

# Formalismos de Modelado y Simulación a Eventos Discretos

Federico Bergero - Rodrigo Castro

CIFASIS, UBA

CIMS<sup>3</sup>

## Organización de la Presentación

- 1 **Introducción**
  - Sistemas y Experimentos
- 2 **Modelado y Simulación**
  - Modelos
  - Simulación
- 3 **Sistemas de Eventos Discretos y Formalismo DEVS**
  - Modelos Atómicos
  - Modelos Acoplados
  - Simulación
- 4 **DEVS como lenguaje unificador**
  - Modelos de Tiempo Discreto
  - Modelos de Tiempo Continuo
  - Modelos Híbridos
- 5 **Aplicaciones**

# Organización de la presentación

- 1 **Introducción**
  - **Sistemas y Experimentos**
- 2 **Modelado y Simulación**
  - Modelos
  - Simulación
- 3 **Sistemas de Eventos Discretos y Formalismo DEVS**
  - Modelos Atómicos
  - Modelos Acoplados
  - Simulación
- 4 **DEVS como lenguaje unificador**
  - Modelos de Tiempo Discreto
  - Modelos de Tiempo Continuo
  - Modelos Híbridos
- 5 **Aplicaciones**

# ¿Qué es un sistema?

## Definición de Sistema

Un Sistema es una **disposición delimitada** de **entidades interactuantes**.

- Disposición: define la **Estructura del Sistema**.
- Delimitación: las acciones del resto del universo sobre el sistema se reemplazan por **entradas**.
- Entidades interactuante: son los **componentes** del sistema: procesos, elementos, subsistemas, etc.

Ejemplos de sistemas:

- Sistema solar  $\implies$  planetas, estrellas, cometas, etc.
- Sistemas ecológicos  $\implies$  especies, depredadores, presas, etc.
- Sistemas químicos/físicos  $\implies$  partículas, átomos, moléculas, etc.
- Sistemas matemáticos  $\implies$  fórmulas, hipótesis, etc.
- Sistemas sociales  $\implies$  personas, relaciones, intenciones, etc.

## ¿Cómo aprender más sobre este sistema?

### Experimentación

Una forma de entender cómo se comporta el sistema bajo estudio es realizando experimentos sobre él. Un experimento sirve para responder a ciertas preguntas sobre el sistema.

Podríamos tener distintos objetivos:

- **Predecir** el comportamiento bajo cierta situación.
- **Replicar** el sistema creando otro igual.
- **Controlar** el sistema.

### No es tan fácil

Muchas veces realizar un **experimento** sobre el **sistema** no es posible.

- Mucho tiempo.
- Muy costoso.
- Muy riesgoso.
- No existe aún.

# Organización de la presentación

- 1 **Introducción**
  - Sistemas y Experimentos
- 2 **Modelado y Simulación**
  - Modelos
  - Simulación
- 3 **Sistemas de Eventos Discretos y Formalismo DEVS**
  - Modelos Atómicos
  - Modelos Acoplados
  - Simulación
- 4 **DEVS como lenguaje unificador**
  - Modelos de Tiempo Discreto
  - Modelos de Tiempo Continuo
  - Modelos Híbridos
- 5 **Aplicaciones**

# Modelo

## Definición de Modelo

Un Modelo es una **representación simplificada** de un Sistema que permite **responder interrogantes** sobre este último sin recurrir a la experimentación directa sobre dicho sistema.

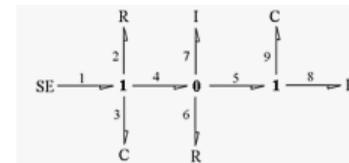
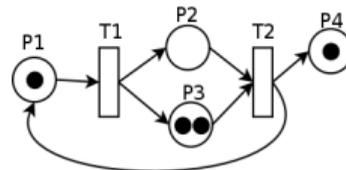
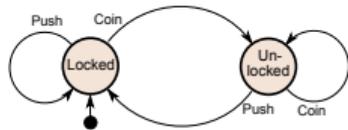
Hay distintas clases de modelos:

- Modelos mentales.
- Modelos probabilísticos.
- Modelos mecánicos.
- Modelos a escala.
- Modelos formales.

## Lenguajes de modelo formales

Los lenguajes de modelado formales permiten describir modelos siguiendo una estructura y un conjunto de reglas.

### • Lenguajes gráficos



### • Lenguajes textuales

```
model A
  Real x;
  equation
    der(x) = 1 - x;
  end A;
```

# Modelos matemáticos

## Definición de Modelo Matemático

Es un conjunto de expresiones matemáticas que describen las relaciones existentes entre las magnitudes caracterizantes del sistema. Ej:  $E = mc^2$ ,  $\sum F = ma$ .

Las magnitudes que caracterizan y rigen la evolución de un modelo matemático se denominan **variables** y **parámetros**.

- Los parámetros son **magnitudes constantes** (o que varían lentamente, independiente de lo que ocurre en el sistema). Ej: masa, resistencia eléctrica, etc.
- Las variables son magnitudes que cambian con el tiempo. Entre ellas encontramos:
  - **Variables fundamentales**: tiempo ( $t$ ) y espacio ( $x, y, z$ ). Son independientes de la evolución del sistema.
  - **Entradas**: representan la acción del **resto del universo** sobre el sistema. Son independientes de la evolución del mismo.
  - **Variables dependientes**: representan la magnitudes que cambian en función de la evolución del sistema.
  - **Salidas**: Son variables dependientes que nos interesan y que podemos observar.

## ¿Cómo obtener un modelo y qué hacemos ?

La disciplina de modelado se encarga de obtener modelos de un sistema. Existen dos formas de hacerlo:

- Primeros principios. Conocimiento a priori.
- Experimentación y derivación de modelo.

## Clasificación de Modelos Matemáticos

Los modelos se pueden clasificar de distintas formas. Una de ellas es en función de la manera en que las variables evolucionan en el tiempo.

- **Tiempo Continuo:** Las variables evolucionan continuamente en el tiempo. Generalmente se representan mediante **ecuaciones diferenciales**.
- **Tiempo Discreto:** Las variables sólo pueden cambiar en determinados instantes de tiempo. Se suelen representar mediante **ecuaciones en diferencias**.
- **Eventos Discretos:** Las variables pueden cambiar en cualquier momento, pero sólo puede haber números finitos de cambios en intervalos de tiempo finitos.

## Simulación

Es la experimentación sobre un modelo (matemático) de un sistema, generalmente implementado en una computadora.

La simulación de un sistema, además del modelado, suele requerir la utilización de **técnicas de aproximación** (métodos numéricos de integración, por ejemplo).

## M&S

Cabe notar que ambas disciplinas Modelado y Simulación aunque están muy relacionadas son muy distintas.

- Se realizan en distintos momentos.
- Por distintas personas.
- Involucran problemas muy distintos.

# Organización de la presentación

- 1 **Introducción**
  - Sistemas y Experimentos
- 2 **Modelado y Simulación**
  - Modelos
  - Simulación
- 3 **Sistemas de Eventos Discretos y Formalismo DEVS**
  - Modelos Atómicos
  - Modelos Acoplados
  - Simulación
- 4 **DEVS como lenguaje unificador**
  - Modelos de Tiempo Discreto
  - Modelos de Tiempo Continuo
  - Modelos Híbridos
- 5 **Aplicaciones**

## Modelos de Eventos Discretos

Consideremos el siguiente ejemplo: un sistema, que posee un sensor detecta cada vez que entra o sale una persona a una habitación, registra el número de personas dentro de la misma. El número de personas se imprime en un panel cada vez que se modifica.

- Cada vez que entra o sale una persona, ocurre un **evento de entrada**.
- Al imprimirse el número en el panel, ocurre un **evento de salida**.
- El número de personas dentro de la habitación representa el **estado del sistema**.

Este tipo de modelos no tiene un formalismo de representación unificado:

- Los eventos no ocurren en momentos específicos, ni sincronizados con algún reloj  $\implies$  no tiempo discreto.
- El estado tampoco evoluciona de forma continua con el tiempo  $\implies$  no tiempo continuo.

## Modelos de Eventos Discretos - Cont.

### Sistemas de eventos discretos

Los SED se caracterizan por tener una **cantidad finita de cambios** en una cantidad **finita de tiempo**. Esto es más restrictivo que los sistemas continuos pero más general que los de tiempo discreto.

Ejemplos de SED:

- Redes de datos.
- Iteración humano-máquina.

## El formalismo DEVS

### Discrete Event System

- Desarrollado por Bernard Zeigler en el 1976.
- DEVS es un formalismo **matemático** basado en teoría de sistemas.
- Es el más general de su clase (Petri, FSM, Statechart, tiempo discreto).
- El comportamiento del modelo se describe a través de funciones matemáticas generales.
- Los modelos pueden ser organizados jerárquicamente.

## Atómicos

La clase de modelos basal en DEVS son los **atómicos** Un modelo describe:

- Cuál es el estado.
- Cuáles son los eventos entradas/salidas posibles.
- Cómo responde a eventos de entrada.
- Cómo actúa ante la ausencia de entradas.

Un modelo DEVS procesa una secuencia de eventos de entrada y de acuerdo a su condición inicial produce una secuencia de eventos de salida.



## Atómicos

Formalmente un modelo atómico DEVS

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

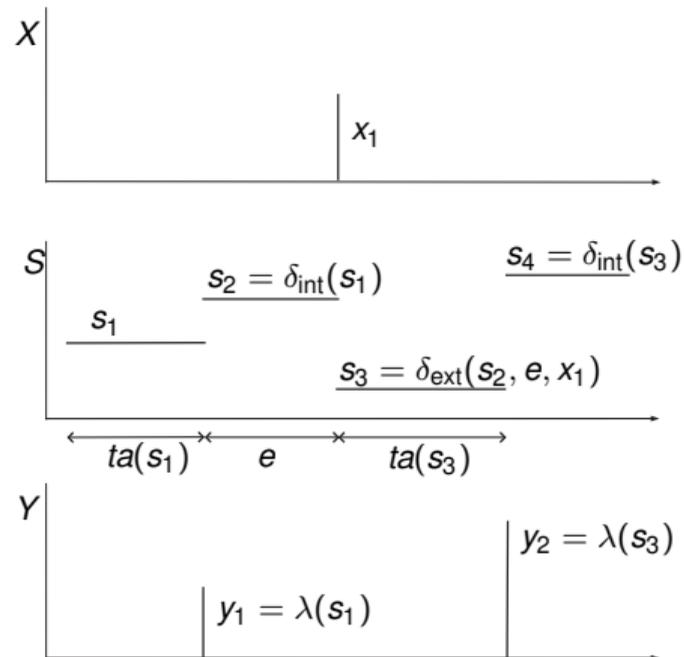
donde:

- $X$  es el conjunto de valores de entrada.
- $Y$  es el conjunto de valores de salida.
- $S$  es el conjunto de valores de estado.
- $\delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}, \lambda$  y  $ta$  son las funciones que definen la dinámica del sistema.

Las funciones tienen la siguiente semántica:

- $ta : S \rightarrow \mathcal{R}_0^+$ . Duración en un estado.
- $\delta_{\text{int}} : S \rightarrow S$ . Transición luego de pasados  $ta(s)$ .
- $\delta_{\text{ext}} : (S \times X \times \mathcal{R}_0^+) \rightarrow \mathcal{R}_0^+$ . Respuesta a una entrada.

## DEVS – Trayectorias



## DEVS – Ejemplo atómico

Un sistema (que llamaremos **generador**) produce eventos. El sistema produce eventos según la siguiente secuencia:  $t = 0, y = 0$ ;  $t = 1, y = 2$ ;  $t = 2, y = 4$ ;  $t = 3, y = 6$ ; etc.

$$G_1 = \langle X, Y, S, \delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}, \lambda, ta \rangle$$

$$X = Y = S = \mathcal{R}^+$$

$$\delta_{\text{int}}(s) = s + 1$$

$$\delta_{\text{ext}}(s, e, x) = s$$

$$\lambda(s) = 2 * s$$

$$ta(s) = 1$$

Notar que el comportamiento queda descrito **sólo** por estas funciones. Por otro lado para conocer la evolución del modelo debemos conocer su estado inicial.

Esto permite separar modelado del experimento y de su simulación.

## DEVS – Ejemplo atómico 2

El modelo anterior no tenía acción útil ante la entrada de un evento. En esta versión haremos que cuando recibe un evento de entrada, se incremente el contador interno  $s$  en  $x$ .

$$G_1 = \langle X, Y, S, \delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}, \lambda, ta \rangle$$

$$X = Y = S = \mathcal{R}^+$$

$$\delta_{\text{int}}(s) = s$$

$$\delta_{\text{ext}}(s, e, x) = s + x$$

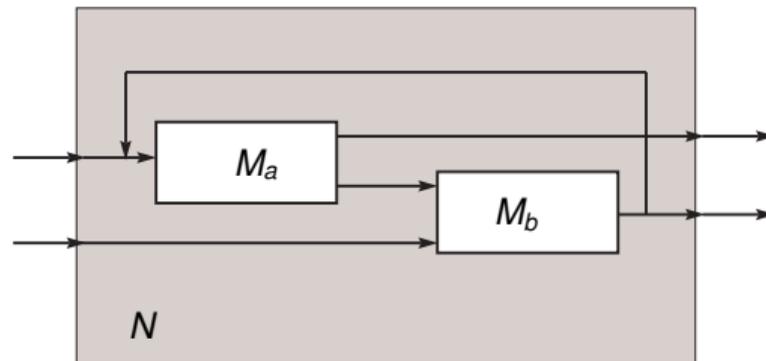
$$\lambda(s) = s$$

$$ta(s) = \infty$$

En este caso el modelo cambia de estado ante una entrada, en función del **estado actual**, la **entrada** y del tiempo transcurrido desde la última transición.

## DEVS – Modelos Acoplados

$$N = (X_N, Y_N, D, \{M_d\}, EIC, EOC, IC, Select)$$



En el acoplamiento **modular** los eventos de salida de un modelo DEVS se convierten en eventos de entrada de otro.

### Clausura bajo acoplamiento

El acoplamiento de modelos atómicos DEVS define un modelo atómico equivalente.

## Simulación de Modelos DEVS

Un simulador genérico de modelos DEVS funciona como sigue:

- 1 Para cada atómico  $d \in N$ , calculamos  $tn_d = ta_d(s_d) - e_d$  (tiempo del próximo evento interno en el atómico  $d$ ).
- 2 Buscamos el modelo atómico  $d^*$  que tiene el mínimo  $tn_d$  ( $d^*$  es el próximo atómico en realizar una transición interna).
- 3 Avanzamos el tiempo de la simulación  $t$  haciendo  $t = tn_{d^*}$ .
- 4 Calculamos el evento de salida  $\lambda_{d^*}(s_{d^*})$ .
- 5 Para cada modelo atómico  $d$  conectado a la salida del modelo  $d^*$ , ejecutamos la función de transición externa y recalculamos  $tn_d$ .
- 6 Ejecutamos la transición interna de  $d^*$  y recalculamos  $tn_{d^*}$ .
- 7 Volvemos al punto 2.

## Herramientas de Simulación

### Simulación por software

Este algoritmo se puede implementar en software. Existen distintas herramientas de simulación:

- ADEVS
- CD++
- MS4ME
- DEVS/Java
- PowerDEVS

Cada una tiene distintos objetivos y metodologías.

## Organización de la presentación

- 1 Introducción
  - Sistemas y Experimentos
- 2 Modelado y Simulación
  - Modelos
  - Simulación
- 3 Sistemas de Eventos Discretos y Formalismo DEVS
  - Modelos Atómicos
  - Modelos Acoplados
  - Simulación
- 4 DEVS como lenguaje unificador
  - Modelos de Tiempo Discreto
  - Modelos de Tiempo Continuo
  - Modelos Híbridos
- 5 Aplicaciones

## Sistemas de tiempo discreto

Los modelos de tiempo discreto pueden ser representados nativamente en DEVS.

- El sistema evolucionará en instantes fijos y equi-espaciados de tiempo.
- La función  $ta(s)$  devuelve una constante.
- Entre estos instantes el estado del modelo permanece constante.

Muchos modelos caen dentro de esta categoría:

- Computadoras digitales.
- Procesamiento de señales digitales.
- Otros formalismos como máquinas de estado finita.

## Modelos continuos

### Representación

- Los modelos de tiempo continuo se representan como ecuaciones diferenciales.

$$\dot{x}(t) = v(t) \quad (1)$$

$$\dot{v}(t) = m * a \quad (2)$$

- Estos sistemas no son directamente representables en DEVS.
- Pueden ser **aproximados** por distintos métodos de interacción numérica.
- En particular por los métodos de cuantificación de estados.

## Un formalismo de bajo nivel

DEVS permite representar modelos:

- Tiempo discreto.
- Eventos discretos.
- Tiempo continuo (aproximándolos).

Por lo tanto DEVS surge como un formalismo natural para modelar y simular sistemas **híbridos**.

- Dentro de DEVS se pueden embeber diferentes formalismos.
- La simulación de un modelo DEVS es simple.
- Permite el modelado jerárquico multi-escala y multi-dominio.

## Organización de la presentación

- 1 Introducción
  - Sistemas y Experimentos
- 2 Modelado y Simulación
  - Modelos
  - Simulación
- 3 Sistemas de Eventos Discretos y Formalismo DEVS
  - Modelos Atómicos
  - Modelos Acoplados
  - Simulación
- 4 DEVS como lenguaje unificador
  - Modelos de Tiempo Discreto
  - Modelos de Tiempo Continuo
  - Modelos Híbridos
- 5 Aplicaciones

## Modelo discreto

El siguiente modelo se denomina **Ecuación de Nicholson–Bailey** y representa la dinámica de poblaciones de parásitos y huéspedes.

$$N(k+1) = \lambda \cdot N(k) \cdot e^{-a \cdot P(k)}$$
$$P(k) = N(k) \cdot (1 - e^{-a \cdot P(k)})$$

- $N(k)$  y  $P(k)$  son las variables de estado (número de huéspedes y parásitos, respectivamente).
- Son Ecuaciones de Estado **no lineales**.
- Es un **modelo autónomo**.

## Modelo continuo

El siguiente modelo se denomina **Ecuación de Lotka-Volterra** y representa la dinámica de poblaciones de presa-depredador.

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

- Son Ecuaciones de Estado **no lineales**.
- Es un **modelo autónomo**.

## Modelo híbrido

- El modelo representa un conjunto de habitaciones heterogéneo.
- Cada habitación tiene su AC.
- Se quiere estudiar el consumo energético global de la red.
- La temperatura en cada habitación evoluciona de forma continua.
- Se simula la acción on/off de cada AC y cada persona que entra/sale en la habitación.
- DEVS permite representar y simular eficientemente esta clase de modelos.

## Aplicaciones a CIMS<sup>3</sup>

DEVS ha sido utilizado:

- Sistemas de energía renovables.
- Dinámica poblacionales.
- Generación y distribución de energía - Microgrids.
- Modelos de múltiples entidades: Partículas, Evacuación, Tránsito, etc.
- Uds. propondrán más!

# Gracias!