química.

La ecuación

$$\frac{du(x, t)}{dt} + a \frac{du(x, t)}{dx} = d \frac{d^2 u(x, t)}{dx^2} + r(u(x, t)^2 - u(x, t)^3)$$

corresponde al modelo ADR, donde  $a, d$  y  $r$  son parámetros expresando coeficientes de advección, difusión y reacción, el cual es aproximado mediante el método de las líneas [17] en el modelo de la Figura 5.7

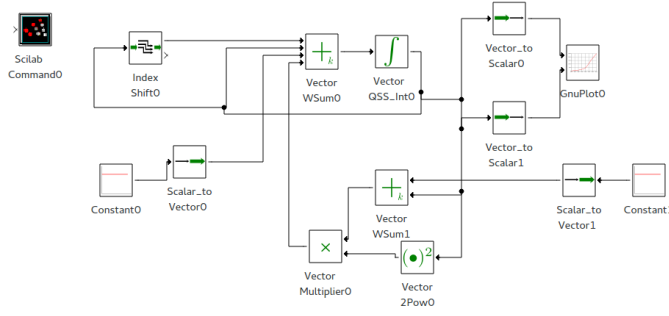


Figura 5.7: Modelo PowerDEVS ADR

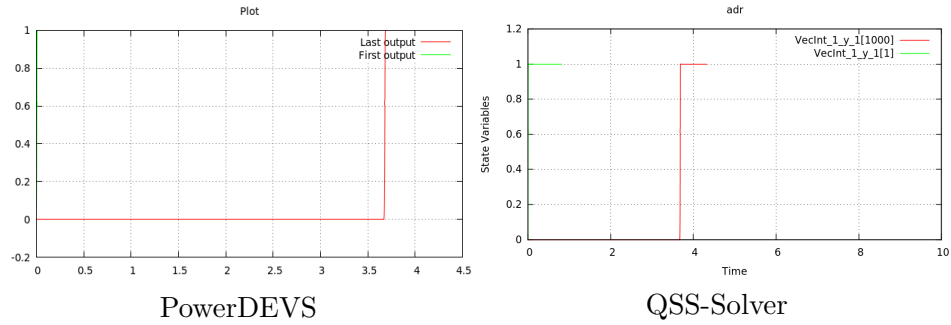


Figura 5.8: Resultados de la simulación ADR

En la Figura 5.8 se puede ver el resultado de la simulación del modelo ADR de 10s para  $N = 1000$  en PowerDEVS a la izquierda, la cual tomó 6089 ms, mientras que la simulación QSS-Solver del modelo convertido es 568.772 ms, en ambos casos utilizando el método de integración LIQSS2.

## 5.6. Convertidor de Voltaje

El siguiente modelo es un tipo de convertidor DC - DC que obtiene a su salida un voltaje continuo menor que a su entrada, manteniendo una alta eficiencia (superior al 95 % con circuitos integrados) y autorregulación.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-u_C - R_D i_D}{L}$$

$$\frac{du_C}{dt} = i_D \frac{1}{C} - \frac{u_C}{R_L C}$$

donde

$$i_D = \frac{R_s i_L - u_C - U}{R_D + R_s}$$

Las ecuaciones anteriores se ven reflejadas en el circuito eléctrico de la Figura 5.9.

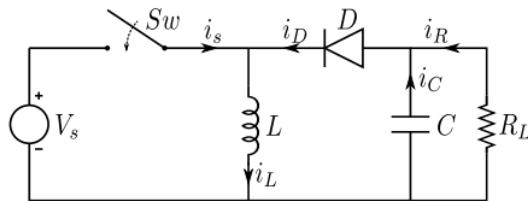


Figura 5.9: Esquema eléctrico de convertidor de voltaje

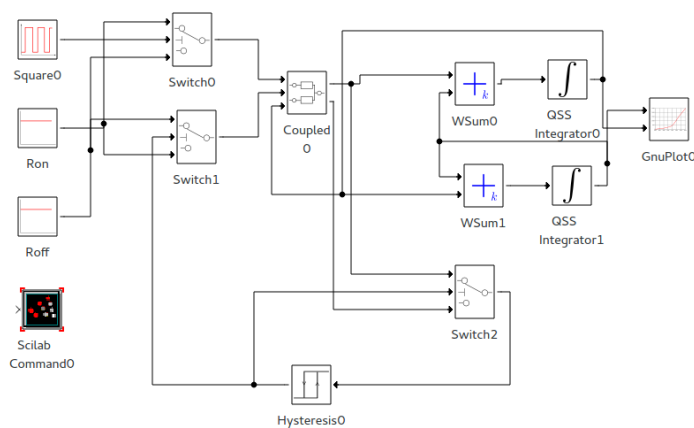


Figura 5.10: Modelo Convertidor de voltaje

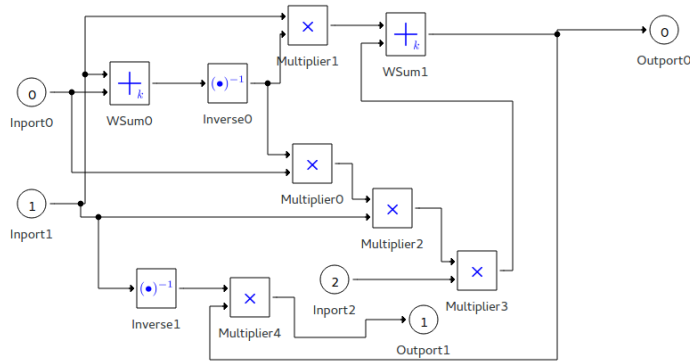


Figura 5.11: Coupled0 (Incluido en Convertidor de voltaje)

El cual es representado en el modelo de la Figuras 5.10 y 5.11.

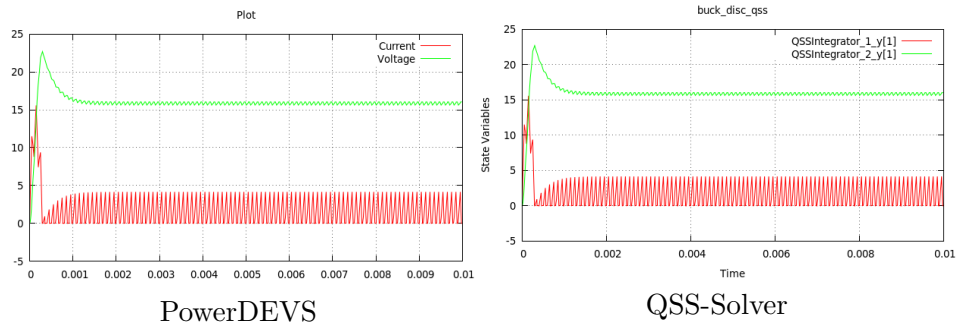


Figura 5.12: Resultados de la simulación de Convertidor de voltaje

En la Figura 5.12 se puede ver el resultado del modelo de Convertidor de voltaje durante 0.01 s a la izquierda en PowerDEVS, lo cual tomó 268 ms, mientras que a la derecha se encuentra el resultado obtenido del QSS-Solver, el cual tomó 10 ms.

## 5.7. Resultados

En el cuadro 5.1 se muestran los tiempos de ejecución obtenidos de los 5 modelos descritos en este capítulo en PowerDEVS (P.DEVS) y QSS-Solver (QSS-S). Ambas mediciones son reportadas por los motores de simulación, en milisegundos (ms). Todas las simulaciones utilizan el método de integración QSS3 excepto los que se especifica LIQSS2.

<b>Modelos</b>	<b>P.DEVS(ms)</b>	<b>QSS-S. (ms)</b>	<b>Mejora (%)</b>
Lotka Voltera 300 s	11	2.75132	81
Lineas de Transmisión 1200 s, N=1000	76402	34982.5	54
Inversores(LIQSS2) 250 s, N=1000	25046	7694.44	69
ADR(LIQSS2) 10 s, N=1000	6089	568.772	90
Convertidor de Voltaje 0.01 s,	268	10.3802	96

Cuadro 5.1: Comparación de las diferentes simulaciones y sus mejoras

En el cuadro 5.1 se puede ver una mejora entre 54 y 96 % entre todos los modelos. Los modelos vectoriales, son nuestro principal objetivo, ya que es una forma simple de describir grandes modelos y son susceptible a tener grandes mejoras en los tiempos de ejecución. Entre estos modelos se aprecia una mejora entre entre 54 y 90 %.

## Capítulo 6

# Conclusiones y Trabajos futuros

## 6.1. Conclusiones

Nos planteamos el objetivo de realizar una traducción para permitir ejecutar modelos PowerDEVS dentro de la herramienta de simulación QSS-Solver, para lo cual se generaron de forma manual<sup>1</sup> los modelos Modelica equivalentes a los bloques PowerDEVS utilizados en los ejemplos del Capítulo 5<sup>2</sup>. Se desarrolló un algoritmo de traducción para la estructura de archivos PDS de PowerDEVS, el cual incluye la traducción de estructuras planas, es decir sin jerarquía, y la traducción de una estructura jerárquica a estructuras planas, la cual nos permite encarar cualquier estructura del archivo PDS, mientras se cuenten con los modelos Modelica generados manualmente. Además se implementaron transformaciones automáticas sobre el código Modelica generado para soportar construcciones que no habían sido implementadas en QSS-Solver, condicional `if...then`, producto escalar y arreglos bidimensionales.

Se mostró, en detalles, la implementación y ejemplos aplicados junto con las mejoras en el tiempo de simulación, las cuales alcanzan cerca del 90 % en modelos grandes. Mostramos además como se mantienen los valores obtenidos de la simulación a través de comparar las gráficas resultantes.

## 6.2. Trabajos Futuros

Para poder convertir una mayor variedad de modelos de PowerDEVS, es necesario escribir más modelos en Modelica equivalentes a los modelos atómicos PowerDEVS. Adicionalmente, algunos modelos atómicos necesitan expandir el QSS-Solver para poder ser ejecutados. El caso más representativo es el de los modelos de tiempo real, lo cual requiere modificar el QSS-Solver para soportarlos.

Durante el desarrollo de este trabajo, la librería `modelicacc`<sup>3</sup>, ha sido actualizada con un nuevo parser, el cual deberá ser actualizado en este trabajo.

La expansión de variables vectoriales, donde los valores provienen de expresiones del entorno Scilab, es siempre tratado como un valor escalar y no como uno vectorial. Para determinar cómo se lo debería tratar es necesario realizar un análisis de los tipos de las variables expandidas. Lo cual podría mejorar los mensajes de error cuando se genera el modelo final.

Además es deseable que podamos llamar a esta conversión desde el mismo PowerDEVS y ejecutar el modelo resultante en el QSS-Solver.

---

<sup>1</sup>La creación de estos modelos requiere conocimientos de PowerDEVS y de Modelica

<sup>2</sup>que se encuentran disponibles en el Apéndice A

<sup>3</sup><http://sourceforge.net/projects/modelicacc/?source=directory>

## Apéndice A

### Modelos Creados



A continuación mostramos los modelos  $\mu$ Modelica equivalentes a los modelos PowerDEVS, utilizados para realizar la comparación de performance:

```
class Constant
  parameter Real p[1]={1};
  parameter Real k = p[1];
  Real y[1];
equation
  y[1] = k;
end Constant;
```

Listado A.1: data/sources/constant\_sci.mo

```
model pulse_sci
  constant Real p[4] = {1, 1, 1, 2};
  parameter Real low = p[1];
  parameter Real amplitude = p[2];
  parameter Real ti = p[3];
  parameter Real tf = p[4];
  discrete Real d(start = low);
  Real y[1];
equation
  y[1] = pre(d);
algorithm
  when time > ti then
    d := low + amplitude;
  end when;
  when time > tf then
    d := low;
  end when;
end pulse_sci;
```

Listado A.2: data/sources/pulse\_sci.mo

```

model ramp_sci
  constant Real p[5] = {5, 5, 5, 1, 2};
  parameter Real t0 = p[1];
  parameter Real tr = p[2];
  parameter Real v = p[3];
  discrete Real s, e;
  Real y[1];
initial algorithm
  e := 0;
  s := 0;
equation
  y[1] = (1-pre(e))*pre(s) * ((time-t0) * v / tr)+ pre(e)*v;
algorithm
  when time > t0 then
    s := 1;
  end when;
  when time > t0 + tr then
    e := 1;
  end when;
end ramp_sci;

```

Listado A.3: data/sources/ramp\_sci.mo

```

model square_sci
  constant Real p[3] = {1, 440, 75};

  parameter Real amplitude = p[1];
  parameter Real freq = p[2];
  parameter Real DC = p[3]/100;
  discrete Real lev(start = 1);
  discrete Real next(start = 0);
  Real y[1];
initial algorithm
  next:= DC/freq;
equation
  y[1] = pre(lev)*amplitude;
algorithm
  when time > next then
    lev:=1-lev;
    next:=time+lev*DC/freq+(1-lev)*(1-DC)/freq;
  end when;
end square_sci;

```

Listado A.4: data/sources/square\_sci.mo

```

model hysteretic
  constant Real p[4] = {1, 2, 3, 4};
  parameter Real xl = p[1];
  parameter Real xu = p[2];
  parameter Real yl = p[3];
  parameter Real yu = p[4];
  Real u[1];
  Real y[1];
  discrete Real state;
equation
  y[1] = state;
algorithm
  when time > 0 then
    if u[1] > xu then
      state := yu;
    end if;
    if u[1] < xl then
      state := yl;
    end if;
  end when;
  when u[1] > xu then
    state := yu;
  end when;
  when u[1] < xl then
    state := yl;
  end when;
end hysteretic;

```

Listado A.5: data/qss/hysteretic.mo

```

class inverse_function
  Real u[1];
  Real y[1];
equation
  y[1] = 1/u[1];
end inverse_function;

```

Listado A.6: data/qss/inverse\_function.mo

```

class QSSIntegrator
  parameter Real p[4]={0,0,0,0,0,0,0,0};
  parameter Real x0 = p[4];
  Real u[1];
  Real y[1](start = {x0});
equation
  der(y[1]) = u[1];
end QSSIntegrator;

```

Listado A.7: data/qss/qss-integrator.mo

```

class qss_multiplier
  Real u[2];
  Real y[1];
equation
  y[1] = u[1] * u[2];
end qss_multiplier;

```

Listado A.8: data/qss/qss-multiplier.mo

```

class qss_quantizer
  parameter Real p[2]={1,0};
  parameter Real dQ = p[1];
  discrete Real level(start=0);
  Real u[1];
  Real y[1];
equation
  y[1]=pre(level);
initial algorithm
  if u[1]>level+dQ then
    level:=level+dQ;
  end if ;
  if u[1]<level then
    level:=level-dQ;
  end if ;
algorithm
  when u[1]>level+dQ then
    level:=level+dQ;
  end when;
  when u[1]<level then
    level:=level-dQ;
  end when;
end qss_quantizer;

```

Listado A.9: data/qss/qss\_quantizer.mo

```

model qss_switch
  parameter Real p[1] = {0};
  parameter Real level = p[1];
  Real u[3];
  Real y[1];
  discrete Real d;
equation
  y[1] = u[1] * d + u[3] * (1 - d);
initial algorithm
  if u[2] > level then
    d := 1;
  elseif u[2] < level then
    d := 0;
  end if;
algorithm
  when u[2] > level then
    d := 1;
  elseif u[2] < level then
    d := 0;
  end when;
end qss_switch;

```

Listado A.10: data/qss/qss\_switch.mo

```

class WSum
  parameter Real p[9]={0,0,0,0,0,0,0,0,0};
  parameter Integer n= integer(p[9]);
  parameter Real w[n] = p[1:n];
  Real u[n];
  Real y[1];
equation
  y[1]=u*w;
end WSum;

```

Listado A.11: data/qss/qss\_wsum.mo

```

class IndexSelector
  parameter Real p[3] = {3, 9, 100};
  parameter Integer L = p[1];
  parameter Integer H = p[2];
  constant Integer N = p[3];
  Real u[N, 1];
  Real y[N, 1];
equation
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] = if i > L and i <= H then u[i, 1] else 0;
  end for;
  annotation(PD2M0 = {Vector, Vector});
end IndexSelector;

```

Listado A.12: data/vector/IndexSelector.mo

```

class Vec2Scalar
  parameter Real p[2]={0, 40};
  parameter Integer Index=p[1] + 1;
  constant Integer N = p[2];
  Real u[N,1];
  Real y[1];
equation
  y[1]=u[Index,1];
  annotation (PD2M0={Vector,Scalar});
end Vec2Scalar;

```

Listado A.13: data/vector/vec2scalar.mo



```

class Scalar2Vector
  constant Real p[2] = {-1, 10};
  constant Integer N = integer(p[2]);
  constant Integer Index = integer(p[1]);
  Real u[1];
  Real y[N, 1];
equation
  if Index == (-1) then
    for i in 1:N loop
      y[i, 1] = u[1];
    end for;
  else
    for i in 1:Index loop
      y[i, 1] = 0;
    end for;
    y[Index + 1, 1] = u[1];
    for i in Index + 2:N loop
      y[i, 1] = 0;
    end for;
  end if;
  annotation(PD2M0 = {Scalar, Vector});
end Scalar2Vector;

```

Listado A.14: data/vector/scalar2vec.mo

```

class vector_sum
  parameter Real p[2] = {1, 10};
  constant Integer N = p[2];
  Real u[N, 1];
  Real y[1];
  parameter Real K = p[1];
equation
  y[1] = K * sum(u[:, 1]);
  annotation(PD2M0 = {Vector, Scalar});
end vector_sum;

```

Listado A.15: data/vector/vector\_sum.mo

```

class VecInt
  parameter Real p[5] = {0, 10, 0, 0, 10};
  constant Integer N = p[5];
  parameter Real x0 = p[4];
  Real u[N, 1];
  Real y[N, 1];
initial algorithm
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] := x0;
  end for;
equation
  for i in 1:N loop
    der(y[i, 1]) = u[i, 1];
  end for;
  annotation(PD2M0 = {Vector, Vector});
end VecInt;

```

Listado A.16: data/vector/qss\_integrator\_vec.mo

```

class IndexShift
  constant Real p[2] = {-1, 10};
  constant Integer Shift = integer(p[1]);
  constant Integer N = integer(p[2]);
  Real u[N, 1];
  Real y[N, 1];
equation
  if Shift > 0 then
    for i in 1:N - Shift loop
      y[i + Shift, 1] = u[i, 1];
    end for;
    for i in 1:Shift loop
      y[i, 1] = 0;
    end for;
  else
    for i in 1:N + Shift loop
      y[i, 1] = u[i - Shift, 1];
    end for;
    for i in N + Shift + 1:N loop
      y[i, 1] = 0;
    end for;
  end if;
  annotation(PD2M0 = {Vector, Vector});
end IndexShift;

```

Listado A.17: data/vector/index\_shift.mo

```

class VectorSum
  parameter Real p[10] = {1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 1000};
  constant Integer N = p[10];
  constant Integer nin = p[9];
  parameter Real w[nin] = p[1:nin];
  Real u[N, nin];
  Real y[N, 1];
equation
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] = u[i, 1:nin] * w;
  end for;
  annotation(PD2M0 = {Vector, Vector});
end VectorSum;

```

Listado A.18: data/vector/qss\_sum\_vec.mo

```

class qss_multiplier_vec
  parameter Real p[2] = {1};
  constant Integer N = p[1];
  Real u[N, 2];
  Real y[N, 1];
equation
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] = u[i, 1]*u[i, 2];
  end for;
  annotation(PD2M0 = {Vector, Vector});
end qss_multiplier_vec;

```

Listado A.19: data/vector/qss\_multiplier\_vec.mo

```

model vector_pow2
  constant Real p[1] = {1};
  constant Integer N = integer(p[1]);
  Real u[N, 1];
  Real y[N, 1];
equation
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] = u[i, 1]*u[i, 1];
  end for;
  annotation (PD2M0={Vector,Vector});
end vector_pow2;

```

Listado A.20: data/vector/vector\_pow2.mo

```

model hysteretic_vec
  constant Real p[5] = {1, 1, 1, 1, 1};
  parameter Real x1 = p[1];
  parameter Real xu = p[2];
  parameter Real y1 = p[3];
  parameter Real yu = p[4];
  constant Integer N = integer(p[5]);
  Real u[N, 1];
  Real y[N, 1];
  discrete Real state[N];
equation
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] = pre(state[i]);
  end for;
algorithm
  when time>0 then
    for i in 1:N loop
      if u[i, 1] > xu then
        state[i] := yu;
      end if;
    end for;
    for i in 1:N loop
      if u[i, 1] < x1 then
        state[i] := y1;
      end if;
    end for;
  end when;
  for i in 1:N loop
    when u[i, 1] > xu then
      state[i] := yu;
    end when;
  end for;
  for i in 1:N loop
    when u[i, 1] < x1 then
      state[i] := y1;
    end when;
  end for;
  annotation (PD2MO={Vector,Vector});
end hysteretic_vec;

```

Listado A.21: data/vector/hyst\_vec.mo

```

model vector_sat
  constant Real p[3] = {-1, 1, 1};
  constant Integer N = integer(p[3]);
  parameter Real xl(fixed = true) = p[1];
  constant Real xu(fixed = true) = p[2];
  Real u[N, 1];
  Real y[N, 1];
  discrete Real under[N];
  discrete Real above[N];
initial algorithm
  for i in 1:N loop
    when time > 0 then
      if u[i, 1] < xl then
        under[i] := 1;
      else
        under[i] := 0;
      end if;
      if u[i, 1] > xl then
        above[i] := 1;
      else
        above[i] := 55;
      end if;
    end when;
  end for;
equation
  for i in 1:N loop
    y[i, 1] = pre(under[i]) *
              xl + (1 - pre(under[i])) *
              (pre(above[i]) *
              xu + (1 - pre(above[i])) *
              u[i, 1]);
  end for;
algorithm
  for i in 1:N loop
    when u[i, 1] < xl then
      under[i] := 1;
    end when;
    when u[i, 1] >= xl then
      under[i] := 0;
    end when;
    when u[i, 1] > xu then
      above[i] := 1;
    end when;
    when u[i, 1] <= xu then
      above[i] := 0;
    end when;
  end for;
  annotation(PD2MO = {Vector, Vector});
end vector_sat;

```

# Bibliografía

- [1] Bernard P. Zeigler, Tag Gon Kim, and Herbert Praehofer. *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 2nd edition, 2000.
- [2] Peter Fritzson and Vadim Engelson. Modelica - A Unified Object-Oriented Language for System Modelling and Simulation. In *ECOOOP*, pages 67–90, 1998.
- [3] Peter Fritzson and Peter Bunus. Modelica – a general object-oriented language for continuous and discrete-event system modeling. In *IN PROCEEDINGS OF THE 35TH ANNUAL SIMULATION SYMPOSIUM*, pages 14–18, 2002.
- [4] Federico Bergero and Ernesto Kofman. PowerDEVS: a tool for hybrid system modeling and real-time simulation. *Simulation*, 87(1–2):113–132, 2011.
- [5] Federico Bergero, Xenofon Floros, Joaquín Fernández, Ernesto Kofman, and François E. Cellier. Simulating Modelica models with a Stand-Alone Quantized State Systems Solver. In *9th International Modelica Conference*, 2012. Aceptado.
- [6] Tamara Beltrame and François E. Cellier. Quantised state system simulation in dymola/modelica using the devs formalism. In *in: Proceedings of the 5th International Modelica Conference*, pages 73–82, 2006.
- [7] Victorino Sanz, Alfonso Urquia, and Sebastian Dormido. Parallel devs and process-oriented modeling in modelica. In *In Proceedings of the 7th International Modelica Conference*, pages 96–107, 2009.
- [8] Mariana C. D’Abreu and Gabriel A. Wainer. M/cd++: modeling continuous systems using modelica and devs. In *MASCOTS*, pages 229–238. IEEE Computer Society, 2005.
- [9] Joaquín Fernández and Ernesto Kofman. Implementación autónoma de métodos de integración numérica QSS. Technical report, FCEIA - UNR, Rosario, Argentina, 2012.

- [10] Federico Bergero. *Simulación de Sistemas Híbridos por Eventos Discretos: Tiempo Real y Paralelismo*. PhD thesis, Universidad Nacional de Rosario - Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, 2012.
- [11] Ernesto Kofman Federico Bergero. A vectorial devs extension for large scale system modeling and parallel simulation. *SIMULATION*, 90(5):522–5456, 2014.
- [12] François Cellier and Ernesto Kofman. *Continuous System Simulation*. Springer, New York, 2006.
- [13] L. R. Petzold. A description of DASSL: a differential/algebraic system solver. In *Scientific computing (Montreal, Quebec, 1982)*, pages 65–68. IMACS, New Brunswick, NJ, 1983.
- [14] J.R. Dormand and P.J. Prince. A family of embedded runge-kutta formulae. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 6(1):19 – 26, 1980.
- [15] Federico Bergero, Ernesto Kofman, and François Cellier. A novel parallelization technique for devs simulation of continuous and hybrid systems. *SIMULATION*, 89(6):663–683, 2013.
- [16] *Efficient Compilation of Large Scale Modelica Models*, 2015. 11th International Modelica Conference - Versaille.
- [17] Ernesto Kofman Federico Bergero, Joaquín Fernández and Margarita Portapila. Time discretization versus state quantization in the simulation of a 1d advection-diffusion-reaction equation. *SIMULATION*, 2015. In press.
- [18] Xenofon Floros, Federico Bergero, François E. Cellier, and Ernesto Kofman. Automated Simulation of Modelica Models with QSS Methods - The Discontinuous Case. In *8th International Modelica Conference*, March 2011.
- [19] Cristian Perfumo, Ernesto Kofman, Julio Braslavsky, and John K. Ward. Load management: Model-based control of aggregate power for populations of thermostatically controlled loads. *Energy Conversion and Management*, 55:36–48, 2012.
- [20] Bernard Zeigler. *Multifaceted modelling and discrete event simulation*. Academic Press, London Orlando, 1984.
- [21] Federico Bergero J. Fernández E. Kofman M. Portapila. Quantized state simulation of advection-diffusion-reaction equations. In *ENIEF 2013 - XX Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones*, Mendoza, Argentina, 2013.



- [22] Joaquín Fernández and Ernesto Kofman. A Stand-Alone Quantized State System Solver for Continuous System Simulation. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 90(7):782–799, 2014.