



**EDITORIAL  
DIGITAL**  
TECNOLÓGICO DE MONTERREY

# **SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO Y DISCRETO**



**HUGO GUSTAVO  
GONZÁLEZ HERNÁNDEZ**

# Acerca de este eBook



## SISTEMAS DE CONTROL EN TIEMPO CONTINUO Y DISCRETO

-

HUGO GUSTAVO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

-

D.R. © Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México 2013.

El Tecnológico de Monterrey presenta su primera colección de eBooks de texto para programas de nivel preparatoria, profesional y posgrado. En cada título, nuestros autores integran conocimientos y habilidades, utilizando diversas tecnologías de apoyo al aprendizaje. El objetivo principal de este sello editorial es el de divulgar el conocimiento y experiencia didáctica de los profesores del Tecnológico de Monterrey a través del uso innovador de la tecnología. Asimismo, apunta a contribuir a la creación de un modelo de publicación que integre en el formato eBook, de manera creativa, las múltiples posibilidades que ofrecen las tecnologías digitales. Con su nueva Editorial Digital, el Tecnológico de Monterrey confirma su vocación emprendedora y su compromiso con la innovación educativa y tecnológica en beneficio del aprendizaje de los estudiantes.

[www.ebookstec.com](http://www.ebookstec.com)

[ebookstec@itesm.mx](mailto:ebookstec@itesm.mx)

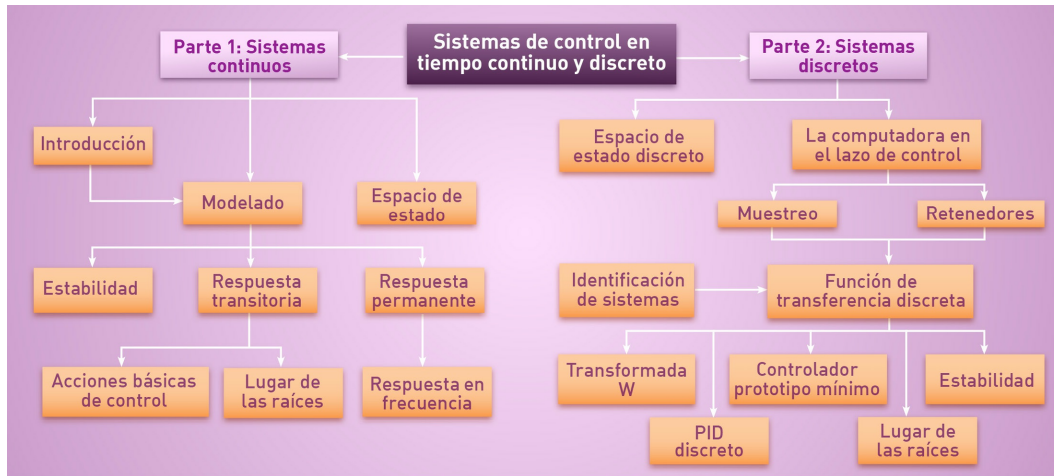
## Acerca del autor

Profesor del Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla desde febrero de 2006. Es director del departamento de Electrónica y Ciencias Básicas. Ha tenido a su cargo también la dirección de los departamentos de Ingeniería Mecánica e Industrial, Ingeniería Mecánica y Electrónica y fue director de la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Su labor docente se ha concentrado, desde 1989 hasta la fecha, en el área de sistemas de control, robótica, visión por computadora y matemáticas tanto a nivel licenciatura como en posgrado. Es egresado de la Universidad La Salle de IME, en Noviembre de 1991. Obtuvo el grado de Maestro en ciencias en Control Automático por el CINVESTAV-IPN en 1995. En 2002 obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en Mecatrónica también por CINVESTAV-IPN.

Ha sido profesor en la Universidad La Salle en la Ciudad de México, en el CICESE donde hizo una estancia postdoctoral, en el BUAP y en el Tecnológico de Monterrey, Campus Puebla. Fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) de 1999-2002. Ha publicado y es revisor de artículos para revistas y congresos de la IEEE, IFAC y IASTED. Es miembro de diversas sociedades científicas.

# Mapa de contenidos



## Introducción del eBook

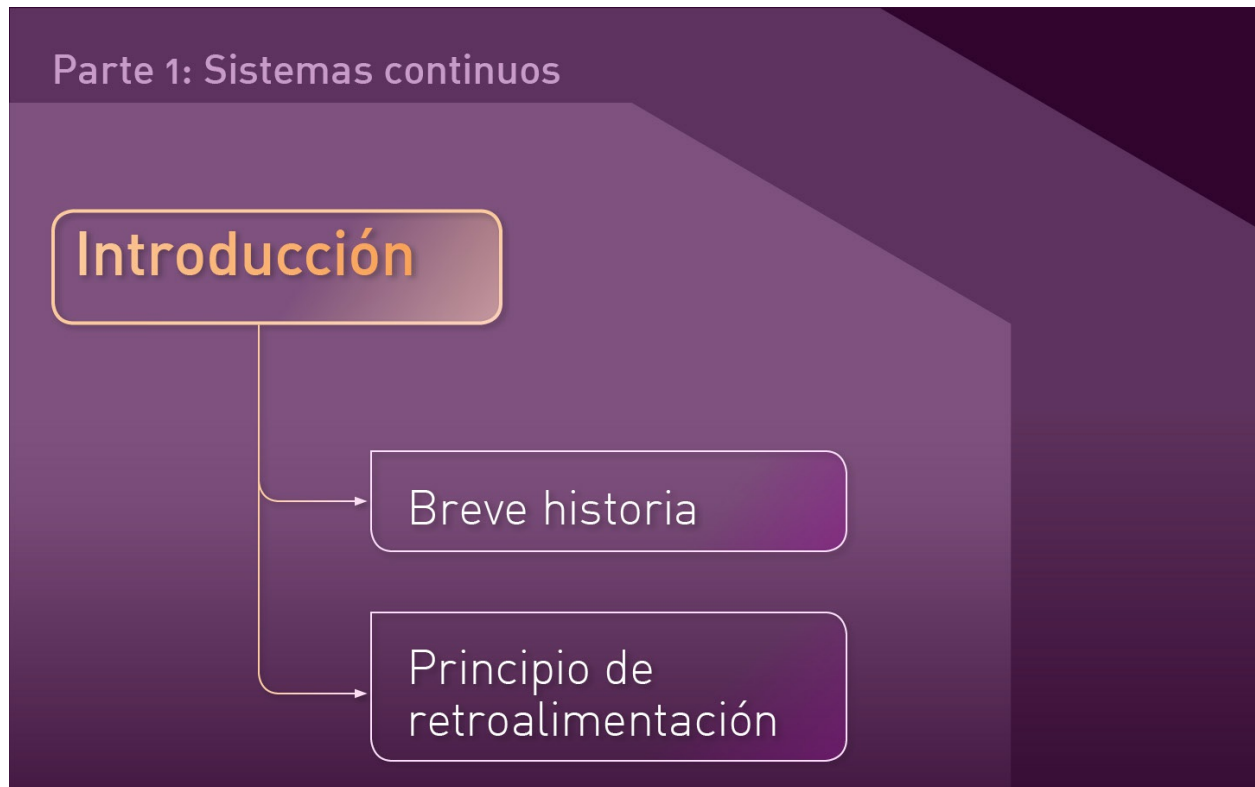
El libro electrónico que se presenta es un compendio sobre la actividad docente a través de los años que el autor lleva impartiendo las materias referentes a control automático. El autor ha plasmado de una manera sencilla los conceptos fundamentales de ingeniería de control, a través de ideas claras y aprovechando la interactividad que ofrece esta versión electrónica. Se complementa con actividades relacionadas con el ejercicio profesional de un ingeniero.

Una ventaja de esta propuesta de eBook es el poder contar con un solo libro de texto, que contemple los temarios de las materias de Ingeniería de control y Control computarizado, utilizando la misma notación y misma metodología para estas materias que no siempre son muy populares.





# 1. Introducción a los sistemas continuos



Un **sistema de control** es un conjunto de elementos interconectados que trabajan para un mismo fin. Puede ser tan sencillo como regular la temperatura en una pecera de peces tropicales o tan complejo como hacer que camine un robot bípedo.

A través de los años, la ingeniería de control ha sido un factor importante para el desarrollo de la tecnología. Siempre que se necesite ajustar una variable física a un valor específico, se está realizando una acción de control. En la vida cotidiana podemos encontrar ejemplos, como el templar la temperatura del agua de la regadera para bañarnos o el simple hecho de caminar. En todos estos procesos existe un componente importante, el control.

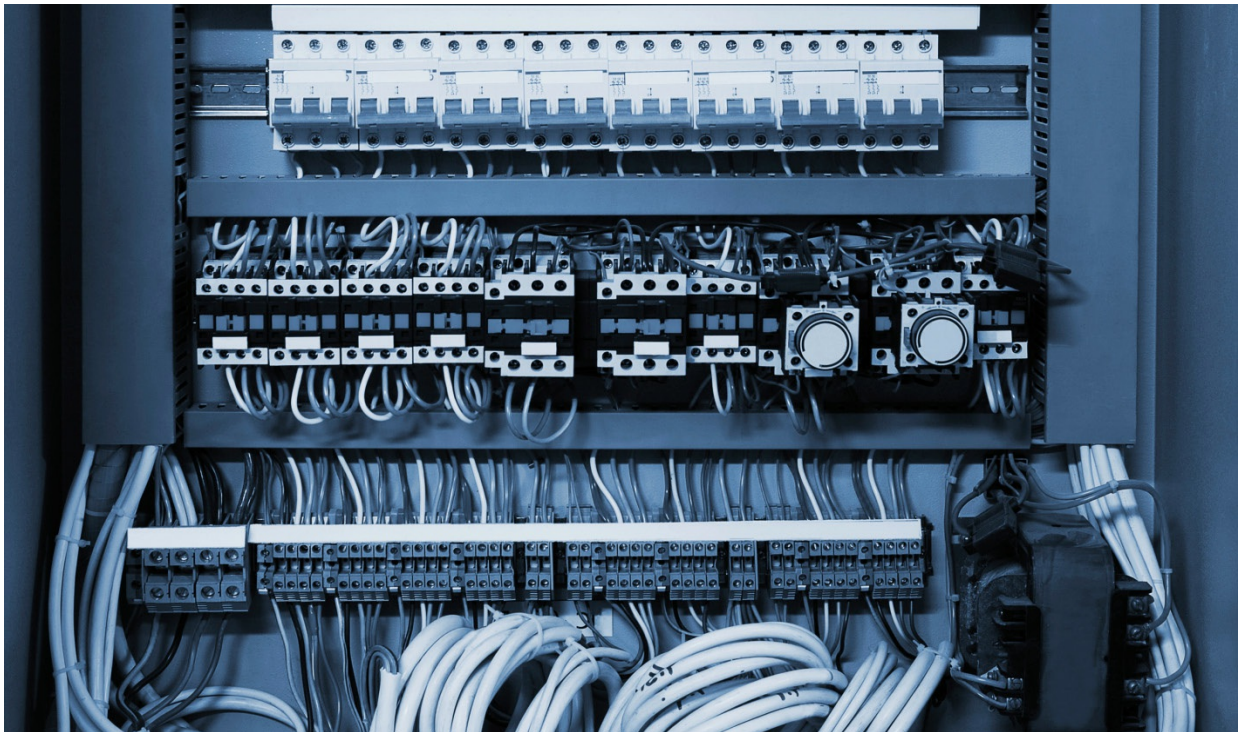
*En general, un sistema de control es parte de un sistema más grande, particularmente en sistemas de producción en alguna planta industrial. Son muy utilizados cada vez que se requiere una salida específica de una máquina, un proceso o un sistema biológico o químico.*

Por esta razón, no es raro encontrar varios sistemas de control formando parte de un proceso

de producción o dentro de un sólo dispositivo, dependiendo de la necesidad que se tenga.

Los sistemas de control pueden considerar retroalimentación o no, podemos pensar en la retroalimentación como información que regresa al lugar donde se originó. Al ser información, debe contener algo nuevo, como cuando el alumno pregunta al profesor y éste se da cuenta que ha transmitido de manera correcta/incorrecta una idea. Otro ejemplo es la utilización de este libro, en los ejercicios, el alumno puede tener información sobre su avance. Esto es retroalimentación.

La diferencia entre cualquier sistema de control y uno utilizado para ingeniería (ingeniería de control) es que la retroalimentación y la acción correctiva con respecto a esta información se busca que se realice de manera autónoma, es decir, por el mismo dispositivo, sin tener que recurrir a un humano que efectúe manualmente la corrección.



## 1.1 Breve historia del control automático

Las raíces del control automático están ligadas estrechamente a las necesidades del hombre, desde los cavernícolas hasta los complejos desarrollos tecnológicos de nuestros días.

Tal vez el primer registro que se tenga documentado de un sistema de control es la clepsidra, usada por los egipcios y mejorada sustancialmente por Platón y Aristóteles. La clepsidra es un reloj que utiliza agua, esto a raíz de la necesidad de medir el tiempo cuando no había sol (relojes solares). Platón utilizó esta idea para desarrollar un despertador para que se levantaran sus alumnos.

La idea era relativamente simple: se tenían dos vasijas, una de ellas arriba y a un lado de la otra, con un pequeño orificio que permitiera salir el agua que se acumulaba en la otra. En la vasija de abajo, se colocaban piezas que flotaban y, a un lado de esta otra, una vasija de cobre. Al subir el agua en la vasija de abajo, los flotadores subían también y finalmente se desbordaban agua y flotadores sobre la vasija de cobre ocasionando un estrépito, suficiente como para despertar a sus alumnos.

Esta estrategia de control consistía en “prender y apagar”; se prende cuando cargamos el agua en la primera vasija y se apaga cuando se desborda la segunda. Este ejemplo sólo toma una secuencia de prendido y apagado; si reutilizamos esta estrategia en un ciclo, tenemos lo que llamamos control on-off (prendido-apagado), el ejemplo más representativo de esta técnica es el termostato.

El termostato consta de un par de láminas de metal con diferente coeficiente de dilatación térmico. En presencia de calor, una de las láminas se dilata más que la otra y esto se puede aprovechar para cerrar o abrir un circuito eléctrico.

Este principio se sigue utilizando actualmente, por ejemplo, en equipos de aire acondicionado; pero, más aún, en los calentadores caseros, en los cuales se puede ajustar la temperatura deseada (de referencia) y una vez que se alcanza esta temperatura, se desactiva la fuente de calor que, por cierto, es una resistencia de bajo ohmaje, como una plancha.

## LIGAS DE INTERÉS

[IEEE Control Systems Magazine](#), edición especial historia del control (abril de 2002).

Esta edición especial contiene artículos muy interesantes y detallados sobre la historia del control automático.

Los ejemplos de la utilización de esta estrategia de control son muchos pero mejor avancemos en el tiempo.





Como en muchas otras disciplinas, el desarrollo de la ingeniería de control fue acelerado considerablemente por la segunda guerra mundial.

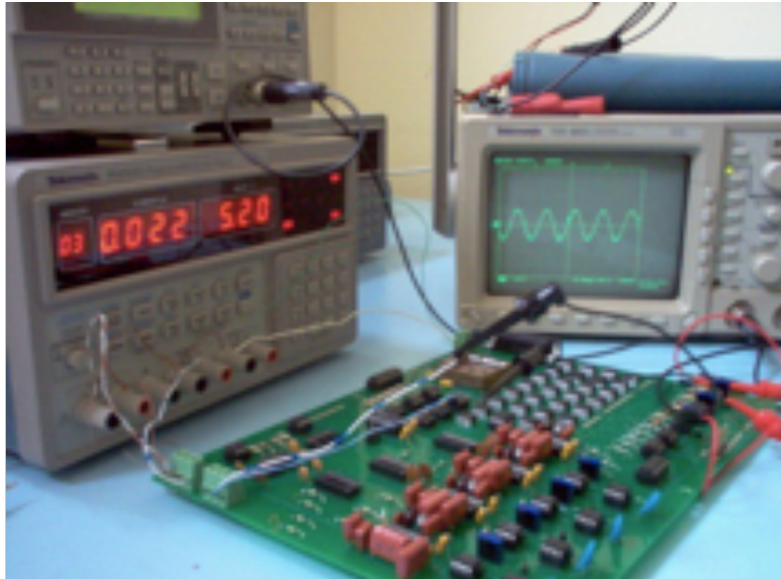
En esta etapa, la necesidad de tecnología para comunicarse de forma clara era una prioridad. En aquel entonces (como ahora), el que tenía la mejor tecnología era el que llevaba mayor ventaja.

En este punto es importante comentar que, aunque no se tenían demasiados avances en electrónica, la teoría de control había avanzado gracias a las matemáticas. Se pudo utilizar el concepto de función de transferencia, una **transformada de Laplace** que encierra el comportamiento de un sistema que luego puede ser conceptualizado como un bloque.



*Tal vez el más importante desarrollo haya sido el poder utilizar la función de transferencia como un elemento en un “lazo” de retroalimentación. Este concepto, aunado con el desarrollo de las computadoras analógicas fue el que realmente disparó la ingeniería de control.*

Con el desarrollo de la electrónica, las estrategias de control también fueron evolucionando, aprovechando los nuevos dispositivos que permitían realizar operaciones matemáticas más complejas. Así fue como surgieron las primeras computadoras analógicas.



La historia del control está entrelazada con el desarrollo de las primeras computadoras analógicas. La primera registrada fue el analizador diferencial del MIT, éste se utilizaba para resolver ecuaciones diferenciales electrónicamente. La tecnología del **amplificador operacional**, ahora utilizado casi en cualquier dispositivo electrónico, fue un parte aguas en la historia del control como lo conocemos hoy en día.

Alrededor de los años 50 la simulación de los misiles guiados forzó los límites tanto de la computación analógica como de la digital. Las computadoras digitales no eran lo suficientemente rápidas para poder instrumentar sistemas de control en tiempo real. Es aquí en donde las computadoras analógicas encontraron una fuerte relación con la ingeniería de control.

Las computadoras analógicas permitieron no sólo la simulación de sistemas reales, gracias a su capacidad de resolver ecuaciones diferenciales, sino también el desarrollo de mejores diseños de sistemas de control.

Una de las más populares **estrategias de control**, el **PID**, fue desarrollado en esa década gracias a este tipo de computadoras. Durante varias décadas, los principios de control automático

fueron transmitidos a muchos estudiantes, entre ellos, al autor de este libro, utilizando estos dispositivos. Muchas estrategias de control también fueron desarrolladas utilizándolos.

La **función de transferencia** de un sistema puede ser obtenida solamente si el sistema es lineal, es decir, si el **modelo matemático** del sistema es una ecuación diferencial lineal. Esto representa un problema si el sistema es no lineal. Respondiendo a esta necesidad, surge la llamada teoría de control moderna.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

*La teoría de control moderna involucra la utilización de la ecuación de estado del sistema, que no es más que la escritura de las ecuaciones dinámicas del sistema con respecto al tiempo en una forma determinada.*

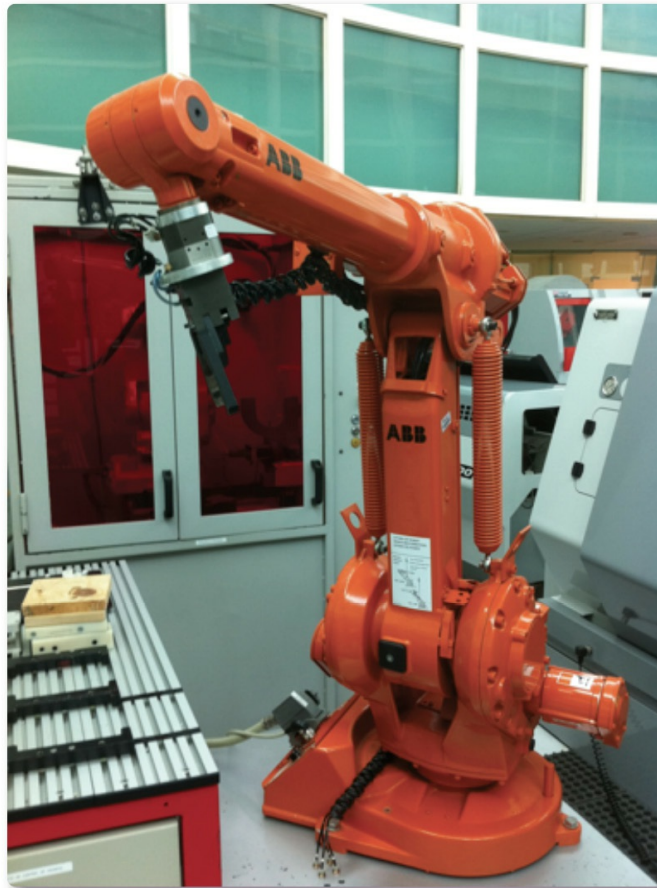
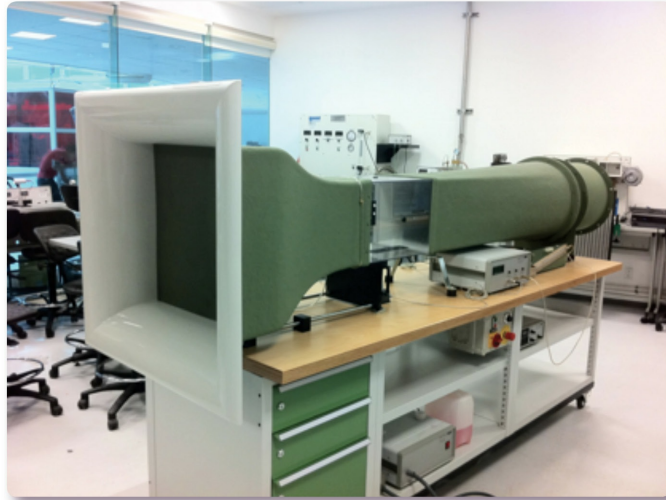
Con las **ecuaciones de estado** se desarrollaron muchas otras técnicas de control pero, sobre todo, fue posible analizar y controlar sistemas de naturaleza no lineal como por ejemplo robots, y otro tipo de sistemas.

Algunas técnicas de control desarrolladas son: control adaptable, control robusto, control óptimo, control por modos deslizantes, control por invariancia e inmersión, control inteligente, y muchas otras.

Gracias a estas técnicas se han podido resolver problemas más complejos que aparecen en ingeniería y en otras disciplinas. En la actualidad tenemos **computadoras digitales** suficientemente rápidas que pueden realizar cálculos en tiempo real y así es posible instrumentar estas técnicas y otras más.

**En este tema hemos visto a grandes rasgos una breve historia de cómo se ha desarrollado la teoría de control, siendo ésta una disciplina relativamente nueva que se ha apoyado no sólo de las matemáticas y la física sino que ha ido de la mano con los desarrollos tecnológicos para satisfacer nuestras necesidades.**



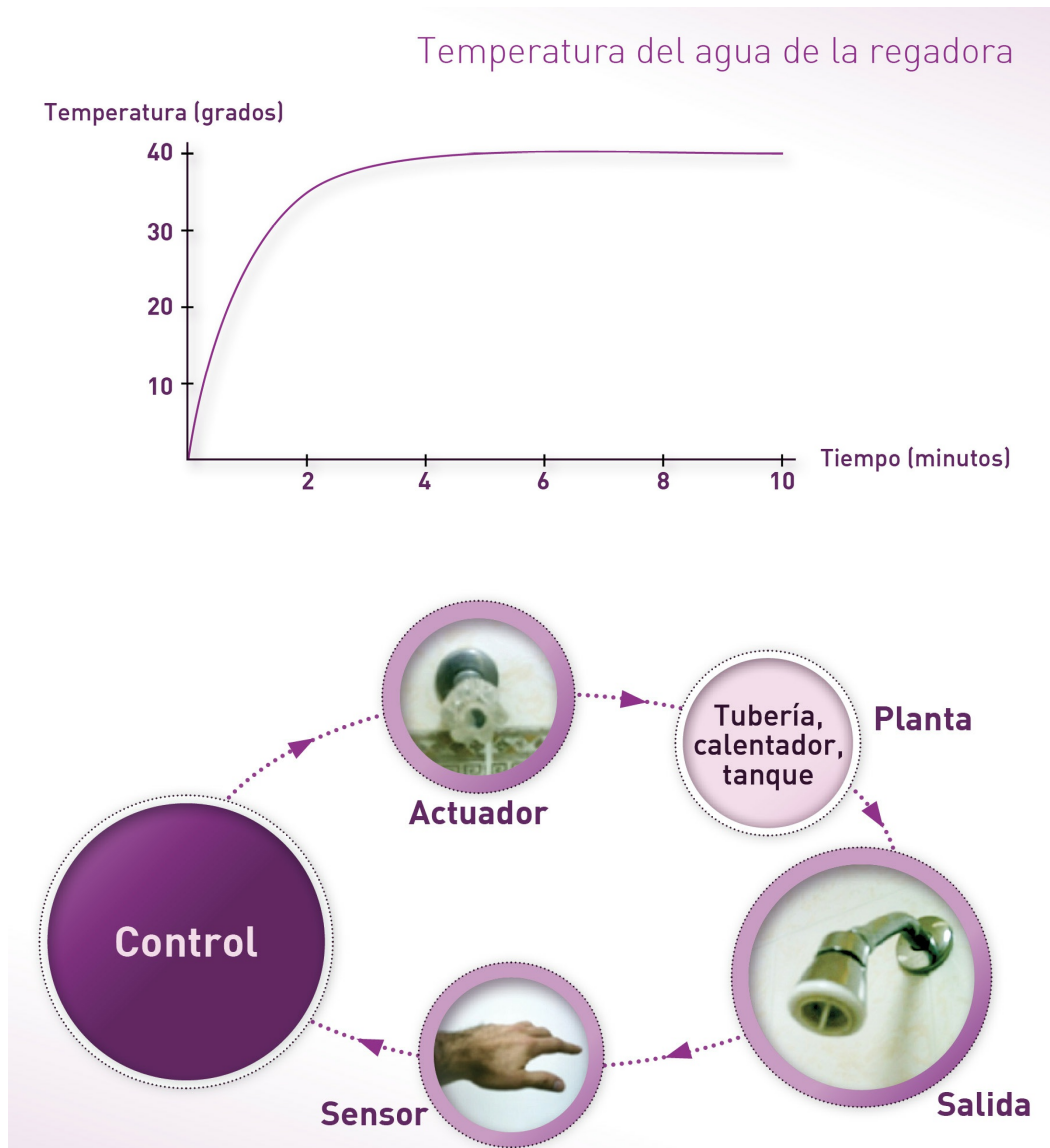


## 1.2 El principio de retroalimentación

Aunque hay personas que gustan de bañarse con agua fría, a muchos de nosotros no nos hacen entrar a la regadera si el agua no está a cierta temperatura. La temperatura de la regadera es un sistema de control en donde la referencia es precisamente esta temperatura a la que

queremos que esté el agua para poder bañarnos a gusto. Podemos considerar que el sistema lo componen: el calentador, las tuberías y las válvulas de caliente/frío.

Cuando abrimos la llave del agua caliente, inicialmente el agua sale a una temperatura que consideramos "fría" (sobre todo en invierno). Si el calentador está encendido, tenemos que esperar un tiempo para que el agua se caliente; este comportamiento es típico en muchos sistemas lineales. Si dejamos salir el agua (y la almacenamos para no desperdiciarla), ésta se irá calentando poco a poco hasta alcanzar una temperatura máxima. Si graficáramos la temperatura de salida del agua con respecto al tiempo, veríamos algo como esto.



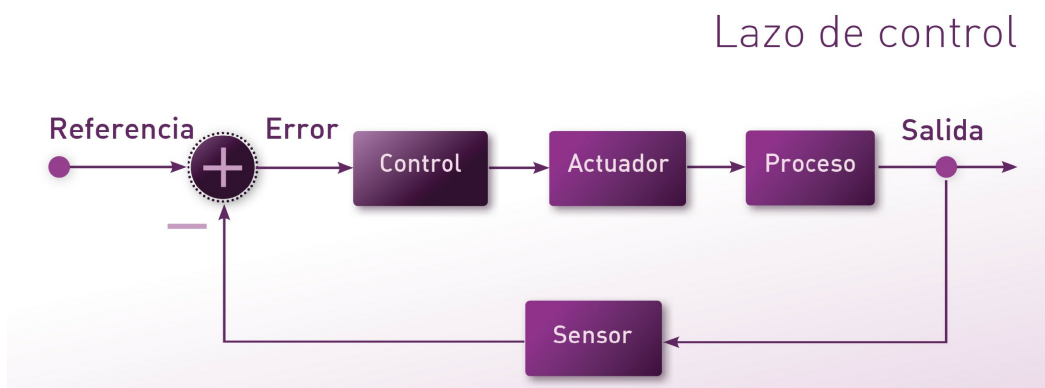
En general, lo que queremos es tener un nivel de temperatura, para eso lo que hacemos es abrir la llave del agua fría y meter la mano para sentir la temperatura del agua. Esperamos un momento más y después volvemos a sentirla, si el agua está a la temperatura deseada entonces dejamos el proceso y nos metemos a bañar. Si no volvemos a repetir: sentimos el agua, comparamos con la temperatura que deseamos y después abrimos o cerramos la llave del agua fría hasta que tengamos esta temperatura deseada.



Este proceso es precisamente lo que conocemos como un sistema de control. La mano funciona como un sensor, es la que se encarga de informarle al proceso el estado de la variable de salida. La información de temperatura es tomada por nuestro sistema nervioso y por medio de impulsos va a nuestro cerebro. Ahí se compara con la temperatura deseada: “está muy fría” o “está muy caliente”. Con base en esta comparación el cerebro toma una decisión. Esta decisión se envía a la otra mano que, junto con la llave del agua, realiza una acción de control: “abre más la llave del agua fría”.

Si modelamos este proceso de una forma gráfica, podríamos considerar una mano como el sensor, la otra mano como el actuador, y nuestro cerebro y sistema nervioso como un comparador (diferencia o resta) y un módulo de toma de decisiones. Este último módulo es precisamente el controlador. Al sistema compuesto por la regadera, calentador, tinaco, tubería, etc., lo llamaremos de ahora en adelante planta o proceso. A estos diagramas con retroalimentación se les conoce como sistemas de lazo cerrado.

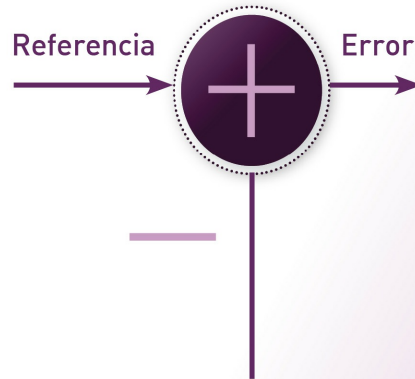
En el siguiente capítulo veremos cómo podemos expresar lo que hay adentro de la planta y en capítulos posteriores veremos cómo diseñar acciones de control, es decir el bloque de control. La imagen muestra lo que conocemos como lazo de control con diagramas de bloque.



Estos bloques tienen una estructura básica: contienen una entrada, una salida e información adentro acerca del procesamiento que se le aplica a la entrada para obtener dicha salida. En otro capítulo veremos que estos bloques pueden contener funciones de transferencia. Si sólo tenemos un bloque con una entrada y una salida, es decir, sin retroalimentación, entonces se le conoce como sistema de lazo abierto.

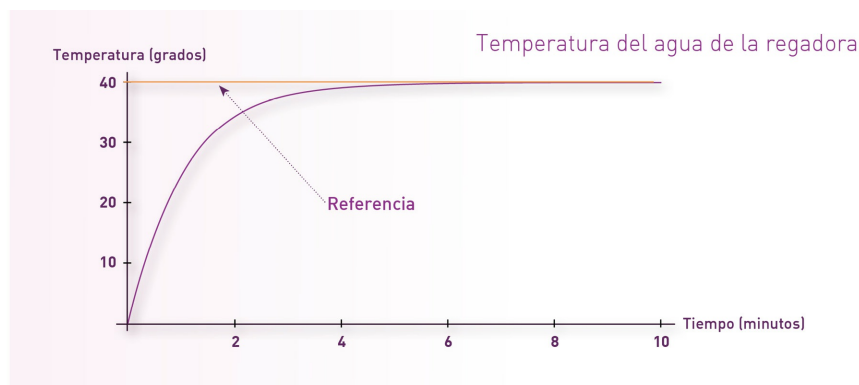


Otro punto importante dentro del diagrama es el punto de suma. Este elemento tiene la suma de la referencia más la entrada negada proporcional a la señal de salida. Esto es, realiza la comparación de la referencia contra el valor de la salida. El resultado de esta comparación es un error que servirá para tomar una decisión.



Es importante también aclarar que las flechas que unen los bloques y el punto de suma representan realmente alambres conduciendo una señal específica. Los bloques representan modelos matemáticos del proceso en cuestión. Estos modelos matemáticos pueden ser representados de diferentes maneras, uno de los más prácticos es la utilización de la función de transferencia, que es simplemente la transformada de Laplace de la **ecuación diferencial** que modela el sistema. Esto implica también que el bloque que contiene el control (elemento de toma de decisiones) es también una ecuación diferencial en el caso general.

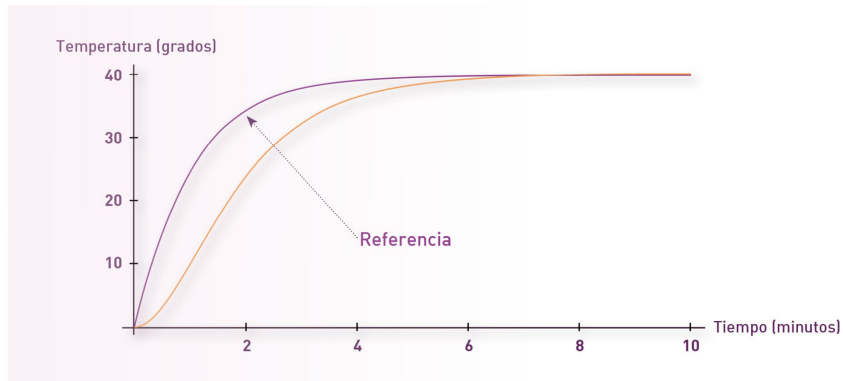
La retroalimentación permite entonces tomar decisiones con respecto al cambio en alguna variable de entrada (accesible) del proceso a fin de cambiar, a su vez el comportamiento de una variable de salida.



Es importante aquí aclarar que el objetivo de control es que la salida se acerque a la referencia tanto como sea posible, es decir, que el error tienda a cero conforme el tiempo avance. No todas las referencias son constantes, es posible que tengamos una referencia variable.

Cuando se tiene una referencia constante, el objetivo de control se llama **regulación**, si la referencia es variable se llama **seguimiento**.

Como puede inferirse de estos conceptos, lo que se requiere del sistema de control es que la salida llegue a la referencia en el menor tiempo posible y con un error que tienda a cero.



**En este tema hemos visto cómo el principio de retroalimentación es una herramienta fundamental para poder diseñar sistemas de control, permite comparar la salida actual de un sistema con respecto a lo que se desea y así poder aplicar una corrección.**

# Conclusión del capítulo 1

Los sistemas de control han contribuido significativamente al desarrollo de la tecnología de automatización a lo largo de los años. A pesar de no ser una disciplina demasiado antigua, su crecimiento aumentó considerablemente desde la segunda guerra mundial. El advenimiento de las computadoras analógicas permitió la instrumentación de algunas técnicas de control con las que, con la llegada de las computadoras digitales y sobre todo con el aumento en la velocidad de procesamiento de estas computadoras, ha sido posible instrumentar algoritmos de control más complejos.

El principio de retroalimentación es una base importante para poder desarrollar sistemas de control, gracias a este mecanismo es posible lograr objetivos de control como regulación o seguimiento, que permiten forzar una variable de salida a tener un valor específico con respecto al tiempo. Se pueden utilizar diagramas de bloque para representar un proceso pero también para representar un sistema de control utilizando el mecanismo de retroalimentación.

# Actividades del capítulo 1

- [Actividad integradora](#)



# Recursos del capítulo 1

- » [IEEE Control Systems Magazine, edición especial historia del control](#) (abril de 2002).

Esta edición especial contiene artículos muy interesantes y detallados sobre la historia del control automático.