

# **CONTROL DIGITAL - MAESTRÍA EN SISTEMAS EMBEBIDOS**

**INTRODUCCIÓN AL CONTROL DIGITAL**

**27 DE FEBRERO DE 2023**

- 1 Sistemas de Lazo Cerrado
- 2 Modelo de un sistema dinámico
- 3 Sistemas de Control en Tiempo Real (RTCS)
  - Soluciones Existentes en el Mercado
- 4 Control de Datos Muestreados
- 5 Diseño Digital
  - Discretizando la Planta
- 6 Referencias

# **SISTEMAS DE LAZO CERRADO**

El control automático aporta los elementos para:

- Lograr un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos.
- Mejorar la productividad en procesos industriales.
- Realizar operaciones repetitivas y rutinarias.
- Mejorar la seguridad de un proceso.

La *realimentación* de un sistema implica utilizar las salidas para afectar las entradas y así modificar el comportamiento dinámico del sistema.

## Ejemplos:

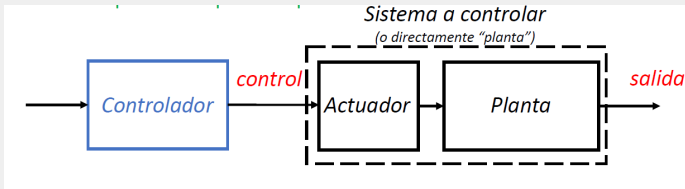
- Regulación de la temperatura corporal de un ser humano a pesar de la temperatura externa.
  - ▶ Sensores de temperatura en la piel y otros órganos.
  - ▶ Con la información sensada se modifica el metabolismo (ritmo cardíaco, temperatura en sangre).
- Caminar siguiendo una trayectoria dada: Sensado a través de la vista y otros. Corrección de la dirección, velocidad, equilibrio.
- Control de velocidad crucero en un automóvil: Medición de velocidad y correspondiente ajuste del par del motor.

Igualmente, no todos los sistemas de control son realimentados:

- Programa del lavarropas: ciclos por tiempo.

# CONTROL EN LAZO ABIERTO

Programa del lavarropas: ciclos por tiempo.



Ventajas:

- De construcción más simple y menos costosos que armar el lazo realimentado.
- No hay problemas de estabilidad.

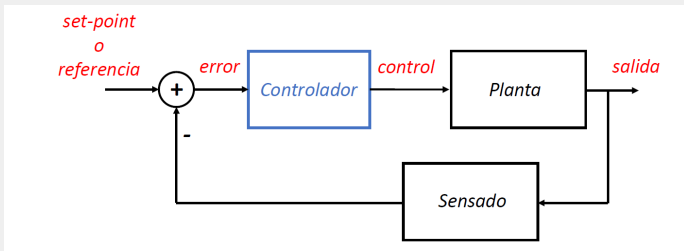
Desventajas:

- Errores frente a perturbaciones.
- Errores si hay diferencias entre el modelo y el sistema ("incertidumbre en el modelo o en los parámetros")

Conviene cuando la precisión de la salida no es "tan necesaria" o su medición no es viable (económica o físicamente).

# CONTROL REALIMENTADO

- Requiere medir la salida (o variables) del sistema.
- Se necesita establecer una referencia (setpoint).

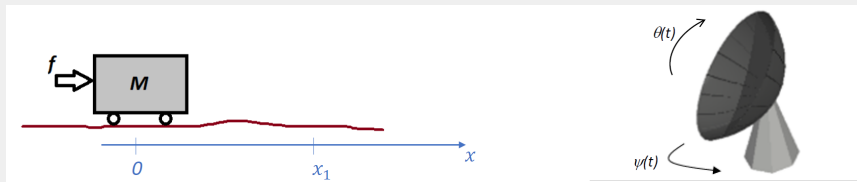


El el bloque **controlador** se pueden utilizar diferentes controles:

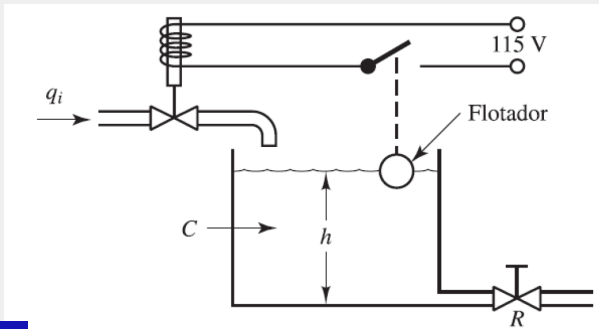
- Control On-Off (o 2 posiciones)
- Control On-Off con histéresis.
- Control Proporcional, Integral, Derivativo.
- Otras leyes de control: Si se conoce el sistema se pueden proponer otras estrategias para mejorar la *performance*, etc.

# ¿QUÉ SISTEMAS O PROCESOS SE QUIEREN CONTROLAR?

## Ejemplo: Controles de posición



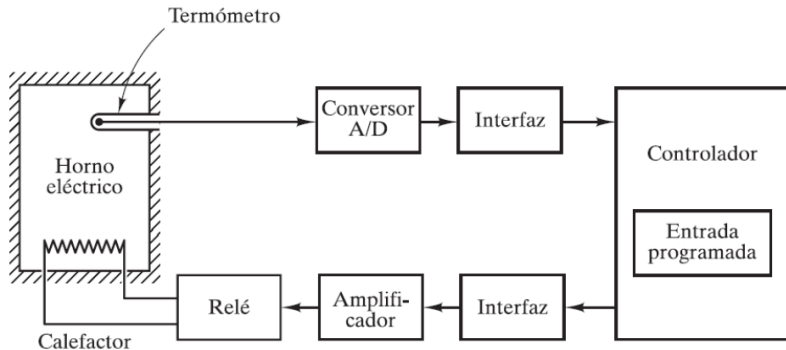
## Ejemplo: Control de nivel de líquidos (el flotador puede ser un sensor)





# ¿QUÉ SISTEMAS O PROCESOS SE QUIEREN CONTROLAR? (CONT.)

Ejemplo: sistema de control de temperatura



# **MODELO DE UN SISTEMA DINÁMICO**

## Modelo del sistema dinámico

Describe como cambia una o algunas variables del sistema o proceso.

- Representación parcial del sistema bajo estudio.
- Tiene rango o región de validez.
- Permite predecir el comportamiento (Más o menos exactamente)

Veremos dos metodologías para obtener modelos:

- A partir de conocer las leyes físicas que describen el comportamiento del sistema (*Modelado propiamente dicho*).
- Determinación de coeficientes de un modelo genérico a partir de ensayo y registro de entradas y salidas. (*Identificación*).

La descripción del sistema a partir de un modelo permitirá en el futuro sintonizar un controlador con mejores resultados de performance.

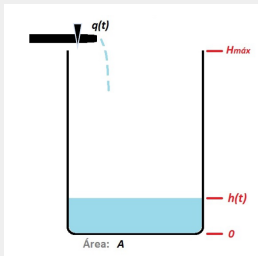
# MODELOS: USO DE ECUACIONES DIFERENCIALES

Las ecuaciones diferenciales (o integro-diferenciales) permiten modelar la evolución temporal de sistemas con “inercia”.

Ningún sistema físico es capaz de cambiar su estado en forma instantánea.

Los sistemas físicos almacenan y disipan energía en alguna forma.  
Desde el punto de vista de la respuesta en frecuencia: ancho de banda finito; energía finita.

Ejemplo: Llenado de un tanque



# MODELOS: USO DE ECUACIONES DIFERENCIALES (CONT.)

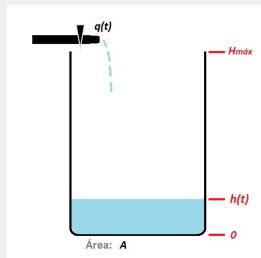
## Ejemplo: Llenado de un tanque

$$q(t) = \frac{dV(t)}{dt}; V(t) = A \cdot h(t)$$

$$q(t) = \frac{d[A \cdot h(t)]}{dt} = A \frac{dh(t)}{dt}$$

Suponiendo al sistema vacío al inicio, la altura del líquido en el instante  $t$  se puede calcular como:

$$h(t) = \frac{1}{A} \int_0^t q(\tau) d\tau$$



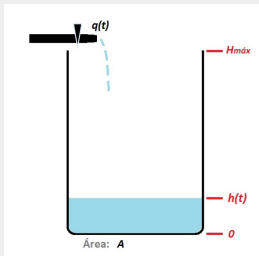
Comportamiento integrador (de caudal)

Otros sistemas físicos que se comportan como integradores:  
capacitores (de corriente eléctrica).

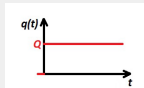
# MODELOS: USO DE ECUACIONES DIFERENCIALES (CONT.)

## Ejemplo: Llenado de un tanque

### CASO 1: válvula on-off (flujo cte. o nulo).

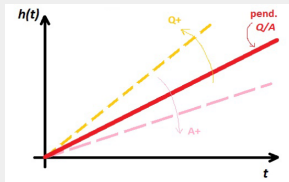


Entrada:  $q(t) = Q, t \geq 0$



Modelo dinámico del sistema:  $h(t) = \frac{1}{A} \int_0^t q(\tau) d\tau$   
Comportamiento previsto de la evolución del llenado:

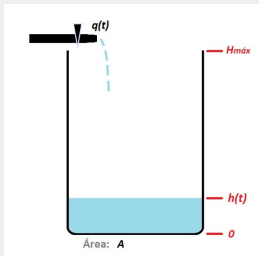
$$h(t) = \frac{Q}{A}t + h_{inicial}$$



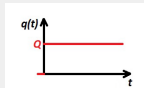
# MODELOS: USO DE ECUACIONES DIFERENCIALES (CONT.)

## Ejemplo: Llenado de un tanque

### CASO 1: válvula on-off (flujo cte. o nulo).

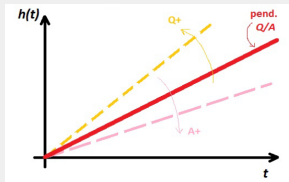


Entrada:  $q(t) = Q, t \geq 0$

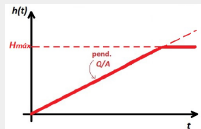


Modelo dinámico del sistema:  $h(t) = \frac{1}{A} \int_0^t q(\tau) d\tau$   
Comportamiento previsto de la evolución del llenado:

$$h(t) = \frac{Q}{A}t + h_{\text{inicial}}$$



**ATENCIÓN** Tanque con tamaño fijo, altura máxima. Habrá desborde: efecto de saturación no modelado.



Este modelo no tiene en cuenta eso.  
Admite  $q$  y  $h$  negativos, no es físicamente posible...

Ejemplo: llenado automático de un tanque hasta cierta altura de referencia (set-point):  $h = h_{ref}$

¿Cómo podríamos realizar un control en lazo cerrado para regular la altura del tanque de agua?



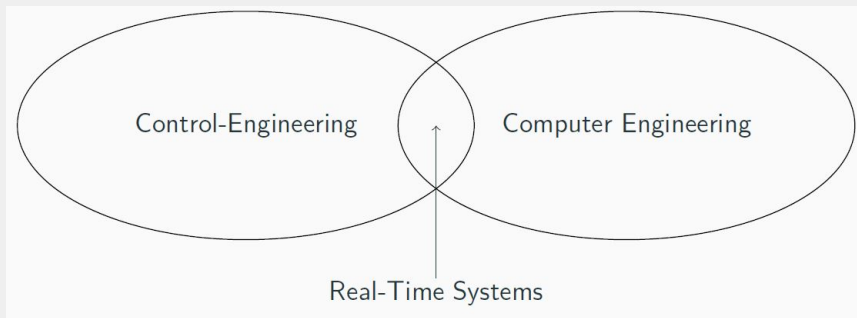
# **SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO REAL (RTCS)**

## Definition

Un sistema de tiempo real es aquel en el cual el resultado correcto depende del procesamiento lógico y del intervalo de tiempo en el cual el mismo está disponible. [1]

En general cumple con 3 estándares:

1. Operación confiable
2. Tiempo de operación determinado.
3. Resultado predecible.



- Todos los sistemas de control son sistemas en tiempo real.
- Muchos sistemas en tiempo real estrictos son sistemas de control.

- 1 Sistemas de Lazo Cerrado
- 2 Modelo de un sistema dinámico
- 3 Sistemas de Control en Tiempo Real (RTCS)**
  - Soluciones Existentes en el Mercado
- 4 Control de Datos Muestreados
- 5 Diseño Digital
  - Discretizando la Planta
- 6 Referencias

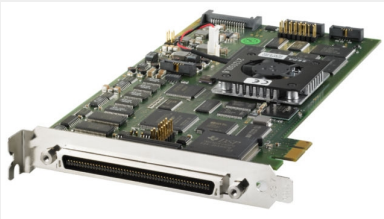
Las soluciones existentes en el mercado se pueden clasificar en 3 grupos [2]:

- Sistemas operativos *Commercial Off the Shelf (COTS)*.
- Plataformas de Hardware Cerradas.
- Sistemas Embebidos.

# COMMERCIAL OFF THE SHELF (COTS)

Hardware que utiliza Software propietario, para RTCS se puede encontrar:

- dSPACE.
- LabVIEW de National Instruments.

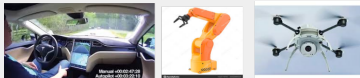


## Programmable Logic Controller (PLC)

Por mucho, los dispositivos más utilizados en la industria para automatización y control. Son altamente robustos (*ruggedized*).



- Cada vez hay más aplicaciones que utilizan lazos de control.

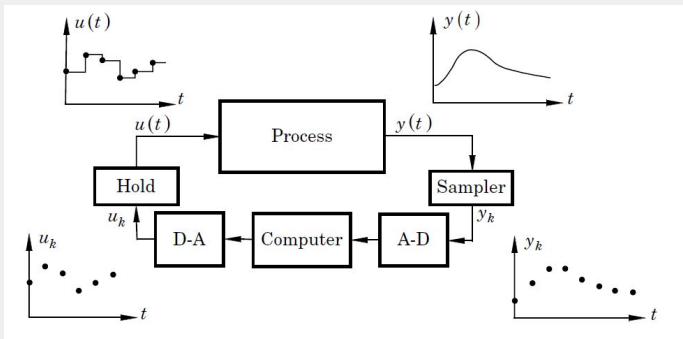


- Con requerimientos de energía, tamaño, capacidad de procesamiento, etc., que no cumplen las soluciones anteriores.
- Pueden ser resueltas con un microcontrolador y un RTOS.

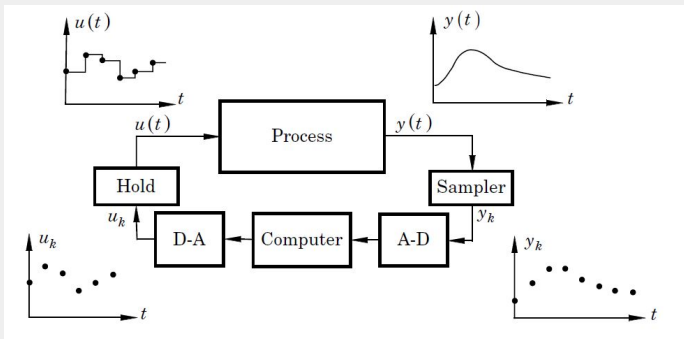


# **CONTROL DE DATOS MUESTREADOS**

# TEORÍA DE CONTROL DE DATOS MUESTREADOS

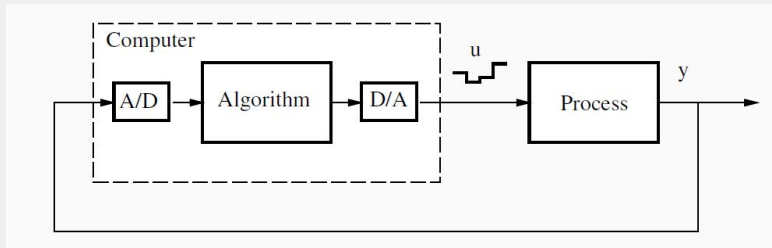


# TEORÍA DE CONTROL DE DATOS MUESTREADOS

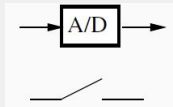


- Problemas con *aliasing* y comportamiento intramuestra.
- Mejor rendimiento que aproximando controladores de tiempo continuo.

# MUESTREO



El conversor A/D actúa como un muestreador



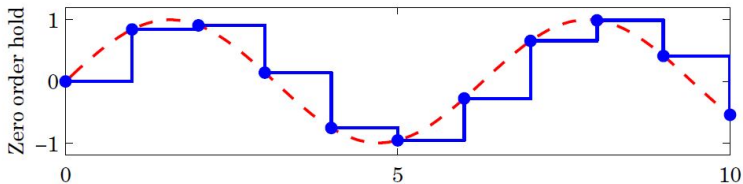
Muestreo periódico/regular:

- El intervalo de muestreo es constante  $h$ .
- Los instantes de muestreo son:  $t_k = kh$ .

# SISTEMAS DE RETENCIÓN

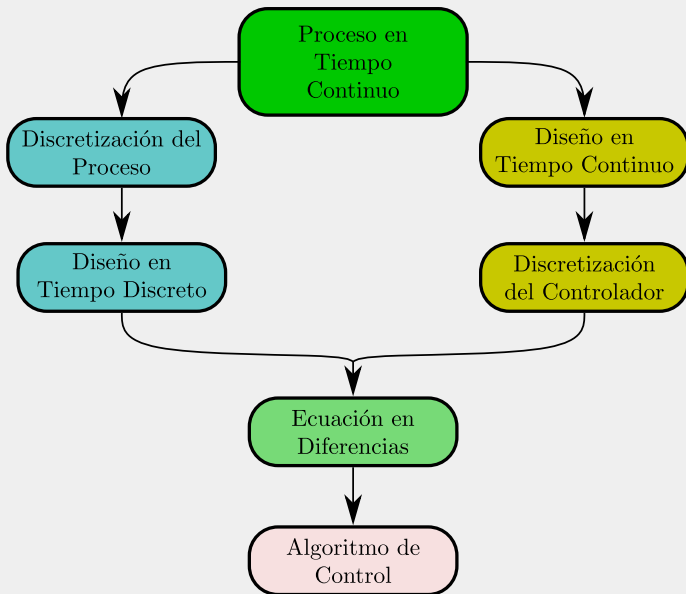
*Zero Order Hold (ZOH):* el más simple y más utilizado. El DAC actúa como un sistema de retención. → La salida del control es constante a trozos.

$$f(t) = f(kh) \quad kh \leq t < kh + h$$

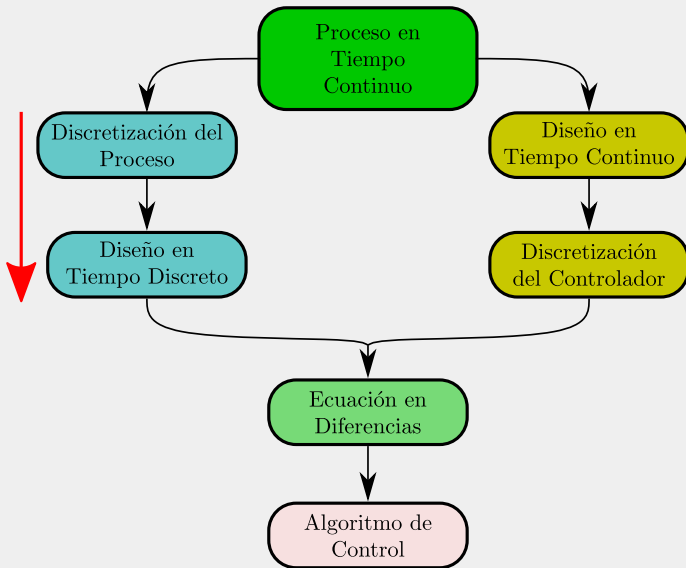


# DISEÑO DIGITAL

# PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DIGITAL



# PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DIGITAL

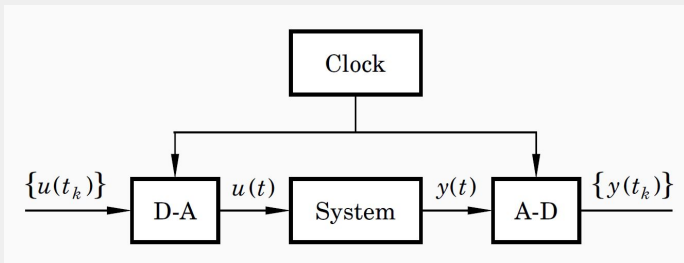




- 1 Sistemas de Lazo Cerrado
- 2 Modelo de un sistema dinámico
- 3 Sistemas de Control en Tiempo Real (RTCS)
  - Soluciones Existentes en el Mercado
- 4 Control de Datos Muestreados
- 5 Diseño Digital**
  - Discretizando la Planta**
- 6 Referencias

# MUESTREO DE SISTEMAS LINEALES

Mirar al sistema desde el punto de vista de la computadora.

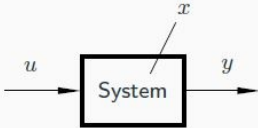



## Muestreo Zero-Order Hold

- La entrada al proceso es constante a trozos.
- Mirar solamente en los instantes de muestreo.

# MODELOS INTERNOS Y E-S

Los modelos del sistema que vamos a usar pueden ser internos (variables de estado) o de entrada-salida (transferencia).

	State-space model	Input-output models	
			
		Differential/difference equation	Transfer fcn
CT	$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ $y(t) = Cx(t)$	$\frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y$ $= b_1 \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + \dots + b_n u$	$G(s)$
DT	$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k)$ $y(k) = Cx(k)$	$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots +$ $a_n y(k-n) = b_1 u(k-1)$ $+ \dots + b_n u(k-n)$	$H(z)$

Ecuación diferencial de orden  $n$ :

$$a_n y(t) + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + \dots + a_1 \frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}} + \frac{d^n y}{dt^n} = b_m u(t) + \dots + b_0 \frac{d^m u(t)}{dt^m}, \quad m \leq n$$

Ecuación en diferencias de orden  $n$ :

$$\begin{aligned} a_n y[k] + a_{n-1} y[k+1] + \dots + a_1 y[k+n-1] + y[k+n] = \\ = b_m u[k] + \dots + b_0 u[k+m], \quad m \leq n \end{aligned}$$

## Clave y Aclaración

La clave: Pensar cada derivada como un desplazamiento.

Aclaración: Es una manera simple de verlo, pero es anticausal.

Que sea causal significa que puedo representar la ecuación con muestras pasadas.  $\Rightarrow$  A la ecuación anterior la retrasamos  $n$  muestras.

$$\begin{aligned} a_n y[k-n] + a_{n-1} y[k-n+1] + \dots + a_1 y[k-1] + y[k] = \\ = b_m u[k-m] + \dots + b_0 u[k], \quad m \leq n \end{aligned}$$

# PROBLEMA DE CONTROL

Ejemplo: llenado automático de un tanque hasta cierta altura de referencia (set-point):  $h = h_{ref}$

CASO 1: válvula on-off (flujo cte. o nulo)

Entrada:  $q(t) = Q, t \geq 0$

Modelo:  $h(t) = \frac{1}{A} \int_0^t q(\tau) d\tau$

Comportamiento previsto:  $h(t) = \frac{Q}{A}t + h_0$




CASO 2: Se agrega sensor de nivel. Flujo proporcional al error

Entrada:  $q(t) = K_1(h_{ref} - h(t)), t \geq 0$

$K_1$  es una ganancia. Puede ser del amplificador, la válvula, etc.

Vemos los casos en Python

# REFERENCIAS

-  P. ZHANG, *ADVANCED INDUSTRIAL CONTROL TECHNOLOGY*. WILLIAM ANDREW, 2010.
-  J. E. ESPÓSITO, “DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UNA BIBLIOTECA DE ALGORITMOS DE CONTROL PARA SISTEMAS EMBEBIDOS,” 2013, TESIS DE GRADO.
-  J. P. HESPANHA, *LINEAR SYSTEMS THEORY*. PRINCETON UNIVERSITY PRESS, 2009.