



## **SISTEMAS DE CONTROL**

### **INTRODUCCIÓN**

## **- TERMINOLOGÍA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL - LAZO ABIERTO VS. LAZO CERRADO**

### **Introducción**

Las aplicaciones del control automático pueden encontrarse tanto en la ingeniería como en la ciencia (vehículos espaciales, guiado de proyectiles, pilotaje de aviones, etc.). Encontramos aplicaciones en la industria de procesos mediante controles de diversas magnitudes como presión, temperatura, humedad, viscosidad, flujo, etc. y en la industria de fabricación, en tareas de maquinado, manipulación y armado de piezas mecánicas.

Las ventajas que se consiguen mediante el control automático son: aumento de producción, mejora en la calidad, reducción de costos y tiempos, supresión o reducción de tareas manuales rutinarias, complejas o riesgosas, etc.

### **Reseña histórica**

El primer trabajo significativo en lo que hace al control automático fue el regulador centrífugo de James Watt, ideado en el siglo XVIII para el control de velocidad de una máquina de vapor.

En 1922 Minorsky trabajó en el control automático de dirección en barcos y demostró cómo se podría determinar la estabilidad de un sistema a partir de las ecuaciones diferenciales que lo representan.

En 1932 Nyquist desarrolló un método simple para determinar la estabilidad de sistemas de lazo cerrado a partir de su respuesta a lazo abierto, en régimen permanente y con excitación senoidal.

En 1934 Hazen introdujo el término servomecanismo para los sistemas de control de posición, estudiando el diseño de servomecanismos repetidores capaces de seguir a una entrada cambiante.

Entre 1940 y 1950 se desarrollaron los métodos de respuesta de frecuencia y del lugar de raíces que posibilitaron el diseño de sistemas de control y conforman el corazón de la teoría de control clásica (sistemas de única entrada y única salida).

Alrededor de 1960 se desarrolló la teoría de control moderna para afrontar la complejidad creciente de las plantas modernas (sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas), así como sus necesidades de exactitud, cantidad producida y costos tanto en aplicaciones militares, espaciales como industriales.

En la actualidad, la disponibilidad de computadoras electrónicas, posibilitó su empleo tanto en el proyecto de sistemas de control como en el control de la operación de los mismos.



También se avanzó en el desarrollo del control óptimo de sistemas determinísticos (aquellos que pueden predecirse por sus antecedentes) y sistemas estocásticos (aquellos que no pueden predecirse ya que son producto del azar y se estudian estadísticamente). Se avanzó también en el desarrollo de sistemas complejos de tipo adaptativos y con aprendizaje.

Los sistemas de control automático encuentran asimismo aplicaciones en campos no ingenieriles como la biología, economía, medicina y sociología.

### Terminología de los sistemas de control

Sistema: Es un conjunto de elementos relacionados de tal manera que forman y/o actúan como una unidad completa en pos de un objetivo.

Control: Dirigir, regular o mandar.

Sistema de control: Es un conjunto ordenado de componentes físicos (naturales o fabricados), biológicos, económicos, etc., relacionados de tal manera que supervisan y regulan al mismo sistema que integran o a otro.

Planta: Es cualquier objeto físico que vaya a ser controlado (por ej. un horno, una habitación, una máquina-herramienta, etc.).

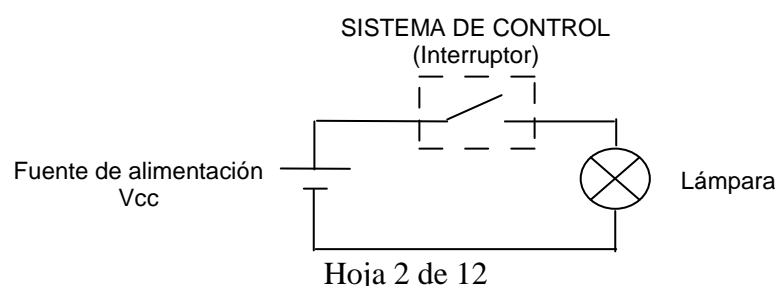
Proceso: Es la operación que se desea controlar (la temperatura de una habitación, la presión de una caldera, la posición y velocidad de la herramienta de una máquina, etc.). Los procesos pueden ser químicos, económicos, biológicos, etc.


Entrada: Es un estímulo, excitación u orden aplicada a un sistema de control, generalmente desde una fuente externa de energía. Pueden ser variables físicas o variables abstractas como valores de referencia o deseados para una salida. Un sistema de control puede tener más de una entrada.

Salida: Es la respuesta real obtenida de un sistema de control y puede o no coincidir con la entrada. Un sistema de control puede tener más de una salida.

Perturbación: Es una entrada espuria o indeseada, ingresada al sistema por algún medio, afectando su salida. Existen perturbaciones externas como ruido e interferencias electromagnéticas, temperatura ambiente, humedad, viento, etc. y perturbaciones internas como ruido térmico y derivas en componentes electrónicos, desgaste en elementos mecánicos, etc.

Ejemplo:



 <b>E.T. N° 17 - Brig. Gral. Don Cornelio Saavedra</b> Distrito Escolar XIII Región V	6° Año <u>Área Electrónica</u>	<b>Apunte teórico 1</b>
		Prof.: Ing. Alejandro Demolli

Para el ejemplo:

- **Entrada:** Tensión aplicada o no al circuito, mediante la acción producida sobre el interruptor.
- **Salida:** Encendido o apagado de la lámpara.
- **Perturbación:** Ruido eléctrico ingresado por el cableado (por ej.)

Acción de control: Es la cantidad responsable de activar al sistema para producir una salida.

Control de realimentación: Es la operación que en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia. Se consideran perturbaciones a las no previsibles.

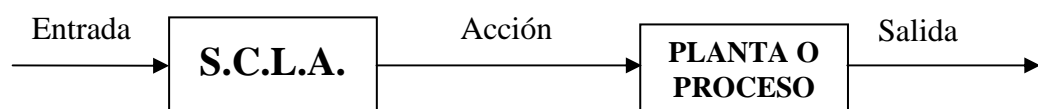
Sistema de control realimentado: Es aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida real y la entrada de referencia, comparando ambas y utilizando dicha diferencia como parámetro de control.

Sistema de regulación automático: Es un sistema de control realimentado cuya misión consiste en mantener la salida real en el valor deseado, a pesar de las perturbaciones presentes. En estos sistemas, la entrada de referencia (o salida deseada) es constante o varía lenta y levemente con el tiempo.

Servomecanismo: Es todo sistema de control realimentado en el cual la salida es una posición, velocidad o aceleración mecánica.

Sistema de control de procesos: Es un sistema de regulación automático en el cual la salida es una variable tal como temperatura, presión, flujo, nivel de líquido o pH.

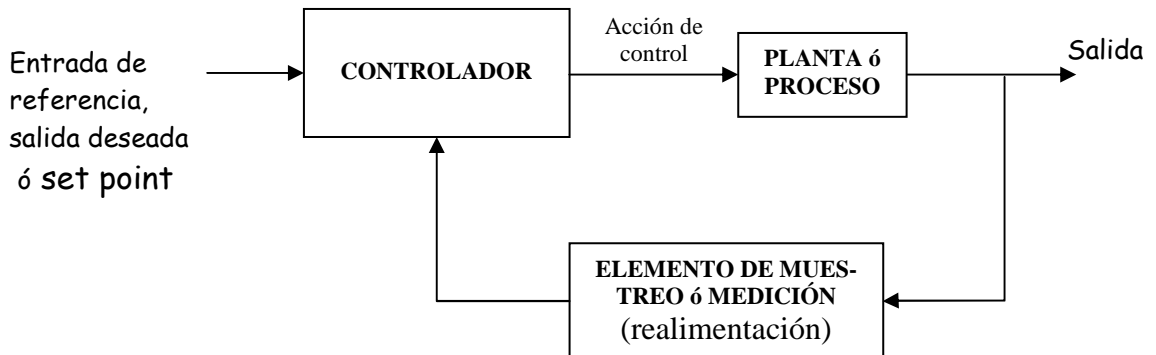
Sistema de control de lazo abierto (S.C.L.A.): Es aquel cuya acción de control es independiente de la salida del sistema. O sea que en estos sistemas no se tiene en cuenta la salida para su realimentación y comparación con la entrada.



La exactitud de estos sistemas depende de su calibración, por lo que, en presencia de perturbaciones, dejan de cumplir o cumplen mal la función de control asignada.

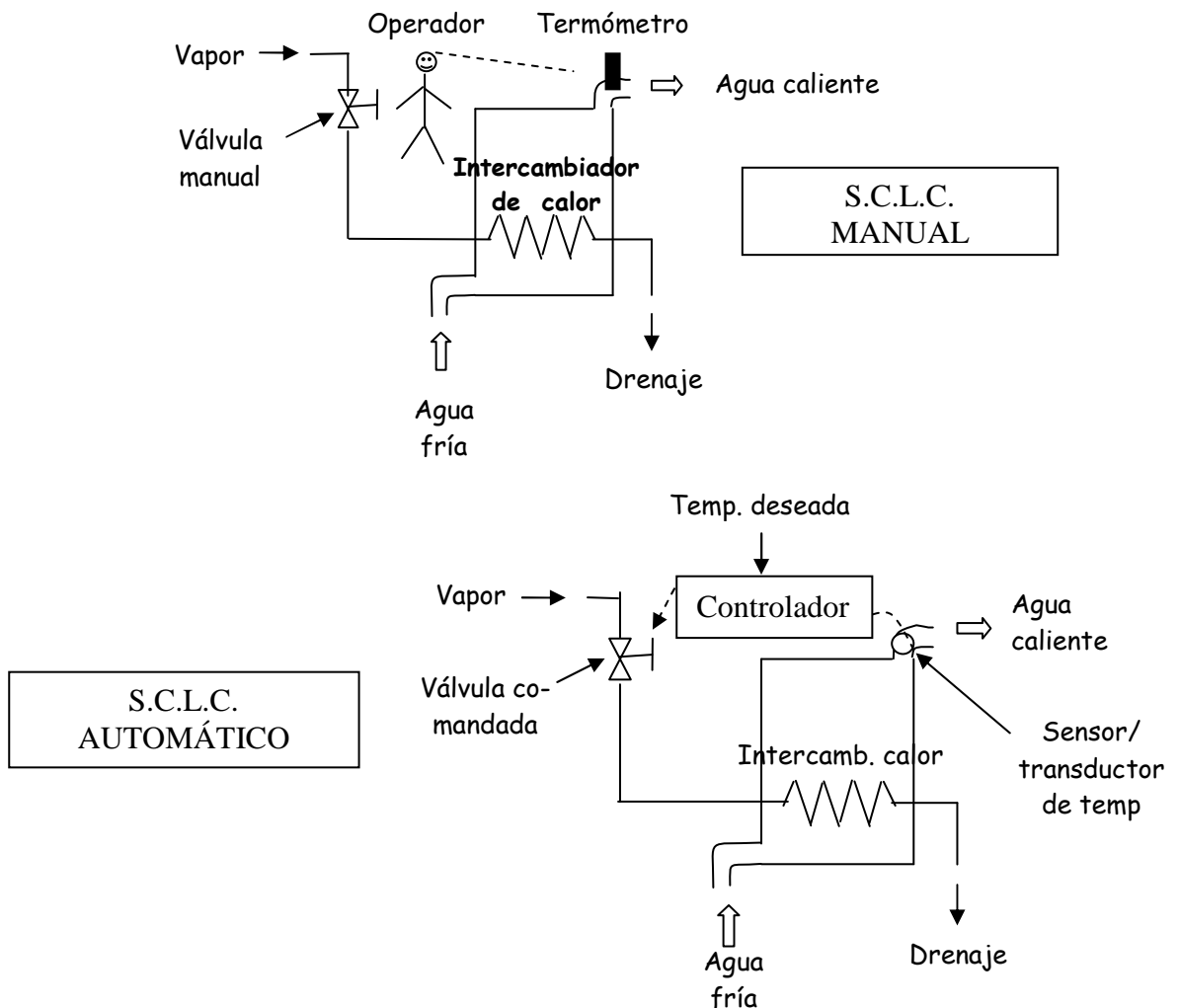
En la práctica sólo se puede usar un control de lazo abierto si la relación entre la entrada y la salida es conocida y no existen perturbaciones internas ni externas (o son despreciables). En general estos sistemas funcionan bajo una base de tiempos (por ejemplo: semáforo, lavarropa automático, etc.).


Sistema de control de lazo cerrado (S.C.L.C.): Es aquel cuya acción de control depende de alguna manera, de la salida real.



Como se puede ver en el esquema, un S.C.L.C., presenta una señal de realimentación, la cual es comparada con la señal de entrada para producir la señal de error. El controlador debe intentar reducir este error, produciendo la acción de control necesaria. Este mecanismo de realimentación y comparación, puede efectuarse en forma manual o automática, siendo este último el de nuestro interés.

Ej.



 <b>E.T. N° 17 - Brig. Gral. Don Cornelio Saavedra</b> Distrito Escolar XIII Región V	6º Año <u>Área Electrónica</u>	<b>Apunte teórico 1</b>
		Prof.: Ing. Alejandro Demolli

### Ventajas de los SCLC frente a los SCLA:

- 1) Poseen mayor exactitud ya que tienden a reproducir fielmente a la señal de entrada. En los SCLA, la exactitud depende de la calibración que se les efectuó y de su persistencia en el tiempo.
- 2) Presentan la propiedad de rechazo a las perturbaciones, lo cual significa que son poco sensibles a las mismas.
- 3) Poseen mayor velocidad de respuesta, es decir: mayor ancho de banda o intervalo de frecuencias en el que el sistema responde a los cambios producidos en el proceso.

### Desventajas:

- 1) Pueden resultar ser inestables (generar oscilaciones en la variable de salida). En los SCLA, no existen problemas de inestabilidad.
- 2) Son más costosos dada su mayor cantidad de componentes y complejidad de diseño necesarios para su buen funcionamiento. En consecuencia, son también más propensos a fallar.
- 3) Debido a la trayectoria en la señal de realimentación, existe una disminución en la ganancia del sistema.

Sistemas de control analógicos: Son aquellos que sólo contienen componentes o procesan señales continuas en el tiempo.

Sistemas de control digitales: Son aquellos que poseen componentes o procesan señales discretas o muestreadas en uno o más puntos del sistema. O sea que puede tratarse de sistemas híbridos (partes analógicas y partes digitales).

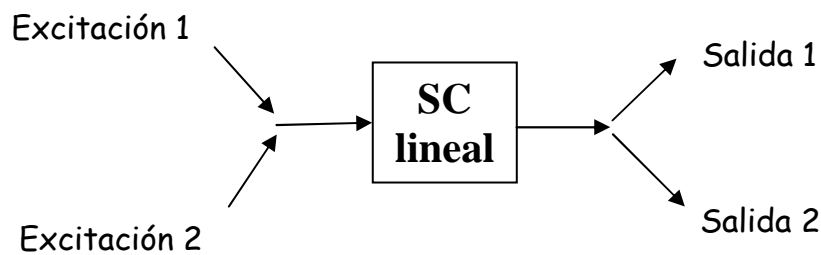
Sistemas de control lineales: Se caracterizan por poseer ecuaciones diferenciales lineales en el modelo matemático que los representan. Por lo tanto responden al principio de superposición.

Ej.

$$y = a.\ddot{x} + b.\dot{x} + c.x + d \quad \longleftarrow \text{Ecuación diferencial lineal}$$

$$\text{Donde } \Rightarrow \dot{x} = \frac{dx}{dt}$$

$$y \Rightarrow \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d\dot{x}}{dt}$$



Si: Excitación 1  $\implies$  (produce) Salida 1

Y: Excitación 2  $\implies$  (produce) Salida 2

Entonces, según el ppio. de superposición:

Excitación 1 + Excitación 2  $\implies$  (producirán) Salida 1 + Salida 2

Sistemas de control alineales: Son aquellos cuyos modelos matemáticos presentan ecuaciones diferenciales que no son lineales. En estos casos no es aplicable el principio de superposición, por lo que su resolución resulta compleja. En estos casos lo que se hace generalmente es efectuar estimaciones y simplificaciones para linealizar el sistema, obteniendo modelos equivalentes, válidos en un determinado rango de operación.

Sistemas de control adaptados: Son aquellos que presentan la capacidad de autoajustarse o automodificarse, de acuerdo a las modificaciones imprevisibles que pudieran existir en el medio o en su estructura. Es decir que pueden adaptarse tanto a cambios ambientales como a errores moderados en su proyecto.

Sistemas de control con aprendizaje: Son aquellos que presentan la capacidad de aprender, de la misma manera que lo haría un operador humano a medida que va adquiriendo experiencia como elemento de control.

### **Enfoques en el estudio de los sistemas de control**

- 1) Análisis: es la investigación de las posibilidades de un sistema existente.
- 2) Diseño: Comprende la elección y el ordenamiento lógico de componentes para conformar un sistema capaz de desempeñar una tarea específica de control.

### **Modelos o formas de representar un sistema de control**

- 1) Modelos matemáticos: Ecuaciones en el dominio del tiempo o de Laplace que se desprenden de las leyes físicas que caracterizan el funcionamiento de cada parte del sistema.

- 2) Diagrama funcional: Es una forma gráfica de representar el funcionamiento de un sistema de control mencionando sus etapas y la evolución de las distintas variables en juego.
- 3) Diagrama de bloques: Es la representación gráfica que describe matemáticamente el funcionamiento del sistema mediante bloques que contienen la función transferencia de cada etapa y flechas que indican la evolución de las señales.
- 4) Gráfico de flujo de señales o flujograma: Es similar al anterior, cambiando solamente la forma gráfica de representar los sistemas.

Ej.: Diagrama funcional de una máquina de control numérico:

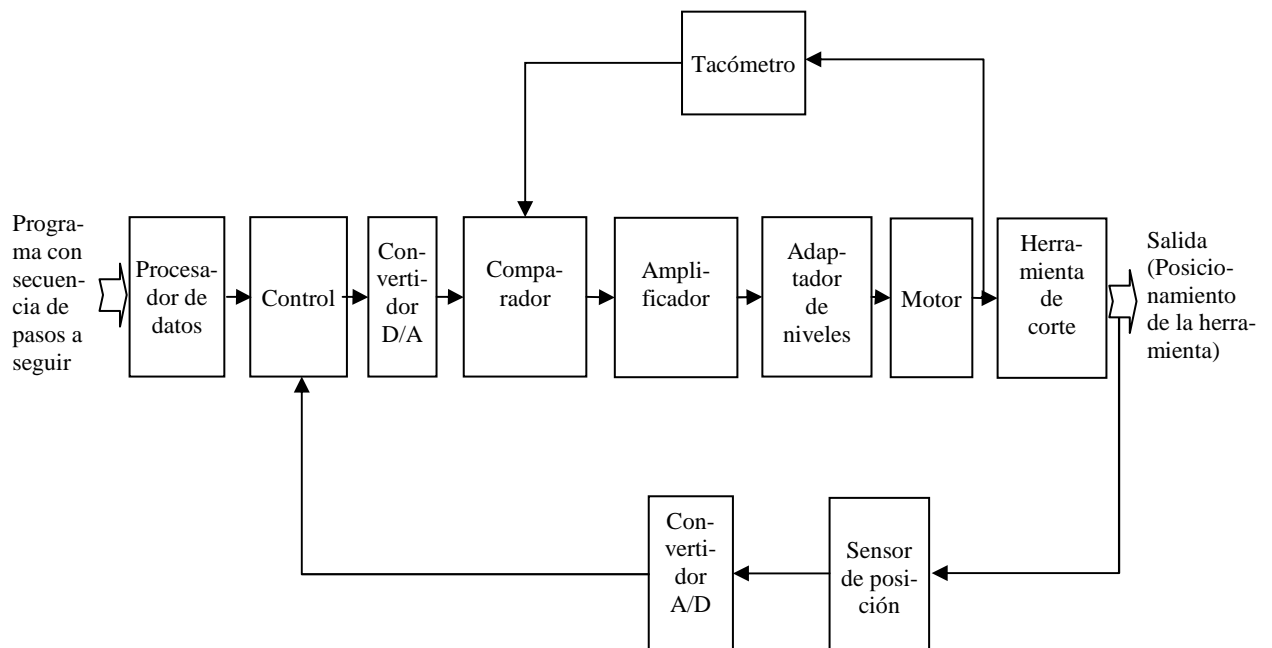
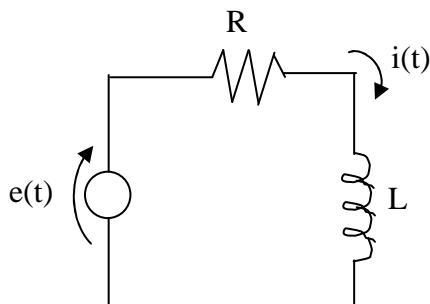


Diagrama de bloques de un circuito eléctrico:



**Modelo matemático del sistema:**

$$e(t) = e_R(t) + e_L(t)$$

$$e(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Ecuación  
diferencial



Pasando al dominio de Laplace con condiciones iniciales nulas (C.I.N.):

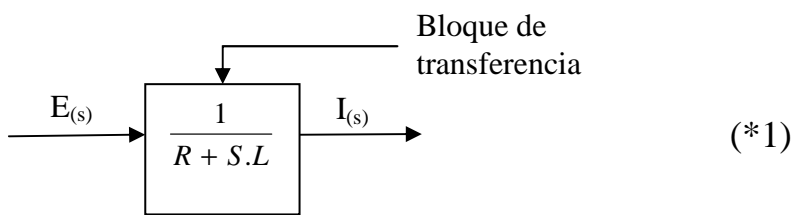
$$E(s) = R.I(s) + L.S.I(s) \quad (1)$$

$$E(s) = (R + S.L).I(s) \quad \text{Ecuación transformada}$$

Despejando  $I(s)$ :

$$I(s) = \frac{E(s)}{R + S.L}$$

$$\frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{R + S.L} \Rightarrow \text{Transferencia del sistema}$$



Si a (1) la trabajamos de la sig. Forma:

$$I(s) = \frac{E(s) - S.L.I(s)}{R}$$

Su representación gráfica mediante diagrama de bloques será:

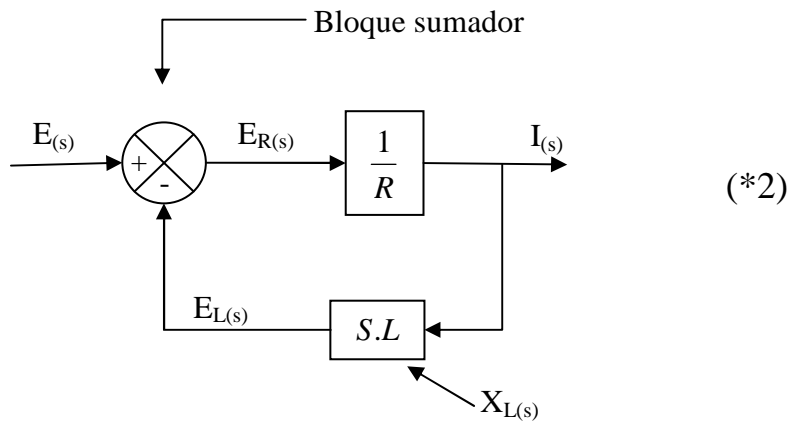
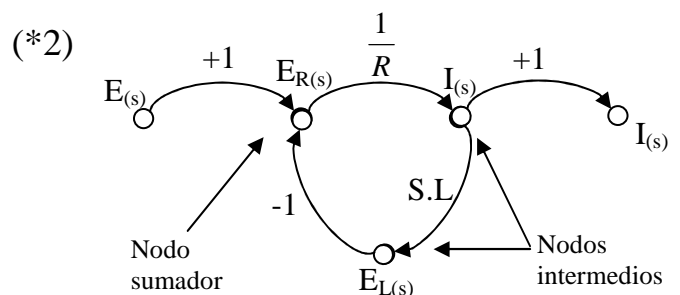
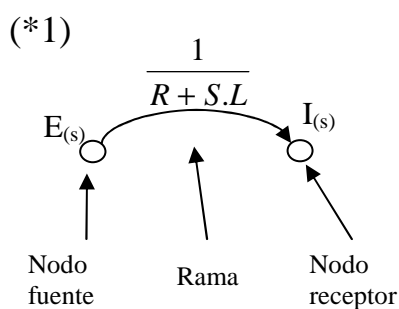


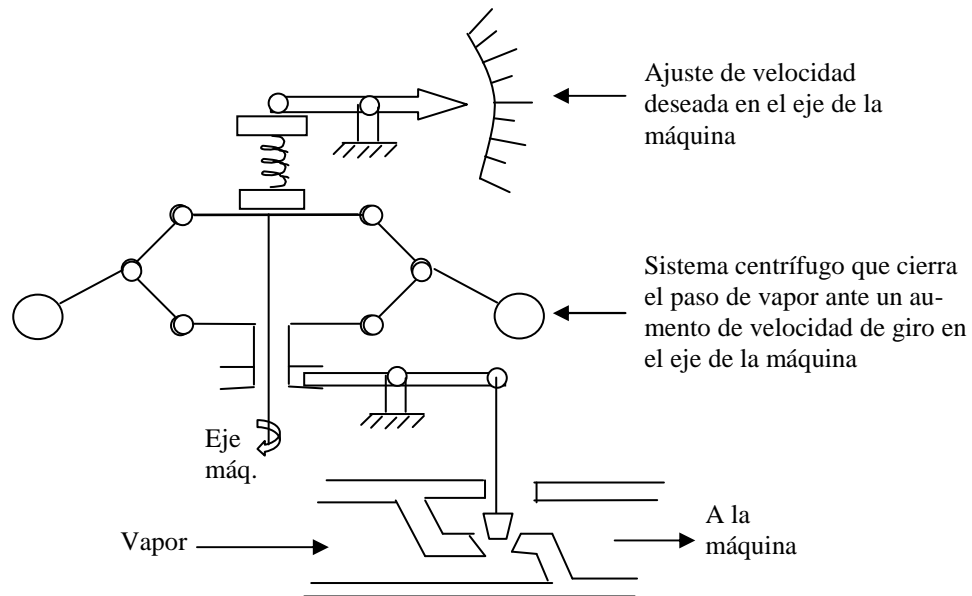
Diagrama de flujo de señal para el sistema anterior:



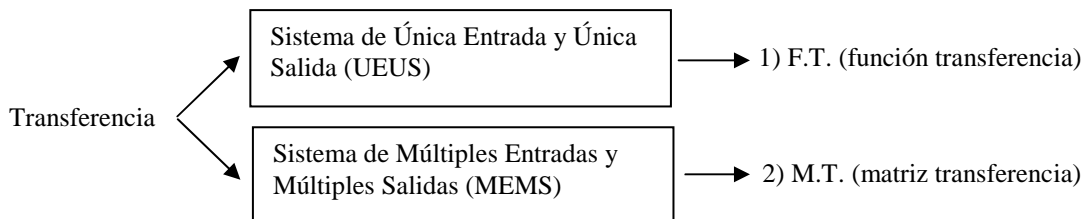




Esquema de un SCLC (regulador de velocidad de James Watt para una máquina de vapor):



Transferencia de un sistema de control:



**1) F.T. (función transferencia)**



En general, la relación entre entrada y salida de un sistema lineal es de la forma:

$$a_m \cdot r^m + a_{m-1} \cdot r^{m-1} + \dots + a_0 \cdot r^0 = b_n \cdot u^n + b_{n-1} \cdot u^{n-1} + \dots + b_0 \cdot u^0$$

Siendo:  $r^m = \frac{d^m r}{dt^m}$  y  $u^n = \frac{d^n u}{dt^n}$  Para  $m = n = 0$ :  $r^0 = r$  y  $u^0 = u$

Recordando la Transformada Laplace de la derivación y transformando con condiciones iniciales nulas (CIN):

$$\mathbf{L}[f^1(t)] = S \cdot F(s) - f(0); \quad \mathbf{L}[f^2(t)] = S^2 \cdot F(s) - S \cdot f(0) - f^1(0); \quad \mathbf{L}[f^3(t)] = S^3 \cdot F(s) - S^2 \cdot f(0) - S \cdot f^1(0) - f^2(0)$$

$$a_m \cdot S^m \cdot R(s) + a_{m-1} \cdot S^{m-1} \cdot R(s) + \dots + a_0 \cdot R(s) = b_n \cdot S^n \cdot U(s) + b_{n-1} \cdot S^{n-1} \cdot U(s) + \dots + b_0 \cdot U(s)$$

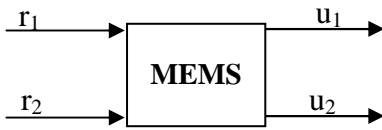
$$[a_m \cdot S^m + a_{m-1} \cdot S^{m-1} + \dots + a_0] \cdot R(s) = [b_n \cdot S^n + b_{n-1} \cdot S^{n-1} + \dots + b_0] \cdot U(s)$$

$$\frac{U(s)}{R(s)} = \frac{a_m \cdot S^m + a_{m-1} \cdot S^{m-1} + \dots + a_0}{b_n \cdot S^n + b_{n-1} \cdot S^{n-1} + \dots + b_0} = F.T.(s) \quad \left. \vphantom{\frac{U(s)}{R(s)}} \right\} \text{Para C.I.N.}$$

Y la salida del sistema, podría obtenerse mediante:  $U(s) = R(s) \cdot FT(s)$



**2) M.T. (matriz transferencia)**



$$U_1(s) = G_{11}(s).R_1(s) + G_{12}(s).R_2(s)$$

$$U_2(s) = G_{21}(s).R_1(s) + G_{22}(s).R_2(s)$$

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}}_{MT} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix}$$

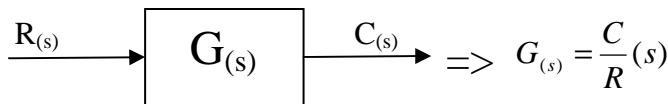
$$G_{11} = \frac{U_1}{R_1} \left| \begin{array}{l} \text{C.I.N.} \\ R_2 = 0 \end{array} \right.$$

$$G_{12} = \frac{U_1}{R_2} \left| \begin{array}{l} \text{C.I.N.} \\ R_1 = 0 \end{array} \right.$$

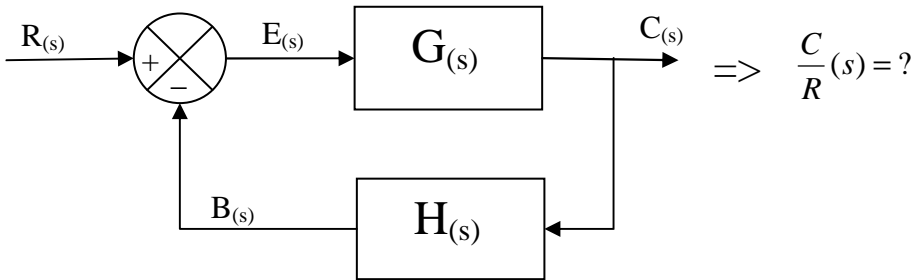
$$G_{21} = \frac{U_2}{R_1} \left| \begin{array}{l} \text{C.I.N.} \\ R_2 = 0 \end{array} \right.$$

$$G_{22} = \frac{U_2}{R_2} \left| \begin{array}{l} \text{C.I.N.} \\ R_1 = 0 \end{array} \right.$$

**Transferencias para SCLA y SCLC:**



$$\Rightarrow G_{(s)} = \frac{C}{R}(s)$$



$$\Rightarrow \frac{C}{R}(s) = ?$$

$R_{(s)}$ : Es la entrada, señal de referencia o salida deseada.

$C_{(s)}$ : Es la salida real o variable controlada.

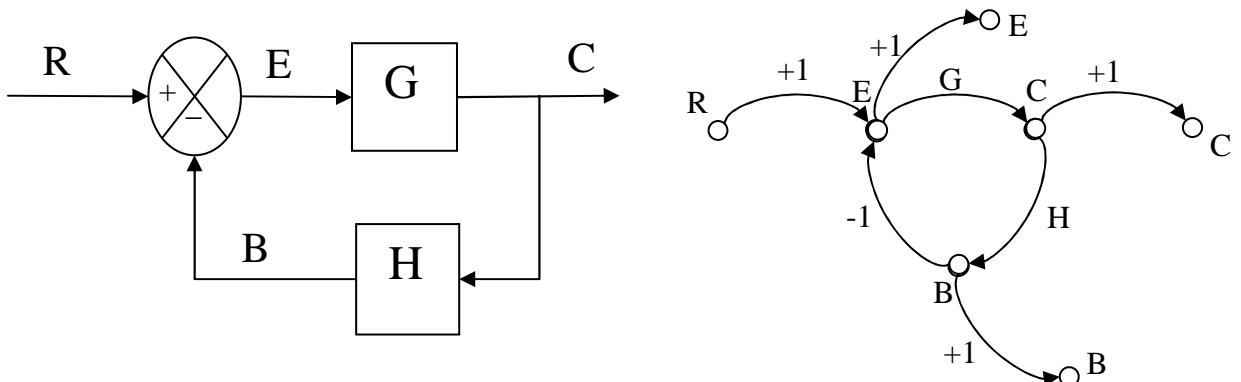
$E_{(s)}$ : Es la señal de error o de actuación.

$B_{(s)}$ : Es la señal de realimentación primaria.

$G_{(s)}$ : Es la transferencia de la cadena directa o del camino directo.

$H_{(s)}$ : Es la transferencia de la cadena de realimentación.

**Transferencia de un sistema de control de lazo cerrado:**





$$\frac{C}{R}(s) = ?$$

$$\begin{cases} E = R \mp B \Rightarrow \frac{C}{G} = R \mp C.H \\ C = E.G \Rightarrow E = \frac{C}{G} \\ B = C.H \Rightarrow C = \frac{B}{H} \end{cases}$$

$$\frac{C}{G} \pm C.H = R$$

$$C \left( \frac{1}{G} \pm H \right) = R$$

$$\frac{C}{R} = \frac{1}{\frac{1 \pm G.H}{G}}$$

$$\boxed{\frac{C}{R}(S) = \frac{G}{1 \pm G.H}}$$

$$\frac{E}{R}(s) = ?$$

$$E = R \mp C.H = R \mp E.G.H$$

$$E \pm E.G.H = R$$

$$E(1 \pm G.H) = R$$

$$\boxed{\frac{E}{R}(s) = \frac{1}{1 \pm G.H}}$$

$$\frac{B}{R}(s) = ?$$

$$\frac{C}{G} = R \mp B$$

$$\frac{B}{H} \cdot \frac{1}{G} = R \mp B$$

$$\frac{B}{G.H} \pm B = R$$

$$B \left( \frac{1}{G.H} \pm 1 \right) = R$$

$$\frac{B}{R} = \frac{1}{\frac{1 \pm G.H}{G.H}}$$

$$\boxed{\frac{B}{R}(s) = \frac{G.H}{1 \pm G.H}}$$

Donde:  $1 \pm G.H \Rightarrow$  Ecuación característica

Se la llama así por ser el denominador común a todas las transferencias entre un nodo receptor y un nodo fuente de todo sistema de control de lazo cerrado.

Esta ecuación contiene los polos de la transferencia (valores de "s" que anulan su denominador).

$1 + G.H = 0 \Rightarrow$  polos de la F.T. (función transferencia para realimentación negativa).

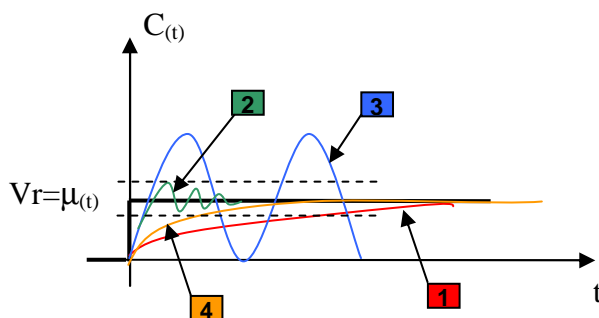
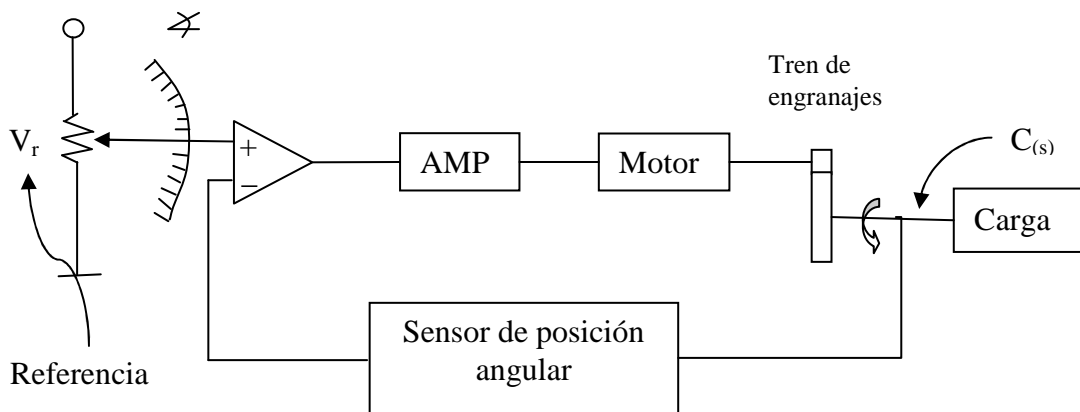
$G.H = -1 \Rightarrow$  transferencia de lazo abierto.

En general  $\begin{cases} G_{(s)} = \frac{N_{G(s)}}{D_{G(s)}} \\ H_{(s)} = \frac{N_{H(s)}}{D_{H(s)}} \end{cases}$

$$\therefore \frac{C}{R}(s) = \frac{\frac{N_G}{D_G}}{1 \pm \frac{N_G}{D_G} \cdot \frac{N_H}{D_H}} = \frac{\frac{N_G}{D_G}}{\frac{D_G \cdot D_H \pm N_G \cdot N_H}{D_G \cdot D_H}}$$

$$\frac{C}{R}(s) = \frac{N_G \cdot D_H}{D_G \cdot D_H \pm N_G \cdot N_H}$$

Ejemplo de un sistema de control automático de posición angular.



- $C(t) = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{Sistema sobre amortiguado} \\ \mathbf{2} & \text{Sistema sub-amortiguado} \\ \mathbf{3} & \text{Sistema sin amort. (oscilatorio)} \\ \mathbf{4} & \text{Sistema con amortiguamiento crítico} \end{cases}$

El más apropiado sería el sistema sub-amortiguado, dado que el mismo alcanza la franja de tolerancia entorno al valor deseado ( $V_r$ ), en el menor tiempo, manteniéndose luego dentro de ella.