

UNIDAD 1

# Sistemas de Automatización AÑO 2023

Profesores:

Ing. María Susana Bernasconi-

[sbernasc@uncu.edu.ar](mailto:sbernasc@uncu.edu.ar)

[susybernasconi@gmail.com](mailto:susybernasconi@gmail.com)

Ing Fernando Geli

[fernandogeli@gmail.com](mailto:fernandogeli@gmail.com)

- Programa y Planificación de la Cátedra
- Cronograma de actividades, fechas de evaluaciones, bibliografía y condiciones para la regularización y promoción.
- Bibliografía de Base: Ingeniería de Control de W.Bolton y MECATRONICA 4° edición de W.Bolton.

## ***EVALUACIONES Y CONDICIONES PARA OBTENER LA PROMOCIÓN O REGULARIDAD***

Las condiciones para **aprobar la materia por promoción directa** son:

- el alumno debe tener aprobados:

a) el 100 % de las evaluaciones parciales con nota superior a 60%.

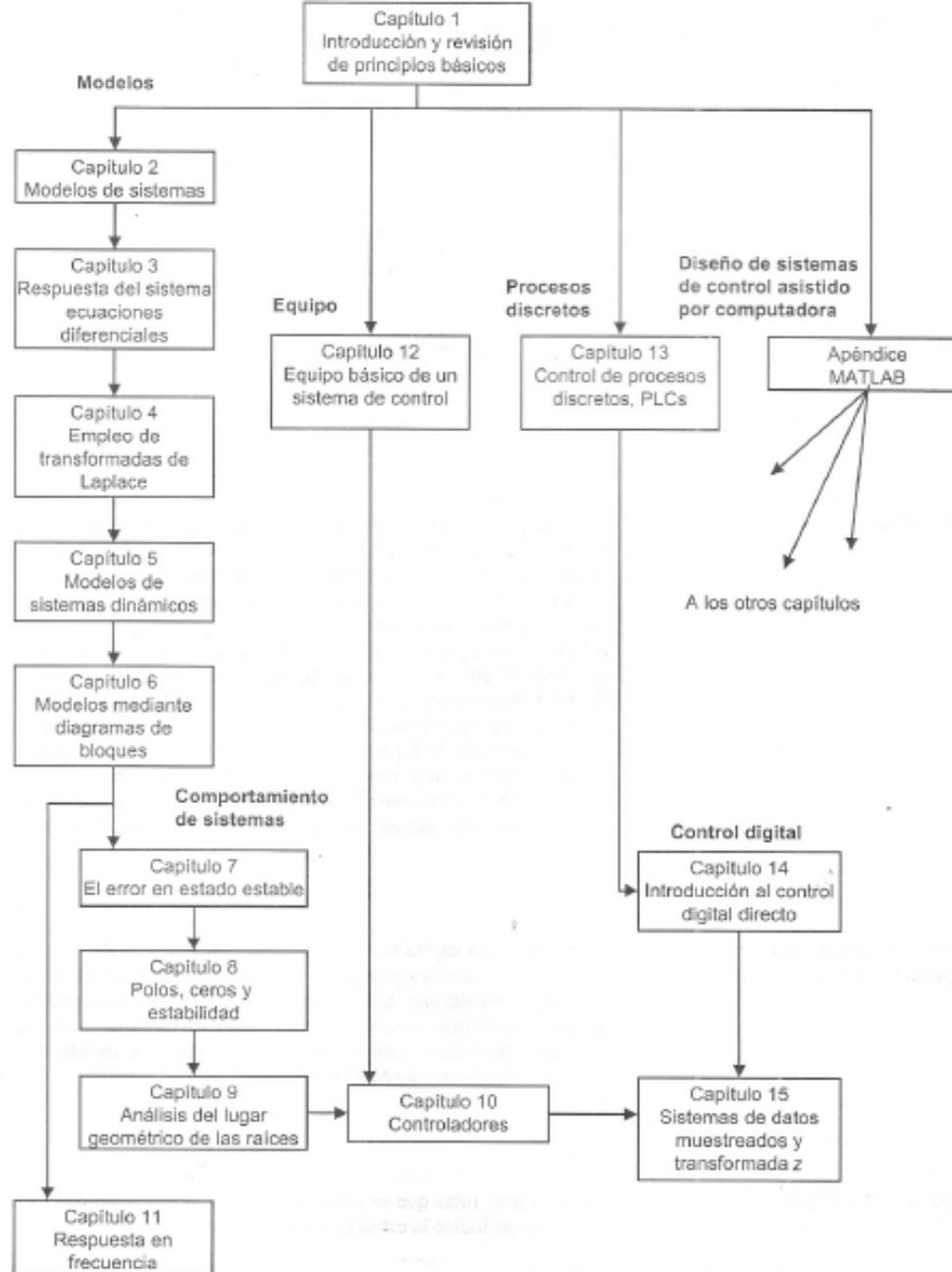
b) una evaluación global integradora aprobada con nota superior a 60%.

- la nota obtenida por el alumno al promocionar debe ser igual o superior a 60% y se calculará:

$$\text{Nota Promoción Directa} = 0.25 * \text{Promedio de parciales} + 0.75 * \text{Nota Global Integrador}$$

Las condiciones **para regularizar** la materia son:

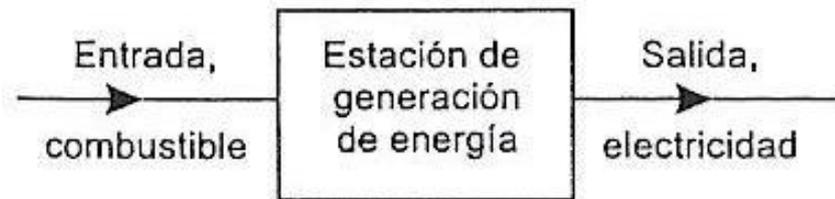
-tener aprobadas las evaluaciones parciales con nota superior a 60%



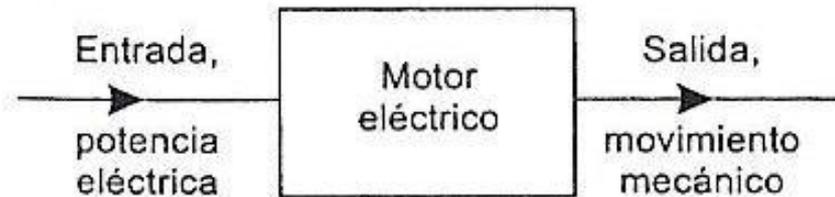
# SISTEMAS

Se emplea para describir un conjunto de componentes que interactúan entre sí y donde nuestro interés se centra en la relación entre la salida y la entrada.

No importa la complejidad del sistema y sus componentes



a)



b)

Sistema a) una estación de generación de energía

Sistema b) un motor eléctrico

**Esto nos permitirá definir el modelo de cualquier sistema: proceso, sensor, elementos de acción final, controlador.**

# Sistemas de primer orden

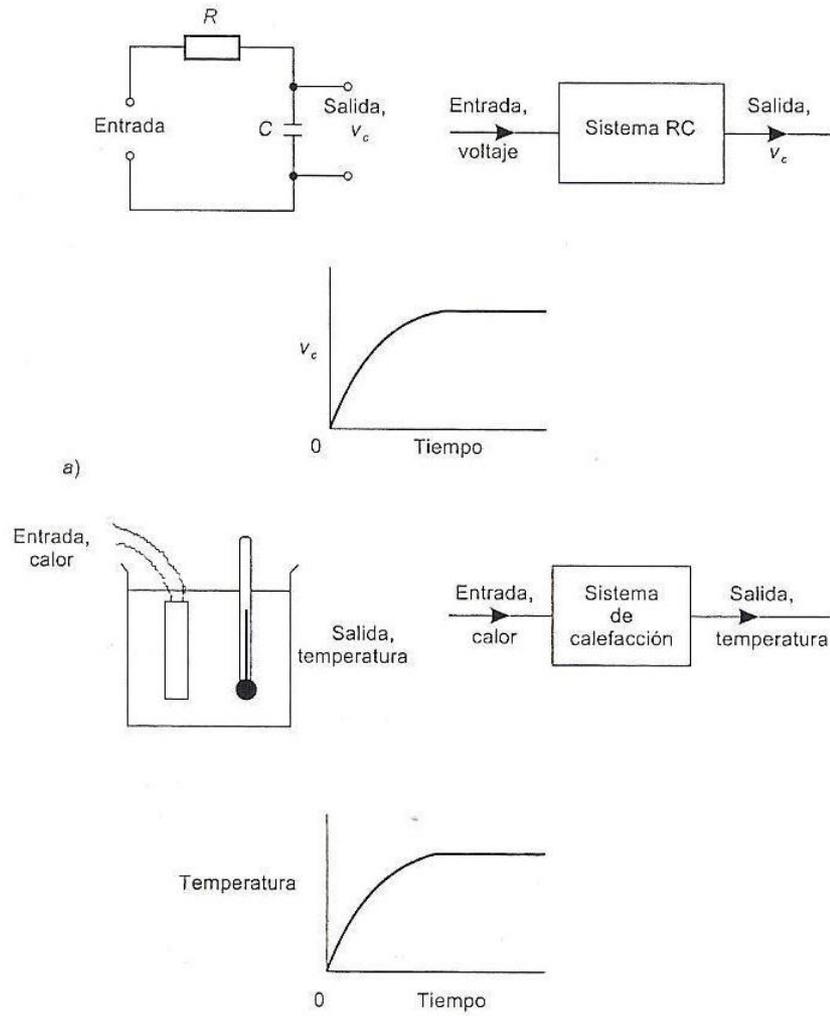
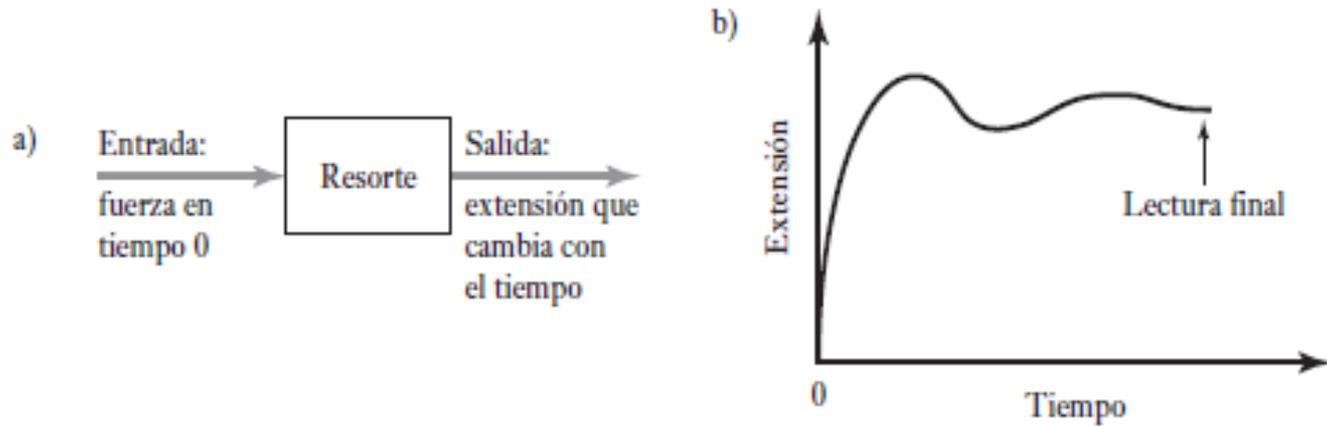


Figura 1.2 Sistemas similares:  
a) sistema RC, b) sistema de calefacción

# Sistemas de segundo orden



# ¿Entonces que es un modelo?

Concepto de modelo: un modelo es solo un medio para transferir alguna relación de interés de una versión real a otra (por ejemplo matemática), considerando solo las relaciones de interés.

Utilizaremos **DIAGRAMAS EN BLOQUES** para representar los modelos, dichos **BLOQUES** se los denomina **FUNCIONALES** ya que cada uno representa o cumple con una **FUNCIÓN** dada.

# Conveniencia de particionar o dividir un sistema (un bloque general) en subsistemas (bloques funcionales)

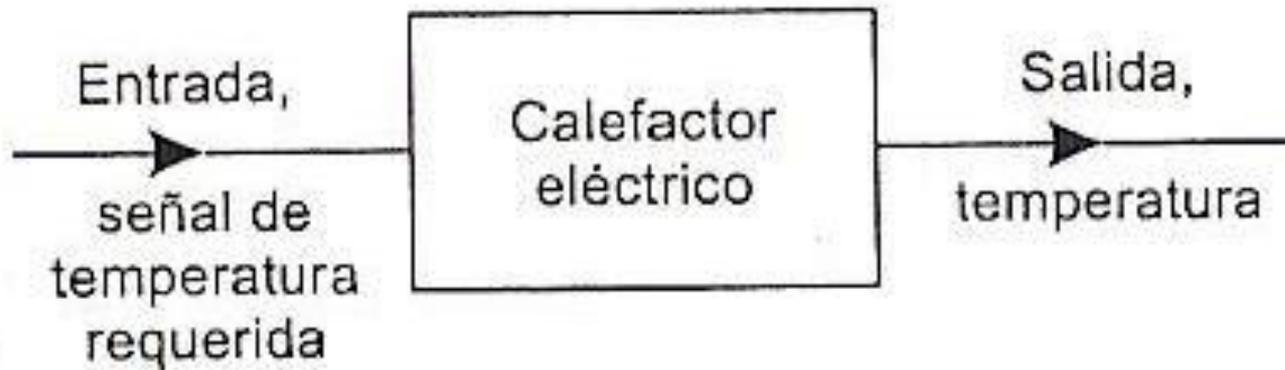


Figura 1.3 a) Sistema de medición de temperatura y b) sus subsistemas

# Sistema de control

Un sistema es de control si las salida/s puede/n adoptar un valor dado (o deseado), pese a la perturbaciones o disturbios externos.

Cabe aquí mencionar, que la caja negra de la que hablamos, puede tener una entrada y una salida (Sistemas SISO) o múltiples entradas / salidas (Sistemas MIMO), el adecuado análisis de estos últimos se realiza en términos de “Variables de Estado”, que se verá luego, no siendo cubierto por los libros de base, pero sí, entre otros por el libro de K. Ogata, “Ingeniería de Control moderno”



**Figura 1.5** Ejemplo de un sistema de control en lazo abierto

En un sistema de LC, lo importante es obtener una señal de ERROR, capaz de corregir las desviaciones entre el valor deseado y el valor real de la variable que se pretende controlar.

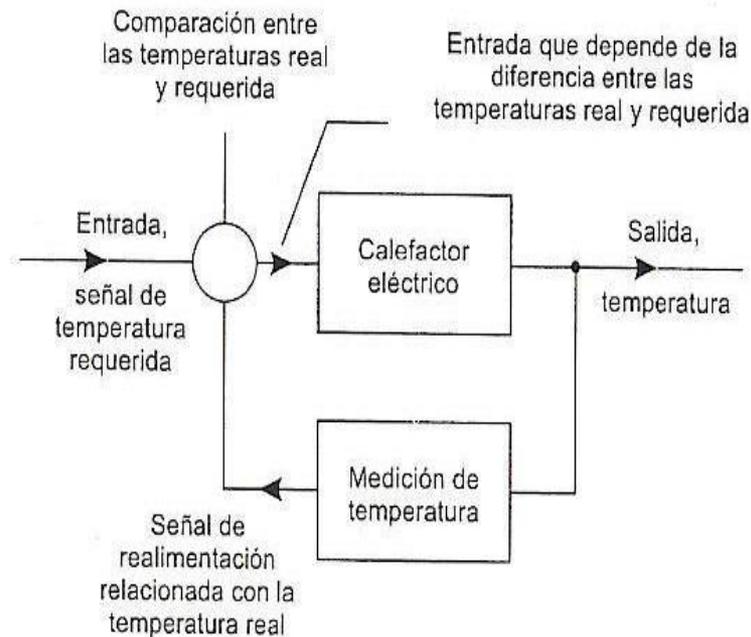


Figura 1.6 Ejemplo de un sistema de control en lazo cerrado

Se destaca que un sistema de LC puede ser manual o automático . Otro caso y en contraposición al caso de LA del cañón, está el caso de LC de un misil.

Los sistemas de LA son sencillos, son de bajo costo y buena confiabilidad, pero inexactos porque no pueden corregirlos errores.

Los sistema de LC son mucho más exactos, sin embargo si existen retrasos (tiempo muerto y capacitancias) , la acción de correctiva llega a tarde y como consecuencia puede haber inestabilidad, no obstante sus ventajas son apreciables -como veremos a los largo de la materia- al momento de hacer frente a las perturbaciones.

Ejemplos:

Cuales serían sistemas de LA y LC:

Un tostador de pan: es LA porque no distingue la calidad de tostado.

Un lava ropa automático es LA porque no distingue entre ropa limpia y sucia. Pero tiene control de temperatura, temporizaciones....

Un termo tanque: es LC, dispone de un sistema que capta la temperatura del agua en el seno del tanque a través de un termotasto , dicha señal la trasfiere a un controlador que la compara con la deseada y en función del error prende o apaga el quemador. (Accion ON OFF)

# Un sistema de LA como todo sistema, se puede dividir en subsistemas

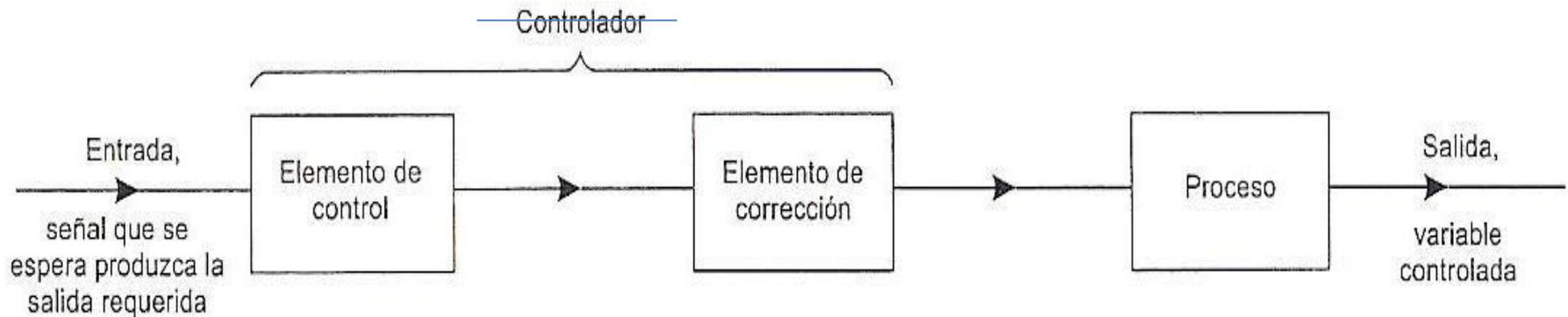
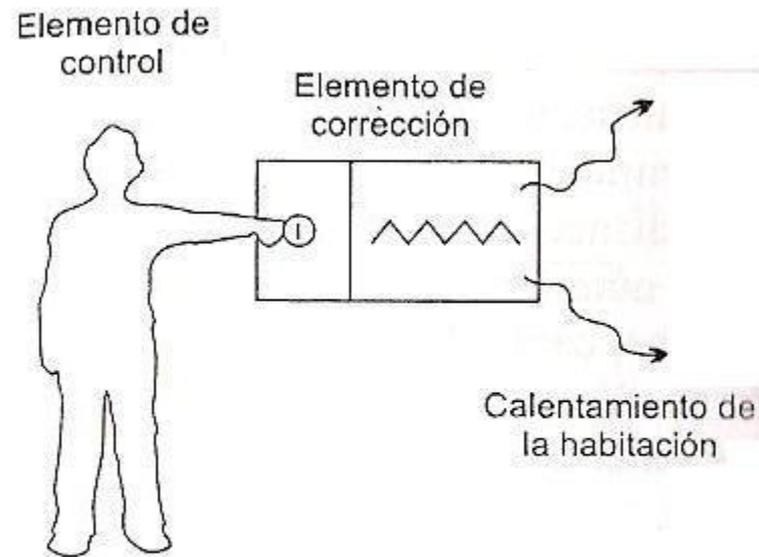
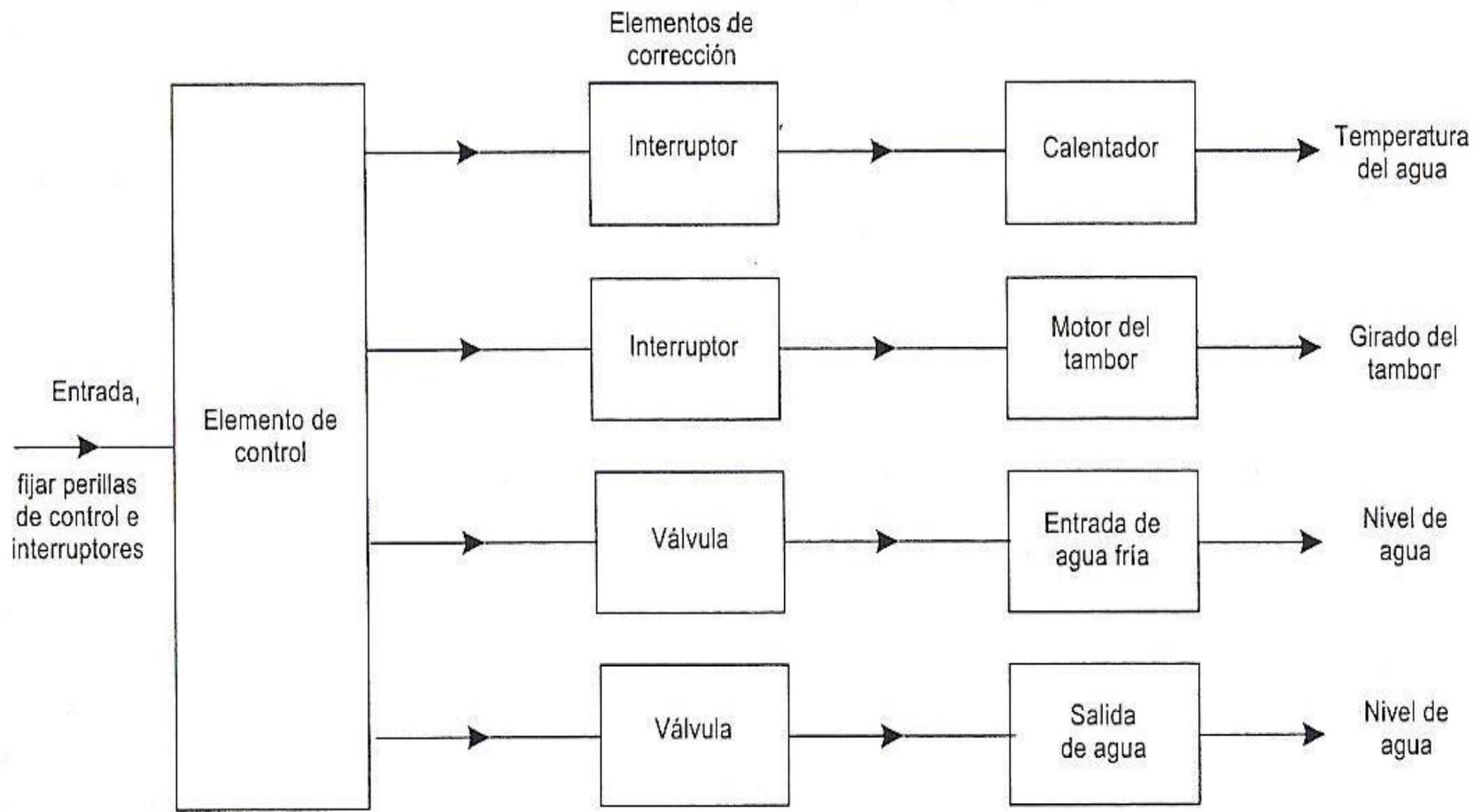


Figura 1.7 Subsistemas en un sistema de control en lazo abierto

Dos ejemplos de sistemas de LA: tratar de distinguir cual es la variable controlada, el elemento de control, el elemento de corrección y el proceso.



**Figura 1.8** Sistema de control en lazo abierto de la temperatura de la habitación



**Figura 1.9** Lavadora de ropa doméstica

# SISTEMAS DE CONTROL

Existen básicamente dos Sistemas de Control:  
de Lazo Abierto (LA) y de Lazo Cerrado (LC)

En un Sistema de LA, la entrada se elige en base a la experiencia para producir un efecto dado en la salida, por ejemplo un calefactor con dos niveles de corriente sobre la resistencia calefactora para dar una temperatura adecuada a una habitación, este sistema nada puede hacer frente a los disturbios externos como la apertura de una ventana.

Otro caso de LA es el de un cañón, se conoce por experiencia la trayectoria del proyectil para producir el efecto dado – esto es dar en el blanco – que depende del sistema de puntería consistente en una calibración - pero nada puede hacer frente a las ráfagas de viento cruzado a lo largo de la trayectoria real del proyectil.

Sistema de LC particionado en subsistemas . Cabe mencionar que los sistemas de LC se llaman también de lazo cerrado con realimentación negativa, el término negativo significa que el sistema con el tiempo evolucionará hacia la estabilidad tendiendo a hacer nulo el error, definido como:

$$\text{error} = \text{entrada} - \text{salida del sistema} \text{ ó}$$
$$\text{error} = \text{valor requerido (o deseado)} - \text{valor real de la variable controlada}$$

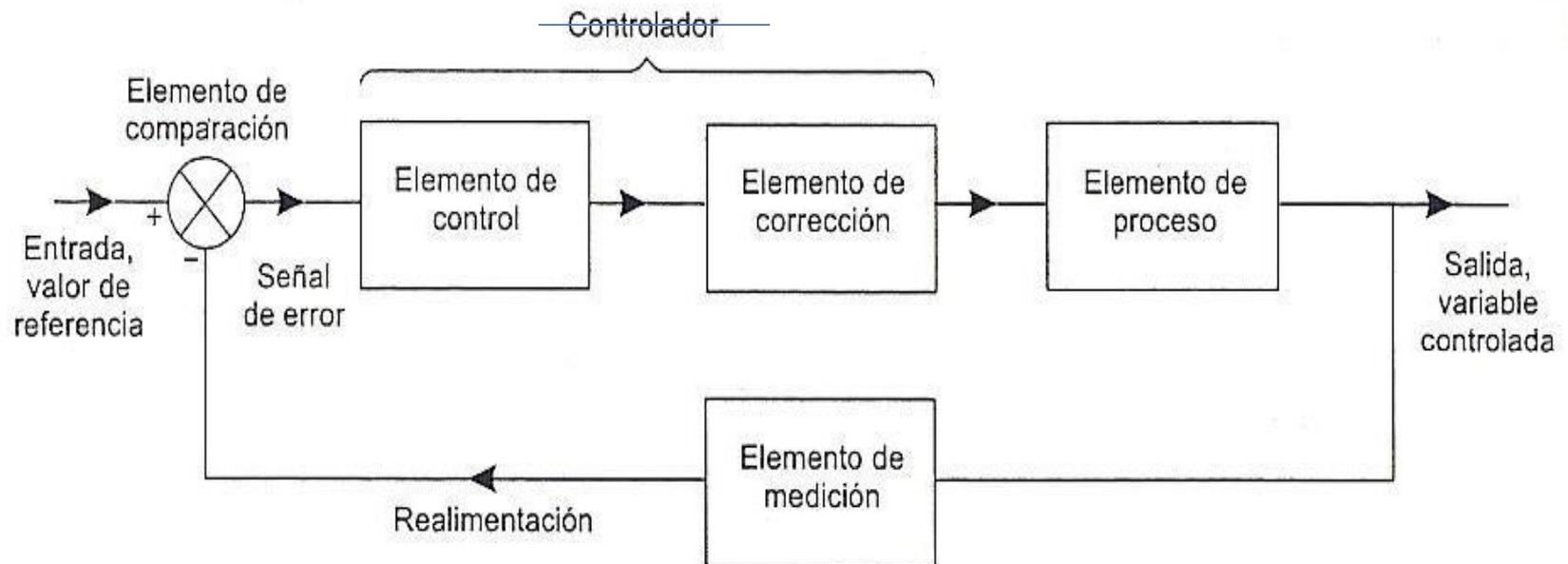


Fig 1.10 Subsistemas en un lazo de control en lazo cerrado

A continuación varios casos de LC, tratar de identificar en cada uno de ellos:

la variable controlada

el valor de referencia, requerido o deseado

el elemento de comparación

la señal de error

el elemento de control (luego será un algoritmo o ley de control)

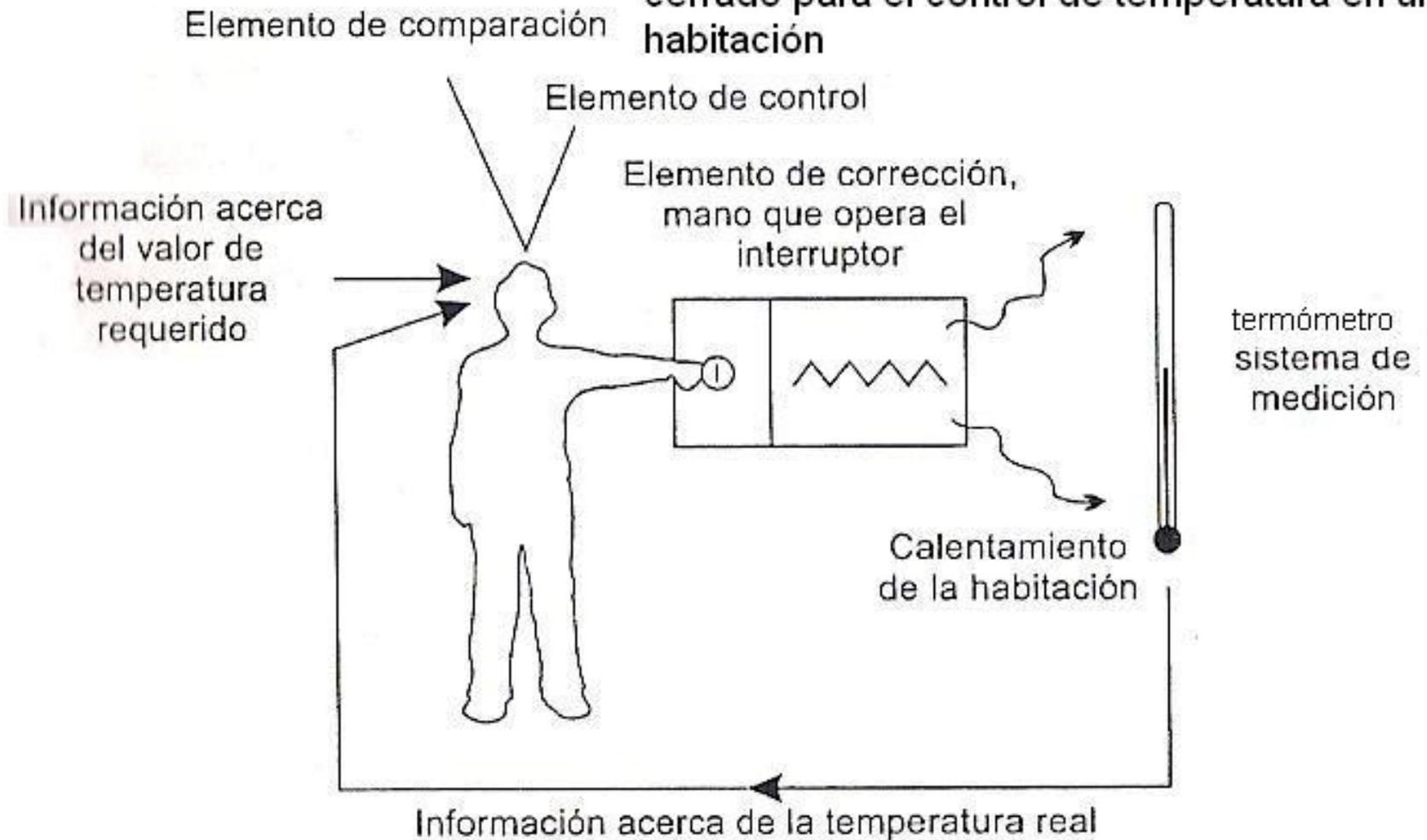
el elemento de corrección, de acción final o variable manipulada

el proceso

dispositivo de medición

tipo de realimentación (+ ó -)

Figura 1.11 Sistema de control en lazo cerrado para el control de temperatura en una habitación



Señal de error relacionada con la diferencia entre el tono dorado requerido y el real

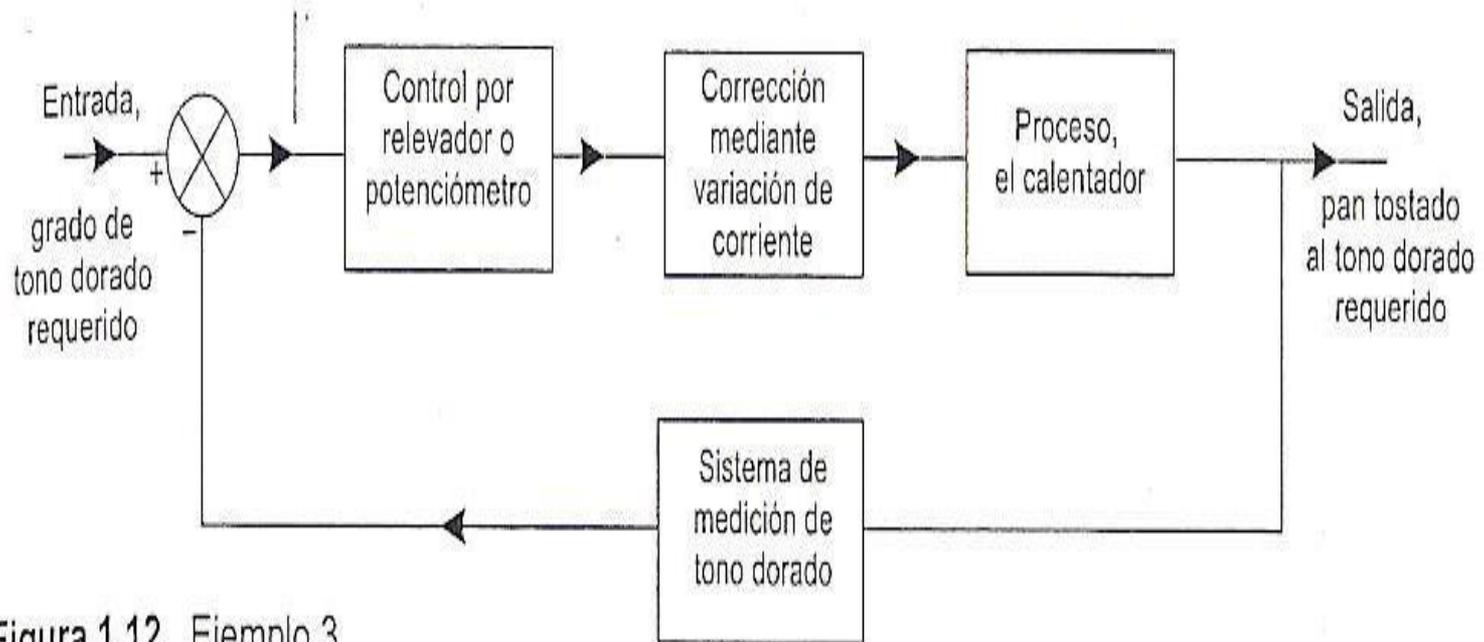
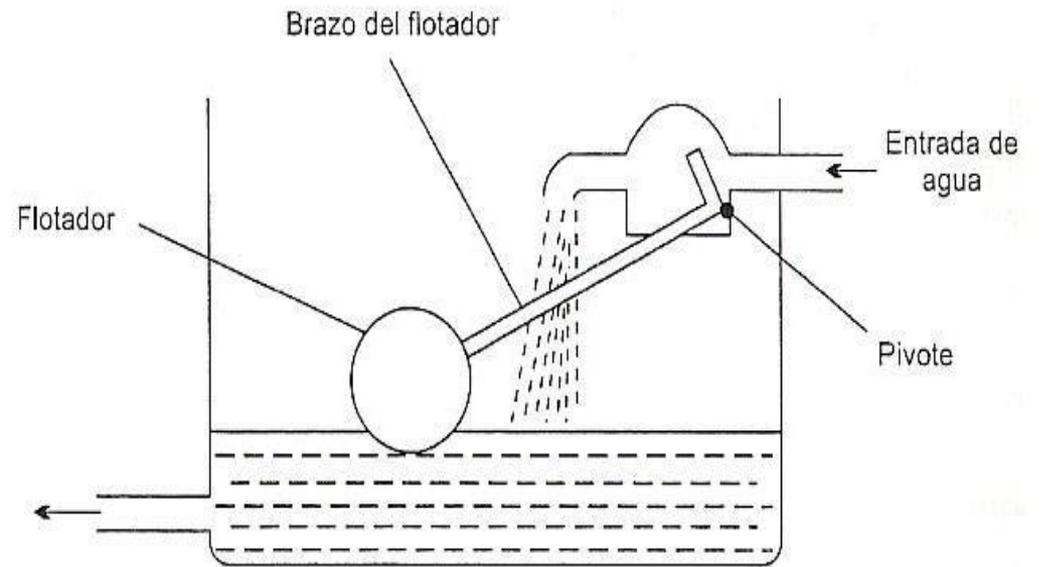


Figura 1.12 Ejemplo 3

Figura 1.13 Control automático del nivel de agua en un tanque



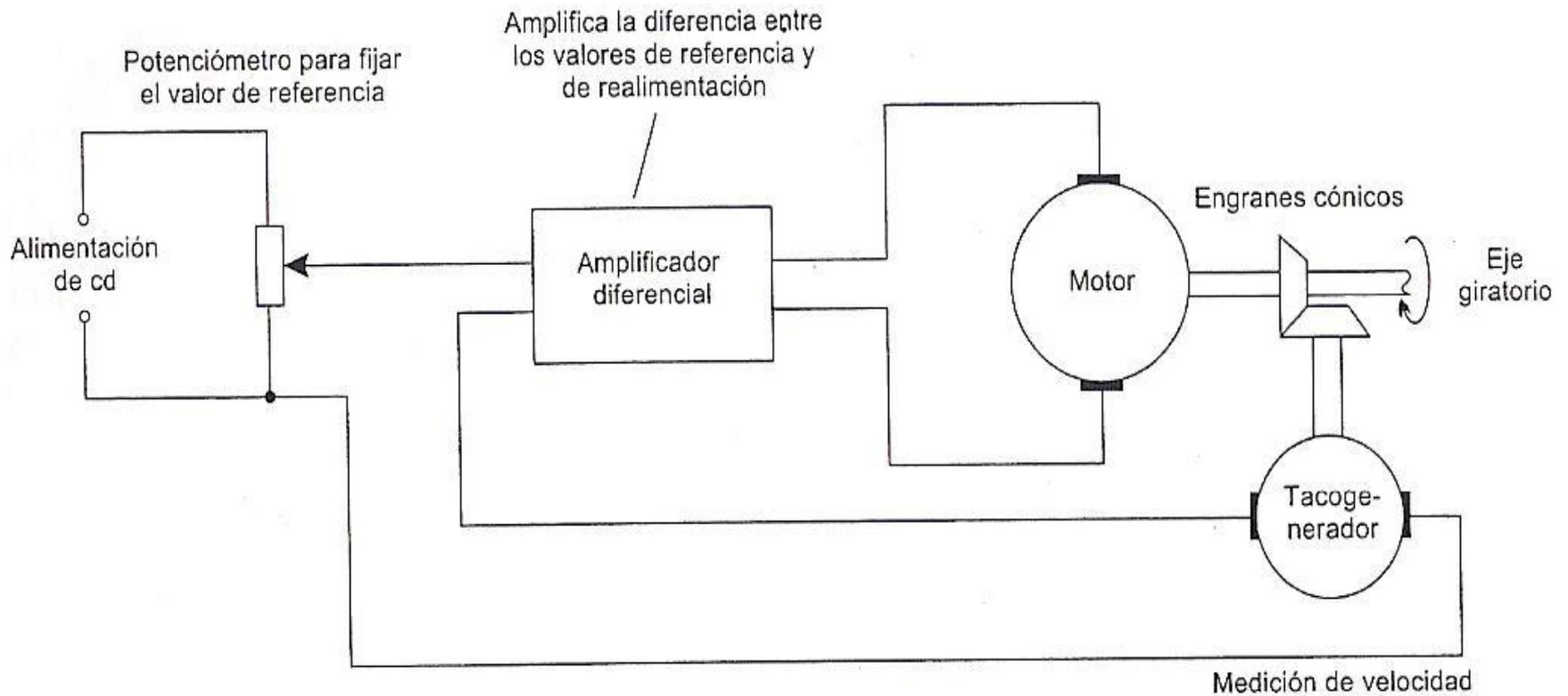
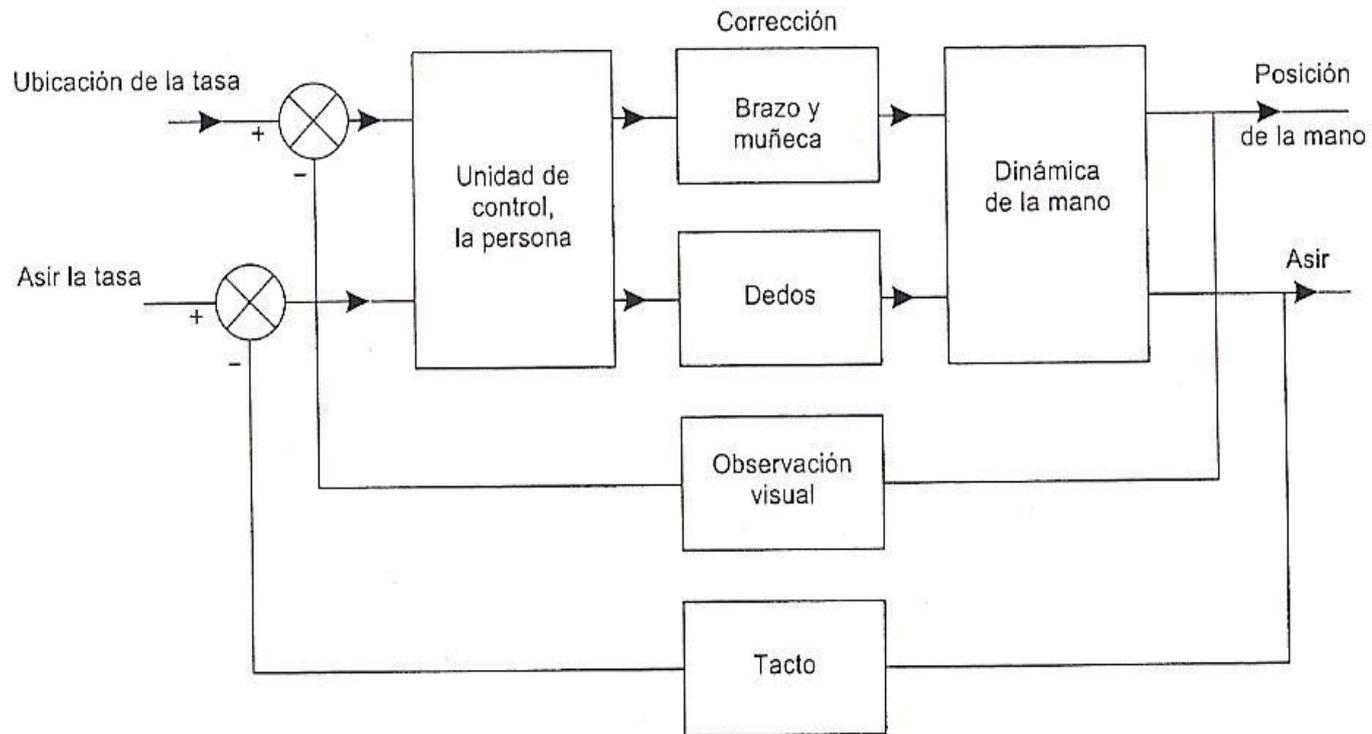


Figura 1.14 Control automático de la velocidad de un eje



**Figura 1.15** Movimiento para levantar una tasa de café

Figura 1.16 Levantar una tasa de café



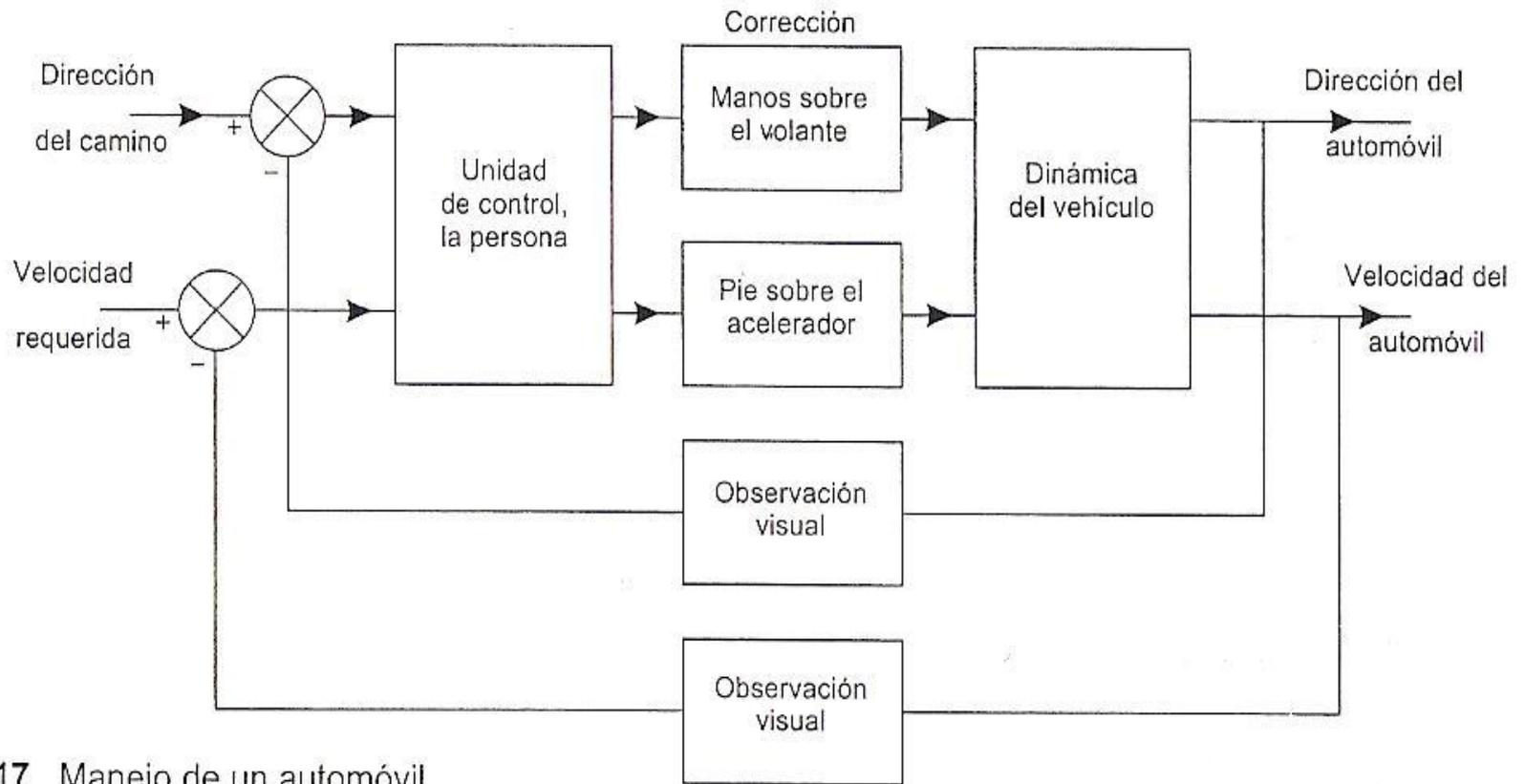
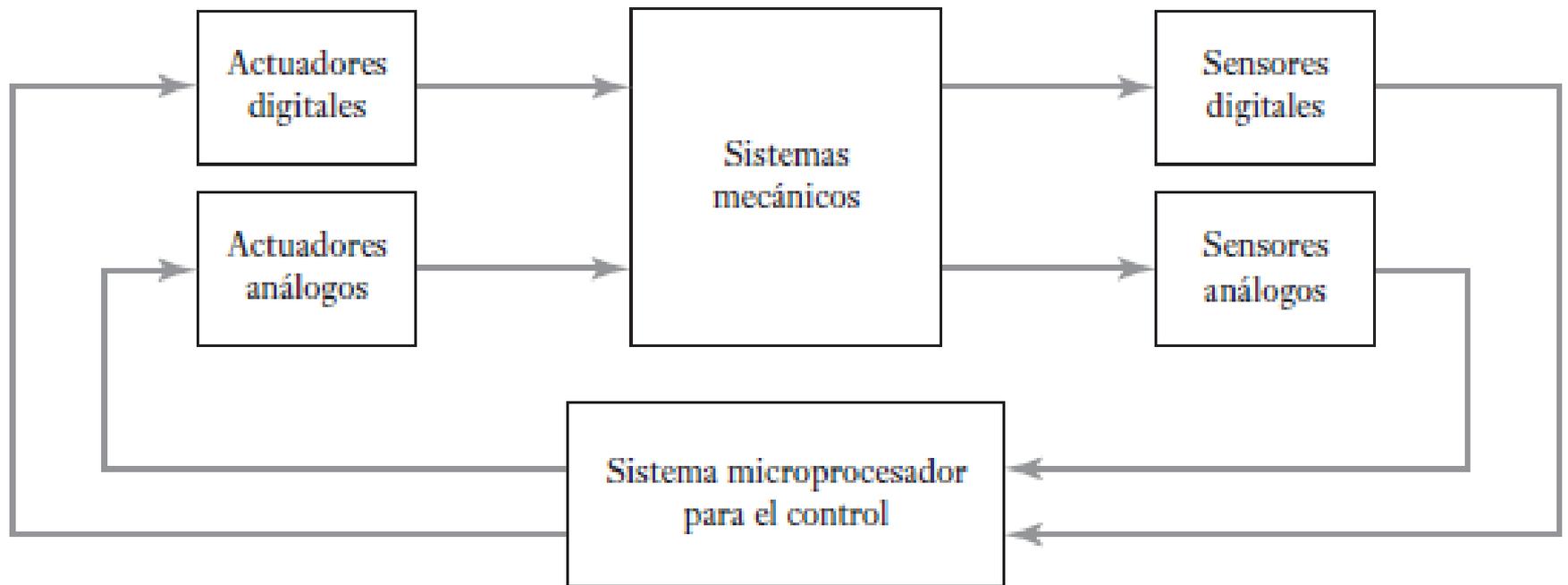
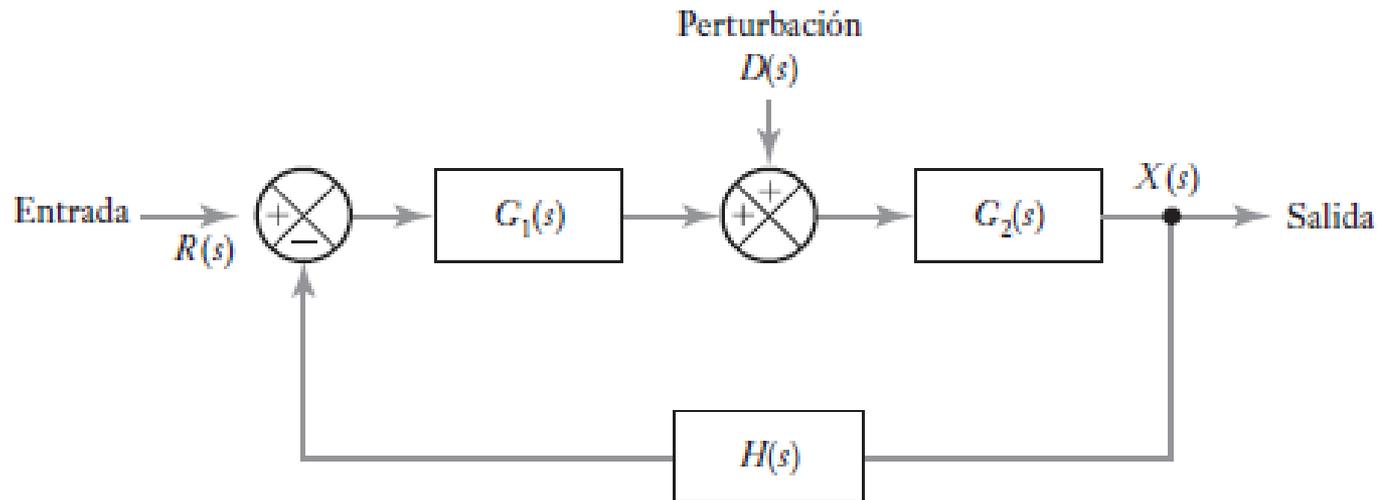


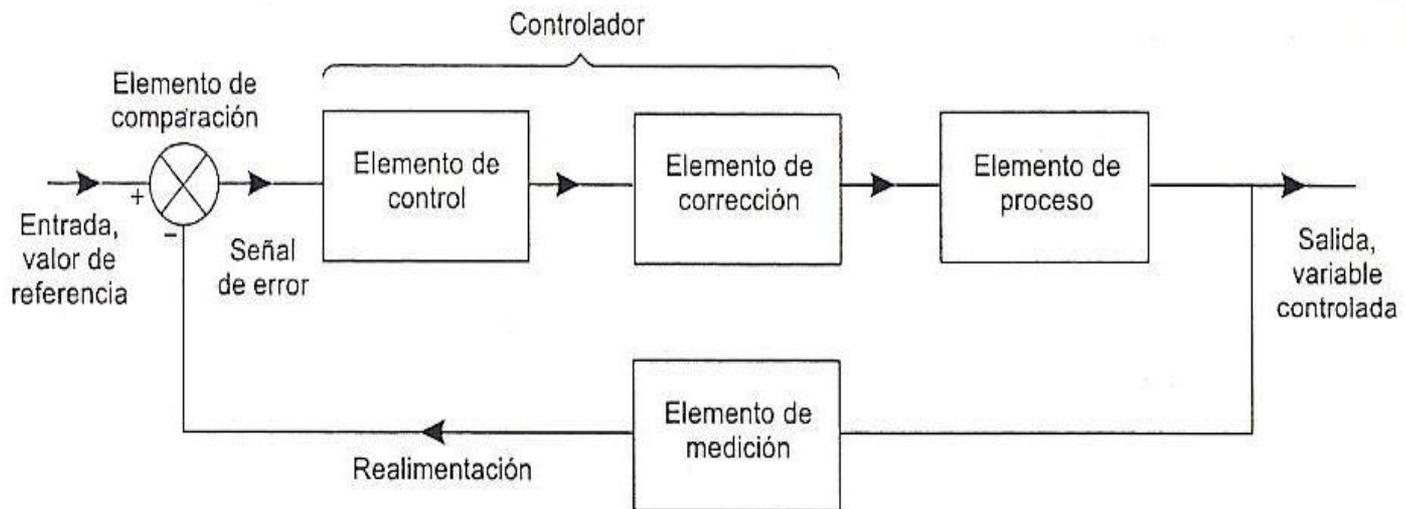
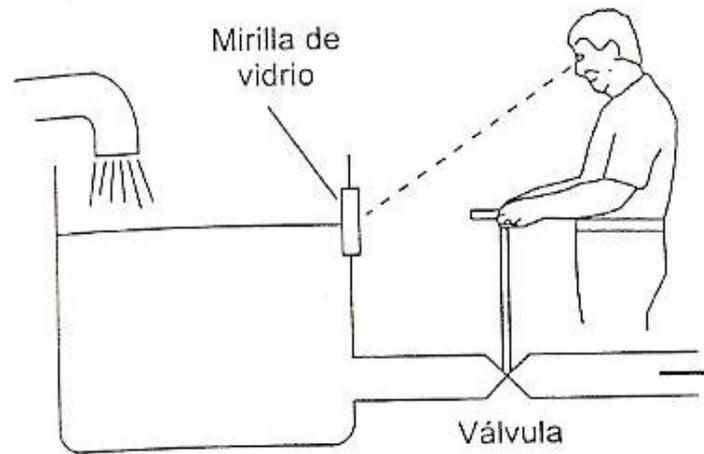
Figura 1.17 Manejo de un automóvil



$$X(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}R(s) + \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}D(s)$$

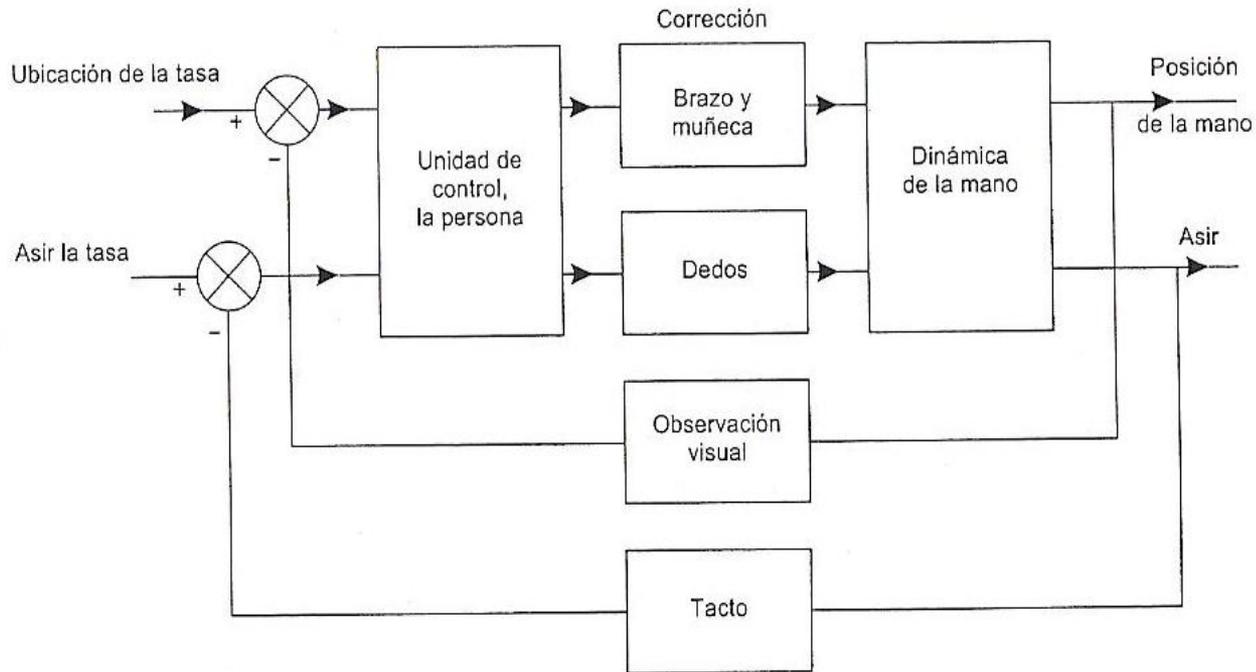


¿Cuales sistemas de lo vistos son  
SISO y cuales MIMO?





Movimientos de brazo y muñeca utilizados para corregir la ubicación de la mano



Estrategias de control: para comenzar se puede decir que en los ejemplos vistos habría dos estrategias marcadamente diferentes: el control de dos posiciones (también llamando todo o nada u on-off) y el control proporcional (al error) .

Ejemplo de control de dos posiciones:

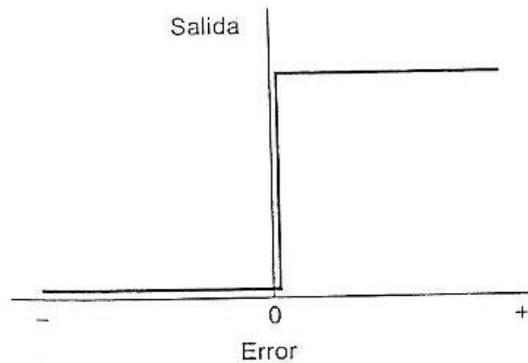


Figura 1.19 Modo de control de dos posiciones

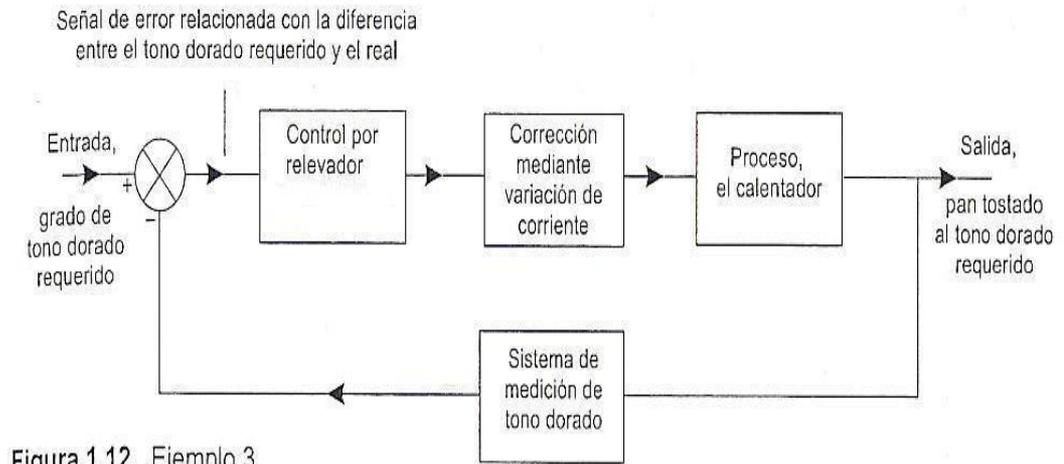


Figura 1.12 Ejemplo 3

Es de dos posiciones, porque el control lo hace mediante un relevador (o relay o relé)

# Ejemplos de control proporcional (al error):

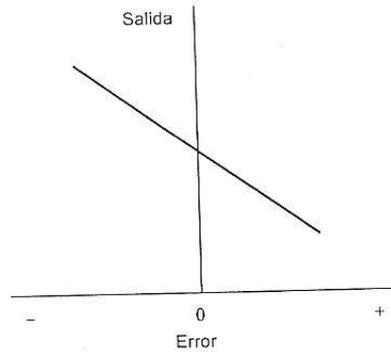


Figura 1.20 Control proporcional

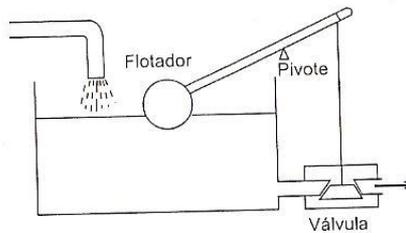


Figura 1.21 Sistema de control de nivel proporcional

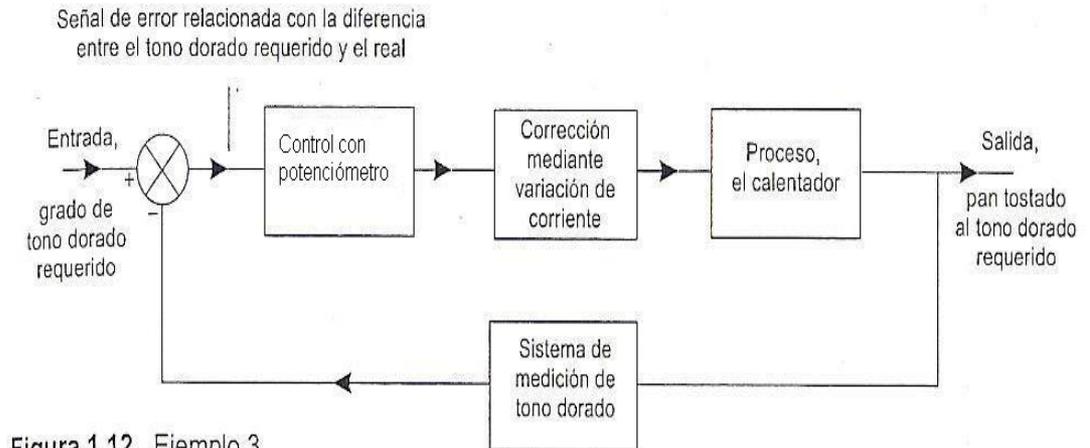


Figura 1.12 Ejemplo 3

# Control Digital a LA y a la LC

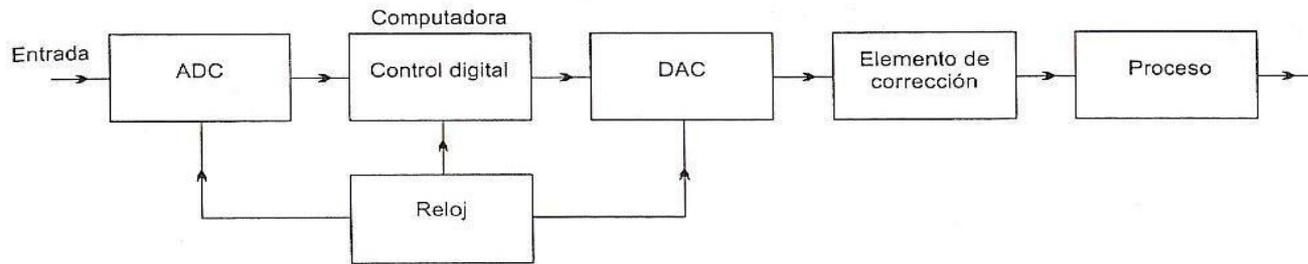


Figura 1.22 Sistema de control digital en lazo abierto para sistemas en tiempo continuo

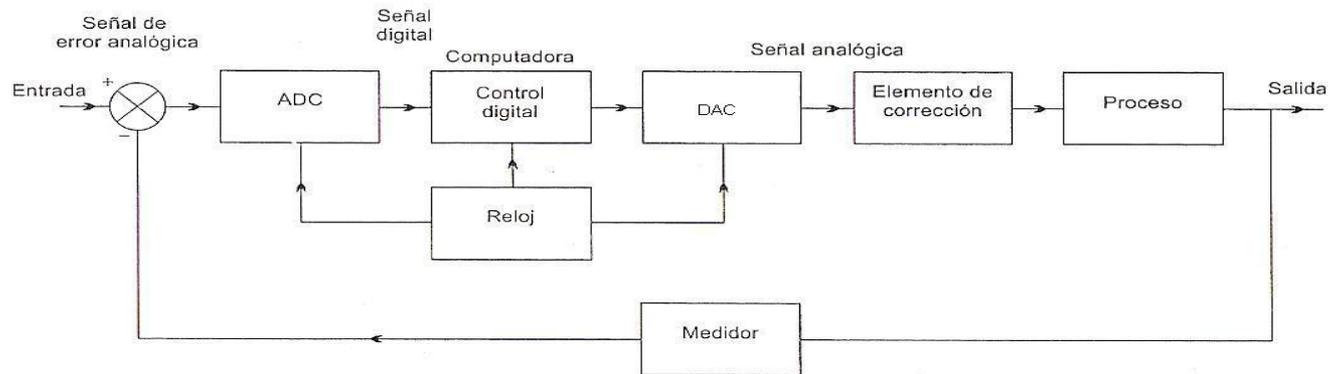


Figura 1.23 Sistema de control digital en lazo cerrado para sistemas en tiempo continuo

# Modelos matemáticos a nivel introdutorio para Sistemas

# Funciones de Transferencias:

Un modelo matemático de un sistema es una replica de las relaciones entre las entradas y las salidas. Estas relaciones se sustituyen por expresiones matemáticas.

Ejemplo 1: un motor donde hay una relación entre el voltaje aplicado y la velocidad angular del eje.

En algunos casos estas relaciones son lineales:

$$\omega = G \cdot V \qquad G = \frac{\text{valor en estado estable de } \omega}{\text{valor en estado estable de } V}$$

Por ejemplo una termocupla que ante un cambio de 10°C en la entrada, genera una variación de 5mV, por lo tanto

$$G = 0,5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

Ejemplo 2: un motor con una FT= 500RPM/V, ¿cual es la salida para una entrada estable de 12V?

$$\text{Salida: } G \cdot \text{entrada} = 500\text{RPM/V} \cdot 12\text{V} = 6000\text{RPM}$$

Mas adelante veremos que las FT **también** toman en cuenta los transitorios que ocurren en las entradas y salidas, no solo, como lo visto hasta ahora, cuando están estables (ó en estado estacionario).

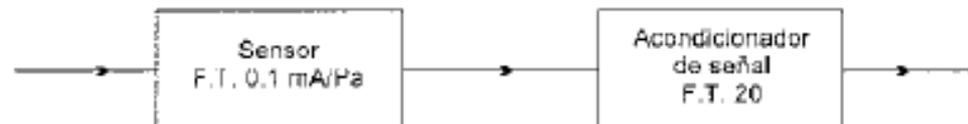
Una Función de Transferencia se define como la relación entre la Transformada de Laplace de la salida y transformada de Laplace de la entrada

$$G = \frac{\theta_o}{\theta_i}$$



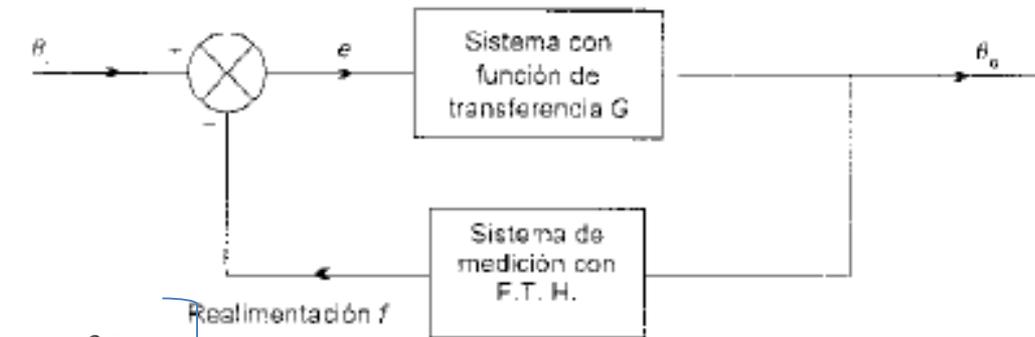
$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{\theta_1}{\theta_i} * \frac{\theta_2}{\theta_1} * \frac{\theta_o}{\theta_2}$$

Ejemplo: el sensor y el acondicionador de señal están en serie, por lo tanto sus funciones de transferencia se multiplican



$$G = 0,1 * 20 \text{ mA/Pa} = 2 \text{ mA/Pa}$$

# Función de Transferencia de Lazo Cerrado



$$G = \frac{\theta_o}{e}$$

$$H = \frac{f}{\theta_o}$$

$$e = \theta_i - f$$

G = FT de trayectoria directa  
H = FT de la realimentación

$$e = \frac{\theta_o}{G} = \theta_i - f = \theta_i - H\theta_o$$

$$\theta_o \left( \frac{1}{G} + H \right) = \theta_i$$

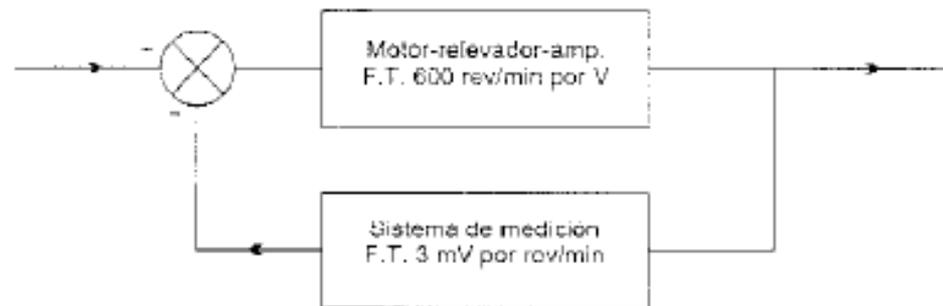
$$\theta_o \left( \frac{1-GH}{G} \right) = \theta_i$$



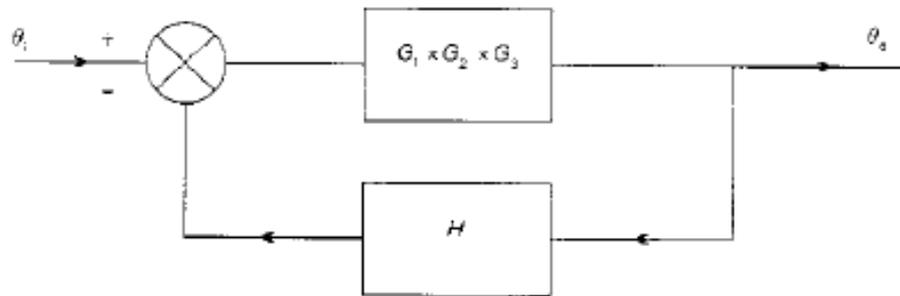
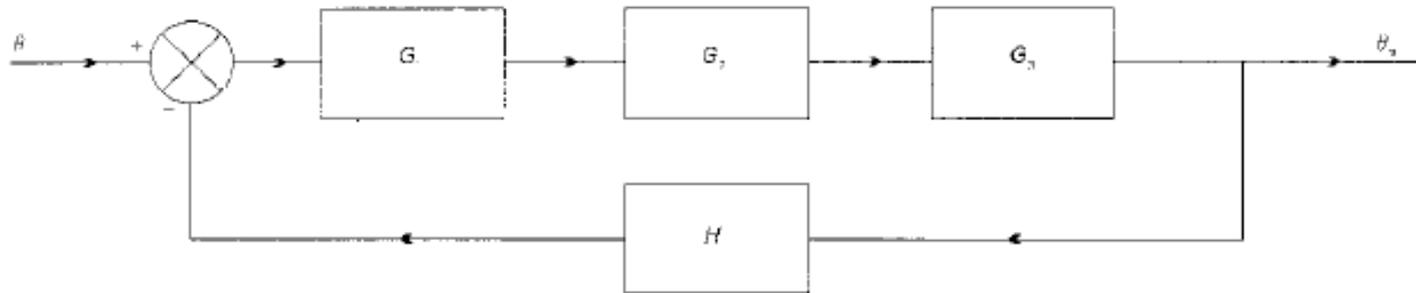
$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \left( \frac{G}{1 + GH} \right)$$

El signo del denominador puede ser negativo si la realimentación es positiva

Un motor de velocidad controlada tiene un sistema motor- relevador-amplificador y un sistema de medición



$$\begin{aligned} \text{Función de transferencia} &= \frac{G}{1 + GH} \\ &= \frac{600}{1 + 600 \times 0.003} \\ &= 214 \text{ rev/min por volt} \end{aligned}$$



$$\text{F.T. del sistema} = -\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{G_1 \times G_2 \times G_3}{1 + (G_1 \times G_2 \times G_3)H}$$

## Error en estado estable

$$E = \theta_o - \theta_i$$

$$G_s = \frac{\theta_o}{\theta_i}$$

$G_s$  es la FT global

$$E = G * \theta_i - \theta_i = \theta_i (G_s - 1)$$

$$E = \theta_i \left( \frac{G}{1+GH} - 1 \right)$$

$$E = \theta_i \left( \frac{1}{H} - 1 \right)$$

Los cambios en las funciones de transferencia de la trayectoria directa casi no tienen efecto sobre el error. La sensibilidad del sistema en lazo cerrado es mucho más pequeña que para sistemas en lazo abierto



La figura 1.31 muestra un controlador con una función de transferencia de 12 y un motor con una función de transferencia de 0.10 rev/min por V.

a) ¿Cuál será el error en estado estable cuando el sistema es un sistema de control en lazo abierto y cómo cambiará el error si, debido a cambios ambientales, la función de transferencia del motor cambia en 10%?

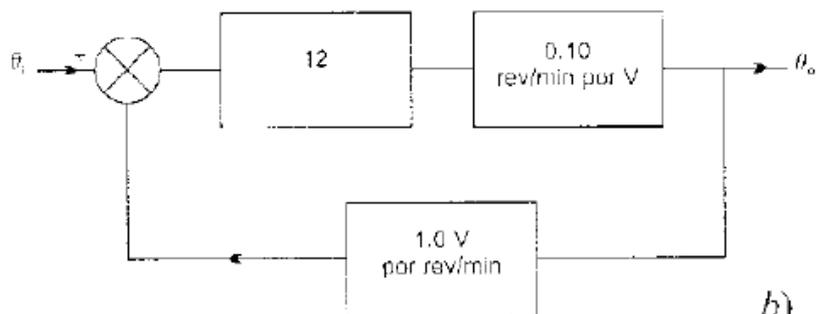
Si hay un cambio de 10% en la función de transferencia del motor, es decir, 0.11 rev/min por V, entonces

$$E = \theta_i (G_1 G_2 - 1)$$

$$E = \theta_i (12 \times 0.10 - 1) = 0.2 \theta_i$$

$$E = \theta_i (12 \times 0.11 - 1) = 0.32 \theta_i$$

El error se incrementa en un factor de 1,6



b)

b) ¿Cuál será el error en estado estable cuando el sistema es un sistema de control en lazo cerrado si el lazo de realimentación tiene una función de transferencia de 1.0 V por rev/min y cómo cambiará el error si, debido a cambios ambientales, la función de transferencia del motor cambia en 10%?

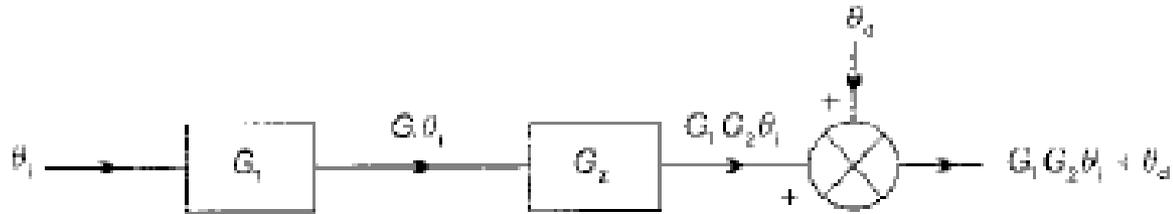
$$E = \theta_i \left( \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 H} - 1 \right)$$

$$E = \theta_i \left( \frac{12 \times 0.10}{1 + 12 \times 0.10 \times 1.0} - 1 \right) = -0.45 \theta_i$$

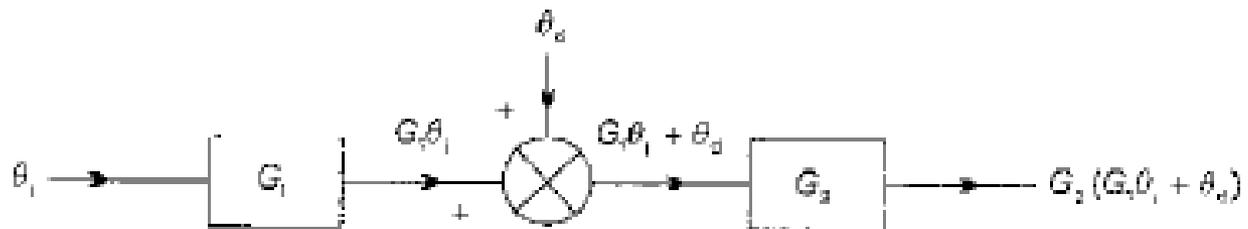
$$E = \theta_i \left( \frac{12 \times 0.11}{1 + 12 \times 0.11 \times 1.0} - 1 \right) = -0.43 \theta_i$$

El error se incrementa en un factor de 0,044

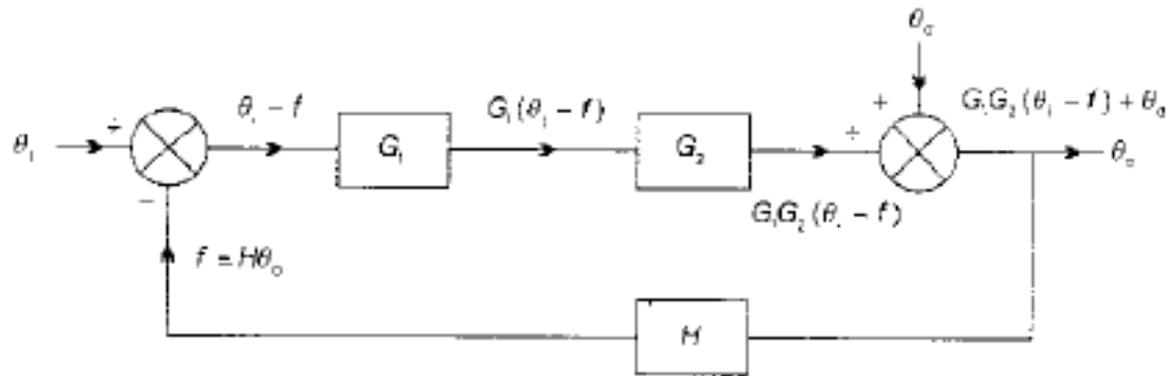
## Efecto de las perturbaciones



$$\theta_o = G_1G_2\theta_i + \theta_d$$



$$\theta_o = (G_1\theta_i + \theta_d)G_2 = G_1G_2\theta_i + G_2\theta_d$$



$$\theta_o = G_1 G_2 (\theta_i - f) + \theta_d$$

$$\theta_o = G_1 G_2 (\theta_i - H \theta_o) + \theta_d$$

$$\theta_o (1 + G_1 G_2 H) = G_1 G_2 \theta_i + \theta_d$$

$$\theta_o = \theta_i \left( \frac{G_1 G_2}{1 + G_1 G_2 H} \right) + \theta_d \left( \frac{1}{1 + G_1 G_2 H} \right)$$

## Estabilidad de los sistemas de control

En términos mecánicos se dice que un sistema está en equilibrio estable, si cuando se le da un empujón, éste regresa a su posición original cuando se deja de empujar. Un ejemplo de esta situación es una bola en reposo sobre un plato esférico (figura 1.36). Cuando la bola se empuja, ésta se mueve hacia un lado del plato, pero cuando se deja de empujar, regresa pronto a su posición de reposo al centro del plato. Sin embargo, la posición sería inestable si la bola estuviera en reposo sobre la parte exterior del plato si éste se voltea, cualquier ligero empujón causa que la bola ruede y no regrese a su posición original cuando se deja de empujar.

Figura 1.36 a) Estable,  
b) inestable



En general, se dice que un sistema es *estable* si cuando está sujeto a una entrada o perturbación acotada entonces la salida es acotada. Una entrada o salida acotada es la que tiene una magnitud finita. Así, en el caso de la bola, la entrada es al inicio cero, seguido de un empujón que no continúa en forma indefinida sino que cesa después de un tiempo. La salida en la condición estable es tal que el empujón causa el movimiento de la bola y que se desplace de su posición de reposo, pero eventualmente el movimiento de la bola cesa y el desplazamiento no continúa incrementándose o cambiando.

En la condición inestable, el desplazamiento de la salida se va incrementando, es decir, una entrada de magnitud finita puede producir una salida que crece sin límite.

La condición para estabilidad también se puede expresar como que un sistema es estable si al excitarlo con un impulso la salida regresa eventualmente a cero.

Los sistemas de control en lazo abierto son inherentemente estables. Una entrada finita produce una salida finita y que en forma indefinida no cambia con el tiempo. Al incrementar la función de transferencia de un elemento en tales sistemas no tiene efecto en la estabilidad del propio sistema.

En cambio, los sistemas en lazo cerrado pueden mostrar inestabilidad, que se puede presentar como resultado de tiempos de retardo que ocurren entre el cambio en la variable y la señal de realimentación que resulta de la respuesta del sistema.

## CONCLUSIONES: Lazo cerrado versus lazo abierto

Las ventajas de tener una trayectoria de realimentación y, por lo tanto, un sistema en lazo cerrado en lugar de un sistema en lazo abierto se pueden resumir de la manera siguiente:

1. Más exacto en la igualación de los valores real y requerido para la variable.
2. Menos sensible a las perturbaciones.
3. Menos sensible a cambios en las características de los componentes.
4. La velocidad de respuesta se incrementa y, por lo tanto, el ancho de banda es mayor, es decir, el intervalo de frecuencias en los que el sistema responderá.

Pero hay algunas desventajas:

1. Hay una pérdida en la ganancia en cuanto a que la función de transferencia de un sistema en lazo abierto, se reduce de  $G$  a  $G / (1 + GH)$  por una trayectoria de realimentación con una función de transferencia  $H$ .
- 2 . Existe una gran posibilidad de inestabilidad.
- 3 . El sistema es más complejo y, por lo tanto, no sólo más caro, sino más propenso a descomposturas.