

# INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA AL CONTROL

## BLOQUE 1: INTRODUCCIÓN AL CONTROL

T1: Introducción al control de Procesos. Modelado

T2: Controlador PID. Métodos de sintonía

*P1: Identificación del Modelo de un Sistema*

*P2: Identificación y control PID*

## BLOQUE 2: CONTROL INTELIGENTE

T3: Aplicación de Inteligencia artificial en el control

## BLOQUE 3: CONTROL EXPERTO

T4: Sistemas expertos en control

*P3: Sistema experto para sintonía de un PID*

## BLOQUE 4: CONTROL BORROSO

T5: Lógica borrosa

T6: Control basado en lógica borrosa

*P4: Control borroso de la planta de la práctica P2*

## BLOQUE 5: NEUROCONTROL

T7: Introducción a las redes neuronales

T8: Aprendizaje de las redes neuronales y control neuronal

*P5: Control Neuronal de un brazo robot*

---

Apuntes realizados por: Montserrat Sacie Alcázar

Profesora: Matilde Santos Peñas

IAAC, Facultad de Informática (UCM)

## BLOQUE 1: INTRODUCCIÓN AL CONTROL

### TEMA 1: INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS. MODELADO

#### 1. 1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PROCESOS

La **Inteligencia artificial** es la ciencia encargada de emular partes del razonamiento humano por medio de herramientas informáticas.

Principal utilidad: Automatización en la evaluación de escenarios o sistemas y la toma de decisiones o la asistencia

##### **¿Qué es el control?**

Todo sistema que se encuentre operando requiere que su funcionamiento sea regulado para cumplir con los objetivos que se espera de él. ... El conjunto de acciones, procedimientos, normas o técnicas que aseguran la regulación de un sistema es lo que se denomina **Control**.

##### **Control:**

-Regulación manual o automática de un sistema para que mantenga la salida/comportamiento deseado dentro de un rango. "Qué haga lo que tú quieras"

-Es multidisciplinar (en la vida, la industria, la naturaleza)

**Control automático:** Realizado por un controlador -> conseguir salida esperada y mantener la salida ante posibles perturbaciones



Matilde Santos Peñas  
Facultad de Informática, UCM 

Inteligencia Artificial aplicada al control ....

...pero qué significa **Control**?



- Automatización
  - Robótica, manofactura, ...
- Disciplina de la Ingeniería
  - Arquitecturas, mecanismos y **algoritmos**



Ejemplos:

Control de:

- La temperatura de un reactor químico (mantener salida consistente)
- Control de un crucero automóvil (sistema de dirección)
- Control de un vuelo (controlar altitud, velocidad)
- Unidad de disco del computador
- Proceso de aprendizaje alumno-profesor
- Un sistema de control de un brazo humano
- Un sistema de control para un sistema de helicóptero de doble elevación
- Dispositivo microquirúrgico robótico
- Sist. De control de posición de una máquina
- Sist. Control de temperatura de una cabina o aire acondicionado
- Sist. Control de propulsión de cohetes
- Control de procesos químicos...

En el **control de procesos** se estudia:

1. Las plantas a controlar -> **MODELADO E IDENTIFICACIÓN** (análisis)  
(planta, qué quiero conseguir)
2. Las técnicas empleadas para ello -> **DISEÑO DEL CONTROL** (síntesis)  
-Técnicas  
-Algoritmos  
-Estrategias de control

1)

El **controlador** es un sistema (algoritmo, hardware, acción manual) que consigue ajustar el comportamiento de un sistema, planta o proceso al deseado. Es el encargado de mantener la salida al valor deseado (referencia) ante posibles perturbaciones externas.



## Nomenclatura

- Referencia o consigna:  $r(t)$
  - Salida del sistema:  $y(t)$
  - Acción de control:  $u(t)$
- Error:  $e(t) = y(t) - r(t)$
- $u(t) = f(e(t))$

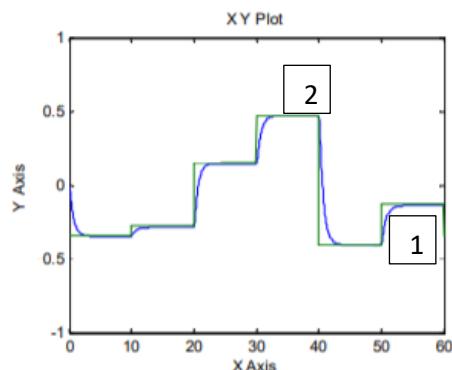
U: caudal

Medida de salida: realimentación

Sensor: instrumentación para medir una variable

En función del error (diferencia entre la salida actual y el valor esperado) varía la señal de control.

## EJEMPLO:

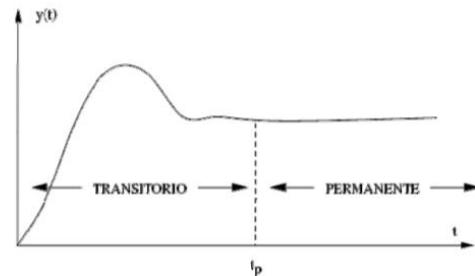


(2) Salida verde: salida esperada (referencia)

(1) Salida azul: salida actual (es bastante bueno el tiempo de respuesta, no se puede mejorar mucho, pues el tiempo de reacción no puede ser 0 justo)

2)

Respuesta de un sistema



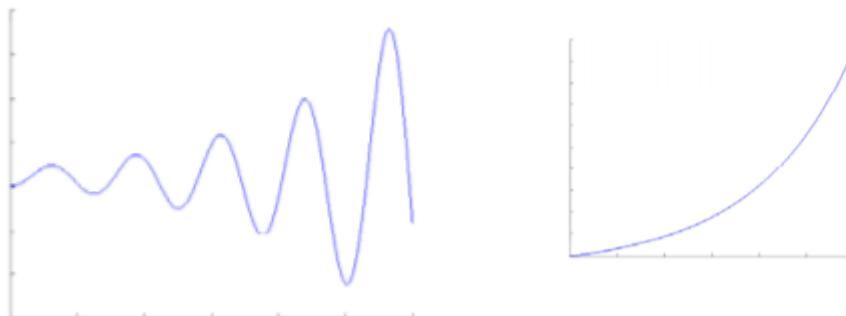
2 fases:

-Transitorio: fase del tiempo en la que se está reaccionando a la entrada de control  
(Hay varios cambios pero dura poco tiempo)

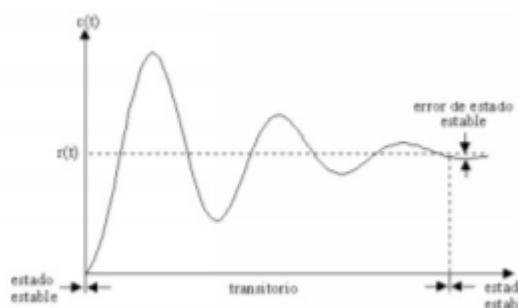
-Permanente o estacionario: Fase en la que se alcanza el valor de referencia y se mantiene la salida cte.

- Según la respuesta:

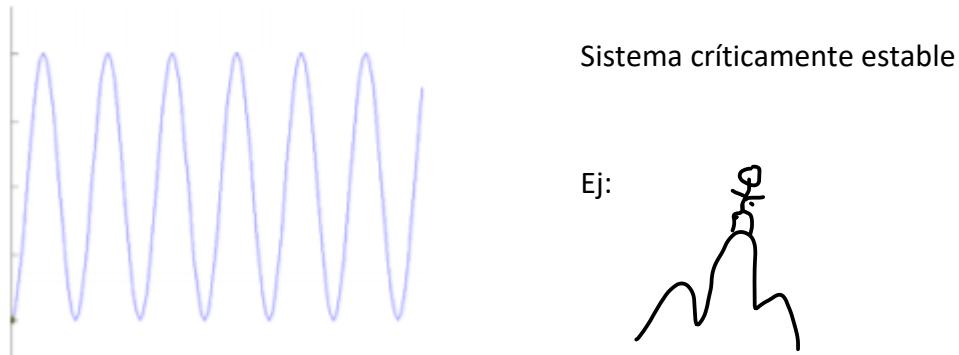
Sistema inestable



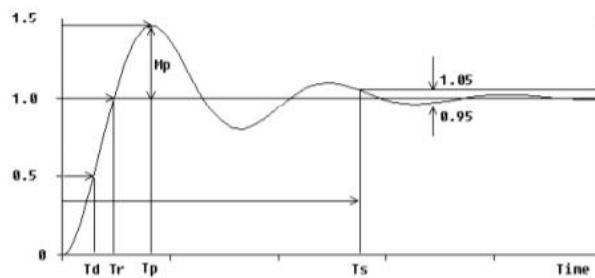
Oscila, pero la amplitud va en aumento(1) y aunque no oscile(2), no se va a recuperar el control



Sistema estable: Aquel que tiene fase estacionaria



## RESPUESTA DE UN SISTEMA



- **Tiempo de retardo ( $t_{delay}$ ):** alcanza por primera vez la mitad del valor final o es distinta de cero
- **Tiempo de subida ( $t_{rising}$ ):** la respuesta pasa del 0% al 100% de su valor final (o del 5% al 95% o del 10% al 90%).
- **Tiempo pico ( $t_{peak}$ ):** tiempo en el que la respuesta alcanza el primer pico
- **Sobreelongación (% $M_p$ ):** máxima amplitud (%) en la que la respuesta excede la señal de referencia
- **Tiempo de asentamiento ( $t_{settling}$ ):** la respuesta alcanza y permanece dentro de un porcentaje del valor final (2% o 5%).

15

- Para medir la respuesta del sistema usamos unas especificaciones o criterios:
  - Tr, tiempo de subida:**
    - Primera vez que alcanza el valor de salida deseado.
    - Sistema rápido -> Tr pequeño
  - Td, tiempo de retardo:**
    - tiempo que pasa desde que mandamos una orden de control hasta que la recibe o reacciona, el sistema.
    - La medida exacta no tiene mucha importancia, puede variar.
  - Mp, sobreelongación:**
    - La sobreelongación o máxima amplitud de la respuesta, se mide con respecto al valor deseado (expresado en %)  
Ej:  $1,5 - 1,0 = 0,5 \rightarrow$  Sobreelongación del 50%
    - No todos los sistemas tienen Mp, ej, un chip se quemaría, la respuesta del sistema de control no debe tener sobreelongación

-**T<sub>p</sub>, tiempo pico:**

- Instante en el que ocurre la sobreelongación (variarlo es inútil, me da igual que ocurra antes que después más, tarde)

-**T<sub>s</sub>, tiempo de asentamiento:**

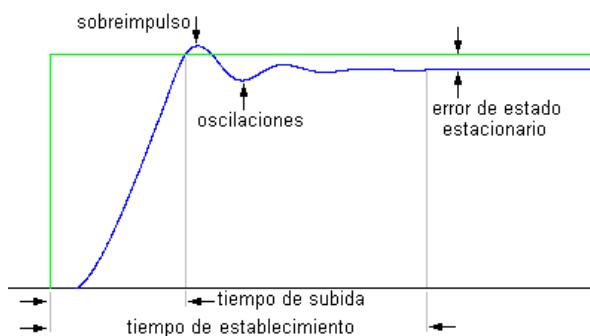
- Tiempo que tarda en entrar en la fase de estacionamiento
- A partir de T<sub>s</sub>, la respuesta es prácticamente cte

Si un sistema nunca llega a asentarse, es inestable

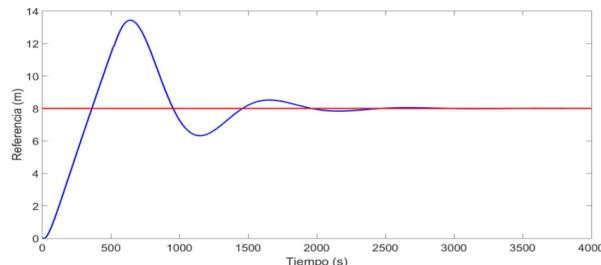
-**ess, error estacionario:**

- No se llega al valor esperado o se pasa, es la diferencia entre el valor de salida en la fase estacionaria y el valor de referencia
- Será 0, cuando el sistema de control sea exacto. Ej: sistema de control del freno debe serlo

1 Sist. Con ess



2 Sist sin ess:



## 1.2 MODELOS

### (1) Motivación:

- Imitar el comportamiento de un sistema real o hipotético en un ordenador
- Así es como se fabrica todo, creando modelos
- En el modelo experimento y mido todo lo que me interese porque el sistema puede no existir, ser caro, las condiciones de prueba pueden ser peligrosas o queremos hacerle modificaciones o predecir el comportamiento futuro -> NO EXPERIMENTAR CON EL SISTEMA

Ej: Hay modelos meteorológicos para predecir lo que va a pasar en la semana.

- El modelo se centra en lo que yo quiero estudiar
- Los modelos son aproximaciones.



## SISTEMAS Y MODELOS

### SISTEMA

Objeto o conjunto de objetos cuyas propiedades o funcionamiento se quieren analizar y estudiar

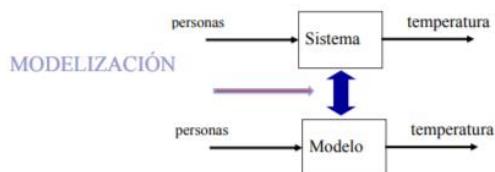
### MODELO

Su representación es una abstracción de algunas propiedades o características

19

## MODELO

*El modelo de un sistema es cualquier tipo de descripción abstracta que refleja convenientemente sus características relevantes*



*Para los mismos estímulos del sistema real, que tengan valores o reacciones similares a los que podríamos observar en dicho sistema real*

20

## TIPOS DE MODELOS

■ **MODELOS MATEMÁTICOS:**  
conjunto de relaciones matemáticas entre las variables del sistema

■ **OTROS MODELOS:**  
distintas representaciones del sistema según su naturaleza y el tipo de información disponible (verbal, mental, prototipo, ....)

22

(2)

### Tipos de Modelos:

- 1 **MODELOS MATEMÁTICOS:** Hay ecuaciones que pueden definir un sistema, son programables.
- 2 **OTROS MODELOS:**

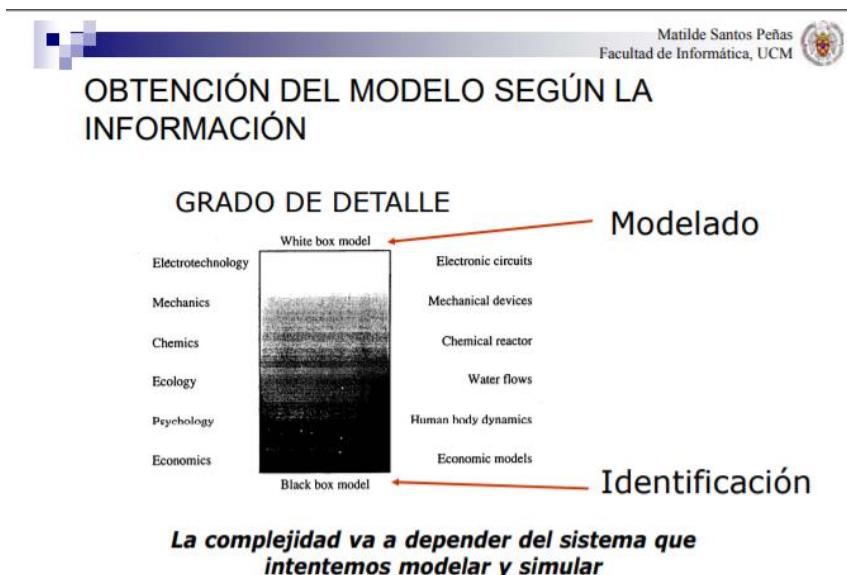
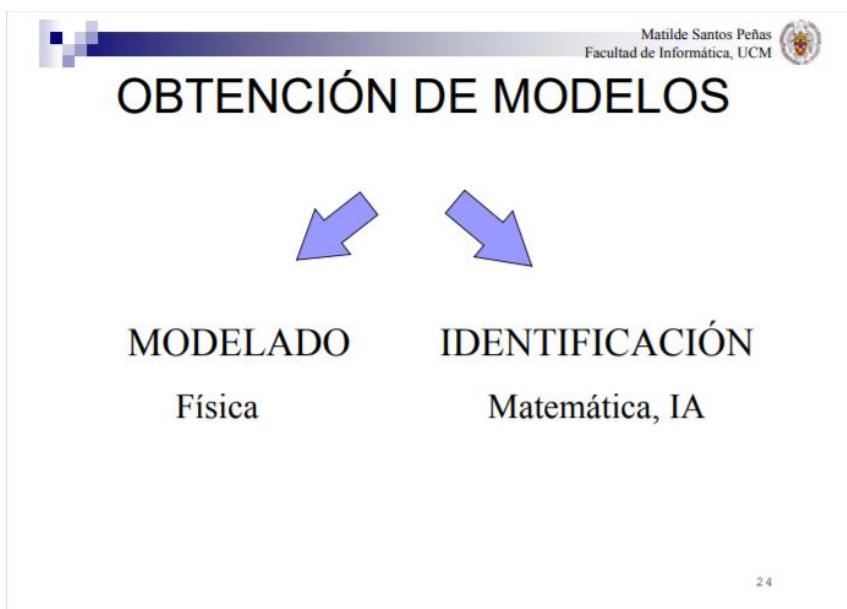


### Tipos de Modelos matemáticos:

- **Continuos:** Las variables de estado evolucionan o varían de forma continua a lo largo del tiempo. (Ej: Tpra, audio, plasma, velocidad, posición) -> corresponden con **Sistemas Continuos**.
- **Discretos:** Hay variables que cambian en instante(s) concreto(s) del tiempo. (periódicamente o no) (Ej: reloj, peaje de una autopista: llega un coche, a los 10 min llega otro, cuántica: es un sistema discreto)
- **Determinista:** Ej: Las leyes de la naturaleza lo son, El azar no está involucrado en los futuros estados del sistema. Siempre producirá la misma salida a partir de las mismas condiciones de partida o estado inicial.
- **Estocásticos o aleatorios:** Ej: tirar un dado Comportamiento no determinista, el subsiguiente estado del sistema está determinado tanto por acciones predecibles del proceso como por elementos aleatorios

- Dinámicos: Son sistemas con memoria, importa la historia, el pasado. Su estado evoluciona con el tiempo Ej: el hombre
  - Estáticos: Da igual el pasado
- 
- Lineales: La respuesta del sistema varía de forma lineal
  - No lineales: En la vida todo es no lineal
- Nosotros trabajamos con aproximaciones lineales de sistemas

(3)



25

Ej 1: Las leyes de la naturaleza son modelos, 2<sup>a</sup> ley de Newton:  $F = ma$

Círculo eléctrico: leyes de Kirchhoff  $\sum Vi = 0$

Ley de Ohm  $V = R \times I$

- En la naturaleza es más fácil **encontrar la forma matemática o ley que describa los fenómenos**, en ese caso se usa **Modelización**

Ej 2: En economía o cuando **no tenemos muy claro qué ocurre, No existe ley que lo describa**, no sabemos el por qué de su comportamiento -> "Modelos de caja Negra" (como las redes neuronales)

Ahí se usa **Identificación**

(3.1)



Matilde Santos Peñas  
Facultad de Informática, UCM 

## MODELADO DE SISTEMAS

- se basa siempre en **aproximaciones e hipótesis** (representa parcialmente la realidad)
- se construye para **un fin específico**, y debe formularse de modo que sea útil para tal fin
- compromiso entre la **sencillez** (manejable) y la necesidad de recoger todos los aspectos esenciales del sistema (**completo**)

26

Ej: "La manzana cae por la gravedad" es una aproximación, no tengo en cuenta factores secundarios como el aire

Modelo completo, desde el punto de vista de lo que yo quiero estudiar incluirá unas características u otras.

### (3.1.1) Métodos de Modelado:

Describen un Sistema mediante un conjunto de **ecuaciones diferenciales (S. Continuos)** o diferencias; o **ec. Algebraicas (S. Discretos)** normalmente no lineales.

Para describir un sistema disponemos de:

- **Hipótesis** sobre el mismo
- **Leyes**
- **Datos Experimentales:** para decidir expresiones

## MODELADO



- amplio rango de validez,
- tarea larga: requiere experiencia y conocimiento del sistema

28

Ej: 1<sup>a</sup> ley de Newton: Un objeto permanecerá en reposo o con M.U.R a menos que sobre él actúe fuerza externa -> Amplio rango de validez -> Universo macroscópico

Ej: ley  $V = R \times I$  sirve para Voltios, GV, MV (unidades)

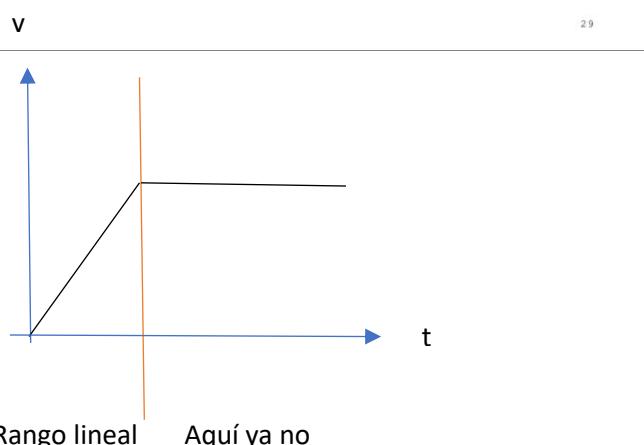
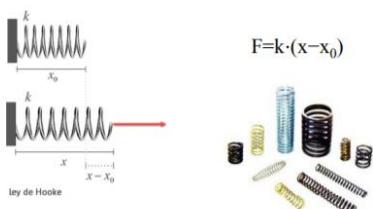
Se requieren expertos en física del sistema para modelizar

### Modelización 1: Muelle

#### MUELLE

Matilde Santos Peñas  
Facultad de Informática, UCM

#### Ley de Hooke



Estiramiento del muelle, es lineal, hasta que el muelle se rompe

“Linealizar”: Conseguir rango de valores donde se comporte de manera lineal

## Modelización 2: Amortiguador

**MODELIZACIÓN**

■ Spring-mass-damper

$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = r(t)$

Figure 2.1. Spring-mass-damper system.

Estoy empleando la fuerza en mover la masa y el rozamiento.

$$R(t) = M + \text{Fricción} + \text{Muelle}$$

El modelo matemático intentará explicar estas acciones mediante leyes físicas(hay que sabérselas para modelizar)

Modelo matemático (con dominio en el tiempo):  $r = M \times a + fr \times v + k \times y$  donde  
 $v$  = velocidad,  $fr$ = coeficiente de fricción,  $a$  = aceleración con respecto a la posición.

Reformularlo en función de  $y$ :

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = r(t)$$

Problemas: No nos da información de si el sistema es rápido o lento y programar ese modelo es complicado -> usar otra representación:

## Modelo en el dominio de Laplace(s)

- $t \longrightarrow s$
- $y(t) \longrightarrow Y(s)$
- $\frac{d}{dt} \longrightarrow s$
- $\frac{dy}{dt} \longrightarrow s \times Y(s)$

- $\frac{d^2}{dt^2}$   $s^2$
- $\frac{d^3}{dt^3}$   $s^3$
- ...
- $\int$   $\frac{1}{s}$
- $\int \frac{dy}{dt}$   $y$

La integral y la derivada son inversas, vamos a trabajar con sistemas de 3º orden como mucho.

## TRANSFORMADA DE LAPLACE

- Modelo en el dominio temporal ( $t$ )
  - Condiciones iniciales nulas (reposo)

$$M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = r(t)$$

- Modelo en el dominio de Laplace ( $s$ )

$$Ms^2 Y(s) + fs Y(s) + KY(s) = R(s)$$



## FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

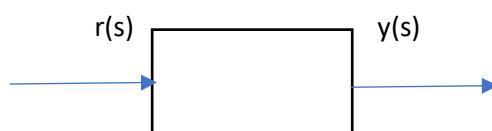
$$Ms^2 Y(s) + fs Y(s) + KY(s) = R(s)$$

$$\text{F. T} \quad \leftarrow \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ms^2 + fs + K} = G(s)$$

**Función de Transferencia:** Modelo que me relaciona la salida con la entrada del sistema en el dominio de Laplace

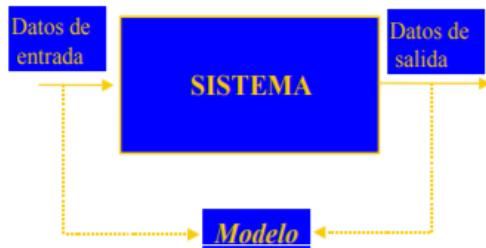
- ➔ Es un sistema de orden 2, corresponde con dos ecuaciones diferenciales normales, si fuera de orden 5 habría un  $s^5$
- ➔ Valores iniciales = 0 si las condiciones iniciales son nulas o estados iniciales están en reposo

- ➔  $C_i = 0 \rightarrow$  la derivada será siempre  $s$
- ➔ Solo puedo realizar T.Laplace a sistemas lineales
- ➔  $Y(s) / R(S) = G(S)$



(3.2)

## IDENTIFICACIÓN



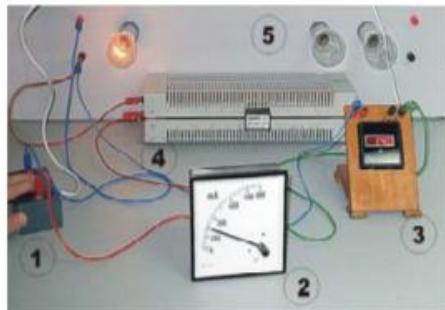
### ■ Generan ecuaciones lineales

- Sin hacer hipótesis ni tener en cuenta los mecanismos internos de funcionamiento
- Se basan exclusivamente en el uso de **datos experimentales de entrada y salida (caja negra)**
- No aportan conocimiento físico

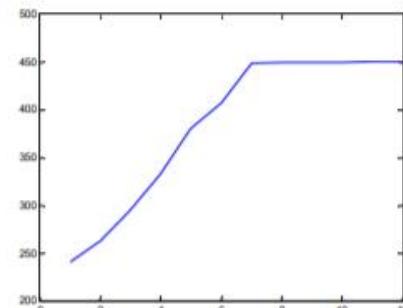
3.4

Usar : “Cuando no conocemos las leyes físicas de un sistema porque no hay”.

## Ejemplo de identificación



Tensión (V)	Intensidad (A)	Resistencia (R)
135	0.149	906.04
140	0.150	927.15
150	0.165	909
160	0.180	888.89
170	0.190	894.73
185	0.210	880.95
200	0.230	869.56



- (1) Pulsador
- (2) Amperímetro
- (3) Voltímetro
- (4) Resistencia variable (reóstato)
- (5) Lámparas de filamento de carbón
- (6) Lámpara de filamento metálico

$$V(t) = a I(t) + b I^2(t)$$

3.5

Le metes una  $V$  de entrada y sale una  $I$  (la corriente dependerá de lo que hay dentro del motor que no sé lo que es)

Le hago a la gráfica un ajuste con regresión lineal o algo y determino que:

Con una herramienta matemática saco el modelo matemático de mi sistema:

$$I = a \times v^2 + b \times V \text{ donde } a = 0.2 \text{ y } b = 3.18, \text{ empírico}$$

### 3.1.2 FASES DE IDENTIFICACIÓN

- . Escoger **Modelo** (polinomio, exp, ...)
  - . Realizar **experimento** y tomar conjunto de valores de **E/S**
  - . **Estimar parámetros** por algún método numérico que se ajuste a los valores
- Obtenemos modelos lineales orientados a control
- Son sistemas restringidos (funcionan en un entorno de validez, solo en un rango de valores)
- Más sencillos de deducir normalmente
- No interpretación física de los parámetros, “no significado”



Concepto de Robustez: Las entradas suelen seguir un patrón 0V, 5V, 10 V..

Si puedo ampliar el rango de valores para mi sistema no es bueno.

**A veces necesitamos conocer la entrada realista para identificar la respuesta rápidamente**

### IDENTIFICACIÓN BASADA EN ENTRADAS ESPECIALES

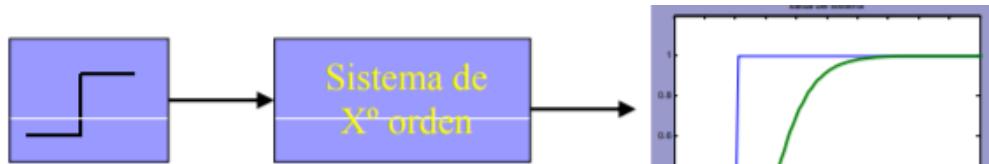
Se aplica al sistema un estímulo conocido (salto, rampa, ...), y de la respuesta se deduce el modelo

- ✓ modelos lineales
- ✓ generan funciones de transferencia
- ✓ no estocásticos (no dependen de azar)
- ✓ dominio del tiempo y de la frecuencia

### EJEMPLO 1: IDENTIFICACIÓN EN EL DOMINIO TEMPORAL

La mayoría de los procesos industriales producen una respuesta estable monótona creciente a una **entrada escalón/salto**, similar a la de un sistema de **primer orden con retardo (modelo)**

FT:  $Gm(s) = \frac{K}{1 + s \cdot Tp} e^{-sTo}$

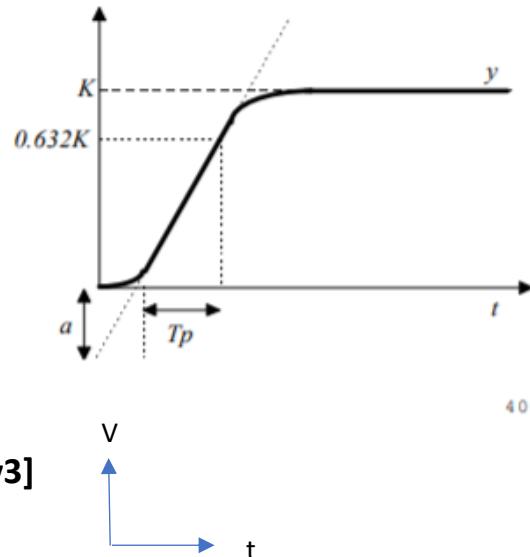


- Características en el dominio temporal:

- Ganancia o valor estacionario  $K$
- Tiempo de subida  $T_p$
- Retardo  $T_0$

### Modelo

$$G_m(s) = \frac{K}{1 + s \cdot T_p} e^{-sT_0}$$



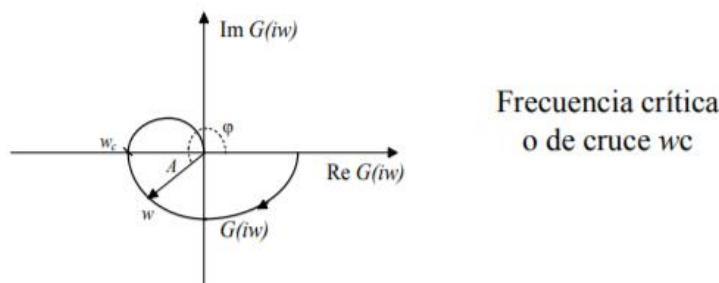
Entrada (step)  $V = [0, 0, 0, v1, v2, v3]$



## EJEMPLO 2: IDENTIFICACIÓN EN EL DOMINIO FRECUENCIAL

Un sistema lineal estable con función de transferencia  $G$ , para una entrada sinusoidal, la salida también es periódica con la misma frecuencia

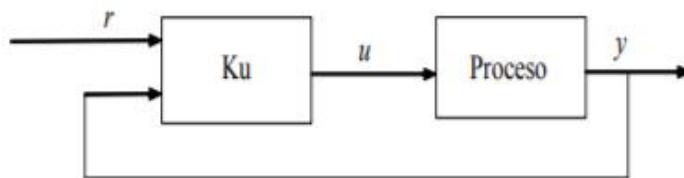
$$G(iw) = A(w) \cdot e^{i\varphi(w)}$$



Frecuencia crítica  
o de cruce  $w_c$

# PUNTOS RELEVANTES

- la **ganancia crítica  $K_u$**  :
  - ganancia de un controlador proporcional a partir de la cual el sistema en lazo cerrado deja de ser estable
- el **periodo de oscilación mantenida  $T_u$** :
  - periodo de la oscilación que se consigue con ese valor de ganancia



**Resumen:**

**Modelado** -> Ecuación de t -> TL -> Función de transferencia

**Identificación** -> **Métodos** → **Recursivos**: -Mínimos cuadrados, -Regresión

→ **Basados en entradas especiales** ->

-Basados en dominio temporal( $K$ ,  $T_0$ ,  $T_p$ )

-Basados en dominio de frecuencia:  $K_u$ ,  $T_u$  (no vamos a trabajar con ellos)

---

## TEMA 2: CONTROLADOR PID. MÉTODOS DE SINTONÍA

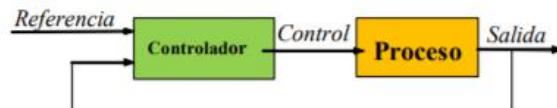
### 1.3 CONTROL DE PROCESOS

# CONTROL DE PROCESOS

*El diseño de un controlador:*

- 1º** ⇒ **especificaciones del sistema a controlar**  
⇒ **características del regulador**
- 2º** ⇒ **SINTONÍA (calibración)**

¿Qué tipo de controlador es? Elección del controlador



2

---

(1)

PASOS:

1. ¿Qué tipo de sistema se desea controlar?
2. Obtener **modelo** matemático, opciones:
  - a. **F.T** (relación de Laplace entre entrada y salida)
  - b. **Modelo de Espacio de estado** (modelo descrito por conjunto de entradas, salidas y variables de estado relacionadas por ec. Diferenciales de orden n. El espacio de estado se refiere al espacio de n dimensiones cuyos ejes coordenados están formados por variables de estado)

(2)

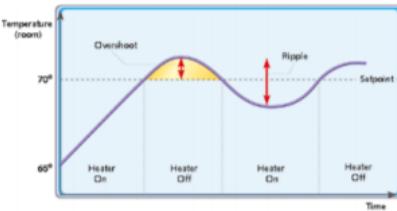
¿LAZO ABIERTO O LAZO CERRADO?

- El termostato de un calentador es un ejemplo de control on-off
  - Un sensor de temperatura enciende el calentador si la temperatura baja del set-point y lo apaga cuando la alcanza



## CONTROL ON-OFF

- Aumenta o disminuye la señal de calor a su máximo/mínimo valor
- El control on-off no funciona bien para todo tipo de sistemas
  - Si el termostato espera a que se alcance la temperatura deseada para apagarse, puede producir sobreelongación.
  - Esos picos y oscilaciones pueden no ser aceptables por otros sistemas (ascensor)



### Lazo abierto:

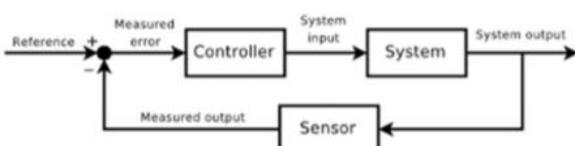
- en función de una entrada obtengo una respuesta (controlador on/off)
- ¿Aumenta/disminuye al máx/mín valor la señal de control? -> Sobreelongación (no todos los sistemas lo permiten, sistema que controla leds de un circuito)

### Lazo cerrado:

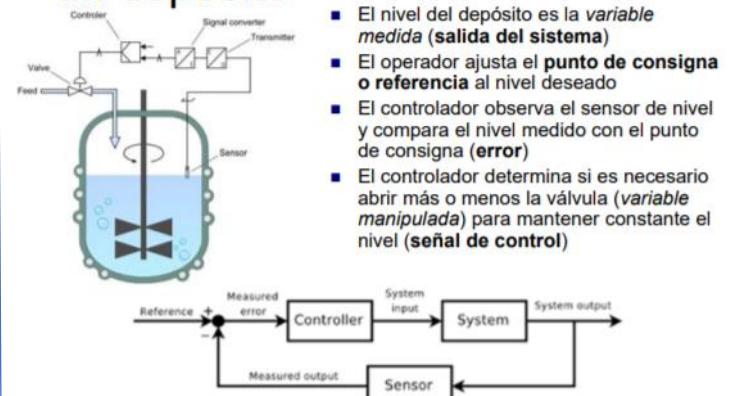
- Hay realimentación: Medida de la diferencia entre la consigna (valor deseado) y el valor actual.
- Ej: control de velocidad de un crucero, control del nivel de un depósito:

## Ejemplo 1: control de velocidad de crucero en un automóvil

- La velocidad es la **variable medida (salida del sistema)**.
- El operador (conductor) ajusta la velocidad **de consigna o referencia** (deseada) (100 km/h)
- El controlador mide la velocidad (sensor) y compara la velocidad medida con el punto de consigna (**error**)
- El controlador corrige cualquier desviación ajustando la posición de la válvula de combustible, que es la **variable manipulada (señal de control)**



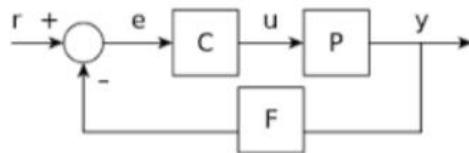
## Ejemplo 2: control del nivel de un depósito



(3)

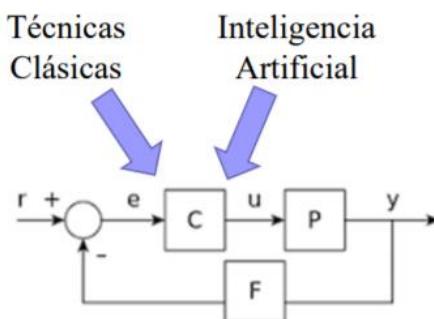
## SEÑALES EN UN SISTEMA DE CONTROL

- Referencia o consigna:  $r(t)$
- Salida del sistema:  $y(t)$     Error:  $e(t) = y(t) - r(t)$
- Acción de control:  $u(t)$                    $u(t) = f(e(t))$



(4) ¿CONTROL CLÁSICO O CONTROL INTELIGENTE?

## CONTROL CLÁSICO CONTROL INTELIGENTE



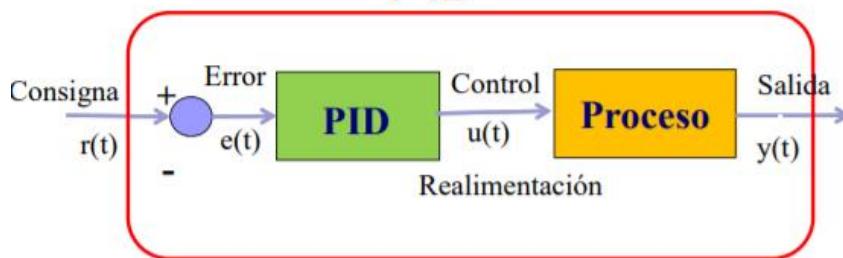
## CONTROL DE PROCESOS

- En la mayoría de los procesos industriales, controladores convencionales con resultados aceptables
- La aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial:
  - ampliar el rango de aplicación de los controladores convencionales
  - facilitar el diseño de controladores no lineales que incorporan conocimiento de los operadores
  - dotarles de funcionalidades avanzadas (adaptación, auto-ajuste, ...)

## (4.1) CONTROLADOR CONVENCIONAL

- ✓ Robustez, simplicidad, lineal
- ✓ Eficiente (problemas simples)
- ✓ Facilidades de funcionamiento y de ajuste
- ✓ Sencillo, rápido, fácil de implementar
- ✓ Sintonía bien establecida (no trivial)
- ✓ Estructura conocida y aceptada en el mundo industrial (85-90 %, desde 1930)
  - ✓ los operarios de planta: conocimiento de sus parámetros y sintonía
  - ✓ cómodos trabajando en ese entorno (experiencia)

### CONTROL CONVENCIONAL: PID



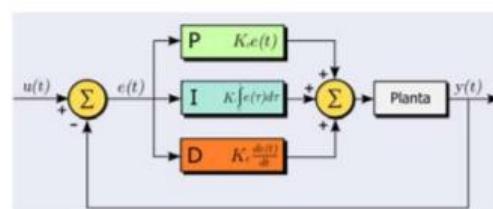
$u(t)$ : señal de control o variable manipulada

$e(t) = r(t) - y(t)$ : señal de error o desviación entre la señal de referencia o de consigna  $r(t)$  y la salida del proceso, que es la variable medida  $y(t)$

1.3

### PID: 3 acciones de control

- Proporcional (P)
- Integral (I)
- Derivativa (D)



Proporcional,  
 integral y  
 derivativa  
 respecto al  
 error

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$U_p$

$U_i$

$U_d$

1.4

◆ **Acción de control proporcional ( $u_p$ ):** a la desviación de la salida del proceso respecto al punto de consigna (error)

$$u_p(t) = K_p \cdot e(t)$$

✓ **Ganancia proporcional  $K_p$**

Realimentación

- Rechazo de perturbaciones

◆ **Acción de control integral ( $u_i$ ):** proporcional al tiempo que la salida del proceso ha sido diferente del punto de consigna, a la historia pasada del error

$$u_i(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$$

✓ **Ganancia integral  $K_i = K_p/T_i$**

Elimina el error estacionario

1.6  
 $T_i$  : Tiempo integral, parámetro del controlador

◆ **Acción de control derivativa ( $u_d$ ):** proporcional a la velocidad del error. Predice los cambios

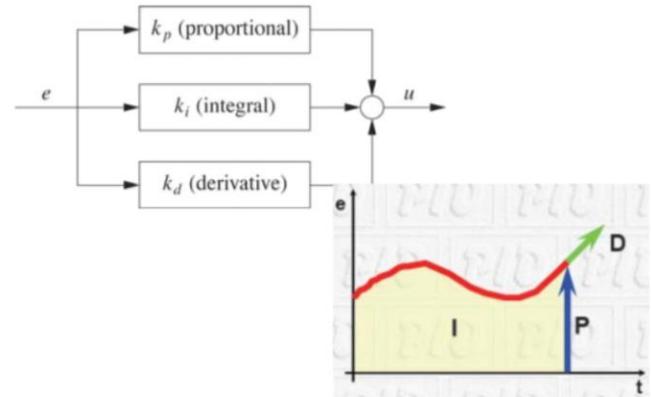
$$u_d(t) = K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

✓ **Ganancia derivativa  $K_d = K_p \cdot T_d$**

Anticipa

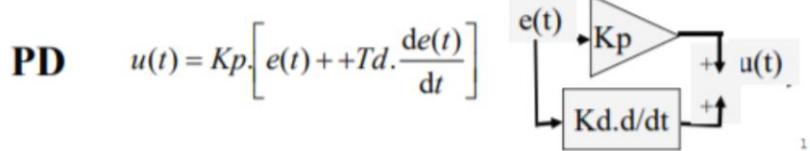
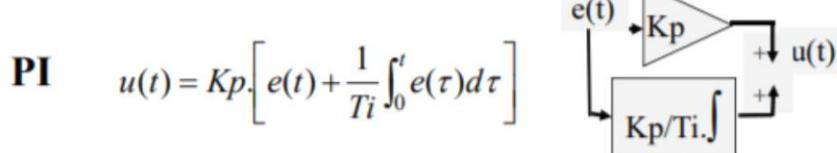
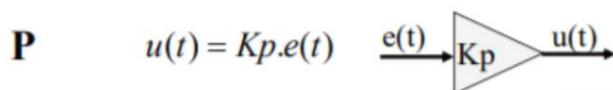
A la  $U_d$  le afecta el ruido,  
ESTABILIZA, disminuye  
sobreelongación

### ACCIONES DEL PID

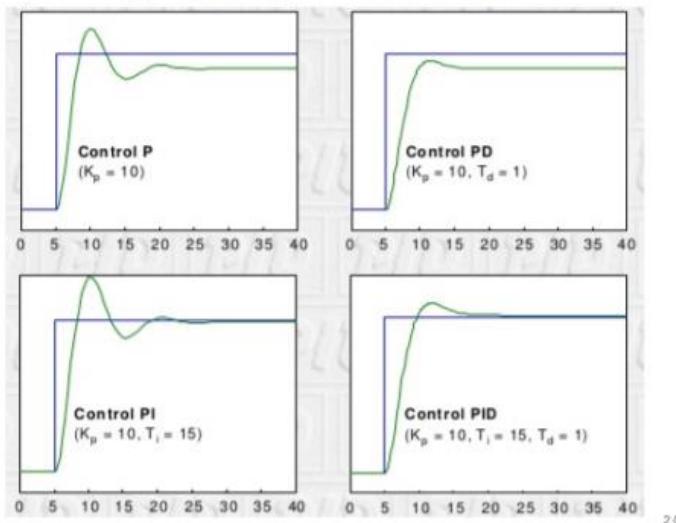


## CONTROLADOR P, PI, PD, PID

**PID (ISA)**  $u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right]$



## ¿P, PI, PD o PID?



Habrá que sintonizar y ver con cuál obtenemos mejor respuesta del sistema

### (4.2)

Una vez seleccionado el controlador, lo sintonizamos

## MÉTODOS DE SINTONÍA

- Una vez elegido el **tipo de controlador** hay que **ajustar sus parámetros (sintonía)** para que cumpla unas determinadas especificaciones (características de la respuesta)
  - 1 □ **Métodos directos:** se basan en la misma **respuesta** del sistema
  - 2 □ **Métodos indirectos:** se basan en un **modelo** del sistema

## METODOS DIRECTOS: Sintonía cualitativa

- Simples prescripciones sobre qué parámetros del PID cambiar y cómo (aumentar o disminuir), para conseguir determinadas especificaciones
  - conocimiento de sus efectos sobre el sistema en lazo cerrado
- Conocimiento empírico
  - tablas de sintonía (respuesta del sistema para diferentes valores de los parámetros) y reglas heurísticas



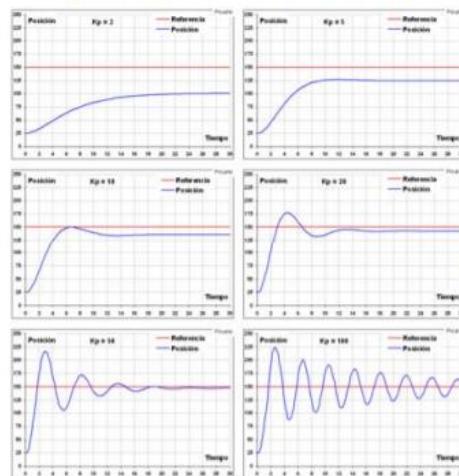
## PARÁMETROS DE AJUSTE DEL PID

- **Ganancia proporcional  $K_p$**
- **Ganancia integral:  $K_i = K_p/T_i$** 
  - Constante de tiempo integral ( $T_i$ ): tiempo requerido para que la acción integral contribuya a la salida  $u(t)$  en una cantidad igual a la acción proporcional
- **Ganancia derivativa:  $K_d = K_p \cdot T_d$** 
  - Constante de tiempo derivativa ( $T_d$ ): tiempo requerido para que la acción derivativa adelante a la acción proporcional

24



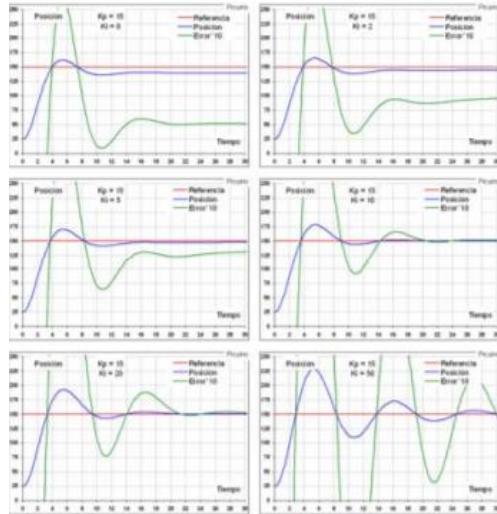
## VARIACIÓN CUALITATIVA $K_p$



- Aumenta la velocidad de respuesta
  - Sistema más rápido
  - Menor tiempo de subida
  - Mejora el transitorio
- Disminuye el error en régimen permanente
- Menos estable
  - Más sensible a perturbaciones

25

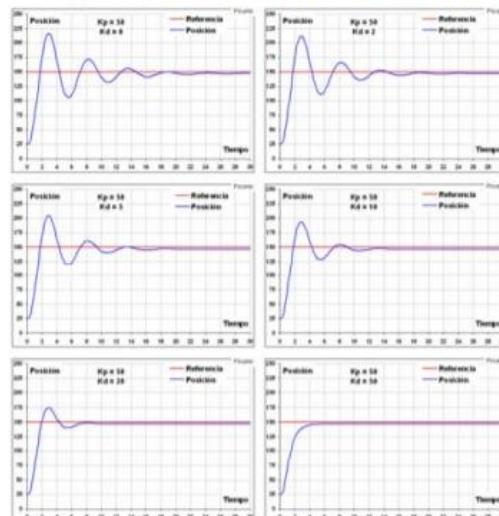
## VARIACIÓN CUALITATIVA Ki



- Elimina el error en estado estacionario
- Aumenta la inestabilidad
- Alarga el transitorio
- Aumenta un poco la velocidad del sistema
- Señal de error ampliada (verde), para apreciar cómo se reduce el error a medida que aumenta la acción integral.

26

## VARIACIÓN CUALITATIVA Kd



- Mejora la estabilidad
  - Permite valores más elevados de Kp
- Disminuye un poco la velocidad del sistema
  - Más lento
- El error en régimen permanente permanece igual
- Amplifica las señales que varían rápidamente
  - Ruido de alta frecuencia

27



## SINTONÍA CUALITATIVA

	$K_p$ aumenta	$T_i$ disminuye	$T_d$ aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado
Área de error	Se reduce	Disminuye hasta cierto punto	Se reduce
Perturbación control	Aumenta bruscamente	Aumenta gradualmente	Aumenta muy bruscamente
Frecuencia lazo	No afecta hasta cierto punto	Disminuye	Aumenta

2

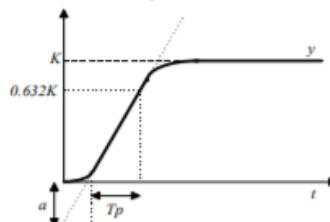
28

## MÉTODOS INDIRECTOS: Sintonía cuantitativa

- Calcula las ganancias del controlador en función de los parámetros de un modelo
- Estimación de ciertas características del proceso (en lazo abierto o en lazo cerrado, de la respuesta temporal o frecuencial)
- Fórmulas de sintonía (relaciones empíricas)
  - Valores aproximados para los parámetros del controlador (ajuste fino, cualitativo)

29

## MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS (LAZO ABIERTO)

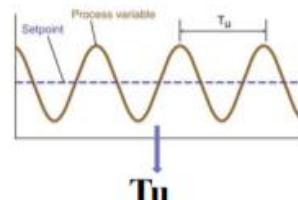
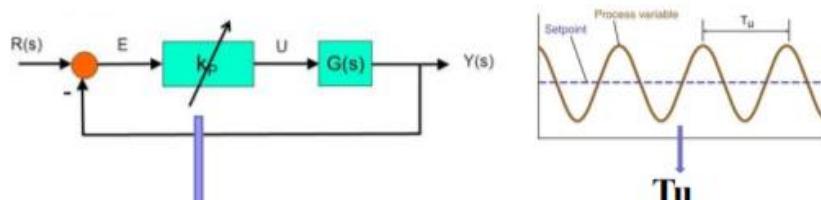


Basado en la respuesta temporal

	<b>K<sub>p</sub></b>	<b>T<sub>i</sub></b>	<b>T<sub>d</sub></b>
<b>P</b>	$T_p/(K \cdot T_o)$		
<b>PI</b>	$0.9T_p/(K \cdot T_o)$	$3.33T_o$	
<b>PID</b>	$1.2T_p/(K \cdot T_o)$	$2T_o$	$0.5T_o$

30

## MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS (LAZO CERRADO)

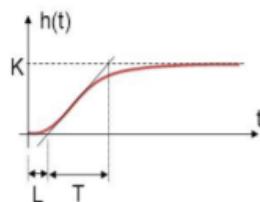


**K<sub>u</sub>** →

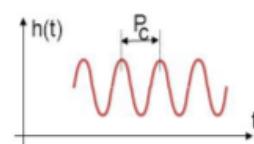
	<b>K<sub>p</sub></b>	<b>T<sub>i</sub></b>	<b>T<sub>d</sub></b>
<b>P</b>	$0.5K_u$		
<b>PI</b>	$0.45K_u$	$T_u/1.2$	
<b>PID</b>	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

31

## OTRAS TABLAS Z-N



	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	$T/L$	0	0
PI	$0.9 T/L$	$0.3/L$	0
PID	$1.2 T/L$	$0.5/L$	$0.5L$



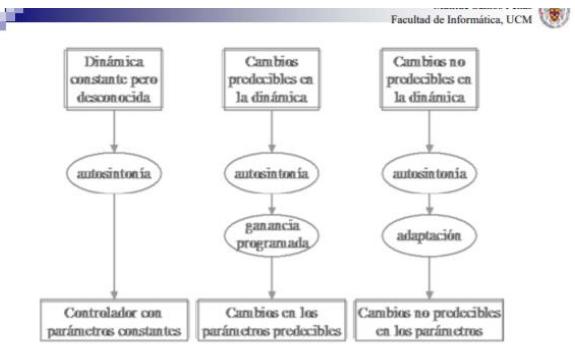
	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	$0.5 K_c$	0	0
PI	$0.45K_c$	$1.2/P_c$	0
PID	$0.6K_c$	$2/P_c$	$0.125P_c$

3.2

## ESTRATEGIAS DE CONTROL

- **Autosintonía:** sintonía automática del controlador a petición del usuario
- **Ganancia Programada:** los parámetros del controlador cambian dependiendo de variables auxiliares medidas, con las que se relacionan las variaciones en la respuesta
- **Control Adaptativo:** los parámetros del controlador están continuamente ajustándose para acomodarse a los cambios en la dinámica del proceso y a las perturbaciones

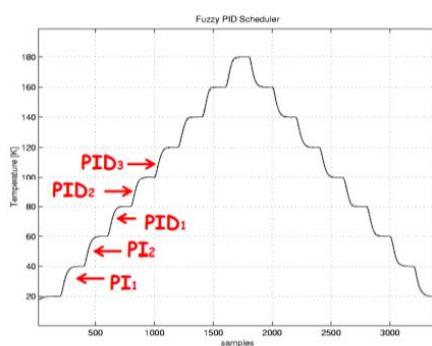
3.3



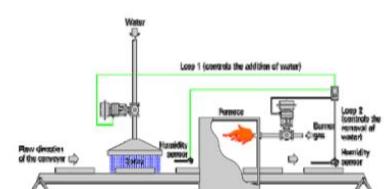
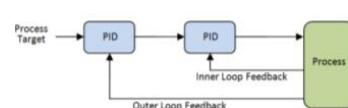
Estrategias de control

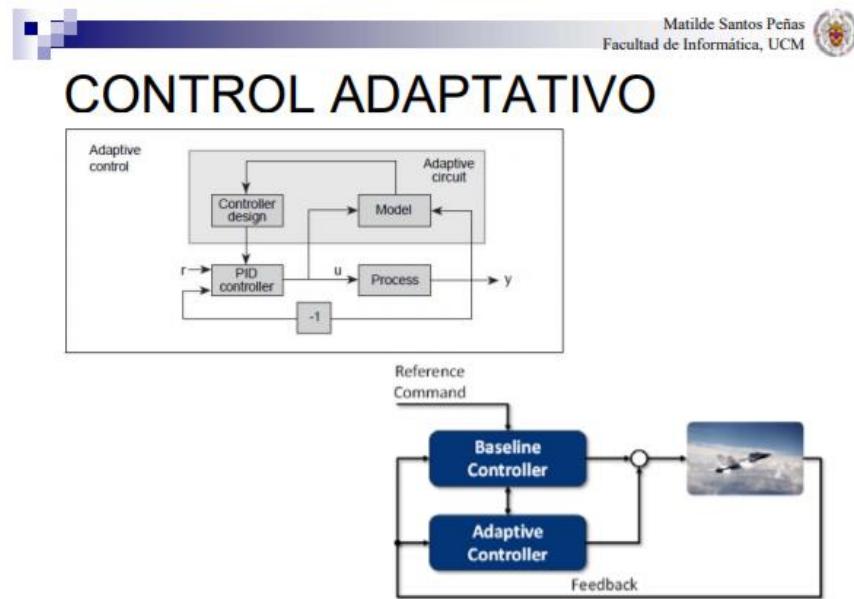
3.4

## GANANCIA PROGRAMADA



## CONTROL EN CASCADA





## BLOQUE 2: CONTROL INTELIGENTE

### TEMA 3: APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL CONTROL

#### 2.1 Control Inteligente

##### **1 Nacimiento del control**

Conseguir objetivos de alto nivel

Automatización -> que un sistema de control pueda reemplazar o auxiliar al operador en algunas tareas

**Control inteligente:** automatización de procesos y sistemas complejos a través de la emulación de la inteligencia biológica

- ➔ Línea de investigación del control inteligente nace con el objetivo de aplicar al control las técnicas de Inteligencia Artificial
- ➔ Comité español de automática: <http://intranet.ceautomatica.es/en/og/control-inteligente>



## Características del Control Convencional

- Típicamente basados en modelos matemáticos (analíticos)
  - ecuaciones diferenciales y en diferencias
- La estructura de entrada-salida (dinámica) del sistema está "rígidamente" definida
- Los objetivos se especifican de una manera "nítida" o no cualitativa (numérica o analítica) por el diseñador
  - insuficiente para situaciones de la vida real que requieren cierta autonomía
- Se desarrollan esquemas de control analíticos para cumplir los objetivos



## Limitaciones del Control Convencional

- Conducido por la teoría de control, no por el problema a resolver
  - Se parte de estrategias de control analítico y se busca dónde se pueden aplicar
- El problema de control se aborda por separado de la planta
  - El sistema a controlar está típicamente separado del controlador
  - Paliar un diseño pobre de la planta
- La información cualitativa, la experiencia, la heurística, el sentido común, etc. no se utilizan directamente en el algoritmo de control
  - Consta esencialmente de tratamientos numéricos
- Normalmente requiere conocimientos "completos" sobre el modelo (por ejemplo, valores de parámetros) y las entradas



## Sistemas de Control basados en Conocimiento



- Los seres humanos pueden manejar de forma eficaz información incompleta, imprecisa y cualitativa/difusa para tomar decisiones inteligentes
- El razonamiento humano es predominantemente aproximado, cualitativo y "suave"
- El control inteligente puede imitar el control humano (puede incorporar la experiencia del operador, heurística, conocimientos de control, etc.)

## Características del Control Inteligente

- Emular funcionalidades "inteligentes" de los seres vivos:
  - Adaptación, razonamiento, aprendizaje, evolución, ...
- Multidisciplinar:
  - control, identificación, estimación, teoría de la comunicación, ciencias de la computación, inteligencia artificial, investigación operativa
- Potentes computadores
- Técnicas de la Inteligencia Artificial
  - *Soft computing*



## Ventajas del Control Inteligente

- No se requiere un modelo explícito (matemático/analítico) de la planta / proceso
  - Un conjunto de reglas o "base de conocimiento" puede representar el comportamiento del sistema
    - modelo implícito
- Planta y controlador no necesariamente separados
- La experiencia y el conocimiento cualitativo pueden ser incorporados
- Se pueden trabajar con información incompleta, imprecisa, general, cualitativa y aproximada
- Se les puede dotar de aprendizaje y auto-organización
  - El rendimiento mejora con la experiencia
- Robusto (tolera incertidumbres, conocimiento incompleto, error de modelo, ruido, etc.)
- Adecuado para sistemas de gran escala y complejos (donde el modelado analítico es difícil, no se dispone de medidas de las señales de entrada y salida, ...)



## CONTROL INTELIGENTE

- Desafíos donde la aplicación del control inteligente puede proporcionar soluciones particularmente útiles



## ¿POR QUÉ CONTROL INTELIGENTE?

### ■ Sistemas

- Complejos, con incertidumbre, ...

### ■ Requerimientos

- No se pueden alcanzar exclusivamente con la teoría del control convencional



## Sistemas candidatos al control inteligente

- Complejos (multivariable, acoplados, no lineales, etc.)
- Naturaleza de la información (matemática, lingüística)
- Información incompleta o con incertidumbre
- No existe modelo matemático o muy complejo
- Con entornos cambiantes o parámetros que varían
- Dinámica desconocida
- Conocimiento (humano) disponible

## 2.2 Inteligencia Artificial



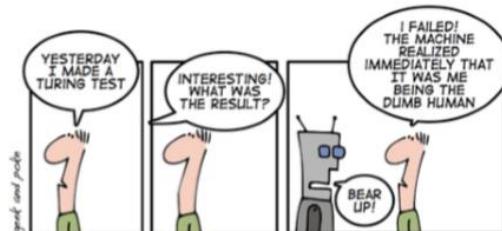
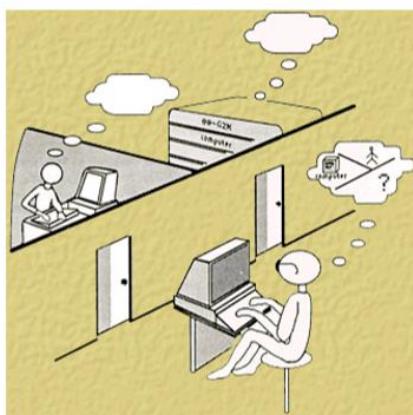
## ALGUNOS HITOS EN LA HISTORIA

- s. XVII: J. Locke. Si las máquinas podían saber ...
- s. XVII: Leibniz. Máquina capaz de llevar a cabo cualquier proceso de razonamiento por el que se le preguntara
- s. XIX: C. Babbage, “ingenio analítico”: capaz de realizar operaciones algebraicas
- s. XX (1936): A. Turing, máquina que realizara tareas en un dominio específico de forma equiparable a los hombres
- 1970, K.S. Fu, el término “control inteligente”
- 1993, “*Technical Committee on Intelligent Control*” del IEEE Control Systems Society



## MÁQUINAS INTELIGENTES

### TURING TEST



# MÁQUINAS “INTELIGENTES” A PRUEBA

## Los programadores tratan de engañar a los interrogadores humanos

- En la prueba de Turing una máquina busca engañar a los jueces para que crean que podría ser humano
- La prueba se realiza mediante una conversación basada en texto sobre cualquier tema.
- Si las respuestas de la computadora son indistinguibles de las de un humano, ha pasado la prueba de Turing y se puede decir que es “inteligente”

## CARACTERÍSTICAS DE LA INTELIGENCIA

- habilidad para percibir y entender
- adaptarse al entorno (distintas circunstancias)
- tomar decisiones y realizar acciones de control
- reconocimiento de objetos y sucesos
- representación del conocimiento en modelos lingüísticos
- razonamiento
- planificación
  
- la inteligencia además crece y evoluciona ....

# CUÁNDO APLICAR CONTROL INTELIGENTE

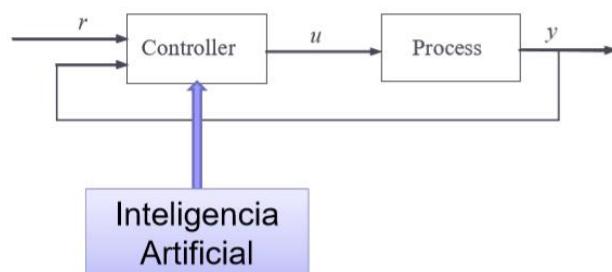
- Reconocerlos y distinguirlos de los sistemas de control convencional
- Clarificar el papel del control en los sistemas inteligentes
  - Identificar los problemas para los cuales los métodos de control inteligente son la única o la mejor solución



Matilde Santos Peñas  
Facultad de Informática, UCM

## CONTROLADOR INTELIGENTE

En definitiva, el controlador inteligente es un controlador heurístico, en cierto modo autónomo, no lineal, quizás adaptativo (con aprendizaje)



### 2.3 Técnicas de Inteligencia Artificial

## LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

- El estudio de las facultades mentales a través del uso de modelos computacionales
- El término data de los 50, por un grupo de científicos que estudiaron el cerebro humano como modelo natural, integrando la cibernetica y los computadores
  - McCarthy, Minsky, Newell, Simon



## TÉCNICAS DE CONTROL INTELIGENTE

- Enfoques computacionales anteriores podían modelar y analizar sólo sistemas relativamente simples

### INTELIGENCIA ARTIFICIAL

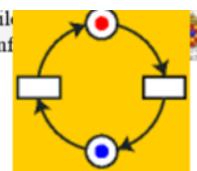
- **Soft Computing** (*computación suave*): es una colección de metodologías inteligentes, que intentan explotar la tolerancia, la imprecisión, la incertidumbre, el grado de verdad, para lograr soluciones fiables, robustas y de bajo coste

# ■ SOFT COMPUTING

Fuzzy Logic	Expert knowledge (rules) and approximate/ qualitative reasoning	Human knowledge and reasoning
Neural Networks	Network of massively connected nodes. Can accurately represent complex systems without analytical models	Neuron structure in brain
Genetic Algorithms	Derivative-free optimization. Can generate a globally optimal control system.	Biological evolution

## ■ REDES DE PETRI

Matile  
Facultad de Inf



- 1962, tesis Carl Adam Petri: teoría general para sistemas discretos paralelos
  - Generalización de la teoría de autómatas
  - Métodos gráficos para representar sistemas como condiciones y eventos
- Representación no puramente secuencial, causal y relaciones de concurrencia
- Lenguaje de la lógica y la representación algebraica
  - Poco atractiva para propósitos de control
  - Modelado de sistemas de eventos discretos

## SISTEMAS EXPERTOS (P3)



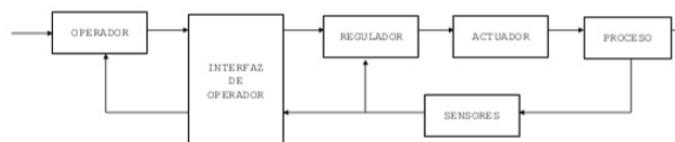
# SISTEMAS EXPERTOS

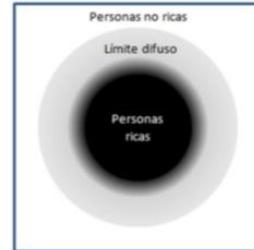
- Campo pionero de la IA
- Programa de ordenador que aplica el proceso del razonamiento humano al conocimiento de un experto en la solución de tipos específicos de problemas
- Componentes de un SE
  - la base de conocimientos (reglas y datos)
    - Reglas del tipo *if-then*
  - el motor de inferencia (razonamiento)
  - interface con el usuario



# CONTROL BASADO EN REGLAS

- Útil en la toma de decisión y eficiente en el modelado
- Lenta en sistemas complejos
- Capacidad de aprendizaje muy limitada
- Aplicaciones en control a nivel supervisor
  - El operador se introduce en el sistema de control como un control superpuesto al control convencional





## LÓGICA BORROSA

- Lógica fuzzy (borrosa o difusa)
  - Generalización de la lógica clásica
- Lofti A. Zadeh, 1965
- Forma matemática de representar la imprecisión inherente al lenguaje natural
- El conocimiento no puede describirse en términos (matemáticos) precisos
- Elementos pertenecen a un conjunto con un cierto grado de pertenencia

## CONTROL FUZZY

- Representa e implementa el conocimiento humano sobre cómo controlar un sistema

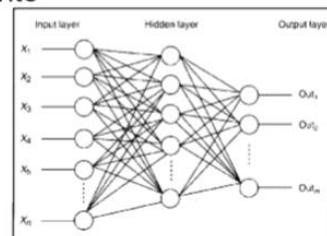


- Fuzzificación: entradas numéricas -> valores de verdad lingüísticos
- Base de reglas (if-then) sobre cómo controlar
- Mecanismo de inferencia: aplica reglas y concluye un resultado
- Defuzzificación: valores fuzzy del control -> valor numérico para la planta

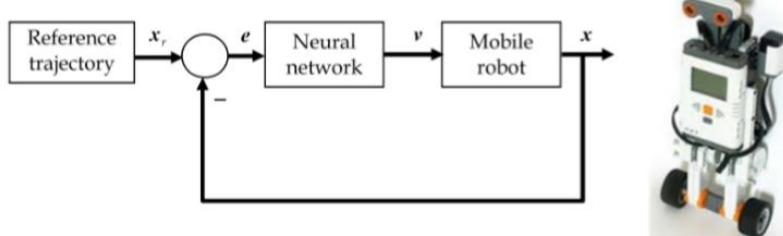


## REDES NEURONALES (NN)

- Las redes neuronales artificiales son circuitos, algoritmos informáticos o representaciones matemáticas inspiradas en el conjunto de neuronas que forman las redes neuronales biológicas del cerebro
  
- Neuronas: elementos de procesamiento
- Operan en paralelo
- Estructura de la red
- Conexiones
- Aprendizaje (entrenamiento)
- Aproximaciones de funciones matemáticas



## CONTROL NEURONAL



- Las redes neuronales artificiales han demostrado ser útiles en una gran variedad de problemas:
  - Identificación
  - Control
    - El perceptron multi-capas (MLP) es la red neuronal más popular en control
    - La segunda es probablemente la red neuronal de base radial (de la cual una de sus formas es idéntica a un tipo de sistema difuso)



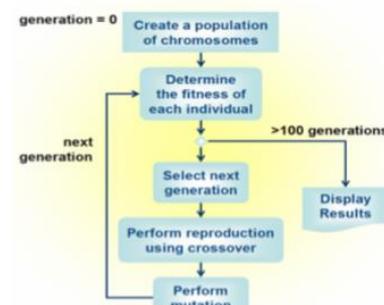
## ALGORITMOS GENÉTICOS

- Un algoritmo genético (GA) es un programa informático que simula las características de la evolución, la selección natural (Darwin) y la genética (Mendel)
  - Los GAs surgieron del estudio de los autómatas celulares (1975)
  - Procedimiento de búsqueda y optimización
  - Paralelo: soluciones candidatas distribuidas en el espacio de búsqueda
  - Estocástico
  - Optimización **explorando** nuevos puntos en el espacio de búsqueda o **explotando** la información ya descubierta
  - Mantienen múltiples soluciones concurrentemente



## ALGORITMOS GENÉTICOS

- Representación abstracta (codificada) de las soluciones candidatas dentro de un dominio de conocimiento (individuo)
- Población inicial que evoluciona a lo largo de generaciones
- Función de ajuste
- Operadores genéticos
- Los “mejores” individuos contribuyen a la siguiente generación



Los AG encuentran una solución razonablemente buena (no óptimo global) en un tiempo razonable



# FUTURO



Una justa predicción sobre el control inteligente sería que fueran capaces de mejorar de forma autónoma su comportamiento “on-line”, y de auto organizarse y planificarse mientras aprenden para conseguir el objetivo deseado

Werbos (1994): *el verdadero control inteligente -control que duplica las más cruciales capacidades de la inteligencia humana- no existe en ningún sistema artificial actualmente.*

---

## BLOQUE 3: CONTROL EXPERTO

### TEMA 4: SISTEMAS EXPERTOS EN CONTROL

#### 1 Sistemas Expertos

Los **sistemas expertos** son **sistemas basados en conocimiento**.

**Sistema basado en conocimiento:** Aplicación informática en la que aparece representado el conocimiento necesario para resolver un determinado tipo de problemas, separadamente del procedimiento para resolverlos.

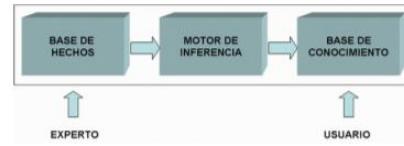
**Sistema experto:** SE, es un programa que incorpora de forma computacional el conocimiento de un experto humano para realizar una tarea X en un dominio Y, de forma que para esa tarea, la eficiencia del programa es comparable a la del experto humano

- Sistema Inteligente

# CARACTERÍSTICAS

- Conocimiento:
  - subjetivo, incompleto, incierto y sujeto a cambios
- Dominio:
  - delimitado y restringido
- Razonamiento
  - simbólico (lógica)
- Estructura
  - Modular

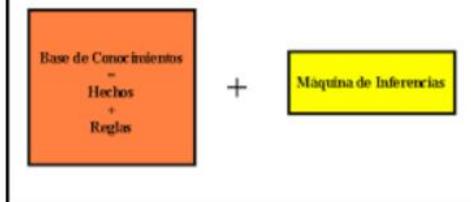
## ESTRUCTURA



- **Base de Conocimiento:** representa de forma codificada (reglas) fragmentos de conocimiento del experto humano acerca de una tarea específica
- **Base de Datos/Hechos:** información sobre el problema concreto que se quiere resolver

7

## Sistema Experto



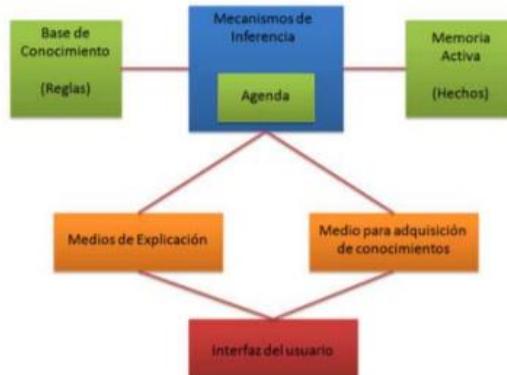
- **Motor de Inferencias:** programa general para aplicar el conocimiento independientemente de la aplicación
  - Genera nuevos hechos ciertos al combinar los que utiliza como entrada con el contenido de las reglas según los mecanismos de razonamiento que contiene

8



- *Explicación y Diálogo* indica al usuario cómo y por qué el sistema ha llegado a una determinada conclusión
- *Adquisición del Conocimiento y/o módulo de Aprendizaje*: modifica el contenido de la base de conocimientos, según las instrucciones del usuario y/o su propia experiencia

- *Interfaz con el usuario*



9

---

## BLOQUE 4: CONTROL BORROSO

### TEMA 5: LÓGICA BORROSA

#### 5.1 Introducción a la lógica Fuzzy

- Un **modelo** recoge **información** del sistema
- Hay modelos con incertidumbre (estadísticos , fuzzys...)
- En **lógica fuzzy** hay incertidumbre (días calurosos)
- Cuando el modelo es estocástico -> modelo estadístico
- Cuando tenemos un modelo no estadístico (léxico) lo representamos con un **modelo fuzzy**

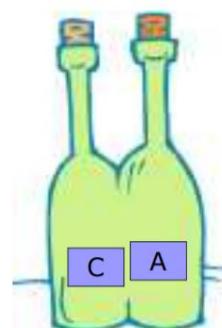
Ej:

#### MODELOS DE LA INCERTIDUMBRE

- $T = \{\text{conjunto de todos los líquidos}\}$
- $L = \{\text{conjunto de líquidos potables}\}$

$$\Pr(A \in L) = 0.91$$

$$m_{L(C)} = 0.91$$



**Probabilidad:**

- en qué grado participa algo de una característica
- solo es válida para **sucesos futuros o desconocidos**  
Ej: El 91 % de los líquidos son potables. Al beber la botella la probabilidad cambia, o es 100% o 0%  
Un hecho pasado ya no tiene probabilidad.

**Fuzziness:**

- Similar a la probabilidad pero, La pertenencia a un conjunto fuzzy permanece en el tiempo.
  - Probabilidad y Lógica difusa se complementan

## 2) Lógica Fuzzy - fundamentos

# LÓGICA FUZZY/DIFUSA/BORROSA

- Técnica de la inteligencia artificial (**Soft Computing**)
  - Emular el razonamiento humano (sentido común)
- Simple y muy potente
- Utilización extendida (aplicaciones)
- Campo abierto a la investigación

## *No siempre la mejor opción*

- En IA las tres principales técnicas de soft computing son:
  - Lógica Borrosa
  - Redes Neuronales
  - Algoritmos genéticos
- La lógica fuzzy intenta formalizar el razonamiento humano aproximado por incertidumbre
- heurística y cualitativa, multivaluada. Usa **lógica multivalente**, pues las variables pueden tomar valores pertenecientes a varios conjuntos fuzzy.

## FUNDADOR

Lofti Zadeh, 1921



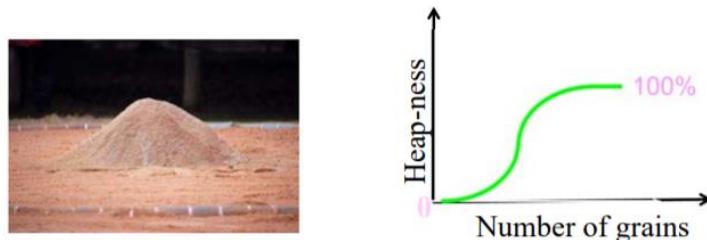
- "Fuzzy Sets", 1965
- Fuzziness: "Un tipo de imprecisión que se asocia con clases en las que no hay una transición aguda de la pertenencia a la no pertenencia" - Zadeh (1970)
- Principio de Incompatibilidad: "a medida que la complejidad de un sistema aumenta, disminuye nuestra capacidad para hacer afirmaciones precisas, incluso significativas, sobre su comportamiento, hasta que se alcanza un umbral más allá del cual precisión y relevancia son características casi mutuamente excluyentes"

## APLICACIONES

- Diagnóstico de fallos, programación matemática, procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones, clustering, etc.
- Procesos con variables fisiológicas y biológicas, aplicaciones médicas, control de calidad
- Modelo y control de sistemas complejos: ascensor, tren de alta velocidad, barcos, conducción automática
- Aplicaciones de control: sintonía, saturación, paso manual a automático, ganancia programada, etc
  - Se usan variables lingüísticas para definir los conjuntos fuzzy
  - La transición de **pertenencia y no pertenencia** a un conjunto no es "abrupta" sino **gradual**

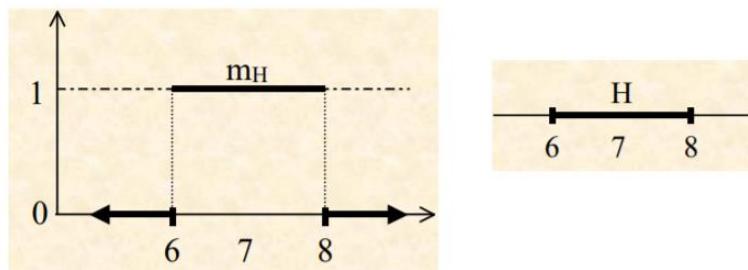
## PARADOJA

- Premisa 1: Un millón de granos de arena es un montículo
- Premisa 2: Un montón menos un grano es un montón
- Pregunta: Es un grano de arena un montículo?

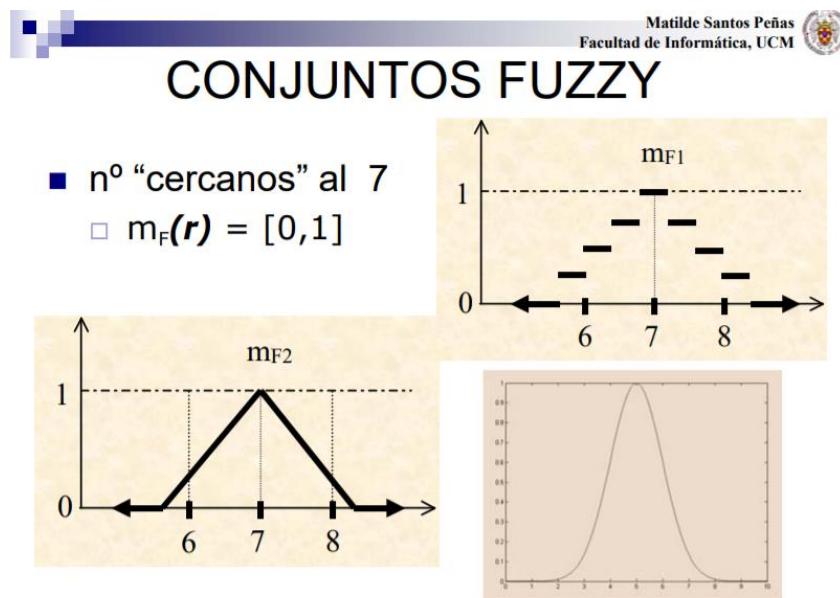


## CONJUNTOS CLÁSICOS (*crisp*)

- nº entre 6 y 8
- $m_H(r) = \begin{cases} 1, & 6 \leq r \leq 8 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$



- La lógica clásica puede ser:
  - Bilvalente (o perteneces o no perteneces al conjunto, como en el ejemplo)
  - Trivalente (puerta abierta, cerrada, entornada)
  - Multivalente (varios grados)

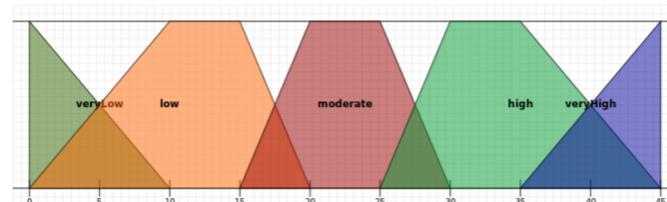


- Lógica Fuzzy multivaluada y esos valores son grados de verdad.

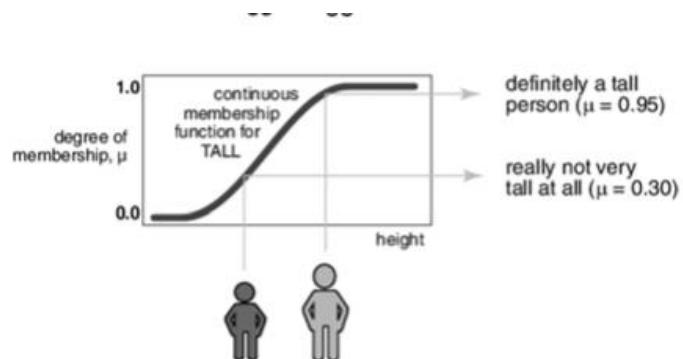
## TEORÍA DE CONJUNTOS FUZZY

discount

(No description)



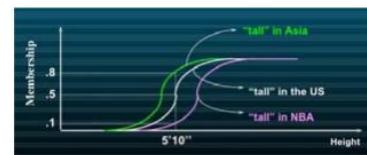
- Grado de pertenencia



- Función de pertenencia
- Un conjunto está descrito por su función característica o función de pertenencia
- Pertenencia parcial de un elemento a un conjunto ( $L = [0,1]$ )

## FUNCIÓN DE PERTENENCIA

- Función continua
- Subjetiva
- Puede definirse de forma numérica, gráfica, mediante un vector, o de forma funcional
- Puede ser cualquier forma, incluyendo arbitraria o irregular (trapezoidal, gaussiana, ....)
- Se normaliza a valores entre 0 y 1
- A menudo utiliza aproximaciones triangulares para ahorrar tiempo de cómputo



•

■

## CONJUNTOS FUZZY

Dado un *universo de discurso U (dominio)*, un **conjunto fuzzy A** de U es un conjunto de pares ordenados de elementos x y su correspondiente grado de pertenencia al conjunto

$$A = \{(x | A(x))\}$$

Los elementos del universo discurso U pueden pertenecer a un conjunto fuzzy A con cualquier valor entre 0 y 1

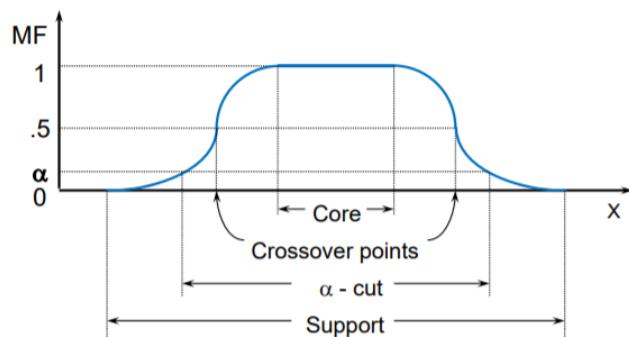
$$0 \leq \mu_{\tilde{F}}(u) \leq 1 \quad \text{Grado de pertenencia}$$

- Los **solapamientos** hacen que un elemento pertenezca a la vez a dos conjuntos fuzzy

•

## CONJUNTO FUZZY

- Se caracteriza por:
  - Una función de pertenencia (MF)
  - Una etiqueta lingüística



•

## CARACTERÍSTICAS

- PROPIEDADES
  - Normalizados ( $m_F(1) = 1$ : verdad)
  - Monotonicidad
  - Simetría
- INFORMACIÓN ÚTIL
  - $m_H(q) = 1$
  - $m_F(q) = 0.98$
- ELÁSTICOS
  - Incorporar incompletitud o imperfección

•

## PROPIEDADES

La mayoría de las propiedades de los conjuntos clásicos (commutatividad, asociatividad e idempotencia) se mantienen para conjuntos difusos excepto dos:

*Ley de  
contradicción*       $\underset{\sim}{A} \cap \underset{\sim}{\bar{A}} \neq \emptyset$

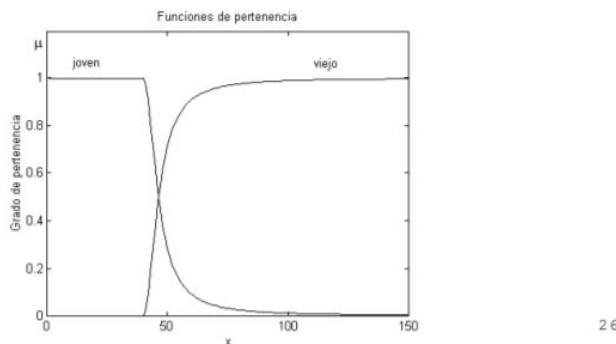
*Ley del tercio  
excluso*       $\underset{\sim}{A} \cup \underset{\sim}{\bar{A}} \neq U$

## Ej continuo

### EJEMPLO: CONTINUO

#### ■ U: edad

- Conjunto fuzzy J (joven)
  - $J = \{(x | 1), 0 < x < 40; (x | (1 + (x - 40)^2/40)-1), x > 40\}$
- Conjunto fuzzy V (viejo)
  - $V = \{(x | 0), 0 < x < 40; (x | (1+40/(x-40)^2)-1), x > 40\}$



2.6

- En este caso particular, son complementarios y la suma de las pertenencias vale 1

## Ejemplo discreto:

### EJEMPLO: DISCRETO

#### ■ U: {meses del año}

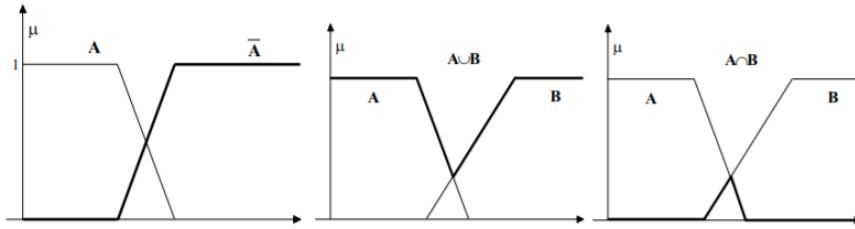
- Conjunto fuzzy F (frío)  
 $F = 1 | \text{enero} + 1 | \text{febrero} + 0.8 | \text{marzo} + 0.7 | \text{abril} + 0.5 | \text{mayo} + \dots$
- Conjunto fuzzy C (calor)  
 $C = 0 | \text{enero} + 0 | \text{febrero} + 0.4 | \text{marzo} + 0.6 | \text{abril} + 0.6 | \text{mayo} + \dots$

U	Ene.	Feb.	Mar	Abr.	May	Jun.	Jul.	Ago	Sept	Oct.	Nov	Dic.
Frio	1	1	0.8	0.7	0.5	0.4	0.2	0	0.3	0.5	0.8	1
Calor	0	0	0.4	0.6	0.6	0.8	1	1	0.7	0.4	0.1	0

*Valores semánticos de los conjuntos fuzzy (joven, viejo, frío, ...) = etiquetas lingüísticas*

- En este caso no son complementarios

- viejo joven frío calor... etiquetas. corresponden a valores de verdad, es el valor semántico de algo
- **Operaciones entre conjuntos fuzzy**



Complemento

Unión (s-norma)

Intersección (t-norma)

Not - and - or

28

- Para unir conjuntos fuzzy se usan las s-normas
  - el máximo (s-normas)
  - or saturada
- intersección t-normas:
  - mínimo
  - producto
- **Modificadores lingüísticos**
  - Son adverbios (muy, extremadamente)
  - Intensifican o diluyen(algo, una especie de) un conjunto difuso
  - se implementan mediante operadores que modifican el conjunto fuzzy

$$\text{"Very"} \alpha = \alpha^2 = \int_Y \frac{[\mu_\alpha(y)]^2}{y} \quad \text{"Very" can be the mathematical square}$$

$$\text{"Very, very"} \alpha = \alpha^4$$

$$\text{"Plus"} \alpha = \alpha^{1.25}$$

"Somewhat" can be the square root

$$\text{"Slightly"} \alpha = \sqrt{\alpha} = \int_Y \frac{[\mu_\alpha(y)]^{0.5}}{y}$$

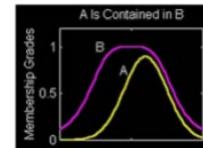
$$\text{"Minus"} \alpha = \alpha^{0.75}$$

## Otras convenciones matemáticas

# RELACIONES FUZZY

## ■ Relaciones ordinarias entre conjuntos fuzzy

- Si existe o no relación entre los elementos de dos o más conjuntos fuzzy
  - Ejemplo: Equivalencia, inclusión



## ■ Relaciones fuzzy entre conjuntos ordinarios

- Grado de pertenencia a la relación (entre 0 y 1)

## ■ Relaciones fuzzy entre conjuntos fuzzy

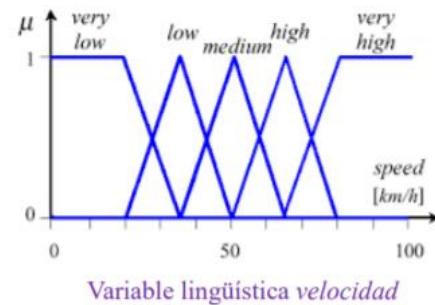
$$R \subset A \times B$$

### 3) REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

- Aproximándonos al uso del lenguaje de un experto con:
  - VARIABLES LINGÜÍSTICAS (Ej : Temperatura = {Muy alta, alta, baja, muy baja})
  - REGLAS FUZZY (Ej : si la temperatura es alta entonces...)
    - Si .. variable entrada es.... Entonces ... variable salida

•

- Nombre de la variable
- Universo o dominio
- Etiquetas lingüísticas (términos)
  - Semántica
- Conjuntos fuzzy asociados a cada etiqueta
  - Función de pertenencia

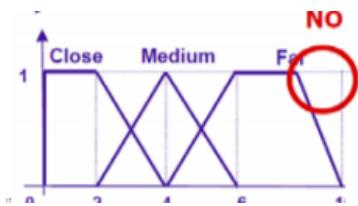
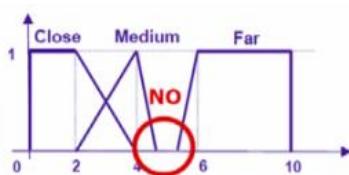


## • Diseño de las variables lingüísticas

1. ¿Cuántas variables = conjuntos fuzzy? Lo normal de 3 a 7 máx.  
Suele ser un número impar ya que ayuda a promediar
2. ¿Cobertura de las variables?  
Todo el dominio ha de estar cubierto así cada valor posible pertenecerá al menos a un conjunto fuzzy.
2. Extremos -> valor máximo > hay que saturar los extremos, funciones trapezoidales con este fin

#### 4. Punto de cruce

OJO:



- El solapamiento puede ser complementario, irregular, asimétrico.  
Intentar hacerlo lo más simple posible.

- Representar bien el conocimiento del que disponemos respecto al problema

- Nivel de cobertura: Si algún valor pertenece a un conjunto con un grado muy bajo, el sistema no le hará nada

SI NO HUBIERA SOLAPAMIENTO EL COMPORTAMIENTO SERÍA LINEAL  
¡MAL!

#### • Reglas Fuzzy

If  $x$  is A then  $y$  is B

- Esto se interpreta como un conjunto fuzzy

A , B = conjuntos fuzzy de las variables de Entrada y salida respectivamente

#### ■ Ejemplos:

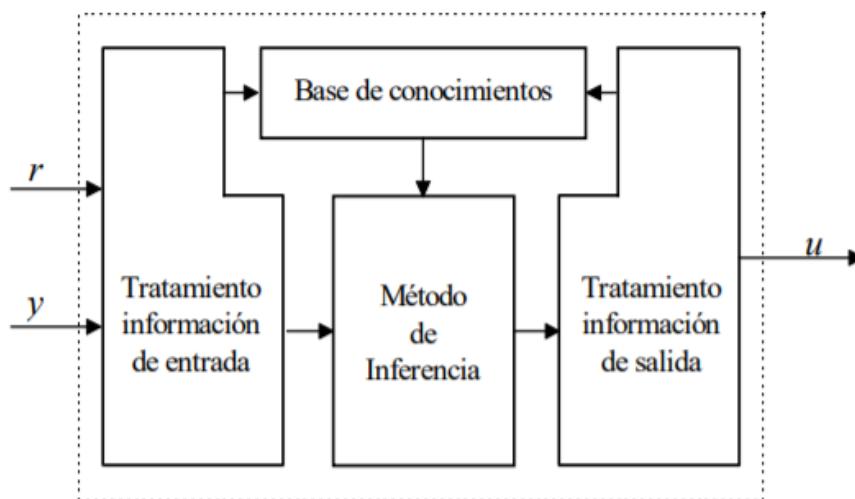
- Si la presión es alta, entonces el volumen es pequeño
- Si el camino es resbaladizo, entonces conducir es peligroso
- Si un tomate es rojo, entonces está maduro
- Si la velocidad es alta, entonces aplique un poco freno

#### • Razonamiento Fuzzy

- Encadenamiento hacia delante :
  - Un solo nivel
  - GMP (Modus Ponens Generalizado)
  - RCI (Reglas Composicional de Inferencia)
    - Máx – Min -> MANDAMI
    - Máx -Prod > LARSEN

## 5.2 Sistemas Fuzzy

- Se compone de un conjunto de reglas lingüísticas:
  - Antecedentes: valores posibles de las entradas
  - Concluyen en la acción a efectuar (en términos lingüísticos también) > salidas
- Ej: **si** la temperatura es alta **entonces** baja mucho la calefacción
- **Elementos de un sistema Fuzzy**



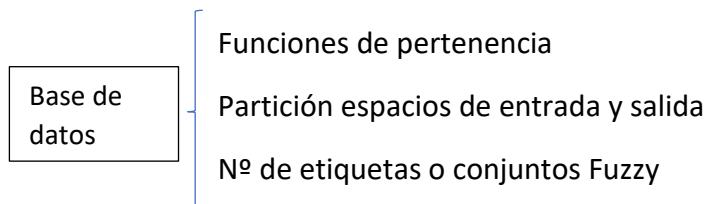
### Elementos de un sistema fuzzy

#### 1. Tratamiento de la información de entrada: “Fuzzyficación”

- Selección y medida de las variables de entrada
  - obtenidas directamente de sensores, etc.
  - calculadas (error, derivada del error...)
  -

$$A(x) = fuz(x0) = A(x0)$$

#### 2. Base de Conocimiento



Base de Reglas de producción	Número de variables de entrada				
	2	3	4	5	
Nº etiq	2	4	8	16	32
	3	9	27	108	324
	4	16	64	256	1024

**Número de reglas**

### 3. Mecanismo de inferencia

- Cómo es la lógica que implementamos para llegar a la conclusión

*La forma de razonar*

*RCI max-\**

$$z = y^o (x^o R)$$

R1: **si altura es alta y peso es grande entonces gordura es media**

R2: **si altura es alta y peso es pequeño entonces gordura es poca**

R3: **si altura es baja y peso es grande entonces gordura es grande**

R4: **si altura es baja y peso es pequeño entonces gordura es poca**

$$R = \text{also}(R1, R2, R3, \dots) = \cup(R1, R2, R3, \dots)$$

### 4. Tratamiento de la información de salida: Defuzzyfificación

- Determinar variables de salida
- Obetener un valor concreto de la salida difusa
- 

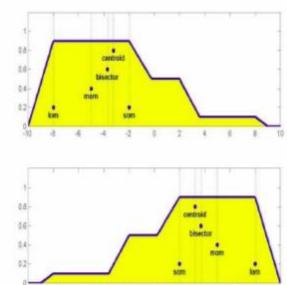
Métodos:

- defuzzyfificación lineal
- promedio de máximos (MOM)
- centro de gravedad (COA)

$$z_0 = \text{defuz}(z)$$

### DEFUZZYFICACION

- Centroide (coa)
- Bisector
- Media de los máximos
- Mínimo de los máximos
- Suma de los máximos
- Centro de la
- ...



- **Tipos de sistemas Fuzzy**

## TIPOS DE SISTEMA FUZZY

- MAMDANI

Ri: **si**  $x$  es  $A_i$  **y**  $y$  es  $B_i$  **entonces**  $z$  es  $C_i$

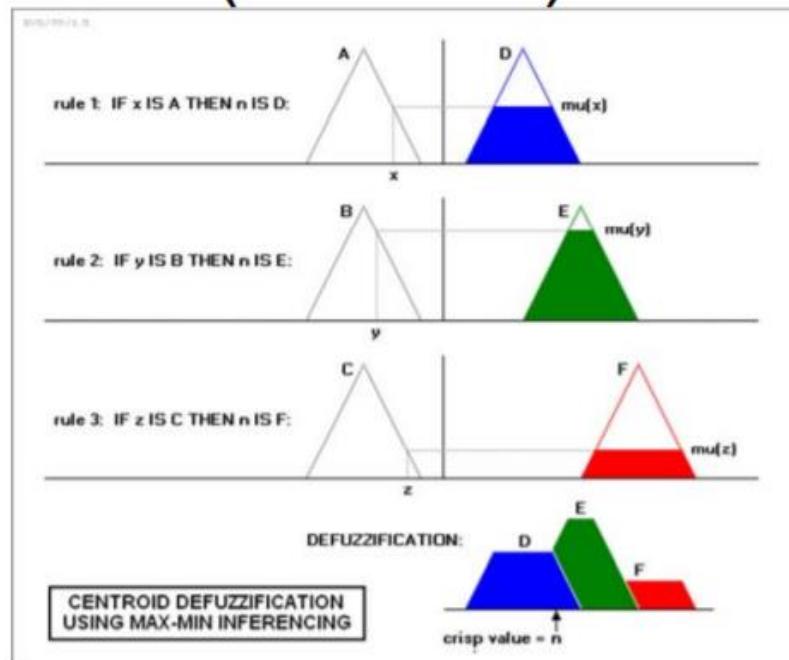
$$C^o = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

- SUGENO

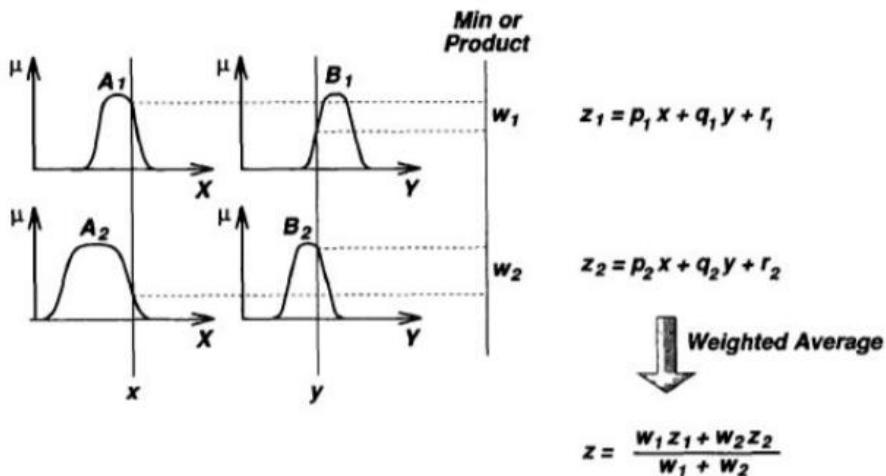
Ri: **si**  $x$  es  $A_i$  **y**  $y$  es  $B_i$  **entonces**  $z_i = f_i(x,y)$

- **Mandani** siempre trabaja con números naturales, por lo tanto es interpretable
- **Sugeno**: si la altura que quiero y el avión es muy bajo, no necesito defuzzificar
- 

## Composición de 3 salidas fuzzy (Mamdani)



## Composición de 2 salidas fuzzy (Sugeno –TSK-)



### Diferencia entre Mandami y Sugeno

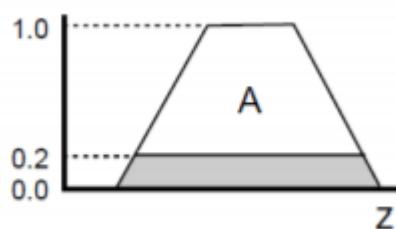
**Inferencia borrosa:** Se entiende por inferencia borrosa la interpretación de las reglas del tipo SI-ENTONCES (IF-THEN) con el fin de obtener las conclusiones de las variables lingüísticas de salida, a partir de los valores de las variables de entrada. La inferencia se basa en el paradigma “Modus Ponens Generalizado” el cual se puede interpretar como la transformación de los grados de cumplimiento del lado izquierdo de las reglas a grados de posibilidad de los lados derechos de las mismas.

#### Inferencia de Mandami:

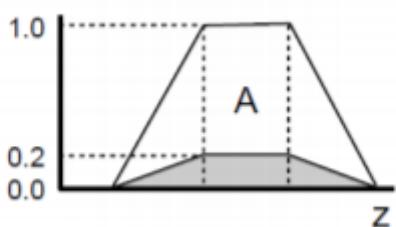
Las etapas de fuzzificación y defuzzificación ya las hemos visto anteriormente. El método de Mamdani utiliza un conjunto de reglas difusas “SI-ENTONCES” (IF-THEN). Toma como entrada los valores de la fuzzificación y se aplican a los antecedentes de las reglas difusas. Si una regla tiene múltiples antecedentes, se utiliza el operador AND u OR para obtener un único número que represente el resultado de la evaluación. Este número (el valor de verdad) se aplica al consecuente.

- Para evaluar la disyunción (operador OR) habitualmente se emplea la T-Conorma estándar (máximo): La salida es el m'áximo valor de todos aquellos que generan el valor m'as alto de la funci'on de pertenencia.
- De igual forma, para el operador AND se usa habitualmente la T-Norma estándar del mínimo.
- Finalmente, el resultado de la evaluación del antecedente se relaciona con el consecuente aplicando un recorte o escalado según el valor de verdad del antecedente para obtener como salida de la regla un conjunto difuso. El método más comúnmente utilizado es el recorte (clipping) que corta el consecuente con el valor de verdad del antecedente. El escalado proporciona un resultado más preciso, preservando la forma original del conjunto difuso y se obtiene multiplicando todos los valores por el valor de verdad del antecedente

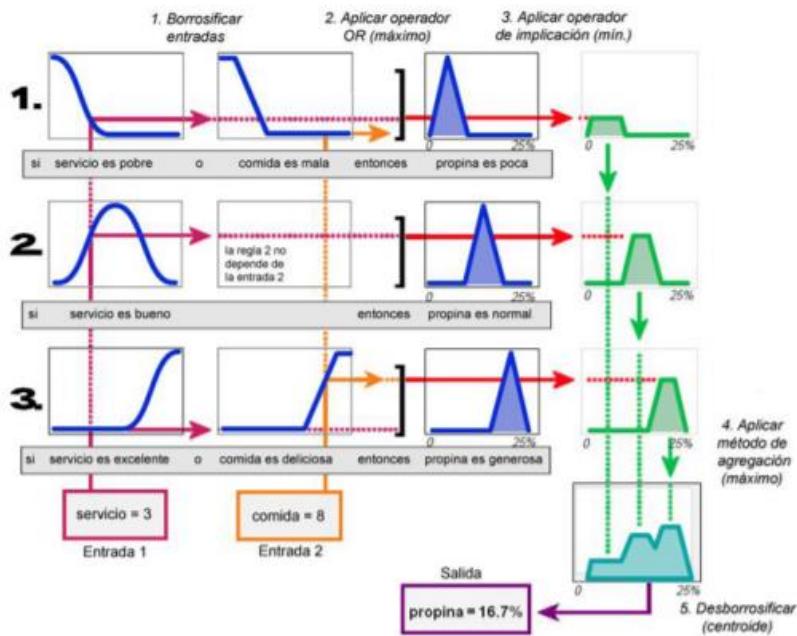
**Conjunto recortado**



**Conjunto escalonado**



**Aggregación:** proceso de unificación de las salidas, se combinan (normalmente mediante la unión) las funciones de pertenencia de todos los consecuentes, previamente recortados o escalados, para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida.



### Inferencia en Sugeno:

Se trata de un método basado en reglas difusas pero en el que el consecuente no nos da un conjunto difuso sino una serie de funciones lineales

principal diferencia: aquí no es necesario realizar un proceso de defuzzificación.

Esto se debe al hecho de que no obtenemos ning\'un conjunto difuso sino un conjunto de funciones lineales. Así, en el m\'etodo TSK podemos obtener directamente el valor de salida de sistema con una expresi\'on del tipo:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i},$$

donde el valor  $\omega_i$  se obtiene calculando el m\'inimo de los valores de entrada en cada regla  $R_i$ .

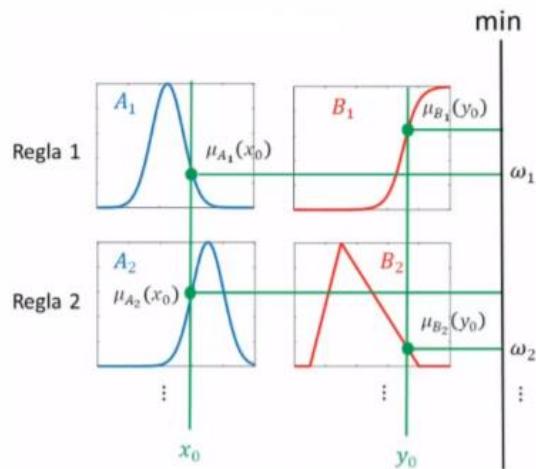


Figura 3.31: Cálculo de las componentes  $\omega_i$ .

## **TEMA 6: CONTROL BASADO EN LÓGICA BORROSA**

- **Control borroso:** control organizado en reglas cuyas acciones están diseñadas para parecerse a las acciones de un operador humano
- Traduce Conocimiento cualitativo -> Algoritmos computables

Matilde Santos Peñas  
Facultad de Informática, UCM



### ¿CUÁNDO PENSAR EN LÓGICA FUZZY PARA CONTROL?

- Procesos complejos y mal definidos
  - Difícil estimación de los parámetros del proceso
  - Difícil medición del valor de las variables a controlar
  - Medidas de sensores no fiables
  - Entornos variables, con ruido, etc
- Constantes de tiempo relativamente altas (0.1 s o más)
  - Ancho de banda bajo (10.0 Hz o menor)
- No existe modelo analítico y la identificación de un modelo experimental no es posible
- Experiencia del control por un operador humano disponible y se puede expresar con reglas lingüísticas y términos fuzzy

- **¿Qué aporta?**
  - Inteligencia para la toma de decisiones y la supervisión
  - Experiencia del operador
  - Controladores no lineales
  - Tratamientos de la información imprecisa
  - Tratamiento simple de sistemas complejos

Facultad de Informática, UCM

### VENTAJAS DEL CONTROL BORROSO

- No es necesario un modelo analítico del sistema
- Implementación simple (no conocimiento profundo de control)
- Mantenimiento fácil, coste no elevado
- Potencia de procesamiento con un número reducido de variables y reglas
- Acción de control suave y continua
- Robustos
- Integración con otras técnicas



Matilde Santos Peñas  
Facultad de Informática, UCM 

## INCONVENIENTES DEL CONTROL FUZZY

- Difícil estudiar su estabilidad
- Imprescindible un experto que suministre su conocimiento
  - Difícil de obtener
  - Difícil de representar sin empobrecerlo
  - Incoherencias
- Elevado número de parámetros (relacionados)
- No metodología general de diseño
- No procedimientos sistemáticos de sintonía

- **Pasos:**

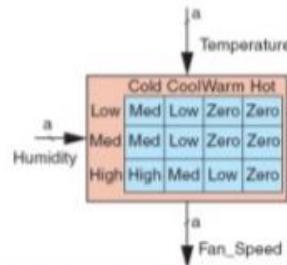
1. Definir variables de entrada y salida
2. Para cada variable definir conjuntos fuzzy
3. Definir conjunto de reglas de control lingüístico con variables borrosas como condiciones y acciones
4. Conjunto de funciones de pertenencia para las variables de entrada y de salida
5. Aplicar la “AND” (típicamente min) y la implicación difusa (típicamente min) a cada regla y obtener una función de pertenencia multi-variable para cada regla (relación Ri).
6. Combinar (agregar) las relaciones Ri usando las conectivas borrosas (OR, típicamente máx) para obtener una relación multivariable borrosa total

Para sacar info del error podemos sacar su derivada y su integral, un PI funciona mejor que un P

### EJEMPLO DE CONTROL FUZZY

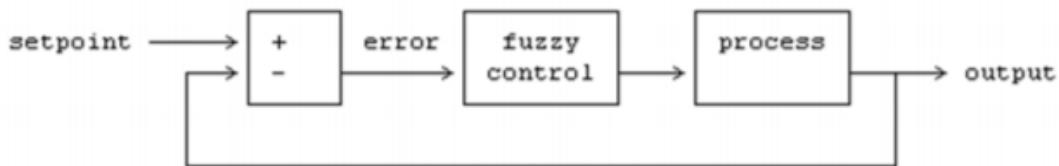
## TEMPERATURE CONTROLLER

- The problem
  - Change the speed of a heater fan, based off the room temperature and humidity.
- A temperature control system has four settings
  - Cold, Cool, Warm, and Hot
- Humidity can be defined by:
  - Low, Medium, and High
- Using this we can define the fuzzy set.



9

## CONTROLADOR FUZZY-PD



Entradas:

- error  $e(t)$
- cambio en el error  $ce(t)$



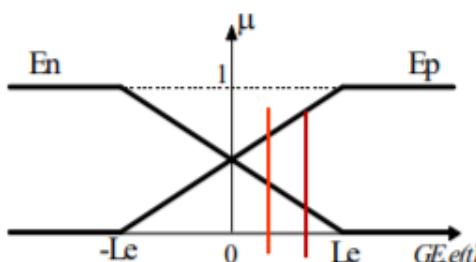
Salida:

- control  $u(t)$

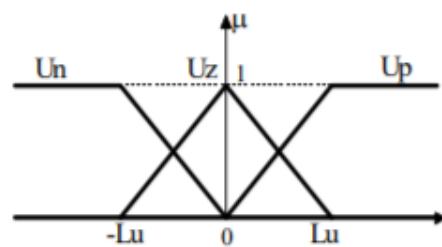
# CONTROLADOR FUZZY-PD

- Variables lingüísticas: error, cambio en el error, control
  - Universo de discurso (dominio o rango)
- Conjuntos borrosos:
  - Etiquetas
    - P: positivo, Z: cero, N: negativo
  - Funciones de pertenencia (MF)
    - Triangulares, trapezoidales, gaussianas
- Estrategia de fuzzificación
- Inferencia
- Estrategia de defuzzificación

## FUZZIFICACIÓN VARIABLES



No. MF  $e = \text{No. MF } ce = 2$   
 $Le = Lce = 10$



No. MF  $u = 3$   
 $Lu = 10$

$$e(t) = 3 \Rightarrow 0.6 \text{ Ep}, 0.4 \text{ En} \quad ce(t) = 6 \Rightarrow 0.8 \text{ CE}_p, 0.2 \text{ CE}_n$$

Mediante un fuzzy singleton (línea vertical) se asigna un valor dado por el grado de pertenencia a cada MF

12

(Paso 1) variables lingüísticas: error, cambio en el error y señal de control

(Paso 2) Los conjuntos borrosos están representados con funciones trapezoidales para valores negativos y positivos

Conjuntos borrosos para  $e(t)$

$$e(t) \in [-Le, Le]$$

$$ce(t) \in [-Lce, Lce]$$

$$u(t) \in [-Lu, Lu]$$

Las definiciones son arbitrarias pero tienen que ser lógicas

Para una mejor afinación se intena que la variable de salida tenga más conjuntos borrosos que las variables de entrada, con funciones triangulares

(Paso 3) Defino reglas

## REGLAS BORROSAS

- R1: **si  $e$  es P y  $ce$  es P entonces  $U$  es P**
- R2: **si  $e$  es P y  $ce$  es N entonces  $U$  es Z**
- R3: **si  $e$  es N y  $ce$  es P entonces  $U$  es Z**
- R4: **si  $e$  es N y  $ce$  es N entonces  $U$  es N**

<u><math>e(t)</math></u>	<u>y</u>	<u><math>ce(t)</math></u>	<u><math>U</math></u>
0.6Ep		0.8CEp	0.6Up
0.6Ep		0.2CEn	0.2Uz
0.4En		0.8CEp	0.4Uz
0.4En		0.2CEn	0.2Un

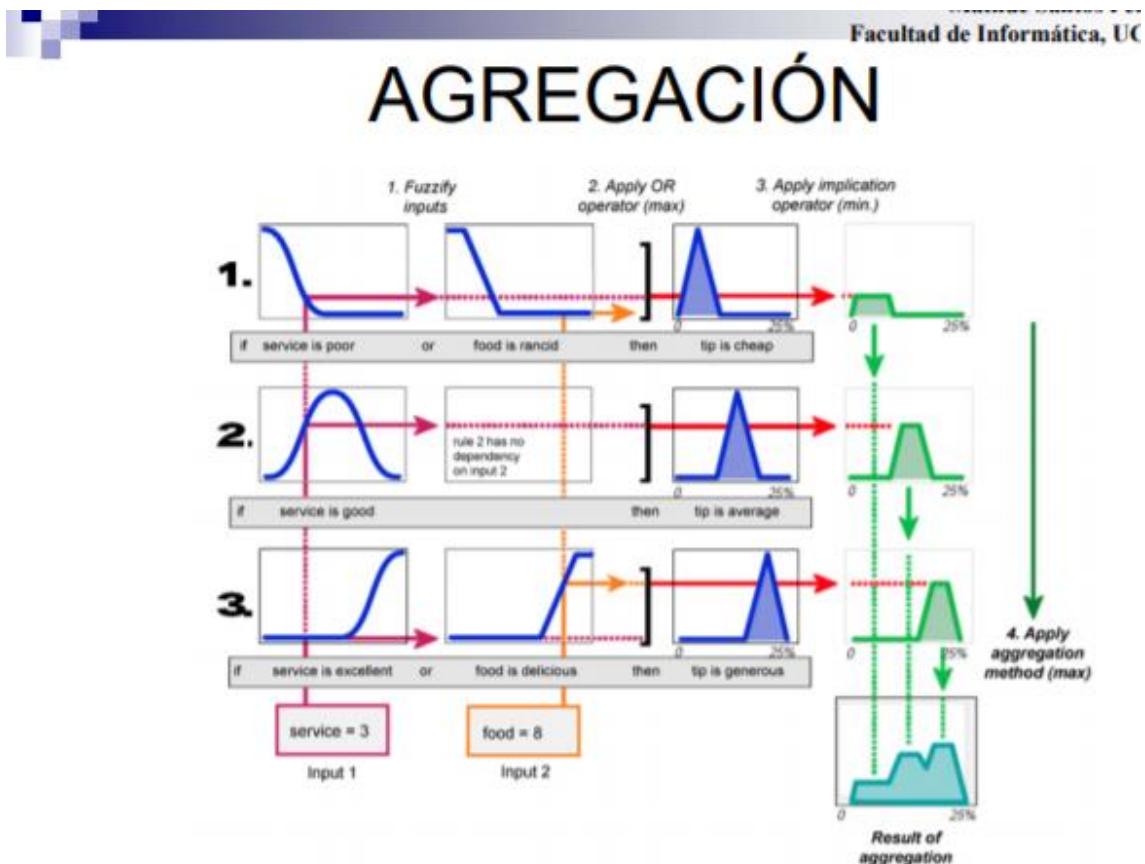
13

**Estrategia de Fuzzificación** – dicen cuanto pertenece a un conjunto y otro borroso el valor que toma una variable

¿Cómo es este error, es positivo, negativo? Esta se suele hacer con MANDAMI es decir trazar una línea vertical que en cierto modo es un conjunto fuzzy y lo denominamos singleton.

**(Paso 4)** Funciones de pertenencia: representación de los valores de las variables y su grado de pertenencia a los conjuntos fuzzy.

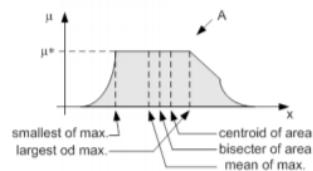
**(Paso 5 y 6)**



**Defuzzificación:**

**La suma de los grados de pertenencia por los valores que definen a ese conjunto borroso**

## DEFUZIFICACIÓN



$$u_L(t) = \sum_{Nu} u_k p_k = \mathbf{U_p.Lu + Uz.0 + Uz.0 + Un(-Lu)}$$

$$0.6 \times 10 + 0.2 \times 0 + 0.4 \times 0 + 0.2 \times (-10) = 4$$

$$u_{COA}(t) = \frac{\sum_{Nu} u_k p_k}{\sum_{Nu} u_k} = \frac{4}{0.6 + 0.2 + 0.4 + 0.2} = 2.857$$

Ejemplo:

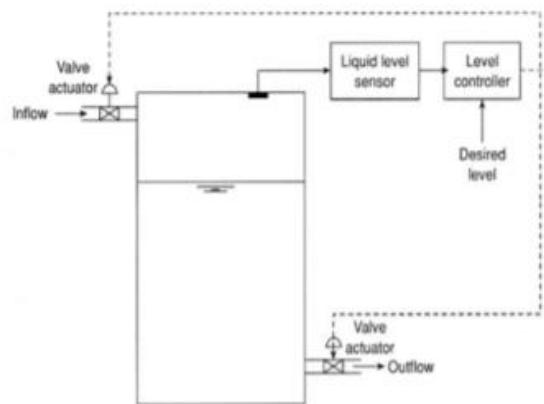
Control del nivel de un depósito

## CONTROL DEL NIVEL DE UN DEPÓSITO

Matilde Santos Peñas  
 Facultad de Informática, UCM

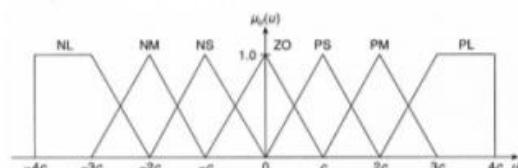
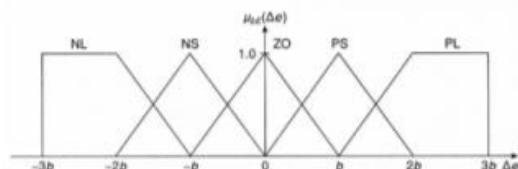
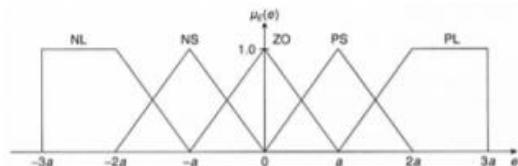


- Error (corrección)
  - $e = \text{nivel deseado} - \text{nivel actual}$
- Cambio en el Error
  - $de$
- Acción de Control =  $u$ 
  - $u > 0 \Rightarrow \text{abrir válvula entrada}$
  - $u < 0 \Rightarrow \text{abrir válvula salida}$





## CONJUNTOS BORROSOS

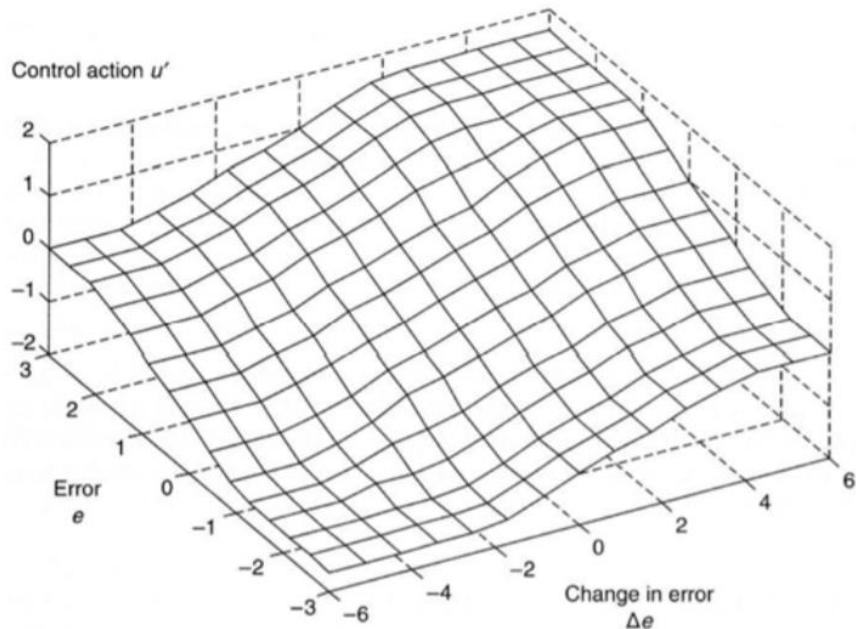


## REGLAS BORROSAS (FAM)

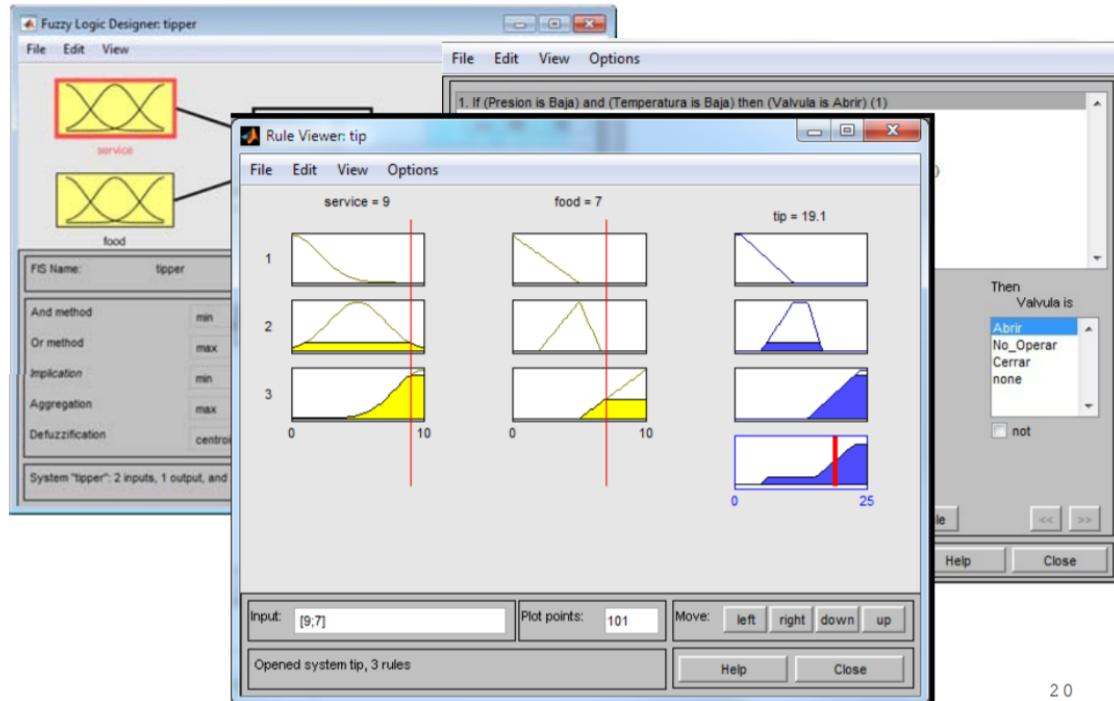
$E \setminus \Delta E$	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	NL	NL	NM	NS	ZO
NS	NL	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NS	ZO	PS	PM	PL
PL	ZO	PS	PM	PL	PL



# SUPERFICIE DE CONTROL

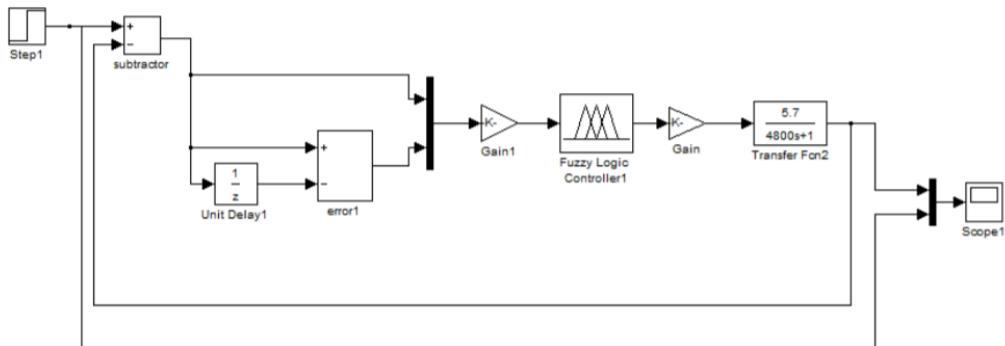


## FUZZY GUI MATLAB



20

# CONTROLADOR FUZZY SIMULINK



- SISTEMA DISCRETO
  - Aproximación de la derivada
    - $de = e(t-1) - e(t)$
    - $de = e(t) - e(t-1)$

21

## BLOQUE 5: NEUROCONTROL

### TEMA 7: INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES

#### 7.1 INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES

##### Motivación:

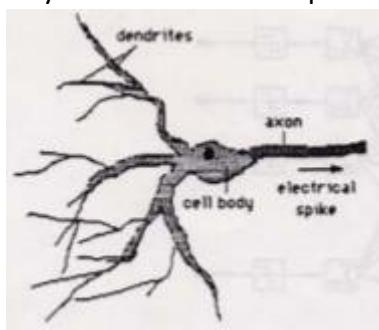
- Imitan la estructura del cerebro (compuesto por neuronas y conexiones entre ellas que permiten la transmisión de impulsos eléctricos) -> Inteligencia Artificial Conexionista
- Son sistemas heurísticos generalmente dedicados al procesamiento de la información.

#### REDES DE NEURONAS ARTIFICIALES (RNA O ANN)

- Sistema de procesamiento de información
- Paradigma de aprendizaje

##### Origen:

- **1950s:** Marvin Lee Minsky fue un científico estadounidense considerado uno de los padres de la inteligencia artificial
- Las redes neuronales representan una analogía humana
- Hay diversidad de interpretaciones



➤ **Historia:**

- **1936**, Turing. Cerebro como modelo de computación
- **1943**, McCulloch y Pitts, modelado de una red neuronal simple mediante circuitos eléctricos
- **1957**, Rosenblatt, Perceptrón.
- **1969**, Widrow y Hoff, Adaline (Adaptive linear elements)
  - Primera aplicación a un problema real (filtro adaptativo para eliminar ecos en las líneas telefónicas)
- **1986**, desarrollo de las redes neuronales
  - Redes de segunda generación, .....

## ¿Qué es una red neuronal?

Es un modelo computacional inspirado en el comportamiento observado en las redes neuronales biológicas

- Consisten en un conjunto de **autómatas conectados** entre sí que generan propiedades globales emergentes -> Sistema de interconexión de neuronas (**capa de neuronas de entrada y capas intermedias opcionales**) de una red que **colaboran** para producir un estímulo de **salida**.

## ¿Factores que influyen en su comportamiento?

- El procesamiento realizado por cada unidad o neurona con la información de entrada que le llega.
- Su conectividad (arquitectura o topología de la red)
- Las reglas que gobiernan la dinámica del envío de mensajes entre unidades

## Tipos de redes neuronales según el procesamiento de sus neuronas:

- **Lógicas:** el procesador local es una función lógica
- **Analógicas:** Computación local (operación analógica), ej: suma + umbral
- **Inferencial:** realización de inferencia local mediante reglas.



## Elementos que forman una red Neuronal:

- **Neuronas** (Elementos de procesamiento)
- **Conexiones** (pesos) -> representan el conocimiento simbólico. Estas conexiones transmiten el impulso, la información. Las conexiones tienen un peso, una fuerza; imitando nuestra forma de aprendizaje y priorización de un

conocimiento a otro( priorizando unas operaciones a otras en el caso del procesamiento de redes neuronales artificiales)

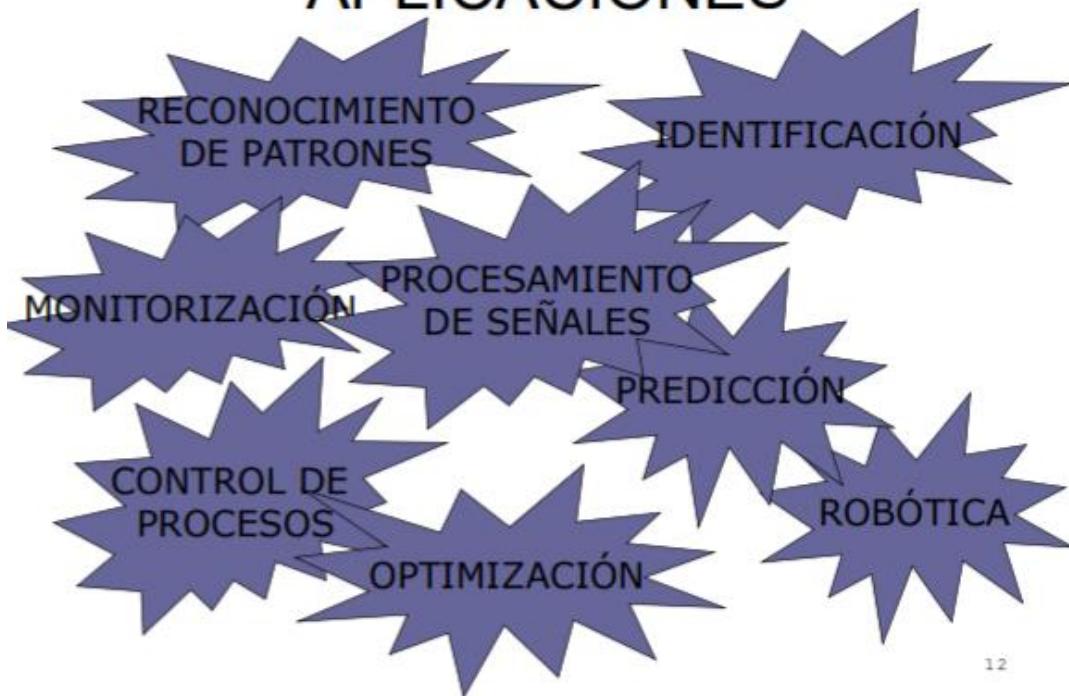
- **2 funciones por neurona:**

- **Función de propagación o activación:** se encarga de realizar el procesamiento local (sumatorio de los datos de entrada ponderados por el peso de su conexión)
- **Función de transferencia o de salida:** Interpretación del resultado de la activación. Suele haber un umbral o valor de saturación

## Beneficios

- Elevada tolerancia a fallos
- Auto-organización
- Información distribuida
  - Cálculos intensivos
  - Tiempo real
  - Información difusa, con ruido o inconsistencias
- Aprendizaje adaptativo
  - Procesar cualquier función o tarea
- Flexibilidad
- Fácil integración con otras técnicas

## APLICACIONES



-Reconocimiento de patrones: reconocimiento de caras, matrículas, firmas. Aprenden el patrón/es que definen cada clase para identificar nuevas entradas.

-Clasificación: puedes poner varias salidas posibles (clases a las que puede pertenecer una salida): persona alta, baja, media

o dos clases (Si/no), por ejemplo: ¿Tiene cáncer o no tiene?

En Machine Learning se usa mucho SVM cuando hay muchos datos de entrada y pocos ejemplos de entrenamiento. Se entrena uno frente al resto (salida multiclase o biclase. A partir de la biclase se puede construir una multiclase).

-Robótica

-Predicción, principalmente de series temporales, con valores históricos

# ÁMBITOS DE APLICACIÓN

- Diagnóstico:
  - De fallos (plantas industriales, nucleares, ..)
  - Médico: enfermedades, concentraciones
- Control, Identificación
- Clasificación
  - Señales de radar, sonar, detección de explosivos
  - Detección de fraudes, firmas, caracteres
- Predicción
  - Finanzas: tendencias, riesgos, evolución
  - Series temporales, demanda, el tiempo, trayectorias
- Optimización
  - Recursos

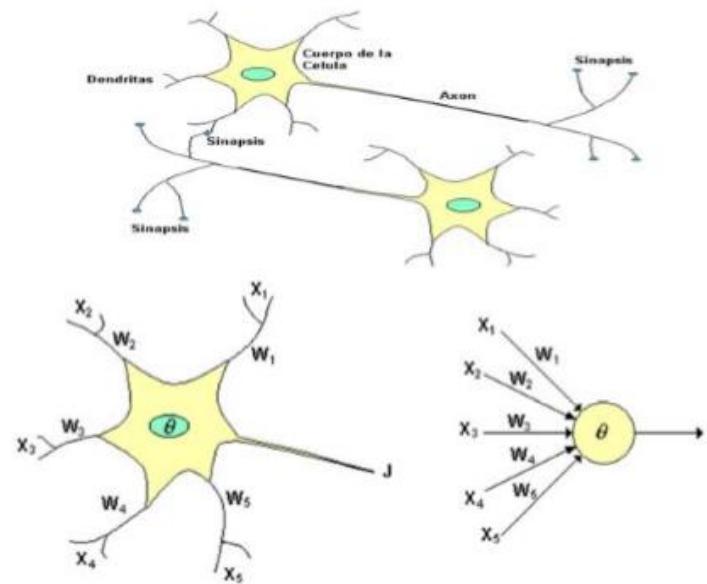
## 7.2 REDES NEURONALES ANALÓGICAS

### NEURONA BIOLÓGICA

- Los estímulos recibidos por el cerebro (sentidos) son transmitidos por las neuronas mediante conexiones sinápticas
- Cuando una neurona es estimulada libera una pequeña cantidad de un componente químico (neurotransmisor)
- Este viaja a través del axon para llegar a las dendritas de otras neuronas, y el proceso se repite
  - Se incrementa o disminuye la relación de las neuronas involucradas
  - Un determinado estímulo puede activar o inhibir a una neurona

Neurona:  $10^{-6}$  m  
Nº total:  $10^{10}$ - $10^{12}$   
Nº conex x neurona  $10^0$ - $10^4$

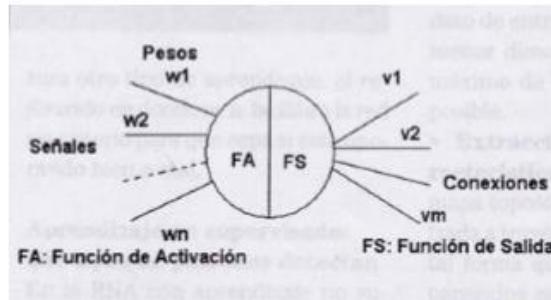
15



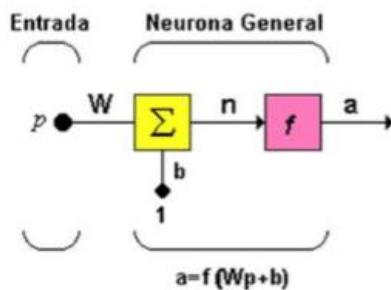
16

## NEURONA ARTIFICIAL

Autómata sencillo que recibe entradas de otras unidades vecinas y calcula un valor de salida

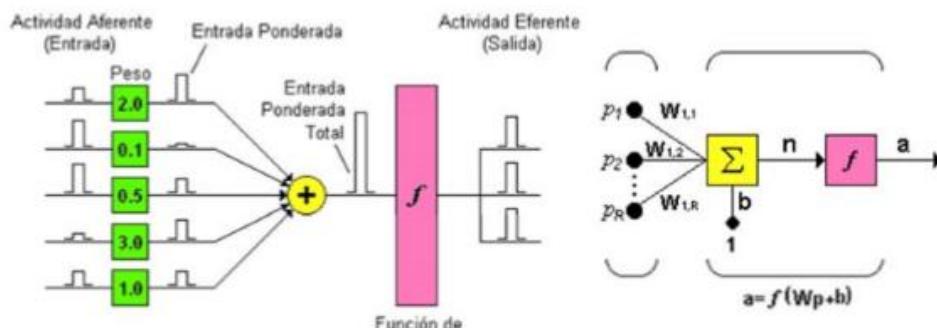


## Funcionamiento:



$$neto_i = \sum_{i=1}^n W_i X_i = \vec{X} \vec{W}$$

$$a = f(Wp + b)$$



$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b$$

$$n = Wp + b$$

$$a = f(Wp + b)$$

## Funciones que intervienen

### ■ FUNCIONES DE ACTIVACIÓN

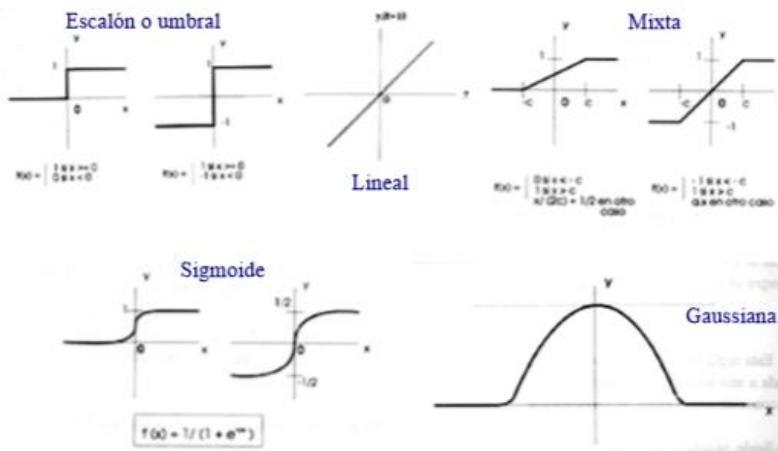
- Continuas o discretas
- Diferenciables
- Rango de las entradas (normalización)
- Estado de activación
  - Reposo (no activo) o excitación (activo)
- Salidas (normalizadas)
  - Discretas:
    - 1 -> estado activo
    - 0 -> estado pasivo, neurona en reposo
  - Continuas: [0,1] ó [-1,1]

## FUNCIÓN DE SALIDA

- Obtiene un valor de salida a partir del estado de activación
- Suele ser igual que la función de activación

## FUNCIONES DE ACTIVACIÓN/SALIDA

- ✓ Función escalón o umbral
- ✓ Función lineal
- ✓ Saturación (mixta)
- ✓ Función sigmoide
- ✓ Tangente hiperbólica
- ✓ Tangente gaussiana, ...



Nombre	Relación Entrada /Salida	Icono	Función
Límitador Fuerte	$a = 0 \text{ si } n < 0$ $a = 1 \text{ si } n \geq 0$		hardlim
Límitador Simétrico	<b>Fuerte</b> $a = -1 \text{ si } n < 0$ $a = +1 \text{ si } n \geq 0$		hardlims
Línea Positiva	$a = 0 \text{ si } n < 0$ $a = n \text{ si } 0 \leq n$		poslin
Línea	$a = n$		purelin
Línea Saturado	$a = 0 \text{ si } n < 0$ $a = n \text{ si } 0 \leq n \leq 1$ $a = 1 \text{ si } n > 1$		satlin
Línea Saturado Simétrico	$a = -1 \text{ si } n < -1$ $a = n \text{ si } -1 \leq n \leq 1$ $a = +1 \text{ si } n > 1$		satlins
Sigmoidal Logarítmico	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$		logsig
Tangente Hiperbólica	<b>Sigmoidal</b> $a = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$		tansig
Competitiva	$a = 1 \text{ Neurona con } n \text{ mas}$ $a = 0 \text{ El resto de neuronas}$		compet

## Tipos de Redes Analógicas:

### 1 No recurrentes:

- Redes de flujo directo: Entrada  $\rightarrow$  Salida
- Sinapsis: conexión entre la neurona m y la neurona n: peso (Si el peso es positivo se las llama excitadoras y si es negativo inhibidora, en caso de ser 0, no existe conexión)
- Matriz con todos los pesos: W

-Tipos:

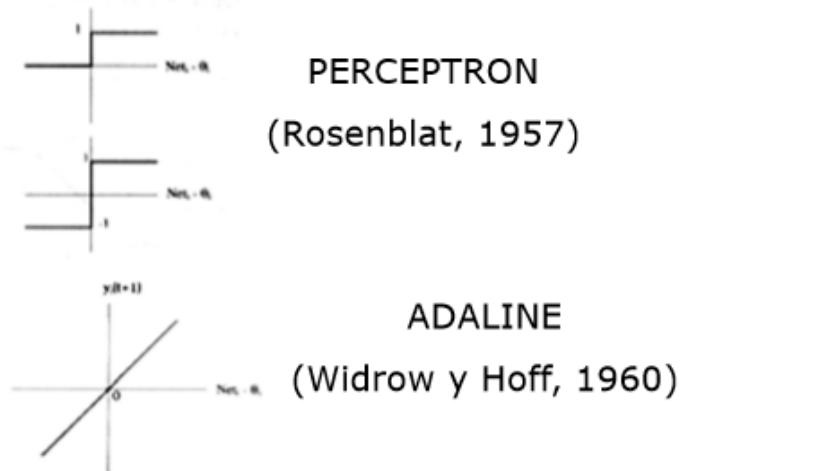
#### ■ Monocapa

- Conexiones laterales entre neuronas de la misma capa
  - *Red de Hopfield; Red Brain-State-In-A-Box, etc*

#### ■ Multicapa

- Neuronas agrupadas por niveles
  - Conexiones hacia delante (*feedforward*)
    - *Perceptron, Adaline, Madaline, ...*
  - Conexiones hacia atrás (*feedback*), bicapa
    - *ART, Neocognitron, ...*

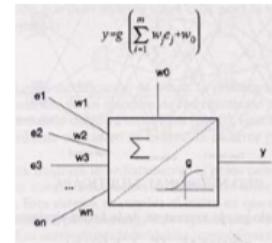
## REDES FEEDFORWARD: Conexiones hacia delante



## PERCEPTRÓN

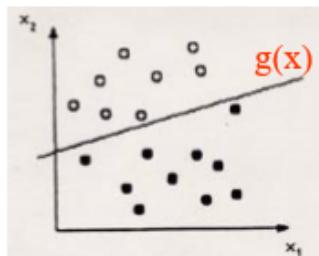
- ELEMENTOS:
  - Varias neuronas de entrada y una de salida
- CONECTIVIDAD: pesos
- PROCESAMIENTO: suma + umbral
  - Función de activación
  - Función de salida

*Mecanismo de aprendizaje:  
función criterio del perceptrón*



29

## EJEMPLO: CLASIFICACIÓN



Entradas:  $x_1, x_2$

Clase 1  $\Rightarrow$  salida 1

Clase 2  $\Rightarrow$  salida 0

Función de activación  $g(x) = \sum_{i=0}^n w_i x_i = w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_0$

Función de salida  $o(x) = \begin{cases} 1, & g(x) > 0 \\ 0, & g(x) < 0 \end{cases}$

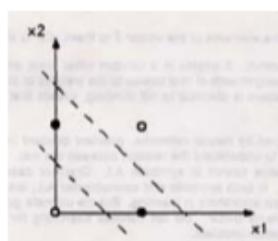
$g(x) = 0 \Rightarrow$  SUPERFICIE DE DECISIÓN

30

## TEOREMA DE CONVERGENCIA DEL PERCEPTRÓN

- Puede encontrar una solución siempre que ésta exista (reconocimiento de patrones lineales)
  - Superficie de Decisión

### EJEMPLO: XOR



X1	X2	XOR	
0	0	0	Clase 2
0	1	1	Clase 1
1	0	1	Clase 1
1	1	0	Clase 2

## PROBLEMAS LINEALMENTE SEPARABLES

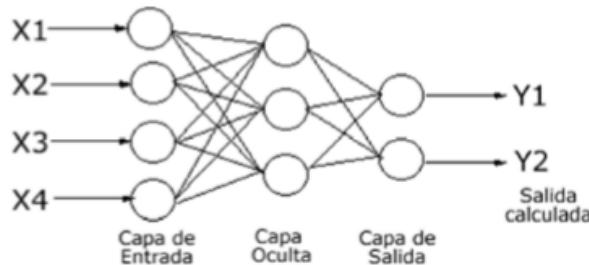
31



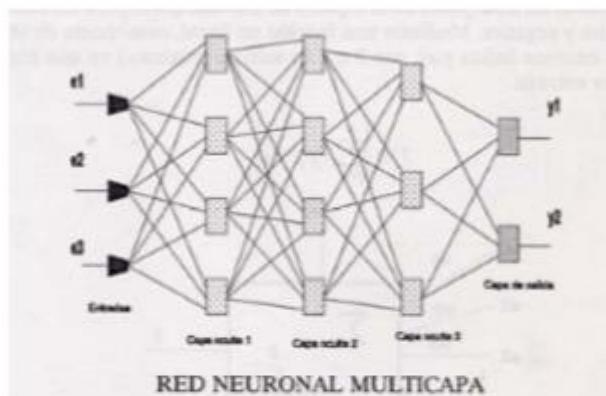
## REDES DE SEGUNDA GENERACIÓN

### REDES MULTICAPA

Red de flujo directo con capas de unidades entre la entrada y la salida (capas ocultas)



32



### NO ASEGURADA LA CONVERGENCIA

*Mecanismo de aprendizaje:  
Retropropagación (backpropagation)*

# PERCEPTRÓN MULTICAPA

- Función de activación derivable
- Aprendizaje: algoritmo de retropropagación
- Conexiones: todas las de un nivel con todas las del siguiente
- Valores reales
- Con una sola capa oculta y un número arbitrario de neuronas puede representar cualquier función

## 7.3

### APRENDIZAJE DE LAS REDES NEURONALES

En el cuadernillo de prácticas aparece resumido

## 7.4

### CONTROL NEURONAL

idem

---

**EXTRA:**

## TRANSFORMADA DE LAPLACE

$$f(t) \longleftrightarrow F(s)$$

$f(t)$	$F(s)$
Step function, $u(t)$	$\frac{1}{s}$
$e^{-at}$	$\frac{1}{s + a}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-at}f(t)$	$F(s + a)$
$t^n$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$f^{(k)}(t) = \frac{d^k f(t)}{dt^k}$	$s^k F(s) - s^{k-1}f(0^+) - s^{k-2}f'(0^+) - \dots - f^{(k-1)}(0^+)$
$\int_{-\infty}^t f(t) dt$	$\frac{F(s)}{s} + \frac{\int_{-\infty}^0 f(t) dt}{s}$
Impulse function $\delta(t)$	1

33

## WEBGRAFÍA/BIBLIOGRAFÍA

Transparencias de Matilde Santos Peñas

<http://fccea.unicauc.edu.co/old/tgarf/tgarfse80.html>

Imágenes sacadas de Google imágenes

[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_determinista](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_determinista)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Estoc%C3%A1stico>

[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_din%C3%A1mico](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_din%C3%A1mico)

[https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio\\_de\\_estados](https://es.wikipedia.org/wiki/Espacio_de_estados)

[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistemas\\_de\\_segundo\\_orden](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistemas_de_segundo_orden)

<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/18965/1/Identificacion%20experimental%20de%20sistemas.pdf>

[http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173788/TFG\\_2017\\_DiciembreSanahuja\\_Samuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/173788/TFG_2017_DiciembreSanahuja_Samuel.pdf?sequence=1&isAllowed=y)