

UNIDADES 13 Y 14. SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE CONTROL

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados entre sí de manera que dirijan su propia actuación por sí mismos, sin intervención de agentes externos (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento.

Normalmente, los sistemas de control están compuestos por una **parte actuadora**, que es el sistema físico que realiza las acciones y una **parte controladora**, que genera las órdenes necesarias para que las acciones se lleven a cabo.

Los elementos controladores, que han sido tradicionalmente dispositivos mecánicos, eléctricos o electrónicos, suelen ser actualmente ordenadores que captan datos y los procesan con los programas de control que llevan incorporados.

Un ejemplo simple de sistema automático de control lo constituye el control de temperatura de una habitación por medio de un termostato. Al sistema se le da una consigna que es la temperatura deseada. El termostato, a partir de la lectura de la temperatura de la habitación mediante un sensor, enciende y apaga automáticamente el foco de calor para mantener la temperatura lo más cercana posible a la temperatura de consigna.

En la actualidad, los sistemas automáticos de control tienen una amplísima aplicación en los procesos industriales y en el ámbito doméstico (domótica).

La rama de la técnica que se encarga del estudio de los sistemas automáticos se denomina **Regulación Automática** o simplemente **Automática**.

2. CONCEPTOS Y DEFINICIONES

- ❑ **Sistema:** conjunto de elementos interrelacionados capaces de realizar una operación dada o de satisfacer una función deseada.
- ❑ **Variables del sistema:** magnitudes sometidas a vigilancia o control que definen el comportamiento de un sistema (velocidad, temperatura, posición, etc.)
- ❑ **Entrada:** señal o excitación externa que se aplica a un sistema con objeto de obtener una respuesta.
- ❑ **Salida:** respuesta que proporciona un sistema.
- ❑ **Perturbación:** señales o excitaciones no deseadas que influyen de forma adversa en el funcionamiento del sistema. Por ejemplo, apertura de ventanas en el sistema de control de temperatura de una habitación.
- ❑ **Planta o proceso:** sistema que se pretende controlar.
- ❑ **Transductor o sensor:** dispositivo capaz de captar una magnitud física y transformarla en otra que es interpretable por el sistema de control.

Ejemplo: consideremos el sistema constituido por una persona que maneja un automóvil. La entrada es la dirección de la carretera, la salida la dirección del automóvil, el sensor son los ojos de la persona, el cerebro sería la parte controladora del sistema de control y las manos del conductor junto con los elementos de dirección del automóvil la parte actuadora. El conductor

controla comparando en su cerebro la dirección de la carretera con la que lleva el vehículo y corrige, con las manos y elementos de dirección del coche, si aprecia desviación.

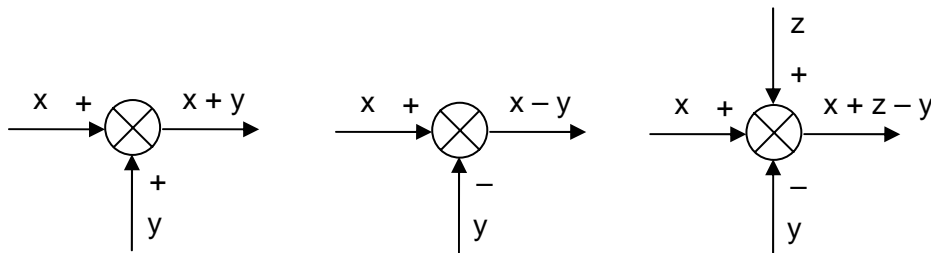
3. LA REPRESENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control se suelen representar en forma de **diagramas de bloques**, de forma que se obtiene una representación visual y simplificada de las relaciones entre las variables del sistema.

Los bloques se representan gráficamente por rectángulos. Cada bloque representa a un elemento del sistema de control. Las relaciones entre los bloques se representan por medio de flechas orientadas que indican el sentido del flujo de la información (señales). Lógicamente, las flechas entrantes en el bloque representan a las entradas y las salientes a las salidas.



En estos diagramas es posible también representar las operaciones entre señales (adición y sustracción). Se utilizan pequeños círculos con un aspa interior. Veamos algunos ejemplos:



Las operaciones de multiplicación o división por una constante se representan con bloques ordinarios.



4. TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL

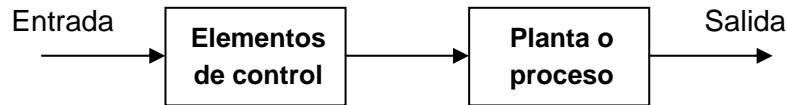
Los sistemas de control pueden ser de dos tipos:

- ❑ **Sistemas de control de bucle o lazo abierto:** son aquellos en los que la acción de control es independiente de la señal de salida.
- ❑ **Sistemas de control de bucle o lazo cerrado:** son aquellos en los que la acción de control depende, en cierto modo, de la señal de salida

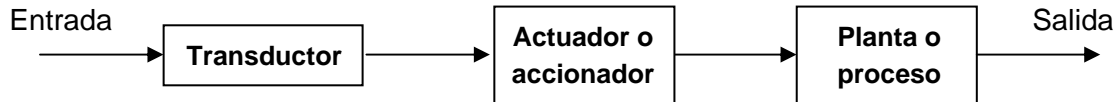
4.1. Sistemas de control en lazo abierto

En ellos, la señal de entrada actúa directamente sobre los elementos que controlan el comportamiento del sistema sin que se tenga en cuenta para nada la señal de salida. El buen funcionamiento de estos sistemas depende de su **calibración**. La calibración consiste en determinar la relación entre la entrada y la salida con la exactitud requerida.

El diagrama de bloques de un sistema de control en lazo abierto es del tipo:



Normalmente, los elementos de control están constituidos por un accionador, que actúa sobre la planta o proceso que se pretende controlar, y un transductor que adapta la señal de entrada a otro tipo de señal (normalmente eléctrica o neumática) interpretable por el accionador.



El principal problema de los sistemas de control en lazo abierto es que son muy sensibles a las perturbaciones, que darán lugar a que no se consiga el valor deseado en la señal de salida.

Ejemplo

Sistema de control de la temperatura de un recinto sin la existencia de termostato. La señal de entrada sería la posición del dial de un potenciómetro (resistencia ajustable) en la que se establezca la potencia calorífica que queremos aplicar. El transductor sería el propio potenciómetro. El actuador sería el foco calorífico (radiador o caldera). La planta o proceso sería el recinto a calefactar y la señal de salida la temperatura en el recinto.

Es evidente que para una misma entrada (posición del dial) se va a obtener una temperatura en el recinto muy diferente dependiendo de perturbaciones como la apertura de puertas y ventanas, corrientes de aire, temperatura exterior, etc.

Ejemplo

Lavadora automática. Esta máquina está programada para realizar las sucesivas operaciones de lavado, cuyas duraciones respectivas vienen determinadas por un temporizador que se coloca en una posición determinada. La señal de entrada sería la posición del programador (temporizador). El transductor sería el propio temporizador, que transforma la posición en la que se coloca su mando en la apertura y cierre de contactos eléctricos. Los elementos actuadores son los diversos mecanismos de la lavadora (motor que mueve el biombo, bombas de entrada de agua y de desagüe, etc.). La planta o proceso sería la ropa que se lava y la variable de salida el grado de limpieza de la ropa.

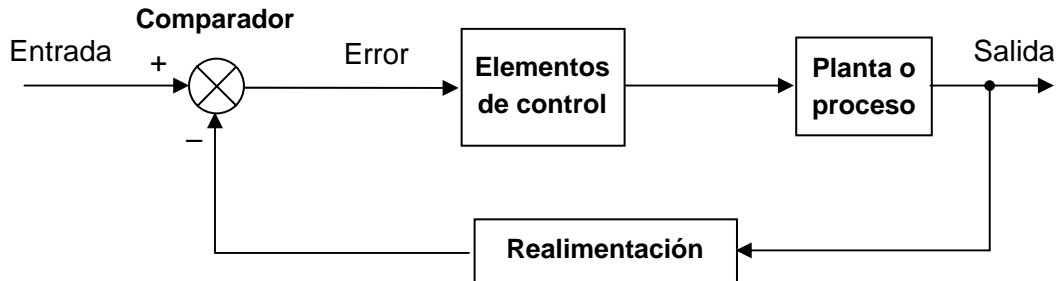
La mayor o menor limpieza conseguida en la ropa no influye para nada en los procesos que se llevan a cabo. La lavadora realizará siempre los mismos procesos independientemente del resultado obtenido. Perturbaciones externas como el grado de suciedad inicial o la calidad del detergente, etc., afectarán a la variable de salida sin que su efecto pueda ser corregido por el sistema de control.

4.2. Sistemas de control en lazo cerrado

Como hemos indicado, en estos sistemas la señal de salida influye en la acción de control. Para ello, es necesario que la señal de entrada a los elementos de control sea modificada en cada instante por la señal de salida. Esto se consigue por medio de la **realimentación**. También se le llama **retroalimentación** o con el término inglés **feedback**.

Por tanto, otra definición válida para los sistemas de control en bucle cerrado sería que “*son aquellos en los que existe una realimentación de la señal de salida, de manera que ésta ejerce un efecto sobre la acción de control*”.

El diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado es del tipo:

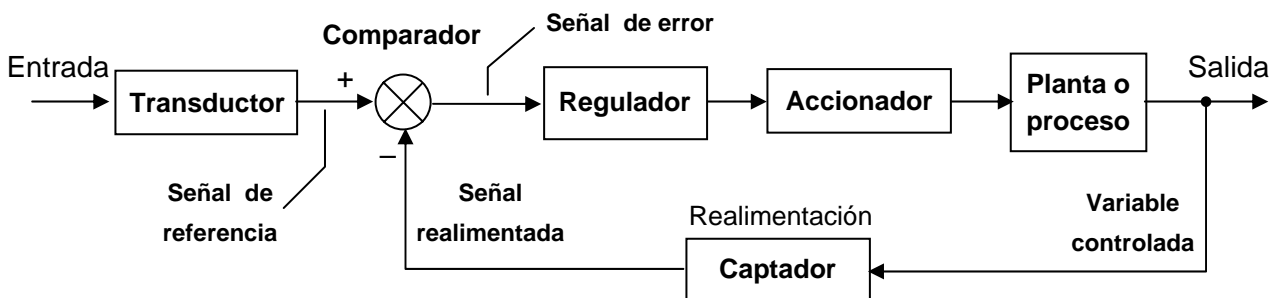


El **error**, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de salida, actúa sobre los elementos de control en el sentido de reducirse a cero y llevar el valor de la señal de salida al valor de la señal de entrada.

Normalmente, las señales de entrada y salida son de diferente naturaleza (por ejemplo, la señal de entrada es una tensión y la de salida la velocidad de un eje de giro), por lo que no serían comparables. Por ello, es habitual que se utilicen **transductores** que las transformen en señales estandarizadas. Estas señales suelen ser corrientes entre 4 y 20 mA, tensiones entre 1 y 5 V o señales neumáticas con presiones entre 0,2 y 1 kg/cm². El transductor que capta la variable de salida y la transforma en una señal comparable con la señal de entrada (*señal realimentada*) se suele denominar **captador**.

La *señal de error* actúa sobre un elemento **regulador**, el cual, en función de la misma, proporciona a su salida una señal que, a través de un elemento **accionador**, influye en la planta o proceso para que la salida (*variable o señal controlada*) tienda hacia el valor de referencia, anulando la señal de error. El regulador es el “cerebro” del control, por lo que debe ser un elemento diseñado con gran precisión.

Con los elementos mencionados, el diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado podría representarse de la siguiente forma:



Los sistemas en lazo cerrado son mucho menos sensibles a las perturbaciones que los de lazo abierto. Las perturbaciones afectarán a la salida, pero los cambios de ésta darán lugar, debido a la realimentación, a una señal de error que, a través del regulador, actuará sobre el proceso compensando las perturbaciones. Su inconveniente es que son de respuesta más lenta y más complejos que los de lazo abierto.

5. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE UN SISTEMA DE CONTROL

Normalmente, los sistemas de control estarán sometidos a variaciones en sus señales de entrada (señales de consigna o de referencia) y a perturbaciones. Para que el sistema de control sea válido es imprescindible que, como mínimo, sea estable.

Decimos que un **sistema** es **estable** cuando permanece en equilibrio en tanto no se le excite mediante una fuente externa y, cuando ésta actúa, vuelve a una nueva posición de equilibrio una vez desaparecida la excitación. También podemos decir que **un sistema es estable, cuando ante una entrada de un valor limitado, la salida tiende a un valor también limitado** dentro de unos límites previamente determinables.

Cuando se produce un cambio en la señal de entrada, o bien cuando actúan perturbaciones sobre un sistema de control, el régimen normal de funcionamiento no se alcanza inmediatamente, sino tras un cierto tiempo, en el que ocurren una serie de fenómenos transitorios. Por tanto, en el estudio de la respuesta de un sistema a lo largo del tiempo hay que considerar dos partes:

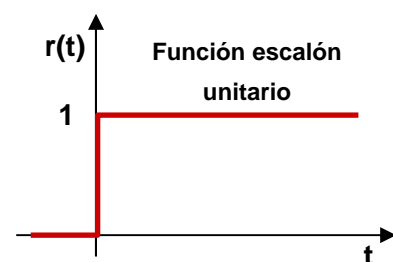
- ❑ **Respuesta transitoria** o **dinámica**: es la que ofrece el sistema durante un cierto tiempo tras el cambio en la señal de consigna o tras la acción de las perturbaciones. Se caracteriza por adoptar las variables del sistema valores anormales e inestables. Esta parte de la respuesta tiende a anularse a medida que va transcurriendo el tiempo si el sistema es estable.
- ❑ **Respuesta permanente**: es la que ofrece el sistema pasado un cierto tiempo cuando ya sus variables se han estabilizado y presentan un valor normal de funcionamiento.

Aunque a partir de un cierto tiempo la respuesta del sistema sea solamente la permanente, la componente transitoria es muy importante. Es necesario que los parámetros de diseño del sistema de control sea el adecuado para que la respuesta transitoria del sistema no sea ni muy brusca ni demasiado lenta. La **respuesta transitoria** caracteriza la **estabilidad** del sistema y su **rapidez de respuesta**. La **respuesta en régimen permanente** ofrece información sobre la **precisión** del sistema y de su **estado de equilibrio**.

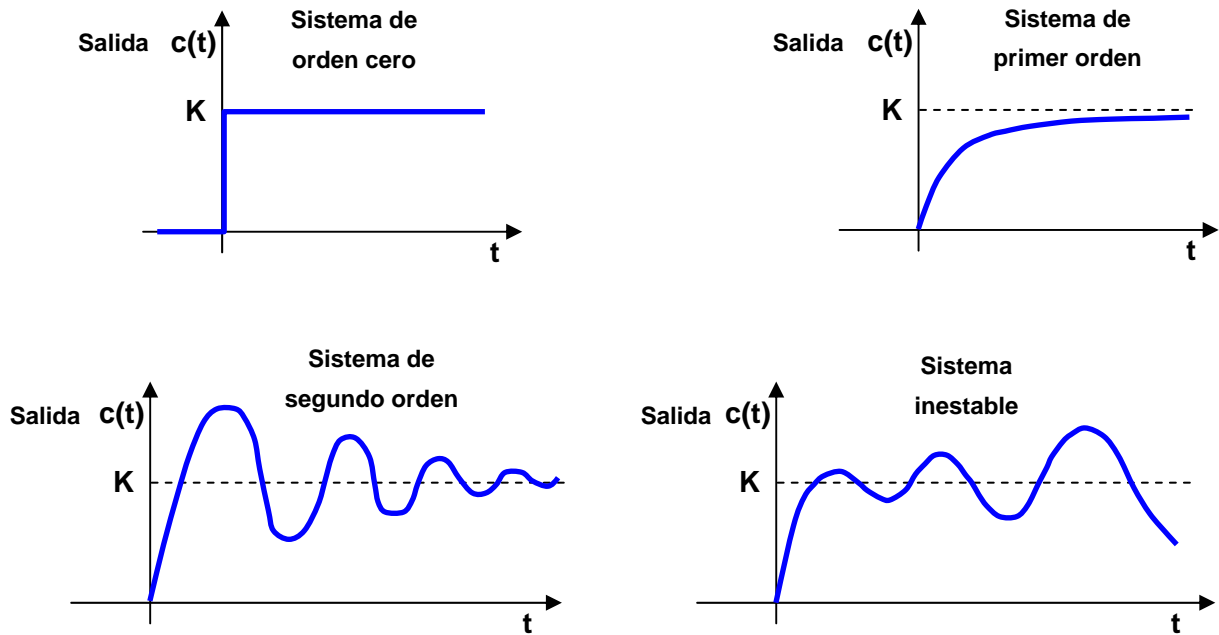
Las variaciones de las señales de excitación que actúan sobre los sistemas pueden ser muy variadas (de variación lenta o rápida, de forma cuadrada o senoidal, impulsos bruscos, incluso variaciones aleatorias, etc.).

Para realizar el estudio del comportamiento de los sistemas de control, unos de los métodos es someterlos a determinadas excitaciones o señales de entrada estandarizadas (impulso, escalón, rampa,...) y observar la respuesta del sistema o señal de salida ante dichas entradas.

La más simple y representativa es la **función escalón** (variación brusca y mantenida de la señal de entrada), que representa la puesta en marcha de un sistema (como darle al botón de marcha). Se suele utilizar para el análisis el **escalón unitario**.



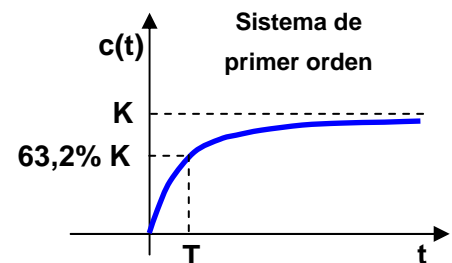
Dependiendo de la naturaleza del sistema pueden producirse diferentes respuestas ante una entrada escalón:



La respuesta de los sistemas estables ante la entrada escalón unitario tiende en más o menos tiempo y con más o menos oscilaciones hacia un valor constante, K , denominado **ganancia estática**, que es el valor que adopta la salida cuando se alcanza el régimen permanente.

Si la amplitud de las oscilaciones, en vez de ir atenuándose, se va incrementando, el sistema es inestable.

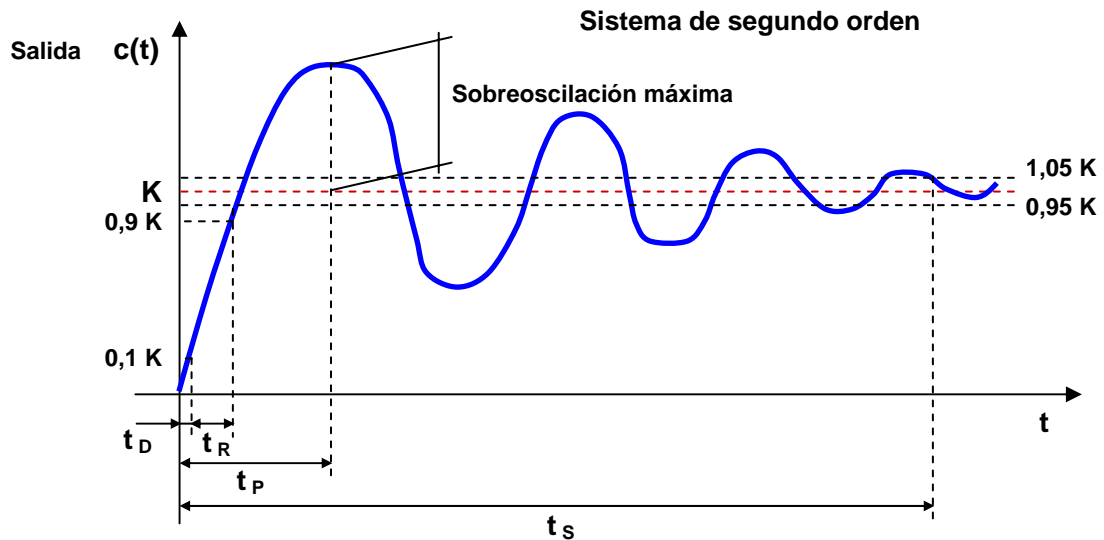
En los **sistemas de primer orden** la característica fundamental es la **constante de tiempo**, T , que se define como el tiempo necesario para que la salida alcance el 63,2% de su valor final. Cuanto más pequeña sea la constante de tiempo más rápida es la respuesta del sistema.



Aunque en teoría el valor K no se alcanza hasta pasado un tiempo infinito, en la práctica se considera alcanzado cuando se llega al 95% de su valor, lo que corresponde a un tiempo aproximado de $t = 3 T$.

En los **sistemas de segundo orden** las características básicas son:

- ❑ **Sobreoscilación máxima:** que es la diferencia entre el valor máximo que adopta la señal de salida y el valor de régimen permanente.
- ❑ **Velocidad de respuesta:** se mide por tres valores, el **tiempo de retraso**, t_D , que es el tiempo que transcurre hasta que la salida alcanza un valor del 10% de su valor de régimen permanente; el **tiempo de subida**, t_R , que es el tiempo que transcurre desde que la salida alcanza el 10% de su valor permanente hasta que llega por primera vez al 90% de dicho valor; el **tiempo de pico**, t_P , que es el tiempo que tarda la salida en llegar a su valor máximo.
- ❑ **Tiempo de establecimiento**, t_s , **para una tolerancia de $x\%$:** es el tiempo necesario para que la salida entre y se mantenga en una zona del $\pm x\%$ en torno al valor de régimen permanente. Se suele tomar el $\pm 5\%$.



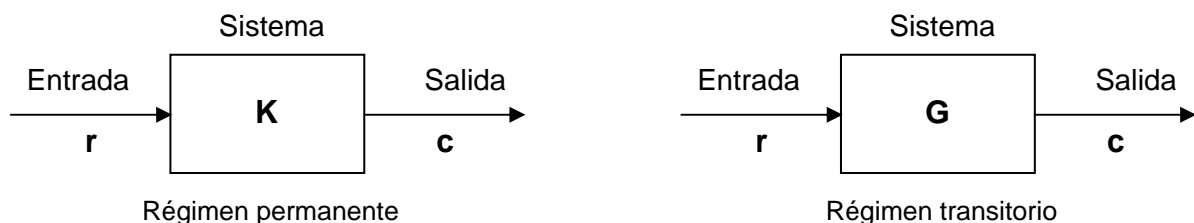
6. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

A pesar de la buena información que ofrece el estudio de la respuesta ante una entrada de tipo escalón, siempre tendremos la incertidumbre de cómo reaccionará ante una perturbación de otro tipo (onda cuadrada, impulsos cortos, onda sinusoidal, ruidos aleatorios, etc.).

Una forma de abordar este problema consiste en estudiar las relaciones entre los diferentes elementos o partes constituyentes del sistema describiéndolas matemáticamente. Se crea así un modelo matemático del sistema cuya respuesta a cualquier tipo de entrada puede analizarse mediante ecuaciones o simulándolo con un programa de ordenador.

La relación matemática entre la entrada y la salida de un sistema se conoce como **función de transferencia**.

Como dijimos, en la respuesta de un sistema en función del tiempo podemos distinguir una parte inicial o respuesta transitoria y la parte que le sigue pasados los momentos iniciales denominada respuesta permanente. El estudio matemático de la respuesta transitoria, que depende del tiempo, requiere el uso de unas herramientas matemáticas complejas que sobrepasan el nivel en el que nos encontramos. La respuesta de régimen permanente es independiente del tiempo y, por tanto, requiere para su análisis de unas herramientas de menor complejidad. En este caso, la relación entre la entrada y la salida se puede expresar por una constante, que hemos denominado **ganancia estática** del sistema.

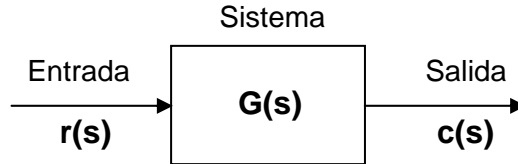


En régimen permanente: $\text{Salida} = K \cdot \text{Entrada}$

Por el contrario, durante el régimen transitorio: $\text{Salida} = G \cdot \text{Entrada}$

siendo G una función que tiende al valor K para tiempos suficientemente largos (cuando el sistema alcanza el régimen permanente).

Uno de los métodos matemáticos más utilizados tanto para el estudio del régimen transitorio (o dinámico) como para el permanente, es el *Método Operacional de Laplace*. Aunque su estudio sobrepasa el nivel de este curso, diremos que se basa en la transformación de funciones que dependen del tiempo en otras dependientes de una variable compleja designada por “s”. Con este método, tanto las variables como las funciones de transferencia se representan en función de la variable “s”.



En lo sucesivo, nos limitaremos sólo al estudio de los sistemas en lo referente al régimen permanente, por lo que consideraremos constantes las funciones de transferencia, dejando para más adelante algunas nociones sobre la dinámica de los mismos.

7. DIAGRAMAS FUNCIONALES O DE BLOQUES

Una de las principales ventajas de la función de transferencia es la posibilidad de representar el comportamiento de cada uno de los componentes del sistema mediante un bloque funcional, caracterizado por su función de transferencia. El sistema queda así configurado como un conjunto de bloques unidos entre sí mediante flechas que indican el sentido del flujo de las señales (cuáles son entradas y cuáles salidas para los respectivos bloques).

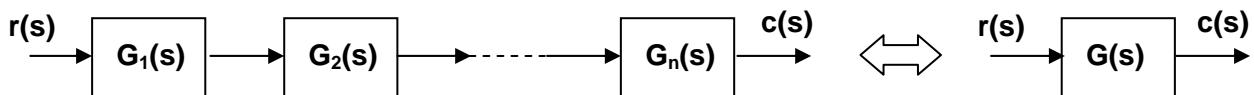
La función de transferencia del conjunto puede obtenerse a partir operaciones matemáticas entre las funciones de transferencia de cada bloque.

En los diagramas funcionales, además de los bloques, se utilizan comparadores o detectores de error para realizar operaciones de suma o resta de variables, como ya vimos anteriormente.

Veamos algunas operaciones que permiten reducir los diagramas de bloques complicados a otros de más fácil manejo o calcular la función de transferencia del conjunto.

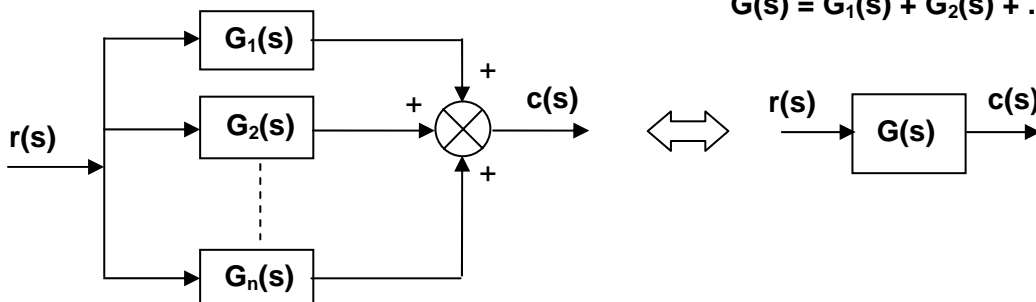
Bloques en serie: La función de transferencia del conjunto es igual al producto de las funciones de transferencia de cada bloque:

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot \dots \cdot G_n(s)$$

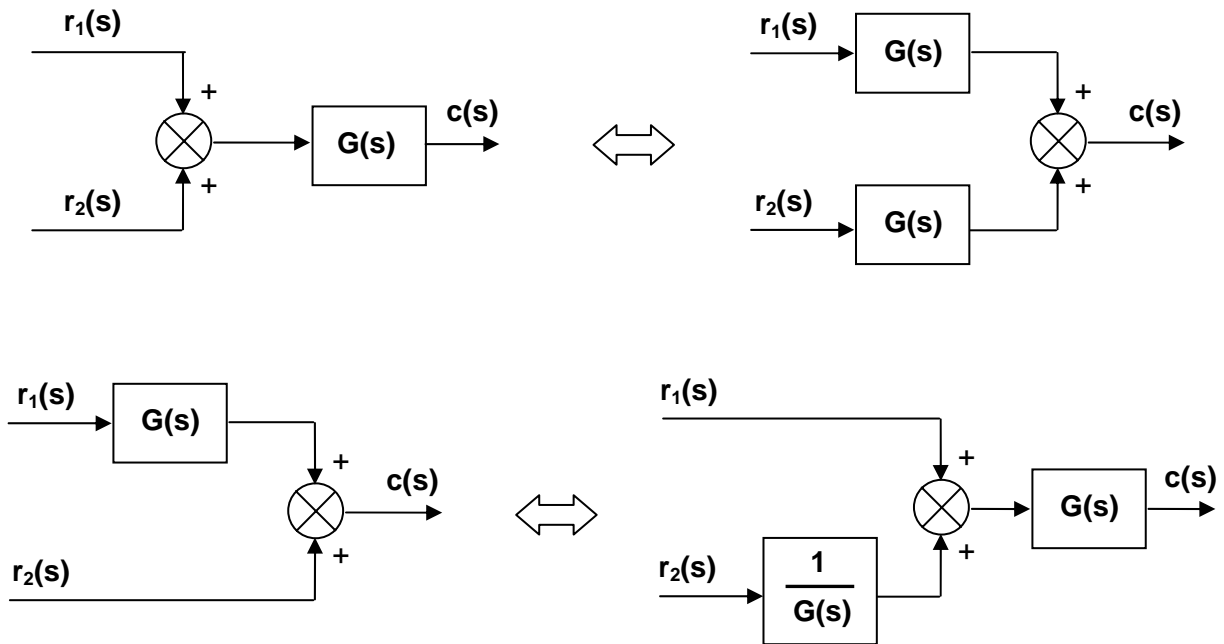


Bloques en paralelo: La función de transferencia del conjunto es igual a la suma de las funciones de transferencia de cada bloque:

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) + \dots + G_n(s)$$

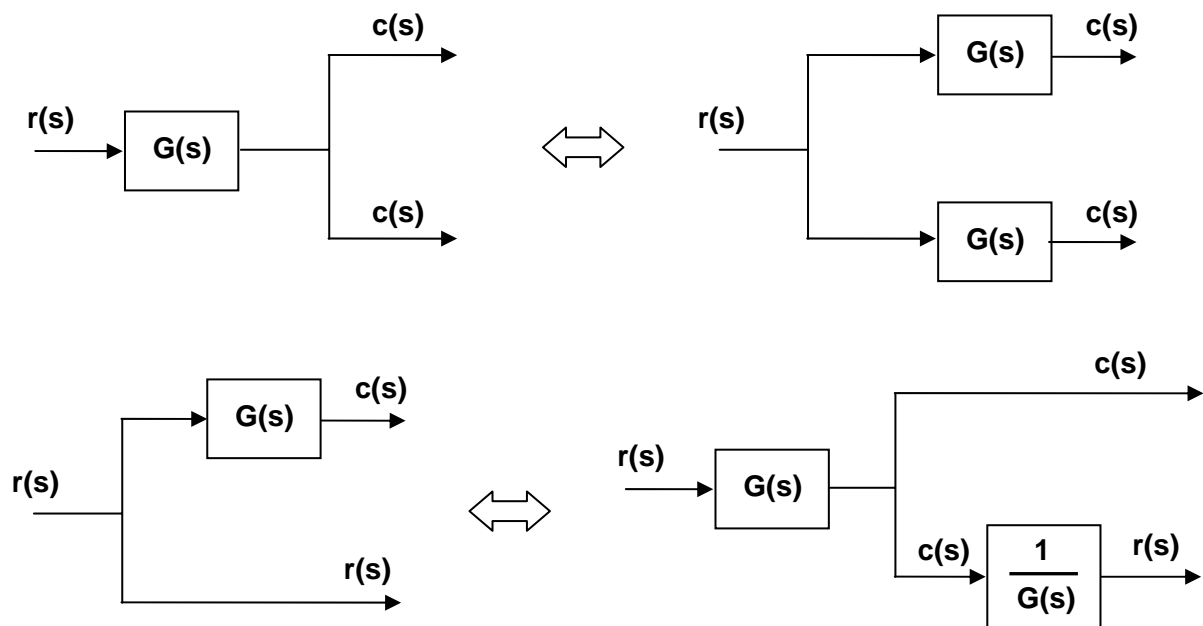


Transposición de puntos de suma: consiste en mover un punto de suma o comparador al otro lado de un bloque con objeto de facilitar la simplificación.

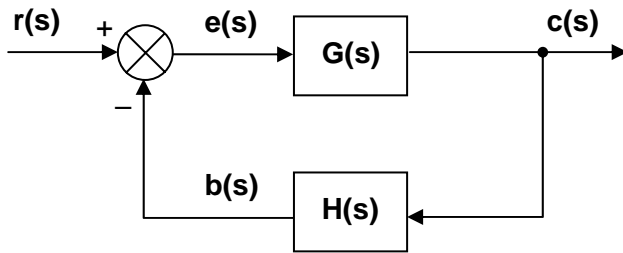


Las transformaciones indicadas en las figuras anteriores serían análogas en el caso de que hubiera más de dos funciones sumadas o si unas funciones se suman y otras se restan.

Transposición de puntos de bifurcación: tienen la misma función que la transposición de los puntos de suma.



Conexión en anillo con realimentación: es la conexión típica de los sistema en bucle cerrado.



La función de transferencia del conjunto será:

$$M(s) = \frac{c(s)}{r(s)}$$

Del esquema se desprenden las ecuaciones:

$$e(s) = r(s) - b(s) \quad (1)$$

$$c(s) = G(s) \cdot e(s) \quad (2)$$

$$b(s) = H(s) \cdot c(s) \quad (3)$$

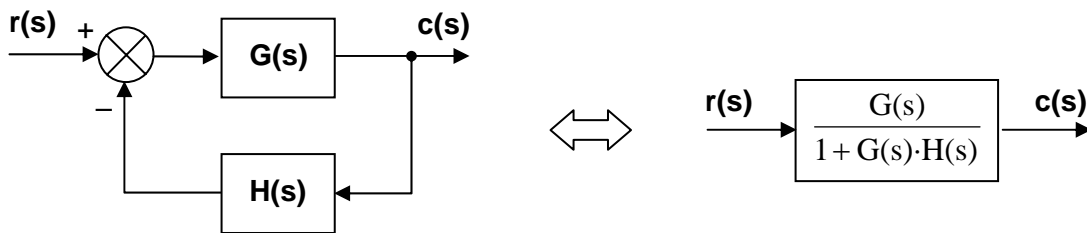
Sustituyendo la ecuación 3 en la 1 y ésta a su vez en la 2, se obtiene:

$$c(s) = G(s) \cdot [r(s) - H(s) \cdot c(s)] = G(s) \cdot r(s) - G(s) \cdot H(s) \cdot c(s)$$

de donde:

$$c(s) + G(s) \cdot H(s) \cdot c(s) = G(s) \cdot r(s) \Rightarrow c(s) [1 + G(s) \cdot H(s)] = G(s) \cdot r(s)$$

$$M(s) = \frac{c(s)}{r(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)}$$



8. ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE CONTROL

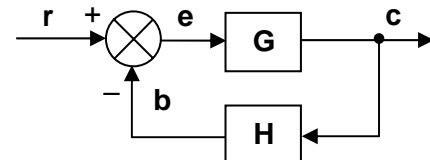
La estabilidad de un sistema de control está relacionada con su respuesta transitoria. Como ya enunciamos, **un sistema es estable si la salida tiende a un valor finito cuando la entrada toma un valor limitado**. No obstante, un sistema puede cumplir esta condición y ser relativamente inestable si el tiempo necesario para adaptarse a las perturbaciones exteriores o a los cambios de la señal de consigna es mayor que el que requiere la aplicación.

Para determinar si un sistema es o no estable antes de su fabricación, se utilizan varios métodos matemáticos, que por su complejidad quedan fuera de nuestro alcance y nuestros objetivos.

El siguiente ejemplo nos ilustra sobre un posible origen de inestabilidad de un sistema de control en lazo cerrado.

Sea el sistema de la figura, cuya función de transferencia es, como sabemos:

$$M = \frac{c}{r} = \frac{G}{1 + G \cdot H}$$



Cuando $G \cdot H = -1$, el denominador de la función de transferencia se hace 0, por lo que la función de transferencia se hace infinito y con ella la salida. El sistema es claramente inestable.

Sea ahora el ejemplo siguiente. Vamos a considerar el caso de que $G \cdot H < -1$.

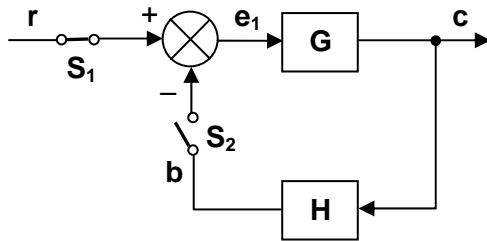


Figura 1

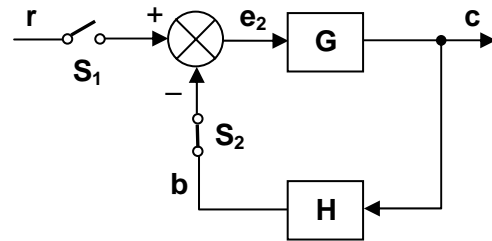


Figura 2

Con los interruptores en las posiciones de la figura 1, tenemos las relaciones:

$$e_1 = r \quad b = G \cdot H \cdot e_1.$$

Teniendo en cuenta $G \cdot H < -1$, tenemos: $b < -e_1 \Rightarrow -b > e_1$.

Cuando cerramos el interruptor S_2 , la nueva señal de error será $e_2 = r - b > r + e_1$.

Incluso aunque abramos el interruptor S_1 , para anular la señal de referencia "r", seguirá siendo $e_2 > e_1$.

En estas condiciones, tanto el error "e" como la salida "c" tienden a aumentar indefinidamente. El sistema es inestable.

De los casos expuestos podemos deducir que cuando en un sistema en bucle cerrado se cumple que $G \cdot H \leq -1$, el sistema es inestable.

Uno de los diversos métodos que se han desarrollado para determinar este requisito, o condición de inestabilidad, es el criterio de estabilidad de Bode, que consiste en simular de forma matemática la función $G \cdot H$. A continuación se aplica una señal senoidal a la entrada del modelo matemático y se va variando la frecuencia de la señal de entrada. Si para alguna frecuencia la señal de salida está invertida con respecto a la entrada y la amplitud de la señal de salida es igual o mayor que la de la entrada, el sistema será inestable (ya que se cumple $G \cdot H \leq -1$)