

3

Sistemas automáticos y de control

"El control automático ha desempeñado una función vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su extrema importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticos y similares, el control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura."

Katsuhiko Ogata, ingeniero y profesor japonés experto en sistemas de control



Conoce

1. Sistemas automáticos y de control. Estructura
2. Tipos de sistemas automáticos y de control: sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado
3. Elementos de un sistema de control
4. Función de transferencia
5. Sensores

Ejercicios resueltos

Practica paso a paso

Práctica 1. Accionamiento de un ventilador por temperatura

Repasa

Refuerza

1. Sistemas automáticos y de control. Estructura

Los **sistemas automáticos** se basan en sustituir a los operadores humanos por dispositivos mecánicos o electrónicos en un proceso. En todos los ámbitos se incrementa la automatización de los procesos, con objeto de mejorar la calidad de los productos, aumentar la producción, evitar situaciones de riesgo para el ser humano, etc.

En los sistemas automáticos distinguimos entre automatismos y robots:

- Un **automatismo** es un mecanismo o máquina que realiza una tarea concreta, pero cuyo funcionamiento no se puede modificar. Por ejemplo, el limpiaparabrisas de un coche sin sensor de lluvia, una cisterna de váter y una máquina expendedora son automatismos.
- Un **robot** es una máquina automática programable capaz de captar información de su entorno, procesar el resultado y actuar en consecuencia. Por ejemplo, los robots se utilizan en la industria (en cadenas de montajes, para trasladar mercancías, etc.), para apagar incendios, para detectar explosivos, en agricultura para la recolección, etc.



En un **automóvil** podemos encontrar distintos sistemas automáticos y de control, como la dirección asistida, el sistema de frenado ABS, el sistema de control de la estabilidad ESP, el sistema de control de la velocidad o el sistema de control del aparcamiento. Para ellos, el vehículo dispone de entre 200 y 3.000 sensores.

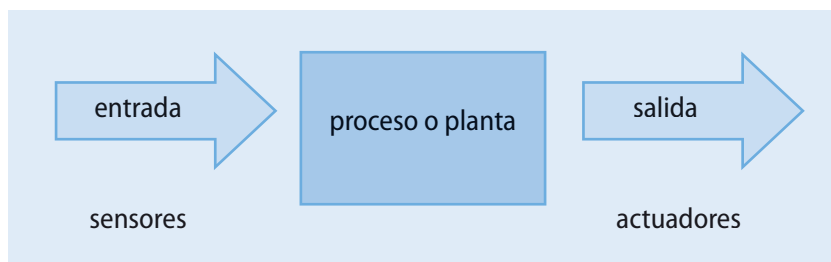
Un **sistema automático y de control** es un conjunto de componentes que actúan de forma coordinada, controlando el funcionamiento de un automatismo o de un proceso para que funcione de la manera prevista y en función del estado inicial.

■ Estructura de un sistema automático

Un sistema automático consta de tres bloques: entrada, proceso y salida.

- La **entrada** es una señal que contiene información, generalmente recogida por una magnitud física, y que pone en funcionamiento el proceso.
- El **proceso o planta** es el conjunto de fases o acciones que lleva a cabo el sistema para conseguir una función.
- La **salida** es la señal de respuesta, generada al final del sistema automático y que generalmente debe mantenerse en un rango gracias al control del propio sistema.

Los sistemas automáticos funcionan con la información proporcionada por los **sensores** y terminan el proceso activando **actuadores**. En términos generales, la estructura de un sistema de control sería la siguiente:



La finalidad de un sistema de control es conseguir que las variables de salida alcancen unos valores prefijados, mediante la manipulación de las **variables de control**.

Las **perturbaciones** son señales de entrada indeseables, producidas de forma interna o externa, que afectan al proceso o planta y modifican el funcionamiento del sistema.

2. Tipos de sistemas automáticos y de control: sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado

Existen dos tipos de sistemas de control: los de lazo abierto y los de lazo cerrado.

■ Sistemas de lazo abierto

En los **sistemas de lazo abierto** no se tiene en cuenta la señal de salida en la acción de control. La salida del sistema no afecta a la entrada. Por ejemplo, cuando encendemos un ventilador, éste funcionará siempre independientemente de la temperatura que tengamos en la habitación.

Las partes de un sistema de control de lazo abierto son:

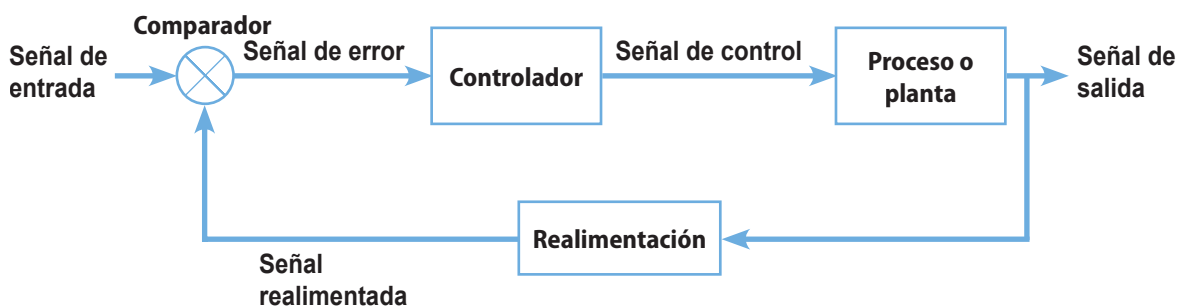


Cuando establecemos el tiempo de funcionamiento de una tostadora, fijamos la señal de entrada, que nos dará como resultado una tostada más o menos hecha, pero el sistema no variará si la tostada se nos está quemando.

En los sistemas de **lazo abierto**, la salida no se compara con la entrada. Estos sistemas son afectados por las perturbaciones.

■ Sistemas de lazo cerrado

En los **sistemas de lazo cerrado**, la señal de salida se compara con la de entrada para corregir los posibles errores y ajustar la acción de control al valor deseado. La señal de salida tiene influencia sobre la entrada al sistema, existe realimentación.



Un ejemplo clásico es el de regulación de la calefacción. Cuando regulamos el termostato de la calefacción a 21 °C, por ejemplo, este sistema mide periódicamente la temperatura ambiente y, si detecta que ha bajado, pone en marcha la calefacción. En este caso, los elementos que intervienen son:

- **Sensor:** forma parte de la realimentación y mide la temperatura ambiente.
- **Comparador:** compara la temperatura ambiente con la temperatura programada.
- **Controlador:** en función de la señal que le llega del comparador, decide si hay que activar o no la calefacción y en caso afirmativo envía una señal.
- **Proceso:** consiste en un actuador que, al recibir la señal del controlador, conmuta un circuito para encender o apagar la calefacción.

En los sistemas de **lazo cerrado**, la salida se compara con la entrada. Estos sistemas son más estables frente a las perturbaciones que los de lazo abierto.

Otros ejemplos serían el piloto automático de un avión o el sistema de un ascensor.

3. Elementos de un sistema de control

Los principales **elementos de un sistema de control** son los sensores, los transductores y captadores, los comparadores, los controladores o reguladores y los actuadores.

■ Sensores

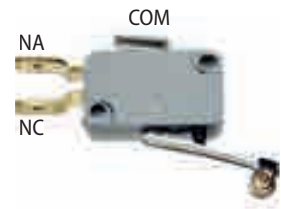
Un **sensor** es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas (temperatura, humedad, intensidad luminosa, distancia, aceleración, inclinación, presión, humedad, fuerza, etc.) y transformarlas en variables eléctricas. Es, pues, el encargado de medir el valor de una magnitud variable.

■ Transductores y captadores

A la salida de un sensor tenemos en ocasiones una señal que no se puede utilizar directamente en el sistema, por lo que es necesario transformarla en otra, normalmente de tipo eléctrico. El **transductor** transforma la señal de salida de un sensor en una señal eléctrica. Un **captador** es un transductor en que la señal de salida no es de tipo eléctrico.

Habitualmente, los transductores y captadores incluyen el sensor, por lo que habitualmente se utilizan indistintamente los tres términos.

Retomando el ejemplo clásico de regulación de la calefacción de la página anterior, y suponiendo un termostato de rueda, se necesita que la posición angular del cursor que indica la temperatura deseada se convierta a un tipo de señal que pueda utilizarse en el sistema de control (en este caso, una señal eléctrica). De esto se encarga el transductor.



Sensor de contacto: final de carrera.



Sensor de intensidad luminosa: resistencia variable con la luz (LDR).



Sensores de temperatura: resistencias variables con la temperatura (NTC y PTC).

■ Comparadores

Un **comparador** compara las señales de referencia y entrada. Cuando la diferencia supera un determinado valor, avisa al controlador. Los comparadores, llamados también *detectores de errores*, proporcionan una señal que indica la diferencia que existe entre dos valores: el valor obtenido a la salida y el valor deseado. Esta señal se conoce como **señal de error**.

■ Controladores o reguladores

Un **controlador** o **regulador** es el elemento encargado de mejorar la respuesta del sistema a la señal generada por el comparador. Recibe la señal de error, interpreta dicho error y actúa para compensarlo.

■ Actuadores

Los **actuadores** son los elementos que llevan a cabo la acción para la que ha sido diseñado el sistema. Reciben la orden del controlador y actúan sobre el proceso con el fin de eliminar el error.

Los actuadores ejecutan la acción calculada por el controlador, que modifica las variables de control. Pueden ser eléctricos (como los relés o los motores de corriente continua y alterna) y neumáticos o hidráulicos (como los cilindros y las válvulas).

En el caso del sistema de calefacción, la señal de entrada sería la temperatura requerida y la señal de error sería la diferencia entre la temperatura deseada y la temperatura real. El comparador generaría esta señal, que entraría en el controlador, y éste a su vez enviaría la orden al actuador para calentar el recinto.

EJERCICIOS

1. ♦♦ Di si los siguientes sistemas que puedes encontrar en una vivienda son de lazo abierto o de lazo cerrado: sistema de alarma antirrobo, lavavajillas, lavadora detectora de suciedad, tostador de pan, aire acondicionado, sistema de posicionamiento de un telescopio.
2. ♦♦♦ Explica cómo convertir en sistemas de lazo cerrado cada uno de los sistemas que en el ejercicio anterior has considerado de lazo abierto.

4. Función de transferencia

Para que un sistema de control sea efectivo deben cumplirse las siguientes **condiciones**:

- El sistema debe ser **estable**, es decir, la salida va a estar siempre dentro de un rango.
- La **velocidad de respuesta** debe ser lo suficientemente rápida.
- Se debe poder **reducir lo suficiente el error**, es decir, la diferencia entre la salida y la entrada.

Para analizar un sistema de control y mejorar sus características se utiliza la **modelización** o **modelado**. Se puede llevar a cabo de dos formas:

- Mediante **operaciones matemáticas**, como integrales, derivadas y ecuaciones diferenciales, que se resuelven a través de una función llamada *transformada de Laplace*. Estos métodos quedan fuera del alcance de este curso.
- Mediante **diagramas de bloques**, que nos permiten obtener la relación entre la entrada y la salida de un sistema.

Por sencillez utilizaremos el segundo método, si bien ambos necesitan la llamada **función de transferencia**.

Una **función de transferencia** es un modelo matemático que representa la relación entre la respuesta de un sistema y la señal de entrada. Matemáticamente, es el cociente entre la transformada de Laplace de la señal de salida y la de la señal de entrada:

$$P(s) = \frac{Z(s)}{X(s)}$$

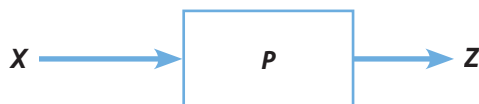
■ Diagramas de bloques. Cálculo de la función de transferencia

Los **diagramas de bloques** son diagramas de flujo que comprenden:

- **Rectángulos**, que representan **bloques de transferencia**
- **Círculos**, que representan **comparadores** y pueden ser nudos aditivos o diferenciadores
- **Flechas**, que indican el **sentido de circulación de la señal**

Cada bloque de transferencia representa una operación del sistema de control. Normalmente no hay un único bloque, sino que el sistema se subdivide en subsistemas más sencillos. Por ejemplo, si el diagrama tiene tres bloques, cada uno de los bloques (1, 2, 3) estará representado por una función de transferencia (P_1, P_2, P_3). Es decir, la función de transferencia del sistema, P , estará en función de P_1, P_2 y P_3 .

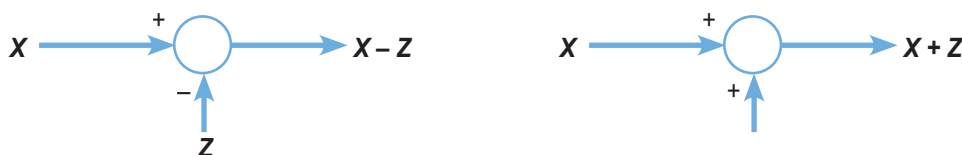
Vamos a calcular la función de transferencia en el caso más sencillo, en el que el sistema de control se representa por un único bloque, como se ve a continuación:



Si una variable entra en un bloque, la variable que tenemos a la salida es la de entrada multiplicada por la función de transferencia del bloque. Es decir, se cumple que:

$$Z = P \cdot X$$

Es decir, en este caso la función de transferencia es $P = Z / X$, como ya habíamos definido anteriormente. En el caso de que lleguen dos señales a un comparador, se suman o se restan según se indique:

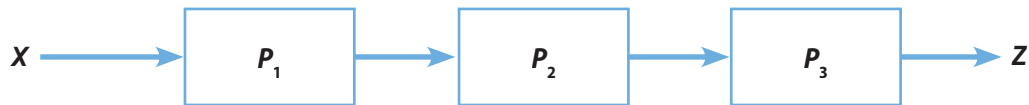


■ Obtención de algunas funciones básicas

A continuación vamos a hacer los cálculos para obtener algunas **funciones básicas**, que luego podremos utilizar directamente sin realizar la demostración.

1. Bloques en serie

Disponemos de varios bloques colocados como se muestra en la siguiente figura:

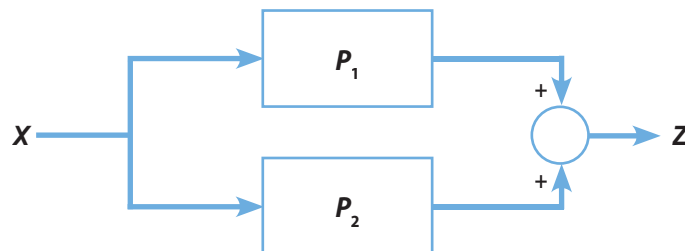


- A la salida del primer bloque tendremos $X \cdot P_1$
- A la salida del segundo bloque tendremos $X \cdot P_1 \cdot P_2$
- A la salida del tercer bloque tendremos Z , que es igual a $X \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$
- Por tanto, la función de transferencia es:

$$\frac{Z}{X} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$$

2. Bloques en paralelo

Disponemos de dos bloques colocados como se muestra en la siguiente figura:

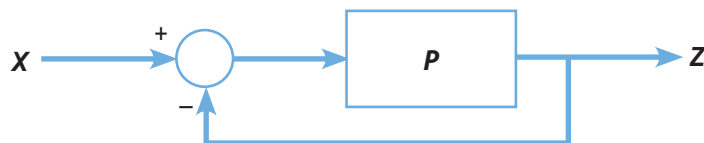


- A la salida del primer bloque tendremos $X \cdot P_1$
- A la salida del segundo bloque tendremos $X \cdot P_2$
- Entonces: $Z = (P_1 + P_2) \cdot X$, o bien:

$$\frac{Z}{X} = P_1 + P_2$$

3. Sistema realimentado negativamente con realimentación directa (sin bloques en la realimentación, o realimentación igual a la unidad)

Disponemos de un bloque y un comparador colocados como se muestra en la siguiente figura:

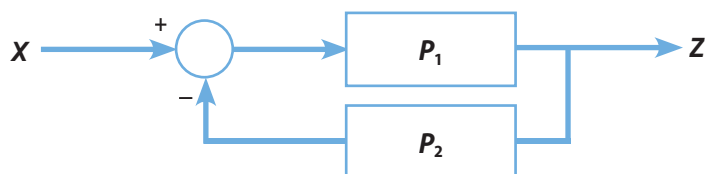


- En el comparador entran, por un lado, X , y por la realimentación, la propia variable Z
- A la salida del comparador tendremos $X - Z$
- A la salida del bloque tendremos $(X - Z) \cdot P$
- Por tanto, $Z = (X - Z) \cdot P$
- Si despejamos Z , tenemos que $Z + Z \cdot P = P \cdot X \Rightarrow (1 + P) \cdot Z = P \cdot X$
- Entonces:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P}{1 + P}$$

4. Sistema realimentado negativamente

Disponemos de dos bloques y un comparador colocados como se muestra en la siguiente figura:



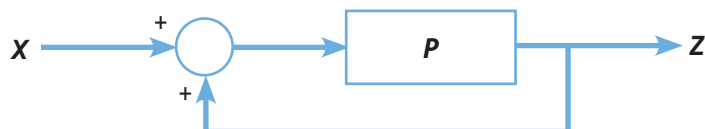
- En el comparador entran, por un lado, X , y por la realimentación, $Z \cdot P_2$
- A la salida del comparador tendremos $X - Z \cdot P_2$
- A la salida del bloque P_1 tendremos $(X - Z \cdot P_2) \cdot P_1$
- Por tanto, $Z = (X - Z \cdot P_2) \cdot P_1$
- Si despejamos Z , tenemos que $Z + Z \cdot P_1 \cdot P_2 = P_1 \cdot X \Rightarrow (1 + P_1 \cdot P_2) \cdot Z = P_1 \cdot X$
- Entonces:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 + P_1 \cdot P_2}$$

Observamos que, si $P_2 = 1$, obtenemos el caso 3, tanto en el diagrama como en la expresión.

5. Sistema realimentado positivamente con realimentación directa (sin bloques en la realimentación, o realimentación igual a la unidad)

Disponemos de un bloque y un comparador colocados como se muestra en la siguiente figura:

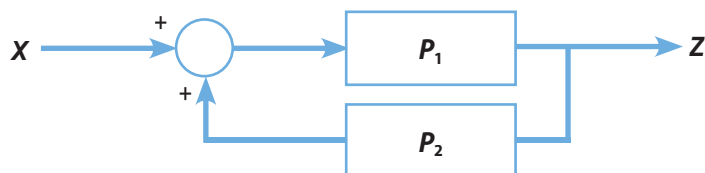


- En el comparador entran, por un lado, X , y por la realimentación, la propia variable Z
- A la salida del comparador tendremos $X + Z$
- A la salida del bloque tendremos $(X + Z) \cdot P$
- Por tanto, $Z = (X + Z) \cdot P$
- Si despejamos Z , tenemos que $Z - Z \cdot P = P \cdot X \Rightarrow (1 - P) \cdot Z = P \cdot X$
- Entonces:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P}{1 - P}$$

6. Sistema realimentado positivamente

Disponemos de dos bloques y un comparador colocados como se muestra en la siguiente figura:

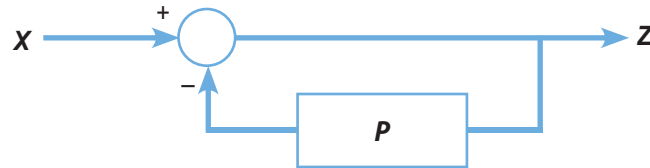


- En el comparador entran, por un lado, X , y por la realimentación, $Z \cdot P_2$
- A la salida del comparador tendremos $X + Z \cdot P_2$
- A la salida del bloque P_1 tendremos $(X + Z \cdot P_2) \cdot P_1$
- Por tanto, $Z = (X + Z \cdot P_2) \cdot P_1$
- Si despejamos Z , tenemos que $Z - Z \cdot P_1 \cdot P_2 = P_1 \cdot X \Rightarrow (1 - P_1 \cdot P_2) \cdot Z = P_1 \cdot X$
- Entonces:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 - P_1 \cdot P_2}$$

Observamos que, si $P_2 = 1$, obtenemos el caso 5, tanto en el diagrama como en la expresión.

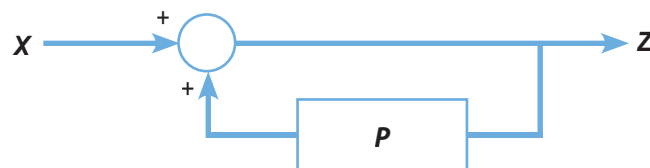
7. Sistema realimentado negativamente con bloque exclusivamente en la realimentación



- En el comparador entran, por un lado, X , y por la realimentación, $Z \cdot P$
- A la salida del comparador tendremos $X - Z \cdot P$
- Por tanto, $Z = X - Z \cdot P$
- Si despejamos Z , tenemos que $Z + Z \cdot P = X \Rightarrow (1 + P) \cdot Z = X$
- Entonces:

$$\frac{Z}{X} = \frac{1}{1 + P}$$

8. Sistema realimentado positivamente con bloque exclusivamente en la realimentación



- En el comparador entran, por un lado, X , y por la realimentación, $Z \cdot P$
- A la salida del comparador tendremos $X + Z \cdot P$
- Por tanto, $Z = X + Z \cdot P$
- Si despejamos Z , tenemos que $Z - Z \cdot P = X \Rightarrow (1 - P) \cdot Z = X$
- Entonces:

$$\frac{Z}{X} = \frac{1}{1 - P}$$

EJERCICIOS

3. ♦♦ Explica en qué consiste la modelización y qué es una función de transferencia.

4. ♦ Dibuja el diagrama de bloques correspondiente a cada una de estas funciones de transferencia:

a)

$$\frac{Z}{X} = \frac{P}{1 + P}$$

b)

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 + P_1 \cdot P_2}$$

c)

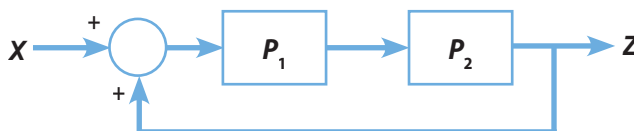
$$\frac{Z}{X} = \frac{P}{1 - P}$$

d)

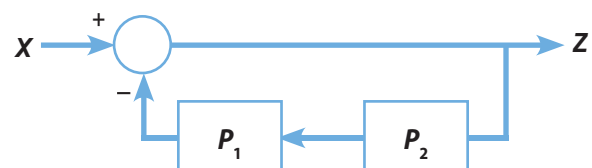
$$\frac{Z}{X} = P_1 + P_2$$

5. ♦ Obtén la función de transferencia de los siguientes sistemas representados por diagramas de bloques:

a)



b)



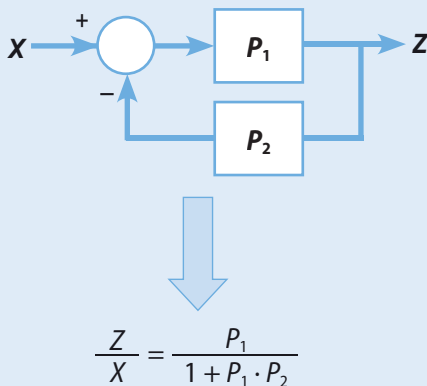
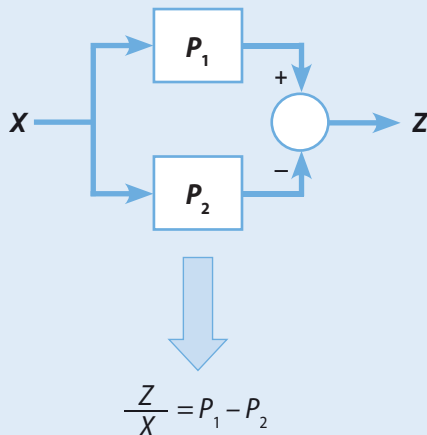
Solución: Es el caso 5, donde $P = P_1 \cdot P_2$, luego:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 - P_1 \cdot P_2}$$

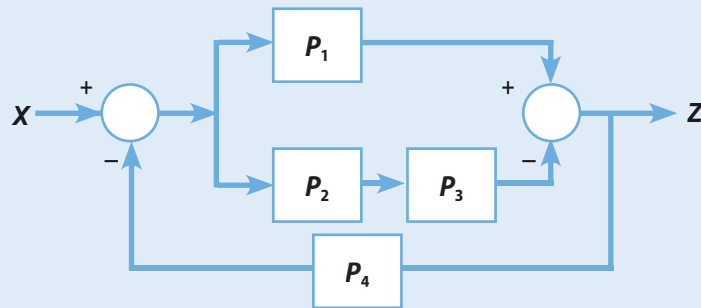
Solución: Es el caso 7, donde $P = P_1 \cdot P_2$, luego:

$$\frac{Z}{X} = \frac{1}{1 + P_1 \cdot P_2}$$

EJEMPLO



Veamos cuál es el procedimiento para obtener la función de transferencia en diagramas más complicados que los básicos. Supongamos que partimos del diagrama siguiente:



Método 1

Podemos dividir el sistema de control en subsistemas que ya conocemos por los casos anteriores.

Observamos que la parte superior es un diagrama en paralelo (caso 2, con signo negativo) y que la parte inferior es una realimentación con otro bloque (caso 6). Repasando los casos vistos, incluidos al margen, podemos afirmar que el bloque de arriba puede sustituirse por una única función, que es $P_1 - P_2 \cdot P_3$, ya que sabemos que P_2 y P_3 están a su vez en serie.

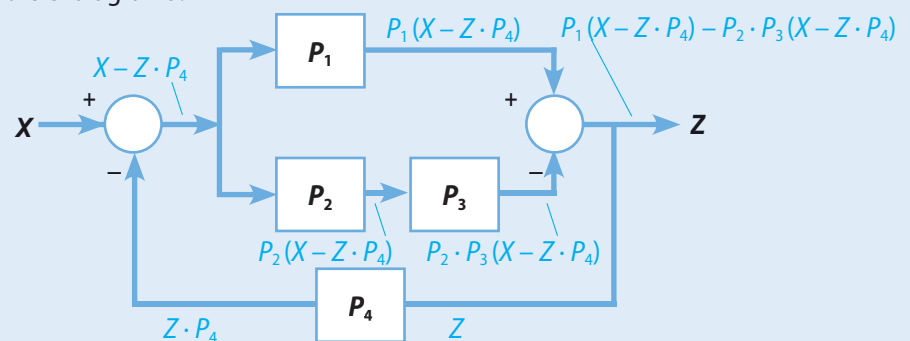
Sustituyendo esta función en el caso 6, obtenemos que la función de transferencia será:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1 - P_2 \cdot P_3}{1 + (P_1 - P_2 \cdot P_3) \cdot P_4}$$

(Observa en la segunda figura del margen que hemos sustituido P_1 por $P_1 - P_2 \cdot P_3$ y P_2 por P_4 .)

Método 2

También podemos ir viendo qué función sale de cada bloque, e irlo indicando sobre el diagrama:



A la salida tenemos $Z = P_1 \cdot (X - Z \cdot P_4) - P_2 \cdot P_3 \cdot (X - Z \cdot P_4)$.

Operamos para despejar Z:

$$Z + Z \cdot P_4 \cdot P_1 - Z \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = X \cdot P_1 - X \cdot P_2 \cdot P_3$$

$$(1 + P_4 \cdot P_1 - P_2 \cdot P_3 \cdot P_4) \cdot Z = (P_1 - P_2 \cdot P_3) \cdot X$$

Y obtenemos la función de transferencia:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1 - (P_2 \cdot P_3)}{1 + (P_4 \cdot P_1) - (P_2 \cdot P_3 \cdot P_4)}$$

(expresión igual a la que hemos hallado por el primer método).

5. Sensores

Hemos visto que dentro de un sistema de control encontramos siempre sensores y actuadores. En lo que a los sensores (transductores y captadores) se refiere, habrá tantos como variables a medir. Existe un sensor para cada tipo de magnitud que se tenga que medir. La siguiente tabla recoge algunos de ellos.

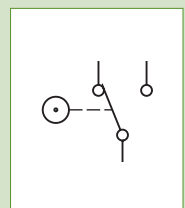
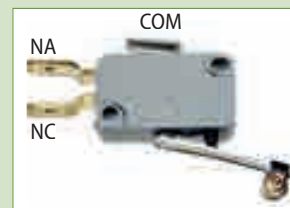
Magnitud que se mide	Sensores
Posición y proximidad	<ul style="list-style-type: none"> • Final de carrera • Sensor inductivo • Sensor capacitivo • Sensor óptico: infrarrojos • Sensor de ultrasonidos
Luminosidad	<ul style="list-style-type: none"> • LDR • Fototransistor
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Termistor (NTC, PTC) • Termopar
Humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Detector de humedad del suelo • Detector de temperatura ambiente y humedad relativa
Velocidad	<ul style="list-style-type: none"> • Tacómetro
Fuerza y presión	<ul style="list-style-type: none"> • Galga extensiométrica • Sensor piezoeléctrico
Ángulos	<ul style="list-style-type: none"> • Potenciómetro • <i>Encoder</i> o codificador rotatorio
Movimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Radar • Sensor PIR

■ Sensores de posición y proximidad

Sirven para determinar la posición de un objeto, dentro de un margen, o bien su presencia o ausencia.

Conmutador final de carrera

Cambia de posición al ser accionada la palanca de su posición NC a NA. Dispone de tres contactos: NC (normalmente cerrado), NA o NO (normalmente abierto) y COM (común).



Símbolo eléctrico.

Sensor capacitivo

Se basa en la variación del campo eléctrico entre las placas de un condensador, al cambiar su capacidad. La capacidad de un condensador puede cambiar por la distancia entre sus placas, o al modificar el material dieléctrico que está entre ellas.



Sensor inductivo

Estos sensores detectan la variación del flujo magnético creado por una bobina cuando el campo magnético creado por ella es atravesado por un objeto metálico. Se emplean para detectar objetos de metal o ferromagnéticos. Son muy usados en la industria (por ejemplo, en los automóviles, ya que la mayoría de sus piezas son metálicas).



Ejemplo de uso para el autonivelado de la base metálica de una impresora 3D.

Sensor óptico: infrarrojos

Consta de un emisor de luz y un receptor, ambos apuntando en la misma dirección, y su funcionamiento se basa en la capacidad de reflexión del objeto y la detección del rayo reflejado por el receptor.



Sensor de infrarrojos CNY70.

Sensor de ultrasonidos

Utiliza ondas de alta frecuencia y mide el tiempo que tarda la onda en regresar para calcular la distancia a un objeto. Consta de dos partes: el emisor (que emite la señal) y el receptor (que recibe la señal si ésta rebota sobre algún obstáculo cercano).

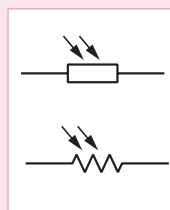


Sensor de ultrasonidos HC-SR04.

■ Sensores de luminosidad

Resistencia variable con la luz (LDR)

Un LDR (*light-dependent resistor*) o fotorresistencia es una resistencia cuyo valor varía con la cantidad de luz que incide sobre ella. Cuanta más luz recibe, menos resistencia ofrece al paso de la corriente.

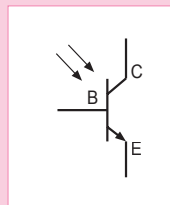


Símbolo eléctrico.

Fototransistor

Es un transistor que permite el paso de corriente del colector al emisor, cuando recibe luz en su base.

En el fototransistor, la luz actúa como corriente de base. Las patillas que se usan son: colector y emisor. Cuando utilizamos uno de tres patillas, normalmente se deja la base sin conectar.

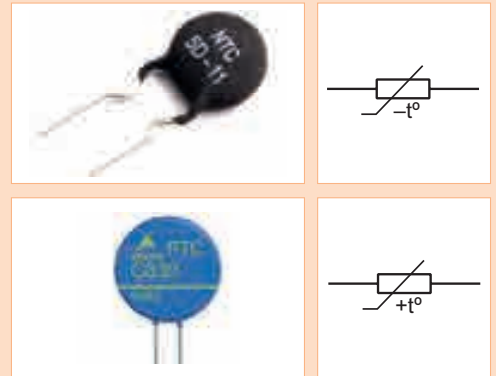


Símbolo eléctrico.

■ Sensores de temperatura

Termistor

Los termistores se basan en la variación de la resistencia con la temperatura. Pueden ser NTC (*negative temperature coefficient*), si el valor de su resistencia disminuye cuando aumenta la temperatura ($R \downarrow, T \uparrow$), o PTC (*positive temperature coefficient*), si el valor de su resistencia aumenta cuando aumenta la temperatura ($R \uparrow, T \uparrow$).



Símbolos eléctricos.

Termopar

Los termopares se basan en el efecto Seebeck: si se unen dos metales por un extremo y se calienta la unión, se produce una diferencia de potencial entre los extremos libres que es proporcional a la diferencia de temperaturas



■ Sensores de humedad

Detector de humedad del suelo

Da un valor de voltaje analógico variable en función del nivel de humedad que detecta. Mide la humedad entre dos terminales. Aunque los hay de muchos tipos, los más habituales se basan en el aumento de la conductividad de la tierra con el incremento de agua en su composición.



Detector de temperatura ambiente y humedad relativa

Mide un rango de temperatura y un rango de humedad. En el caso del DHT11, de 0 a 50 °C y del 20 al 80%.



Sensor DHT11.

■ Sensores de velocidad

Tacómetro

Los tacómetros miden velocidades angulares. Algunos se basan en la ley de Faraday, es decir, en la fuerza electromotriz inducida en un conductor que atraviesa un campo magnético. Se acoplan a una máquina y miden su velocidad de giro. Actualmente se usan tacómetros digitales.



■ Sensores de fuerza y presión

Galga extensiométrica

Las galgas extensiométricas se basan en la variación de la resistencia eléctrica sufrida por un conductor al deformarse cuando se le aplica una fuerza. Consisten en un alambre muy fino o en un papel metálico en forma de rejilla.



Sensor piezoeléctrico

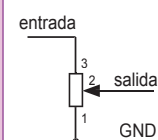
Se basa en la propiedad de los materiales con estructura cristalina de generar una tensión eléctrica entre sus caras al aplicar una fuerza sobre ellas, que les produce una deformación.



■ Sensores de medida de ángulos

Potenciómetro

Se basa en la variación de la resistencia de un conductor en función de la longitud de éste.



Símbolo eléctrico.

Encoder o codificador rotatorio

Es un dispositivo que convierte el ángulo de giro de un objeto (por ejemplo, un motor) en un código digital. Consta de un disco con ranuras y un emisor y un receptor de luz, o bien con bandas blancas y negras. Al girar el disco, la luz pasa por las ranuras o bandas y produce señales. Midiendo el número de señales, puede saberse el ángulo del desplazamiento.



■ Sensores de movimiento

Radar

Sirve para detectar, mediante el empleo de ondas electromagnéticas, la presencia de objetos situados en su campo de propagación, y determinar la distancia a la que se encuentran. Puede emplearse en distancias muy largas, del orden de kilómetros.



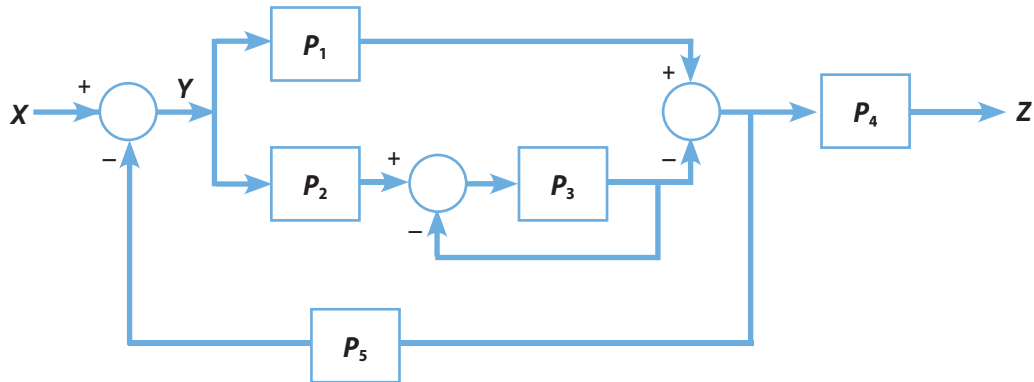
Sensor PIR

Todos los cuerpos emiten una cierta cantidad de energía infrarroja, mayor cuanto mayor es su temperatura. Los dispositivos PIR (*passive infrared*) disponen de un sensor piezoeléctrico capaz de captar esta radiación y convertirla en una señal eléctrica.



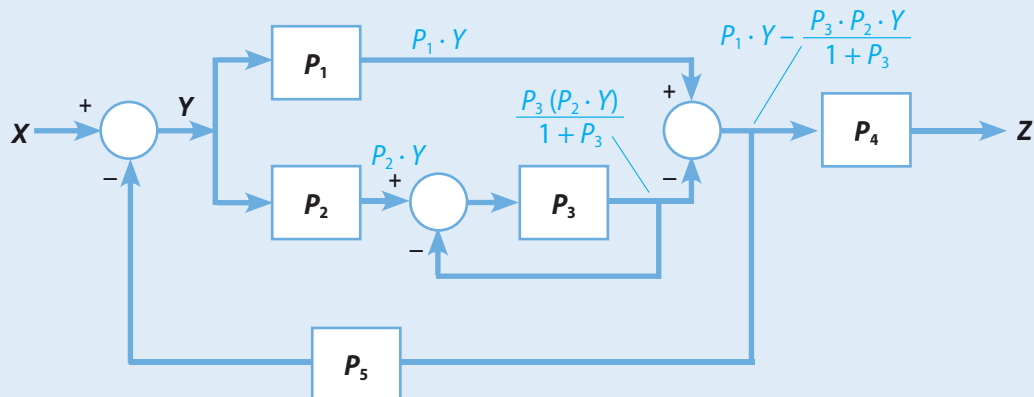
Ejercicios resueltos

1. ♦♦ Dado el siguiente diagrama de bloques, calcula:
- La función de transferencia en función de Y : $Z = f(Y)$
 - La función de transferencia en función de X : $Z = f(X)$



Solución

a) Para obtener $Z = f(Y)$ sólo tenemos que ir deduciendo las señales a la salida de cada bloque en función de Y :

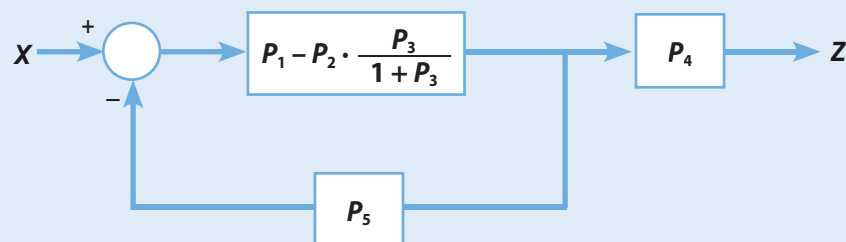


A la salida del bloque P_3 hemos utilizado el caso 3 de los ejemplos propuestos en el apartado 4 del "Conoce", donde en lugar de entrar X entra $P_2 \cdot Y$.

Entonces:

$$\frac{Z}{Y} = P_4 \cdot \left(P_1 - P_2 \cdot \frac{P_3}{1 + P_3} \right)$$

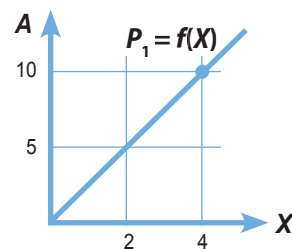
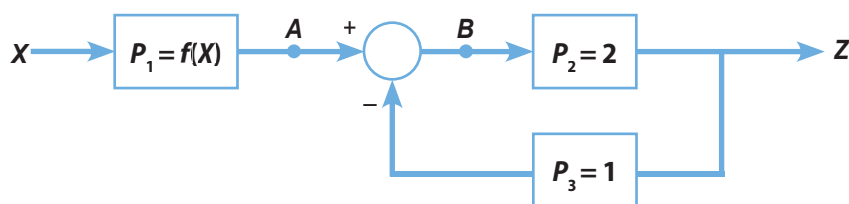
b) Usamos la expresión anterior para sustituir los bloques de la parte superior, y obtenemos el caso 4 de los ejemplos:



Por lo tanto:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1 - P_2 \cdot \frac{P_3}{1 + P_3}}{1 + P_5 \cdot \left(P_1 - P_2 \cdot \frac{P_3}{1 + P_3} \right)} \cdot P_4$$

2. ♦♦♦ Se tiene el siguiente sistema de control, donde las funciones de transferencia P_2 y P_3 son constantes y P_1 sigue una función:



Sabiendo que la función de transferencia del elemento A responde a la función representada, calcula:

- El valor de la señal en los puntos A, B y Z para el valor de entrada $X = 4$.
- Para qué valor de la entrada X la salida vale $Z = \frac{20}{3}$

Solución

- a) Obtenemos la función de transferencia del sistema de control y sustituimos los valores:

$$A = X \cdot P_1$$

$$B = X \cdot P_1 - Z \cdot P_3$$

$$Z = P_2 \cdot (X \cdot P_1 - Z \cdot P_3)$$

Si despejamos Z:

$$Z = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 + P_2 \cdot P_3} \cdot X = \frac{10 \cdot 2}{1 + 2 \cdot 1} \cdot 4 = \frac{80}{3}$$

Hemos sustituido cada bloque por su valor. El de P_1 lo obtenemos de la gráfica, ya que para $X = 4$, P_1 vale 10.

Sustituyendo los valores:

$$A = X \cdot P_1 = 4 \cdot 10 = 40$$

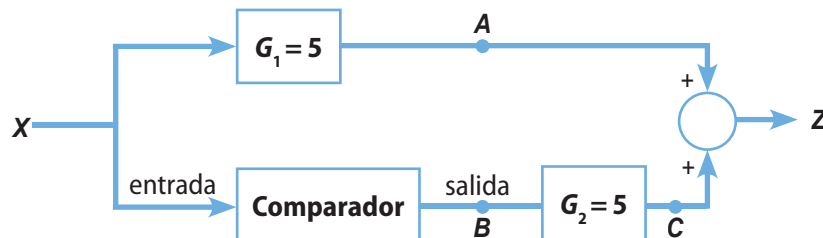
$$B = X \cdot P_1 - Z \cdot P_3 = 40 - \frac{80}{3} = \frac{40}{3}$$

- b) Si $Z = \frac{20}{3}$, entonces, despejando en la expresión de Z, obtenemos que $X = 2$.

Comprobación:

$$Z = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 + P_2 \cdot P_3} \cdot X = \frac{5 \cdot 2}{1 + 2 \cdot 1} \cdot 2 = \frac{20}{3}$$

3. ♦♦♦ Se tiene el sistema de control de la figura, compuesto por dos amplificadores de ganancia $G = 5$ y un comparador que sigue la siguiente función de transferencia: si su entrada es mayor o igual que 2, la salida es 1; si su entrada es menor que 2, la salida es -1 . Determina el valor de la señal en los puntos A, B y C y en la salida, para una entrada $X = 1$.



Solución

Sustituimos los valores en función de los bloques, sabiendo que, para $X = 1$, la función de transferencia del comparador toma el valor -1 :

$$A = 5 \cdot X = 5$$

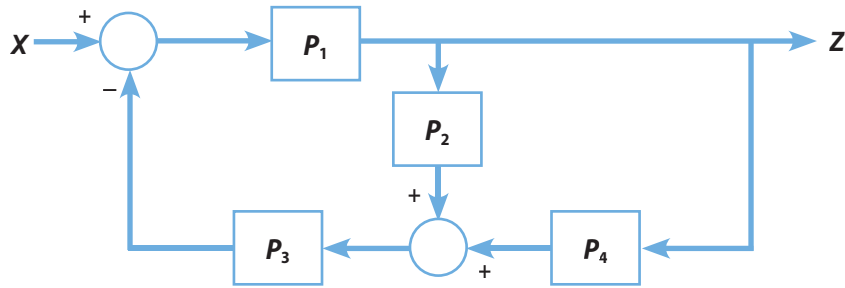
$$B = (-1) \cdot X = -1$$

$$C = (-1) \cdot 5 \cdot X = -5$$

$$Z = 5 \cdot X + (-1) \cdot 5 \cdot X = 0$$

Ejercicios resueltos

4. ★★★ Dado el siguiente diagrama de bloques, calcula la función de transferencia $Z = f(X)$.



Solución

Para calcular la función de transferencia $Z = f(X)$ observamos que:

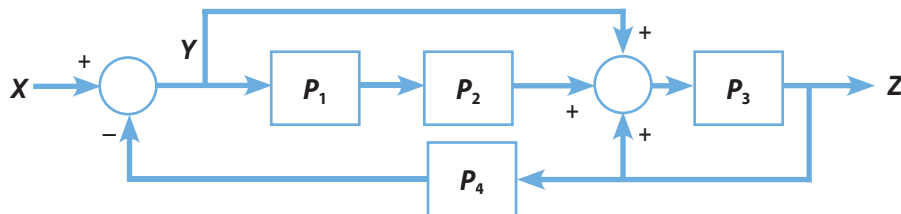
- Los bloques P_2 y P_4 están en paralelo, luego se sustituyen por $P_2 + P_4$.
- Dichos bloques, a su vez, están en serie con P_3 , por lo que a la salida de P_3 tenemos $P_3 \cdot (P_2 + P_4)$.
- El sistema queda reducido al caso 4, con P_1 arriba y $P_3 \cdot (P_2 + P_4)$ en la realimentación.

Por tanto:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 + P_1 \cdot P_3 \cdot (P_2 + P_4)}$$

5. ★★★ Dado el siguiente diagrama de bloques, calcula:

- La función de transferencia en función de Y : $Z = f(Y)$
- La función de transferencia en función de X : $Z = f(X)$



Solución

- a) Observamos que los bloques que entran en paralelo en el comparador son: por la primera rama, la unidad, es decir, Y ; por la segunda rama, $P_1 \cdot P_2 \cdot Y$; y por la tercera, Z .

Luego a la salida de los bloques en paralelo tenemos $Y + P_1 \cdot P_2 \cdot Y + Z$.

Y a la salida del sistema: $Z = P_3 \cdot (Y + P_1 \cdot P_2 \cdot Y + Z)$.

Si operamos para despejar:

$$\frac{Z}{Y} = P_3 \cdot \frac{1 + P_1 \cdot P_2}{1 - P_3}$$

- b) Observamos que $Y = X - P_4 \cdot Z$, y, del resultado del apartado anterior tenemos que:

$$Y = \frac{Z}{P_3 \cdot \frac{1 + P_1 \cdot P_2}{1 - P_3}}$$

Sustituyendo en la expresión anterior:

$$\frac{Z}{P_3 \cdot \frac{1 + P_1 \cdot P_2}{1 - P_3}} = X - P_4 \cdot Z \Rightarrow \frac{Z}{P_3 \cdot \frac{1 + P_1 \cdot P_2}{1 - P_3}} + P_4 \cdot Z = X \Rightarrow \left(\frac{1}{P_3 \cdot \frac{1 + P_1 \cdot P_2}{1 - P_3}} + P_4 \right) \cdot Z = X \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left(\frac{1 - P_3}{P_3 \cdot (1 + P_1 \cdot P_2)} + P_4 \right) \cdot Z = X$$

Y entonces: $\frac{Z}{X} = \frac{1}{\frac{1 - P_3}{P_3 \cdot (1 + P_1 \cdot P_2)} + P_4}$

6. ♦♦ Obtén el diagrama de bloques correspondiente a:

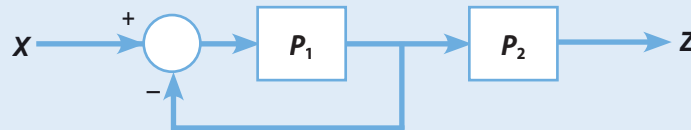
a) Un sistema con la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 + P_1} \cdot P_2$$

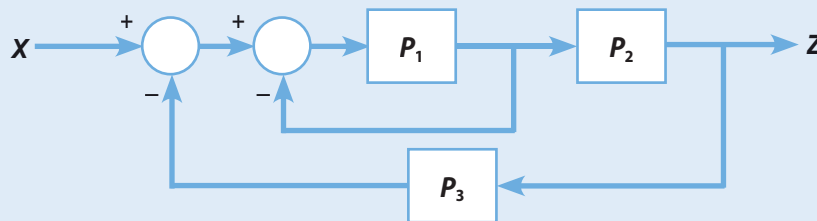
b) El sistema anterior si se realimenta negativamente con una función de transferencia P_3 .

Solución

a) Dos bloques en paralelo en el que el primero es el caso 3:



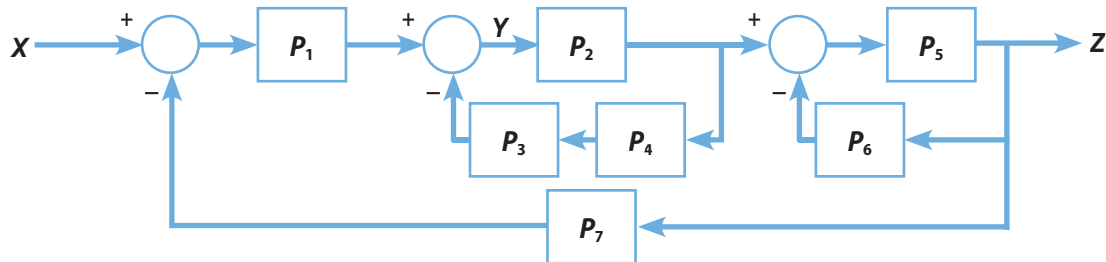
b) Realimentamos el sistema anterior como indica el enunciado:



7. ♦♦♦ Dado el siguiente diagrama de bloques, calcula:

a) La función de transferencia en función de Y: $Z = f(Y)$

b) La función de transferencia en función de X: $Z = f(X)$



Solución

a) Observamos que los bloques P_5 y P_6 se pueden sustituir por:

$$\frac{P_5}{1 + P_5 \cdot P_6}$$

Por tanto:

$$\frac{Z}{Y} = P_2 \cdot \frac{P_5}{1 + P_5 \cdot P_6}$$

b) Observamos que tenemos el caso 4, donde la realimentación es P_7 , y la rama de arriba puede sustituirse por un único bloque, formado por tres bloques en serie, en orden de izquierda a derecha:

$$P_1 \quad \frac{P_2}{1 + P_2 \cdot P_3 \cdot P_4} \quad \frac{P_5}{1 + P_5 \cdot P_6}$$

La segunda expresión se ha obtenido aplicando el caso 4 con realimentación $P_3 \cdot P_4$.

Operando:

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1 \cdot \frac{P_2}{1 + P_2 \cdot P_3 \cdot P_4} \cdot \frac{P_5}{1 + P_5 \cdot P_6}}{1 + P_7 \cdot P_1 \cdot \frac{P_2}{1 + P_2 \cdot P_3 \cdot P_4} \cdot \frac{P_5}{1 + P_5 \cdot P_6}}$$

Práctica 1. Accionamiento de un ventilador por temperatura

Ejercicio 1. Conectar y programar el sensor NTC y el circuito de adaptación del motor de corriente continua

Vamos a construir y programar un ventilador que se ponga en marcha cuando la temperatura supere un cierto umbral. En la segunda parte de la práctica haremos que, según se vaya incrementando la temperatura, el ventilador gire más rápido.

Como sensor de temperatura vamos a utilizar una resistencia variable con la temperatura (NTC) de $4.700\ \Omega$. Se puede usar cualquier otra, pero en tal caso podría ser necesario cambiar el valor de la otra resistencia que tenemos en el divisor de tensión y, lógicamente, los valores de tensión que obtendríamos variarían (pero esto es fácil de ajustar visualizando dichos valores en el monitor serie).

El ventilador estará construido con un motor de corriente continua al que habremos acoplado unas hélices en su eje. Los motores muy pequeños se pueden accionar con Arduino, aunque no es recomendable. Si el motor tiene que mover cierta carga, se puede utilizar una tarjeta Shield, o montar un circuito que proporcione suficiente corriente y proteja la placa. La tarjeta Shield es una extensión de Arduino que tiene esta capacidad.

En esta práctica usaremos un circuito con una alimentación externa para el motor, aunque no necesitemos mucha potencia.

1. Monta el circuito de la figura 1. La explicación del circuito es la siguiente: mediante la resistencia de $10k$ y el termistor de $4k7$ formamos un divisor de tensión que hará que el pin A0 reciba una tensión variable entre 0 y 5 V , que se traduce a valores digitales en la propia placa, entre 0 y 1.024 , para que conformen la señal digital. Conecta a la entrada analógica A0 el punto de unión de la resistencia con el sensor NTC.
2. Monta el circuito de la figura 2. La explicación del circuito es la siguiente: el transistor amplifica la corriente que le llega al motor, para que tenga más potencia; el diodo protege la placa Arduino, que se alimenta con 5 V , dejando que la corriente de 9 V sólo circule para alimentar el motor. En este montaje utilizamos también un pin digital PWM. Necesitamos una fuente de alimentación externa (una pila de 9 V). La masa de la fuente debe estar conectada a la masa de la placa Arduino, pues si no es así el circuito se desestabiliza. Esto es una pauta que se debe seguir en todos los montajes de este tipo.

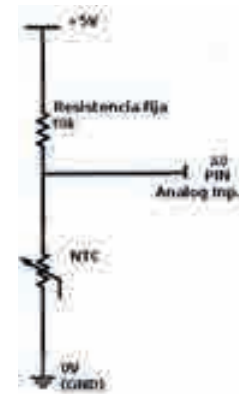


Fig. 1

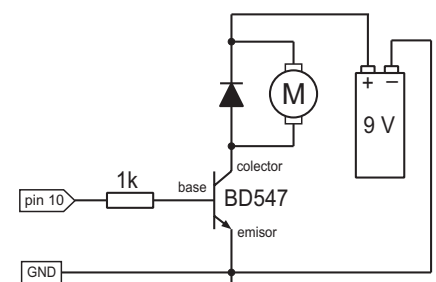
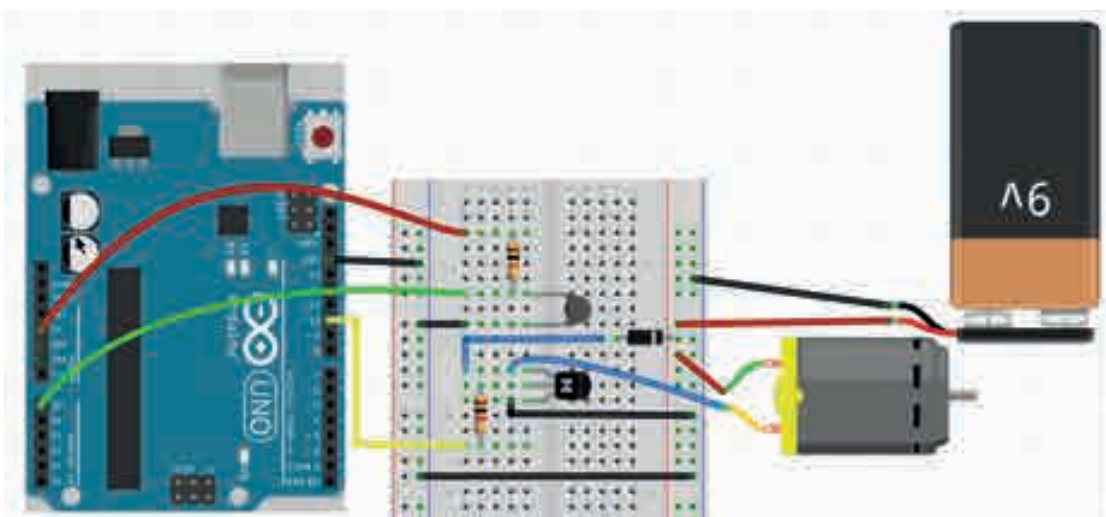


Fig. 2



```

int ntc=A0;
int lectura;
int motorPin = 10;

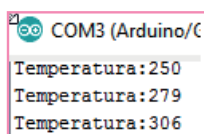
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(motorPin, OUTPUT);
}

void loop() {
  lectura=analogRead(ntc);
  Serial.print("Temperatura:");
  Serial.println(lectura);
  delay(500);

  if(lectura<310 && lectura>=0)
  {
    digitalWrite(motorPin, HIGH);
    delay(1000);
  }
  else{
    digitalWrite(motorPin, LOW);
    delay(1000);
  }
}

```

Fig. 3



COM3 (Arduino/C)

Temperatura:250
Temperatura:279
Temperatura:306

Fig. 4

```

int ntc=A0;
int lectura;
int motorPin = 10;
int velocidad;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(motorPin, OUTPUT);
}

void loop() {
  lectura=analogRead(ntc);
  Serial.print("Temperatura:");
  Serial.println(lectura);
  Serial.print("Velocidad:");
  Serial.println(velocidad);
  delay(500);

  if(lectura<310 && lectura>=0)
  {
    velocidad = map(lectura, 340, 350, 1024, 0);
    digitalWrite(motorPin, velocidad);
    delay(1000);
  }
  else{
    digitalWrite(motorPin, LOW);
    delay(1000);
  }
}

```

Fig. 5

Función map()
map(value, fromLow, fromHigh,
toLow, toHigh)

Fig. 6



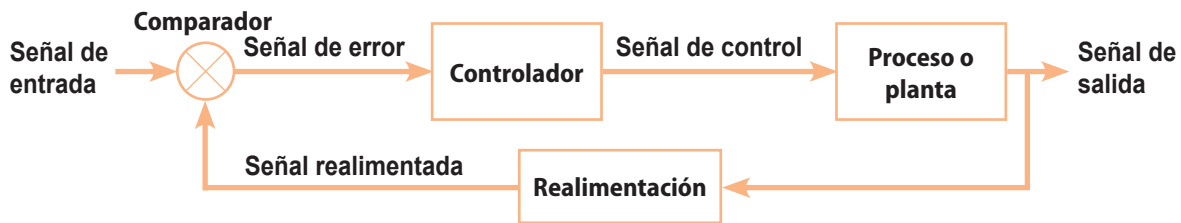
- Una vez conectada la placa Arduino al ordenador, abre el IDE de Arduino. Carga desde el IDE el programa **UD03_P1_1_programa.ino** de la unidad 3 del CD virtual.
 - Como puedes ver (figura 3), damos el nombre **ntc** a nuestra entrada analógica y creamos la constante **lectura** para almacenar el valor de la temperatura.
 - En **void setup()** inicializamos el monitor serie, que va a ser fundamental en esta práctica. Definimos el puerto 10, donde conectaremos el motor como salida.
 - Con la instrucción **lectura=analogRead(ntc)**, lo primero que hacemos es leer el valor del sensor NTC y almacenarlo en **lectura**, y después lo mostramos por el puerto serie.
- Muy importante:** Cuando volquemos el programa en la placa, si vamos a **Herramientas / Monitor serie**, se nos irán mostrando los valores que nos da el sensor NTC. Si lo calentamos (por ejemplo, echándole el aliento), veremos que los valores varían (para el sensor NTC de nuestro ejemplo, entre 340 y 250) (figura 4). **Esta es la primera comprobación que debes realizar.** En nuestro caso, establecemos un umbral de 310 para que el motor se ponga en marcha.
- En el bucle **if** establecemos que, si el valor baja de 310, se ponga en marcha el motor; con **else** nos aseguramos de apagarlo.
 - Vuelca el programa a la placa, abre el monitor serie y ajusta los valores del bucle **if** en función de los valores máximos y mínimos que muestre.
 - Guarda el archivo como **UD03_P1_1_nombreapellido.ino**.

Ejercicio 2. Hacer que la velocidad del motor varíe en función del calor

- Carga desde el IDE el programa **UD03_P1_2_programa.ino** de la unidad 4 del CD virtual.
- Introducimos una nueva variable, **velocidad**, que es donde guardaremos la velocidad a la que irá el motor una vez adaptada la señal (figura 5).
- En **void loop()** vamos a mostrar por pantalla la velocidad que estamos poniendo en el motor. Al ser una salida PWM, su valor variará entre 0 y 1.024.
- En el bucle **if**, en lugar de poner el valor **motorPin** a **HIGH** vamos a escribir el valor que tenga la variable **velocidad**.
- Los rangos de lectura del sensor NTC, teóricamente, van de 1.024 a 0 (lo cual correspondería a temperaturas de 124 a -24 °C), pero hemos comprobado mediante el monitor serie que realmente los valores entre los que se mueve son 350 y 240.
- Los rangos de escritura en el pin 10 del motor van de 0 a 1.024.
- Para convertir la señal utilizamos la función **map** (figura 6), mediante la cual convertimos los valores del rango 240-350 a 1.024-0; además, invertimos la señal para que, cuando disminuya la resistencia, aumente la tensión en el motor.
- Por último, con **digitalWrite** escribimos en el motor el valor de **velocidad**.
- Vuelca el programa a la placa, abre el monitor serie y anota los valores del sensor NTC. Ajusta los valores del bucle **if** en función de los valores máximos y mínimos que muestre, así como los parámetros de **map** para que se ajusten al modelo de NTC que has montado.
- Guarda el archivo como **UD03_P1_2_nombreapellido.ino**.

Repasa

- Un **sistema automático y de control** es el conjunto de componentes que actúan de forma coordinada, controlando el funcionamiento de un automatismo o de un proceso para que funcione de la manera prevista y en función del estado inicial.
- La **estructura de un sistema de lazo cerrado** es la siguiente:



- La finalidad de un sistema de control es conseguir que las variables de salida alcancen unos valores prefijados, mediante la manipulación de las **variables de control**.
- Los principales **elementos de un sistema de control** son los sensores, los transductores y captadores, los comparadores, los controladores o reguladores y los actuadores.
- Para analizar un sistema de control y mejorar sus características se utiliza la **modelización** o **modelado**.
- Una **función de transferencia** es un modelo matemático que representa la relación entre la respuesta de un sistema y la señal de entrada. Matemáticamente, es el cociente entre la transformada de Laplace de la señal de salida y la de la señal de entrada:

$$P(s) = \frac{Z(s)}{X(s)}$$

- Algunos **ejemplos sencillos** de cálculo de la **función de transferencia**:

Caso 1 $\frac{Z}{X} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$	Caso 2 $\frac{Z}{X} = P_1 + P_2$
Caso 3 $\frac{Z}{X} = \frac{P}{1 + P}$	Caso 5 $\frac{Z}{X} = \frac{P}{1 - P}$
Caso 4 $\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 + P_1 \cdot P_2}$	Caso 6 $\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 - P_1 \cdot P_2}$
Caso 7 $\frac{Z}{X} = \frac{1}{1 + P}$	Caso 8 $\frac{Z}{X} = \frac{1}{1 - P}$

En la tabla se han ordenado los casos para que se aprecie por columnas que los casos 3 y 7 son un caso particular del caso 4 y que los casos 5 y 8 son un caso particular del 6, cuando los bloques correspondientes no están, que es como decir que valen la unidad.

ACTIVIDADES DE REFUERZO

1. ✦ Define los siguientes términos, referidos a un sistema de control: sensor, transductor, comparador, actuador, planta o proceso, entrada.
2. ✦ Explica los elementos que diferencian un sistema de control de lazo abierto de uno de lazo cerrado. Cita un ejemplo de aplicación de cada tipo de sistema de control.
3. ✦ Dibuja un sistema de control de lazo cerrado e indica en él los principales componentes y las variables que entran en juego.
4. ✦✦ Explica en qué bloques del sistema del ejercicio anterior incluirías los siguientes elementos: un cilindro neumático, un motor eléctrico, una resistencia variable con la luz.
5. ✦ ¿Qué representa la función de transferencia en un sistema de control?
6. ✦✦ ¿Qué es una perturbación en un sistema de control? ¿Cómo afecta a un sistema de lazo cerrado en comparación con uno de lazo abierto?
7. ✦✦ Explica la función del comparador en un sistema de control. ¿En qué tipo de sistemas se usa?
8. ✦✦ Suponiendo que una persona que monta en bicicleta constituya un sistema de control de lazo cerrado...
 - a) Describe el sistema, indicando cuáles serían los principales componentes.
 - b) Explica qué causas lo podrían convertir en sistema de control de lazo abierto.
9. ✦✦ ¿Cómo podemos utilizar una resistencia variable como transductor de posición en un sistema de control?
10. ✦✦ Explica qué diferencia hay entre un termistor y un termopar.
11. ✦✦ Supongamos que las funciones de transferencia de un sistema de control de lazo cerrado son: planta (G), realimentación (H) y controlador (C). Dibuja el diagrama de bloques del sistema y obtén la función de transferencia.

ACTIVIDADES PRÁCTICAS



En esta actividad vamos a hacer una infografía con **Piktochart** para explicar el funcionamiento de distintos transductores en un sistema de control.

1. Piktochart dispone de una versión que puedes utilizar gratuitamente, pero puedes registrarte o acceder con tu cuenta de correo de Gmail o de Facebook.
2. Una vez que hayas accedido a Piktochart, tienes que seleccionar el formato que desees para tu infografía.
3. Busca imágenes e información sobre los siguientes transductores:
 - Galga extensiométrica
 - Transductor de presión piezoeléctrico
 - Detector de proximidad capacitivo
 - Detector de proximidad inductivo
 - Detector de ultrasonidos
 - Encoder o codificador rotatorio
 - Tacómetro
4. Completa tu infografía con la información recopilada. Recuerda que una infografía sirve para comunicar información de forma muy visual. Por tanto, no es necesario incluir descripciones con un exceso de texto escrito.
5. Finalmente, puedes descargarla como imagen con formato PNG.

PROBLEMAS

1. ♦ Demuestra que la relación entre la señal de salida y la de entrada de un sistema de control en lazo cerrado es la siguiente:

$$\frac{Y}{X} = \frac{G}{1 + G \cdot H}$$

donde G es la función de transferencia del lazo directo y H es la de realimentación.

(Solución: Es el caso 4 de los ejemplos de función de transferencia explicados.)

2. ♦♦ Obtén el diagrama de bloques de un sistema de control que tiene la siguiente función de transferencia:

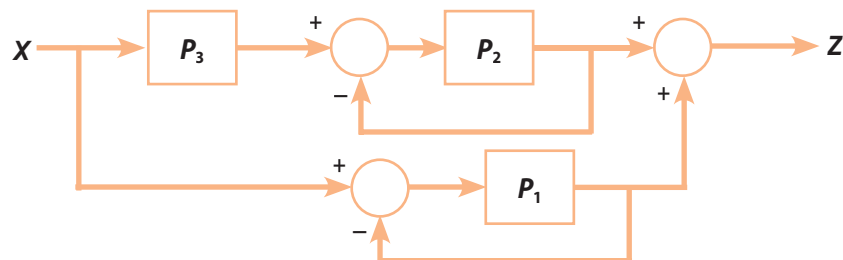
$$\frac{Z}{X} = \frac{P_1}{1 + P_1}$$

(Solución: Es el caso 3 de los ejemplos de función de transferencia explicados.)

3. ♦♦ Si a la función del ejercicio anterior se le añade un sumando con el cual se obtiene la siguiente expresión, ¿cómo será el diagrama de bloques del sistema?

$$\frac{Z}{X} = \frac{P_3 \cdot P_2}{1 + P_2} + \frac{P_1}{1 + P_1}$$

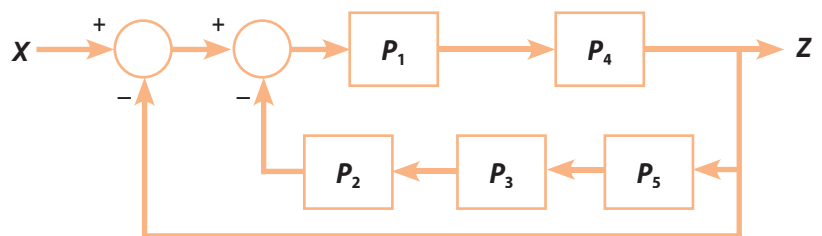
(Solución: Es el caso 2 de los ejemplos de función de transferencia explicados, bloques en paralelo, donde en la parte superior tendríamos el bloque P_3 y a continuación el caso 3 para el bloque P_2 ; y en la parte inferior tendríamos, como en el ejercicio anterior, el caso 3 para el bloque P_1 .)



4. ♦♦♦ Obtén el diagrama de bloques de un sistema con la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Z}{X} = \frac{\frac{P_1 \cdot P_4}{1 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5}}{1 + \frac{P_1 \cdot P_4}{1 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5}}$$

Solución:



ACTIVIDADES DE AMPLIACIÓN

1. ♦♦ Hemos visto que una parte fundamental de los sistemas de control son los elementos controladores. Busca información sobre ellos para indicar cuál es la diferencia entre un microcontrolador y un controlador, así como qué es el control programado.