

## **Capítulo 2**

---

### **Teoría de Control**

## Capítulo 2

# Teoría de Control<sup>1</sup>

Los objetivos de este capítulo son:

- Conocer todos los conceptos relacionados a la Teoría de Control.
- Aplicar estos conceptos en ejemplos simples.

### 2.1 Introducción

Tal como se dijo en el capítulo anterior, el universo es un gran sistema formado por muchos subsistemas los cuales le suplen de metas y por ende de autocontroles. La creación del universo, como ese indescriptible sistema dotado de un gran número de otros sistemas (formando una jerarquía de sistemas), nos da la idea de la necesidad de un gran y único control en ellos, desde el principio, para que permanezcan hasta la actualidad.

El concepto de control ha jugado un papel vital en el desarrollo de la ciencia y de la ingeniería, además de su integración e importancia en los procesos industriales y de manufacturas modernas, así como de gerencia y administración del hogar. Su teoría y práctica brindan medios de lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad, abaratar los costos de producción, expandir el ritmo de producción; en fin, mejorar la eficiencia de los sistemas.

La tendencia actual en la ingeniería de sistemas es hacia una mayor complejidad, debido principalmente a los requerimientos de tareas complejas, y de una buena precisión. Debido a la necesidad de afrontar los cada vez más severos requisitos del comportamiento del sistema de control, al aumento en su complejidad, y al fácil acceso a computadoras de gran escala se introduce entonces el concepto de *teoría de control*, para poder estudiar más fácilmente estos sistemas tan complejos.

### 2.2 ¿Qué es Teoría de Control?

La teoría de control se basa en el principio de gobernar un proceso, esto es, dirigir una variable determinada a niveles o necesidades establecidas mediante acciones que se deciden, en función de las señales emitidas por dichas variables, sobre los elementos del proceso que han de gobernarse o controlarse. A veces lo que se controla es un sistema, en otras palabras, el proceso principal (si hay más de uno) del sistema.

---

<sup>1</sup> Material revisado gentilmente por el Ing. Lino Ruiz

En esta teoría, para que exista el control, debe haber:

- Un objeto, ente o factor.
- Un subsistema controlador.
- Algo que se necesite controlar en el objeto (variable por controlar en el objeto),
- Un observador o detector que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable controlada,
- Un componente comparador que examine la discrepancia entre el valor actual de la variable controlada y lo deseado.
- Una reacción a lo comparado.

En todo sistema de control deben estar presentes estos seis elementos. Un ejemplo que explicaría la función de estos elementos en un sistema sería el siguiente:

Un atleta, después de haber recorrido una distancia, empieza a experimentar un cambio en su temperatura corporal y en ese instante comienza a excretar sudor por los poros. Los elementos de este ejemplo son:

- **Un objeto:** El atleta después de haber recorrido una distancia.
- **Subsistema Controlador:** La excreción por los poros.
- **Variable por controlar:** La temperatura corporal.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Puede ser un termómetro o algún aparato que sirva para observar la variación de la temperatura, a través del tiempo en que el atleta está excretando o sudando.
- **Comparador:** Desviación = temperatura corporal ( $29^{\circ}\text{C}$ ) versus temperatura deseada ( $27.5^{\circ}\text{C}$ ).
- **Reacción:** Sudar para bajar la temperatura<sup>2</sup>.

La teoría de control también es conocida como Ingeniería de Control. Esta, en lugar de operar con dispositivos y componentes físicos, se le reemplaza por sus modelos matemáticos. Uno de los problemas más importantes en Ingeniería de Control es obtener un modelo matemático razonablemente exacto de un sistema. Teoría de control es cualquier interconexión de componentes que satisfacen una función deseada. También es conocida como sistema de control retroalimentado, que tiende a mantener una relación preestablecida entre las salidas y algunas entradas de referencia, comparándolas y utilizando la diferencia como medio de control. Los sistemas de control no están limitados al campo de la ingeniería, sino que se le puede encontrar en todas las disciplinas del conocimiento. Por ejemplo, el organismo humano es análogo a un sistema de control muy avanzado<sup>3</sup>.

También se le llama servosistema o servomecanismo en el que la salida es algún

---

<sup>2</sup> Puede ser temblar en caso que la temperatura corporal sea menor que la temperatura deseada; esto quiere decir que hace frío.

<sup>3</sup> En si se controlan muchos factores

elemento mecánico, sea posición, velocidad o aceleración.

Algunas de las ventajas que ofrece la teoría de control son:

- Incremento en la exactitud. El sistema se puede diseñar para tratar de llevar a cero el error entre la respuesta deseada y medida.
- Pequeña sensibilidad a los cambios en los componentes. El sistema puede diseñarse para tratar de obtener cero errores, a pesar de los cambios en los componentes.
- Reducir los efectos de las perturbaciones. Se pueden atenuar notablemente los efectos de perturbaciones al sistema.
- Incremento en la rapidez de respuesta y anchura de banda. La teoría de control puede utilizarse para incrementar la gama de frecuencias sobre la cual un sistema responderá y hacer que responda más satisfactoriamente. Por ejemplo, un cohete impulsor de satélite tiene todas aquellas semejanzas aerodinámicas de un gigantesco palo de escoba.

La teoría de control es ampliamente difundida y utilizada en todas partes y cada vez juega un papel más importante en el desarrollo de las sociedades y de las tecnologías. Es utilizada en cualquier área científica, industrial, comercial, administrativa, tecnológica y hasta social.

El ejemplo del ser humano, que hemos citado anteriormente, es quizás uno de los sistemas de control más sofisticado y complejo que existe. Un ser humano promedio es capaz de llevar a cabo una gran diversidad de tareas, incluyendo la toma de decisiones. Algunas de estas tareas, como la recolección de objetos o una caminata, suelen ser labores rutinarias. Bajo ciertas circunstancias, estas tareas deben ejecutarse en forma óptima. Por ejemplo, un atleta que corre 100 metros planos tiene por objetivo recorrer esta distancia en el menor tiempo posible. Un corredor de maratón no sólo debe correr la distancia con la mayor rapidez, sino que, además, para lograrlo, debe controlar el consumo de energía y obtener un resultado óptimo. Por consiguiente, se puede decir en forma general que la vida impone el logro de “muchos objetivos”, y los medios para alcanzarlos casi siempre dependen de sistemas de control.

Los sistemas de control ejercen mucha influencia sobre cada faceta de la vida moderna. Las secadoras, satélites espaciales, plantas de proceso químico, sistemas de orientación y navegación, control de la contaminación, tránsito colectivo y regulación económica son unos cuantos ejemplos. En el sentido más amplio, un sistema de control puede ser definido como una interconexión de varios componentes, todos trabajando juntos para la consecución de un objetivo común. Estos componentes, en su mayoría, son dispositivos eléctricos, mecánicos, electrónicos y electromecánicos, entre otros. En otros casos son variables de algún problema abstracto.

En la industria, por ejemplo, son comunes los sistemas de control. Desde el control de calidad de productos industriales, líneas de ensamble automático, tecnología espacial y armamento, control por computadora, sistemas de transportación, robótica y muchos

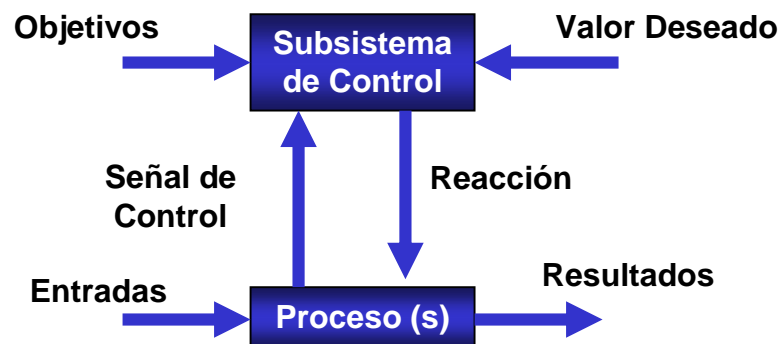
otros. También se pueden resolver con enfoques de teoría de control automático, problemas como el control de inventarios y los sistemas de control sociales y económicos.

Cualquiera que sea el tipo de sistema de control bajo consideración, los elementos básicos del sistema pueden describirse gráficamente a través de diagramas de bloques, que en forma elemental.

En el caso de un sistema de control los elementos más significativos de su composición son:

- Objetivos del control
- Componentes del Sistema de Control
- Proceso o planta del sistema
- Resultados

Esto se ilustra en el siguiente diagrama de bloques:



**Figura 2.1: Diagrama de Bloque de un Sistema de Control**

En general, el objetivo de un sistema de control se basa en controlar las salidas de una manera predeterminada, por medio de las entradas y aplicando los elementos del sistema de control. El sistema de control posee unas entradas<sup>4</sup> y resultados<sup>5</sup>. Las entradas al subsistema de control se denominan *señales de control* y las salidas como *reacciones*. Existen sistemas en los que los controles están acoplados. A los sistemas con más de una entrada y una salida se les llaman *sistemas complejos de control*.

Control implica medir el valor de la variable controlada del sistema, y aplicar al sistema la variable manipulada para corregir o limitar la desviación del valor medido, respecto al valor deseado. La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla; esta es normalmente la salida del sistema. Con el fin de afectar la variable controlada, la

<sup>4</sup> estímulos

<sup>5</sup> respuestas

cantidad o condición modificada por el controlador, se conoce como variable manipulada.

## 2.3 Principios Básicos de Diseño de Sistemas de Control

En esta sección se presentan algunos puntos que son relevantes cuando se diseña un sistema de control.

### 2.3.1 Requerimientos Generales de un Sistema de Control

Los requerimientos generales de un sistema de control son los siguientes:

1. Debe ser capaz de reducir errores a cero, o a un valor pequeño tolerable.
2. La velocidad de respuesta debe ser razonablemente rápida.
3. Todo sistema de control debe ser relativamente estable, es decir, la respuesta debe mostrar un amortiguamiento razonable.

Cualquier sistema de control, para ser útil, debe satisfacer estos requisitos. El requisito de estabilidad relativa razonable y el de la precisión tienden a ser incompatibles. Por lo tanto, al diseñar sistemas de control resulta necesario efectuar el mejor compromiso entre estos dos requerimientos. Un ejemplo que explicaría estos requerimientos podría ser el funcionamiento de un edificio inteligente:

*El desarrollo e implementación de la inteligencia de un edificio tiene como objetivo primordial el confort y la seguridad de las personas que habitan o trabajan en el mismo. Protegiendo física y psicológicamente el entorno humano circundante, utilizando todos los recursos posibles para el cometido final, analizando el límite y la reducción posible de los costos de explotación.*

Ejemplos de controles (facilidades) de un edificio inteligente:

- Control y Optimización de Energía Eléctrica
- Sistema de Alimentación Interrumpida
- Control de Iluminación
- Control de Elevadores
- Sistema de Protección Contra Incendios
- Sistema de Control de Aire Acondicionado
- Sistema Integrado de Seguridad
- Sistema de Gestión y Control de Habitaciones
- Sistema de Control de Estacionamientos
- Sistemas de Comunicaciones
- Sistemas de Distribución de TV
- Megafonía
- Busca Personas
- Sistema de Control de Salas de Reuniones y Salas Multifuncionales
- Cableado Estructurado del Edificio

### 2.3.2 Teoría de Control Clásica versus Teoría de Control Moderna

#### Teoría de Control Clásica

Se basa en la relación entrada-salida del sistema, o función de transferencia. Sólo se consideran importantes las señales de entrada, salida y error; se desarrolla el análisis y diseño de sistemas de control utilizando funciones de transferencia juntamente con una variedad de técnicas gráficas.

Este método se aplica únicamente a sistemas lineales invariantes en el tiempo, de una entrada y una salida. Las técnicas utilizadas son conceptualmente simples y sólo requieren una cantidad razonable de cálculos. Lamentablemente, el proyecto de sistemas en la teoría de control clásica se basa en procedimientos de tanteo y ajuste, los que en general no producen sistemas de control óptimos.

#### Teoría de Control Moderna

Se basa en el concepto de estado, el cual existe desde hace mucho tiempo en el campo de la dinámica clásica y en otros campos. El estado de un sistema dinámico es el conjunto más pequeño de variables tales que el conocimiento de esas variables en  $t = t_0$ , juntamente con la entrada para  $t \geq t_0$ , determinan totalmente el comportamiento del sistema para cualquier tiempo  $t \geq t_0$ .

En otras palabras, el comportamiento futuro de un sistema, quedará determinado por su historia pasada y por las excitaciones externas que le afecten.

Este método es aplicable a sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas que pueden ser lineales o no lineales, invariantes o variables en el tiempo.

El diseño de sistemas, por este método, permite al ingeniero proyectar sistemas de control óptimos con respecto a los índices de comportamiento dados. Además, el proyecto se puede realizar para toda clase de entradas en lugar de que se realice para una función específica de entrada. La Teoría de Control Moderna se utiliza para analizar los sistemas de control, de forma más viable, general y eficaz que la Teoría de Control Clásica.

La teoría de control moderna es un nuevo procedimiento para el análisis y diseño de sistemas de control complejos, la cual está basada en el concepto de estado y espacio de estado. Los sistemas complejos pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas y ser variables en el tiempo.

La teoría de control clásica brinda, generalmente, buenos resultados para sistemas de control de una entrada y una salida. Los procedimientos clásicos o convencionales, ponen énfasis en la comprensión física y utilizan menos cálculos matemáticos que los métodos de control modernos.

La teoría de control moderna contrasta con la teoría de control clásica, en que la primera se aplica a sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas, que pueden ser lineales o no lineales, variables o invariantes en el tiempo, mientras que la segunda tiene mayor aplicación en sistemas lineales, invariantes en el tiempo, y de una sola entrada y una sola salida. Además, la teoría de control moderna es un procedimiento en el dominio del tiempo esencialmente, mientras que la teoría convencional opera en el dominio de las frecuencias complejas, y por tal razón utiliza ampliamente técnicas de solución numéricas de ecuaciones diferenciales.

### 2.3.3 Modelado Matemático

Para poder programar en la computadora un sistema de control, se requiere plantear el problema en función de un modelo matemático. En ingeniería de control, se usan ecuaciones diferenciales lineales, invariantes en el tiempo, funciones de transferencia y ecuaciones de estado, para modelos matemáticos de sistemas lineales, invariantes en el tiempo y de tiempo continuo.

Para ser útil, un modelo matemático, este no debe ser ni muy complicado, ni excesivamente simple. Un modelo matemático debe representar los aspectos esenciales de un componente físico. El uso de tales modelos matemáticos permite a los ingenieros de control desarrollar una teoría de control unificada.

### 2.3.4 Análisis y Diseño de Sistemas de Control

Para poder diseñar un sistema de control es necesario ejecutar una metodología que posea todos los pasos necesarios para lograr un sistema eficiente. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en el control numérico de las máquinas y herramientas en las industrias manufactureras. También resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, y flujo en las industrias. La Ingeniería Mecánica Industrial diseña y construye sistemas de este tipo.



**Figura 2.2: Ensamblaje de Automóviles**

Fuente: [www.bjinforma.com](http://www.bjinforma.com)



Como los avances en la teoría y práctica del control automático brindan medios para lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la productividad, liberarse de la monotonía de muchas operaciones manuales rutinarias y repetitivas, y otras ventajas; la mayoría de los ingenieros y científicos deben poseer un buen conocimiento de este campo.

### 2.3.5 Método Básico de Diseño de Control

El método básico para diseño de cualquier tipo de sistemas prácticos de control, necesita la aplicación obligada de procedimientos de tanteo.

La especificación de la señal de control durante el intervalo de tiempo operativo recibe el nombre de ley de control. Matemáticamente, el problema básico de control es determinar la ley de control óptimo, sujeta a diversas restricciones de ingeniería y de economía, que minimice un índice de comportamiento o desempeño determinado. Para sistemas de control aeroespacial, el índice de comportamiento puede ser un mínimo en tiempo o en combustible. Por ejemplo, para sistemas de control industrial, el índice de comportamiento puede ser el costo mínimo, la confiabilidad máxima, tiempos muertos mínimos, etc. Es importante puntualizar que la elección del índice de comportamiento es sumamente importante, ya que la naturaleza del control óptimo diseñado depende del índice de comportamiento particular que se elige. Así pues, se debe seleccionar el índice de comportamiento más adecuado para cada situación.

### 2.3.6 Pasos de Diseño

Tras completar el diseño matemático, el ingeniero de control simula el modelo en una computadora, para verificar el comportamiento del sistema resultante en respuesta a diversas señales y perturbaciones. Generalmente, la configuración del sistema inicial no resulta satisfactoria. Luego, se debe rediseñar el sistema, y completar el análisis correspondiente. Este proceso de revisión de diseño y análisis se repite hasta obtener un sistema satisfactorio. Al cabo, ya se puede construir un prototipo del sistema físico. Este tema se trata en mayor detalle en el siguiente capítulo.

## 2.4 Clasificación de los Sistemas de Control

La distinción de los sistemas de control la determina la acción de control, que es la cantidad que activa el sistema para producir la salida. Los sistemas de control de maneta más general se pueden clasificar en:

- Sistemas de control de **ciclo abierto**.
- Sistemas de control de **ciclo cerrado**.

### 2.4.1 Sistema de Control de Ciclo Abierto

Los *sistemas de control de ciclo<sup>6</sup> abierto* son aquellos sistemas en los cuales la acción

---

<sup>6</sup> también conocido como *lazo*.

de control es independiente a la salida, o sea, la salida no se mide ni se retroalimenta para compararse con la entrada.

El sistema de control que se muestra en la figura 2.2, es poco sofisticado y se clasifica como *sistema de control de ciclo abierto*. Resulta fácil apreciar que dicho sistema no cumplirá en forma satisfactoria con los requerimientos de desempeño deseados.

Debido a la simplicidad y economía de los sistemas de control de ciclo abierto, se usan en la práctica en muchas situaciones. De hecho, casi todos los autos fabricados antes de 1981 no contaban con un sistema de control.

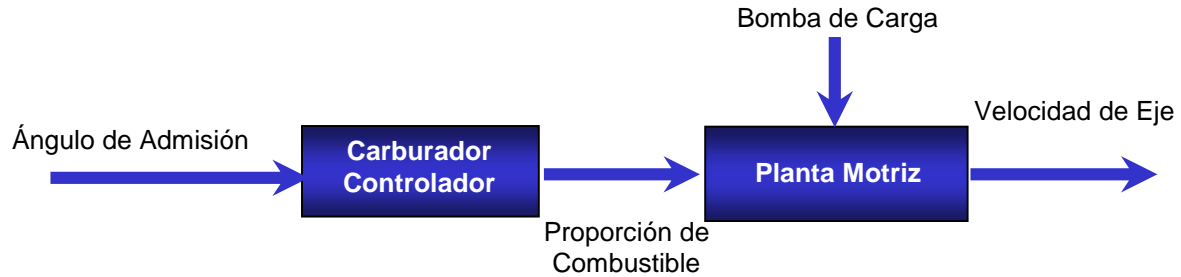
Los elementos de un sistema de control de ciclo abierto, casi siempre pueden dividirse en dos partes: el controlador y el proceso controlado, tal como se muestra en la figura 2.3, se aplica una señal de entrada o comando al controlador, cuya salida actúa como señal de control  $u$ ; la señal actuante controla el proceso controlado, de tal manera que la variable controlada  $c$  se comporte de acuerdo con estándares predeterminados. Estos estándares de comportamiento, en la práctica se determinan experimentalmente y luego se programan las acciones de control, para producir estos efectos.

### Ejemplos:

- El control de tráfico por señales actuadas en función de tiempo.
- Una lavadora de las llamadas “automática” es un sistema de ciclo abierto, puesto que el tiempo de lavado se ha determinado mediante criterios y cálculos previos. Una lavadora, verdaderamente automática, debería comprobar constantemente el grado de limpieza de la ropa y desconectarse por sí misma cuando dicho grado coincidiese con el deseado.
- Un motor de gasolina que se utiliza para accionar una gran bomba, como se ilustra en la figura 2.4, el carburador y la máquina comprenden un tipo común de sistemas de control en donde una gran potencia de salida se controla mediante una pequeña potencia de entrada. En este caso el carburador es el controlador y el motor es el proceso controlado. La proporción de combustible es el control de entrada, y la bomba de carga es una señal perturbadora.



**Figura 2.3: Ciclo Abierto**



**Figura 2.4: Motor de Gasolina**

### 2.4.2 Sistemas de Control de Ciclo Cerrado

Es aquel sistema en el cual la acción de control es en cierto modo dependiente a la salida. Estos sistemas son también llamados sistemas de control por *retroalimentación*<sup>7</sup>.

En los sistemas de control de ciclo abierto, el elemento faltante para lograr un control más preciso y adaptable es un ciclo cerrado o retroalimentación de la salida a la entrada del sistema. Para obtener un control más preciso, la señal controlada  $c(t)$  debe retroalimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida, con el objeto de corregir el error o la desviación. A los sistemas con uno o más ciclos de retroalimentación de este tipo se les llama *sistema de ciclo cerrado*.

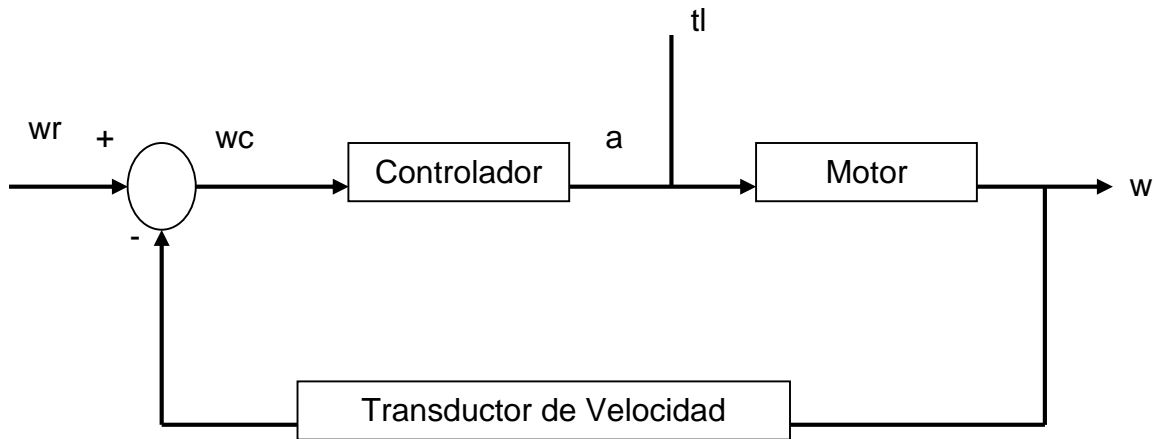
Sin embargo, resulta paradójico en este tipo de sistema, que para que exista una acción de control, primero debe ocurrir un error del sistema. Esto implica, que se pueda lograr mejorar la precisión, pero deberá considerarse que la acción de control sea oportuna y no desfasada.

En la figura 2.5 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de ciclo cerrado aplicado al control de velocidad de un motor. La entrada de referencia  $w_r$  fija la velocidad deseada. Comúnmente, cuando el par de carga es cero, la velocidad del motor en reposo debe coincidir con el valor de referencia  $w_r$ , y cualquier diferencia entre la velocidad real y el valor deseado, causada por cualquiera perturbación del par de carga  $t_l$ , es detectada por el transductor de velocidad y detector de errores, con lo que el controlador operará sobre esta diferencia y proporcionará una señal para ajustar el ángulo del obturador  $a$  que corrige el error.

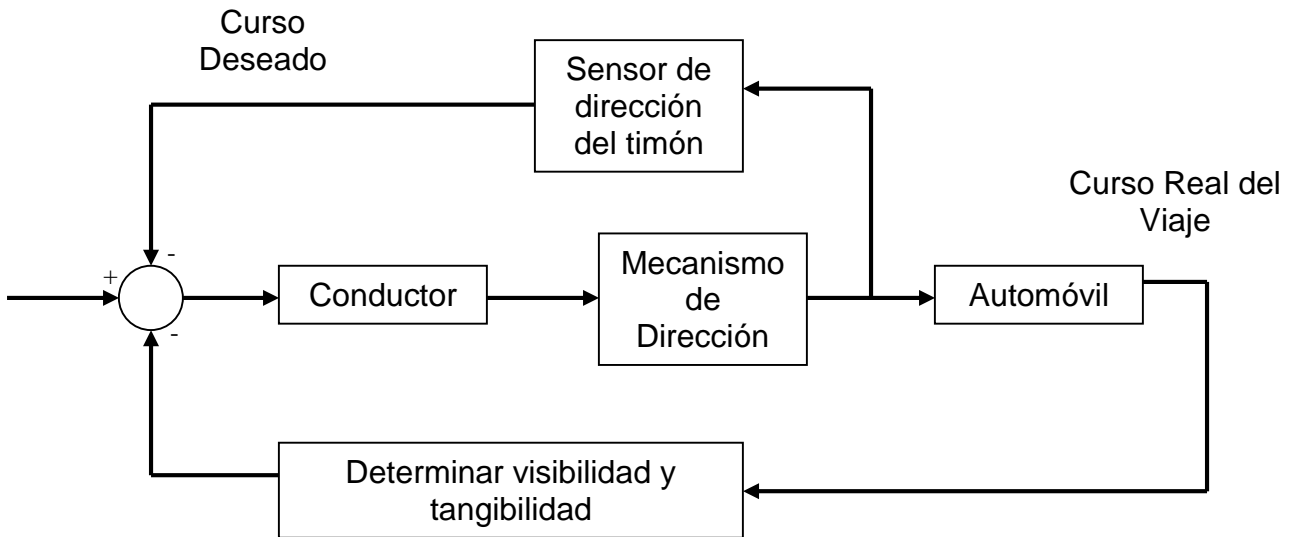
#### Ejemplos:

- Máquinas frigoríficas.
- Calderas para la generación de vapor.

<sup>7</sup> La palabra *retroalimentación* también se conoce como *realimentación*.



**Figura 2.5: Sistema de Control de Ciclo Cerrado**



**Figura 2.6: Sistema de Dirección de un Automóvil**

- Sistema de control de conducción de un automóvil. En la figura 2.6 se presenta el diagrama de bloques de un sistema de control para la conducción de un automóvil. El curso deseado es comparado con la medida de error. Esta medida se obtiene por la retroalimentación visual y táctica (movimiento corporal). Este sistema de retroalimentación es una versión similar al sistema de manejo en una línea marítima o el control del vuelo en un gran avión. Todos estos sistemas operan en una secuencia de ciclo cerrado. También pueden ser conducidos con el apoyo de satélites y sistemas de posicionamiento global.

## 2.5 Tipos Básicos de Sistemas de Control de Ciclo Cerrado

Los sistemas de control de ciclo cerrado son los más utilizados en la actualidad y para facilitar su estudio presentamos los principales tipos que se han desarrollado.

### 2.5.1 Control Directo

Es recomendable medir y controlar directamente la variable que indica el estado del sistema o calidad del sistema para obtener un mejor resultado. Para el caso de control de proceso se puede desear, medir y controlar directamente la calidad del producto. Esto puede presentar un problema, ya que puede ser difícil efectuar la medición de calidad. Por ejemplo, se pueden controlar variables como, temperatura y presión, directamente relacionadas con la calidad.

### 2.5.2 Control Indirecto

El control indirecto de un sistema suele no ser tan eficaz como el control directo, ya que puede haber otras variables que afecten la relación entre la calidad y las variables medidas. Esto quiere decir que, por medio de terceros, se controla el sistema.

### 2.5.3 Sistema de Control Adaptable

Las características dinámicas de la mayoría de los sistemas de control no son constantes por diversas razones, como el deterioro de los componentes al transcurrir el tiempo o las modificaciones en parámetros o en el medio ambiente. Aunque en un sistema de control retroalimentado se atenúan los efectos de pequeños cambios en las características dinámicas, un sistema para ser satisfactorio ha de tener la capacidad de adaptación, lo cual implica la capacidad de auto ajustarse o auto modificarse de acuerdo con modificaciones imprevisibles del medio o estructura. Los sistemas de control que tienen algún grado de capacidad de adaptación, se denominan *sistemas de control adaptados o adaptables*.

En un sistema de control adaptado, las características dinámicas deben estar identificadas en todo momento, de manera que los parámetros de control o detección puedan ajustarse para mantener el funcionamiento óptimo. Este concepto tiene una buena dosis de atracción para el ingeniero de sistemas, ya que un sistema de control adaptable, además de acomodarse a los cambios ambientales, también lo hace ante moderados errores de proyecto de ingeniería o incertidumbre y compensa la eventual falla de componentes menores del sistema, aumentando la confiabilidad de todo el sistema.

### 2.5.4 Sistemas de Control con Aprendizaje

Si intentamos analizar sistemas de control con operación humana, encontramos el difícil problema de escribir ecuaciones que describen el comportamiento humano. En este caso

uno de los muchos factores que lo complican es la capacidad de aprender del operador humano. A medida que este va adquiriendo experiencia, se convierte en un elemento de control, y esto debe ser tomado en cuenta al analizar el sistema. Los sistemas de control con capacidad de aprender reciben el nombre de *sistemas con aprendizaje*. En los últimos años se han dado varios avances en lo referente a estos sistemas.

### 2.5.5 Sistemas de Regulación Automática

Es un sistema de control retroalimentado en el que la entrada de referencia o salida deseada pueden ser constantes, o bien, variar lentamente en el tiempo, y donde su tarea fundamental consiste en mantener la salida en el valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes. Algunos ejemplos de este sistema son: el regulador centrífugo de Watt, la regulación automática de tensión en una planta generadora ante variaciones de carga eléctrica, y los controles automáticos de presión y temperatura en un proceso químico.



**Figura 2.7: Planta Química**

Fuente: [www.canacina.org.mx](http://www.canacina.org.mx)

### 2.5.6 Sistemas de Control de Procesos

Es un sistema de regulación automática en el que la salida es una variable como temperatura, presión, flujo o nivel de líquido. Este sistema tiene amplia aplicación en la industria. Con frecuencia se utilizan en estos sistemas controles programados, como el de la temperatura de un horno de calentamiento en el que la temperatura del mismo se controla según un programa preestablecido.

Por ejemplo, el programa preestablecido consiste en elevar la temperatura a determinado valor durante un intervalo de tiempo, luego reducir a otra temperatura prefijada también durante un período predeterminado. Así pues, nos damos cuenta que el controlador funciona manteniendo la temperatura del horno cercana al punto de ajuste variable.

## **2.6 Comparación entre los Sistemas de Control**

En este punto analizaremos los pros y contras de los diferentes sistemas de control que existen en nuestro tiempo.

### **2.6.1 Ciclo Abierto versus Ciclo Cerrado**

Una ventaja del sistema de control de ciclo cerrado es que el uso de la retroalimentación hace al sistema, en su respuesta, relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de parámetros del sistema. De este modo es posible utilizar componentes relativamente inexactos y económicos y poder lograr la exactitud de control requerida en determinada planta; mientras esto sería imposible en el caso de ciclo abierto.

Desde el punto de vista de la estabilidad, en el sistema de control de ciclo abierto es más fácil de lograr, ya que la estabilidad no constituye un problema importante. Por otro lado, en los sistemas de ciclo cerrado la estabilidad siempre constituye un problema de importancia, por la tendencia a sobre corregir errores, que puede producir oscilaciones de amplitud constante o variable. Hay que recalcar que para sistemas en los que las entradas son conocidas previamente y en los que no hay perturbaciones, es preferible usar el control de ciclo abierto. Los sistemas de ciclo cerrado solamente tienen ventajas si se presentan perturbaciones no previsibles y/o variaciones imprevisibles de componentes del sistema.

Generalmente, se logra un funcionamiento satisfactorio y más económico de todo el sistema, si se opta por una combinación adecuada de controles de ciclo abierto y cerrado.

### **2.6.2 Lineales versus No Lineales**

Estos sistemas se basan en los métodos de análisis y diseño. En su concepto más estricto, los sistemas lineales no existen en la práctica, pues todos ellos tienen un cierto grado de no-linealidad. Los sistemas de control lineales retroalimentados son modelos idealizados que sólo existen como concepto en la mente del analista, para simplificar el análisis y diseño. Cuando las magnitudes de las señales de un sistema de control están limitadas en un intervalo en el que los componentes exhiben características lineales, el sistema es esencialmente lineal.

Por ejemplo, un efecto no lineal de los sistemas de control es la asimetría o desajuste mecánico de los miembros acoplados con engranajes, las características no lineales de los resortes, las fuerzas de fricción o torsión no lineales entre miembros movibles, entre otras. Con frecuencia las características no lineales se introducen a propósito en los

sistemas de control para mejorar su desempeño o lograr un control más efectivo. Por ejemplo, para obtener un control de tiempo mínimo se usa un controlador de tipo cierre-apertura. Este tipo de control es frecuente en muchos sistemas de control de proyectiles o vehículos espaciales.



**Figura 2.8 Transbordador**

Fuente: [www.latercera.cl](http://www.latercera.cl)

En el caso de los sistemas lineales, existe una gran diversidad de técnicas analíticas y gráficas para propósitos de diseño y análisis. Sin embargo, el tratamiento matemático de los sistemas no lineales es bastante difícil y no se cuenta con métodos generales que puedan aplicarse a la resolución de un grupo amplio de sistemas no lineales.

### **2.6.3 Invariable en el Tiempo versus Variable en el Tiempo**

Un sistema de control invariante en el tiempo es aquel en el que los parámetros no varían en el tiempo. La respuesta de tal sistema es independiente del tiempo en el que se aplica la entrada.

Un sistema de control variable en el tiempo es aquel en el cual los parámetros varían con el tiempo; su respuesta depende del tiempo en el que se aplica una entrada. Un ejemplo de un sistema de control variable en el tiempo es el *control de un proyectil* dirigido durante un vuelo. Aunque un sistema variable con el tiempo sin linealidad es todavía un sistema lineal, el análisis y diseño de esta clase de sistemas suelen ser mucho más complejos que los sistemas lineales invariantes en el tiempo.

### **2.6.4 Con Parámetros Concentrados versus con Parámetros Distribuidos**

Los sistemas de control que pueden describirse mediante ecuaciones diferenciales ordinarias, son llamados *sistemas de control con parámetros concentrados*, mientras que los sistemas de control que se describen mediante ecuaciones diferenciales parciales se llaman *sistemas de control con parámetros distribuidos*.



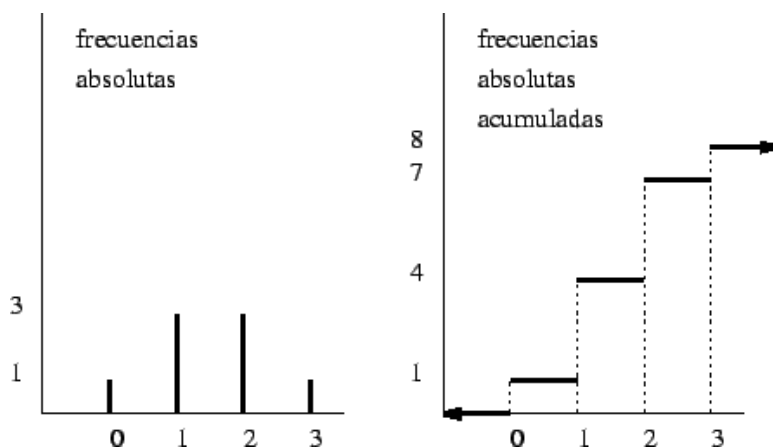
### 2.6.5 Determinísticos versus Estocásticos

Un sistema de control es determinístico si la respuesta a la entrada es predecible y repetible. De no ser así, si el sistema involucra probabilidades (incertidumbre), es estocástico.

### 2.6.6 Tiempo Continuo versus Tiempo Discreto

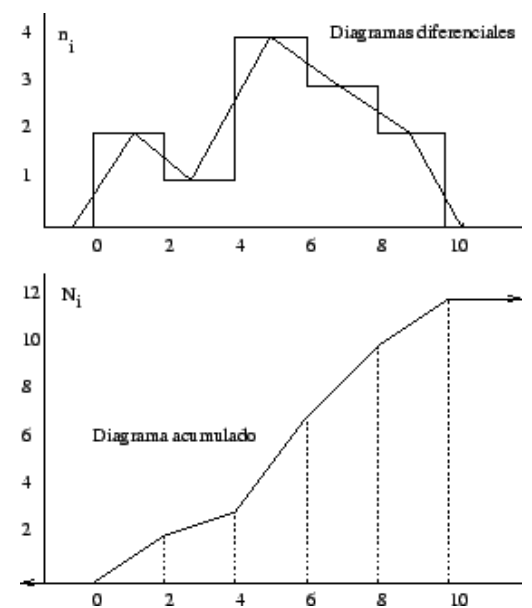
En un sistema de control de tiempo continuo, todas las variables son funciones de un tiempo continuo  $t$ . Un sistema de control de tiempo discreto, abarca una o más variables que son conocidas sólo en instantes discretos o paquetes de tiempo.

A continuación, ejemplos de gráficas representativas de este tópico:



**Diagramas diferenciales e integrales para una variable discreta.**

Fuente: [www.bioestadistica.uma.es](http://www.bioestadistica.uma.es)



**Diagramas diferenciales e integrales para una variable continua.**

Fuente: [www.bioestadistica.uma.es](http://www.bioestadistica.uma.es)

### 2.6.7 Con una Entrada y una Salida versus con Múltiples Entradas y Múltiples Salidas

Un sistema puede tener una entrada y una salida. Por ejemplo, un sistema de control de posición, donde hay un comando de entrada (la posición deseada) y una salida controlada (la posición de salida). Algunos sistemas pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas. Otro ejemplo, un sistema de control de proceso en 2 entradas: Entrada de presión y entrada de temperatura y 2 salidas: Presión de salida y temperatura de salida.

### 2.7 Problemas de Control

De una manera informal, el problema de control consiste en seleccionar, de un conjunto específico o arbitrario de elementos (o parámetros, configuraciones, funciones del tiempo, etc.), aquellos que, aplicados a un sistema fijo, hagan que este se comporte de una cierta manera deseada.

Los problemas de control muestran tres elementos en común:

- Uno que se puede modificar, llamado *entrada*.
- Uno que se desea que tenga ciertas características, llamado *salida*.
- Un tercero, llamado *meta*, que relaciona la entrada con la salida y que no puede ser modificado.

Podemos decir, que el problema de control consiste en escoger, para un sistema dado, una entrada que haga responder a la meta de una manera deseada, esto es, que sostenga una salida con cierta característica. En la siguiente tabla podemos resumir tres problemas de sistemas de control con sus respectivos elementos:

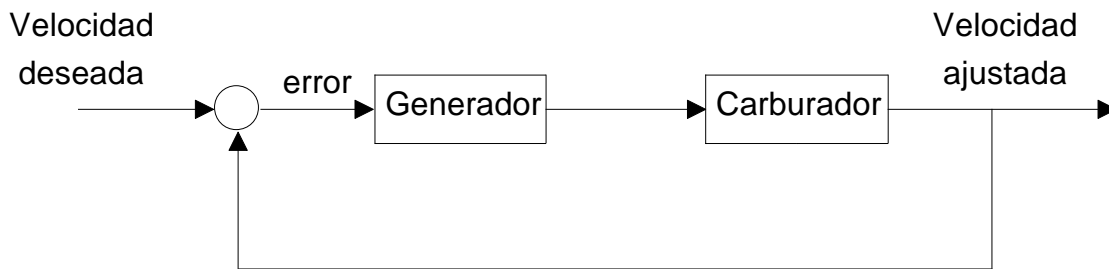
Problema	Entrada	Salida	Meta
Control de Nivel	Localización del punto de operación	Variaciones en el nivel del líquido	Relaciones mecánicas del sistema
Inversionista	Cantidad de acciones a comprar y vender en cierta fecha	Cantidad de efectivo al finalizar el año	Mecanismo de la Bolsa de Valores
Reactor Químico	Temperatura del flujo de alimentación	Composición del torrente de salida	Relaciones de balance y cinética del reactor

## 2.8 Ejemplos

A continuación, se presentan una serie de ejemplos que utilizan los principios y técnicas de la teoría de control.

### 2.8.1 Control de Velocidad del Automóvil

El conductor es el encargado de determinar cuál será la velocidad apropiada para la situación. Un generador eléctrico produce un voltaje proporcional a la velocidad dada. Este voltaje se compara con un voltaje de referencia (el correspondiente a la velocidad anterior) que corresponda a la velocidad deseada. La diferencia en los voltajes es utilizada como señal de error para alterar el carburador e incrementar o decrementar la velocidad según se requiera.



**Figura 2.9: Control de Velocidad de un Automóvil**

Componentes:

- **Objeto:** El automóvil después de haber recorrido una distancia.
- **Subsistema Controlador:** Conductor automático<sup>8</sup>.
- **Variable por controlar:** La velocidad del automóvil.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Velocímetro que observa la variación de la velocidad, a través del tiempo en que el conductor está acelerando.
- **Comparador:** Desviación = velocidad actual (90 km/h) versus velocidad deseada (80 km/h).
- **Reacción:** Aumentar o disminuir la velocidad.

### 2.8.2 Sistema de Control para Llenar un Recipiente con Agua

Objetivo:

Por medio de un grifo en la base, el agua se vaciará en el recipiente. El sistema cortará el flujo de agua automáticamente cuando el recipiente se llene.

<sup>8</sup> Conocido en inglés como *automatic cruiser*.

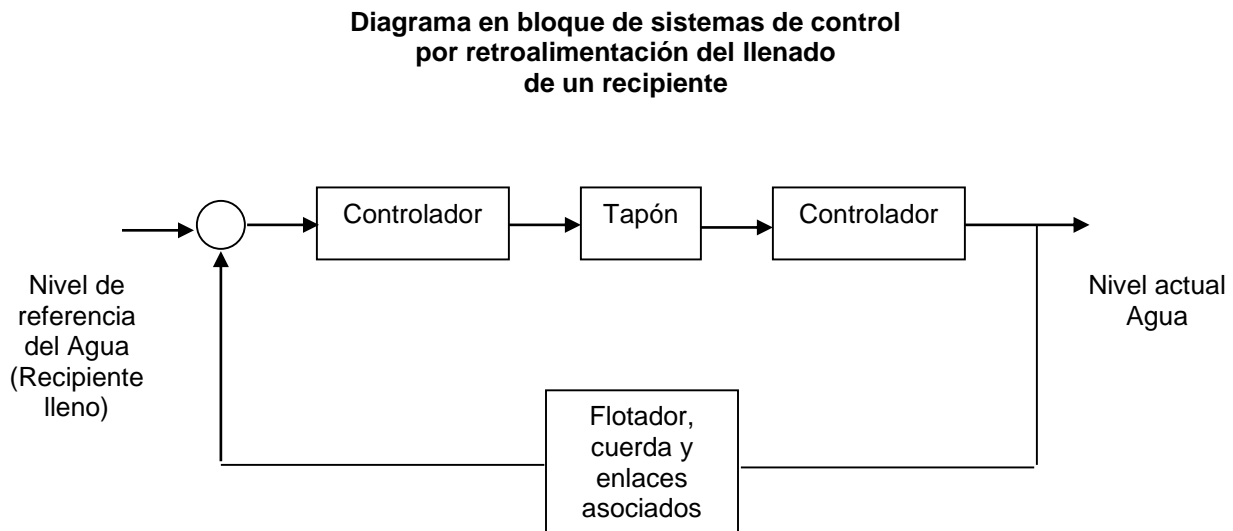
Componentes:

- **Objeto:** El recipiente después de haber abierto el grifo.
- **Subsistema Controlador:** El sistema formado por el tapón y el flotador.
- **Variable por controlar:** El nivel del agua.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** El tapón el cual nos sirve para observar, a través del tiempo el nivel del agua en el recipiente.
- **Comparador:** Desviación = nivel actual (10 m) versus nivel máximo (10 m).
- **Reacción:** El tapón cerrará el flujo de agua de la tubería base.

Funcionamiento:

Tendremos una entrada de agua desde una tubería base, hacia el recipiente que se quiere llenar. En el recipiente tendremos un flotador que ascenderá a medida que el recipiente se esté llenando.

Atado al flotador, existe una cuerda en cuyo extremo opuesto tiene un tapón que controla la entrada de agua desde la tubería base. Cuando el flotador llega al límite de llenado del recipiente, el tapón cerrará el flujo de agua de la tubería base (Véase la figura 2.10).



**Figura 2.10: Recipiente de Agua**

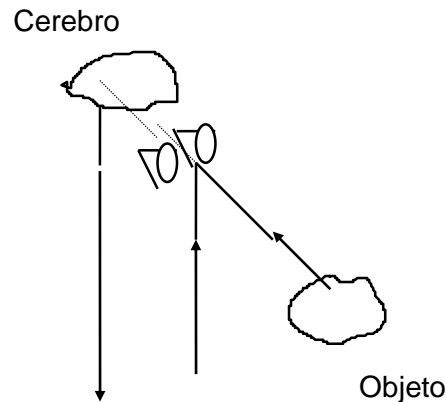
### 2.8.3 Sistema de Control Biológico formado por un Ser Humano al tomar un Objeto.

Los componentes básicos de este sistema de control son el cerebro, el brazo, la mano y los ojos.

El cerebro envía la señal del sistema nervioso requerida hacia el brazo y la mano, con el

fin de alcanzar el objeto. Esta señal se amplifica en los músculos del brazo y la mano los cuales sirven como impulsores en el sistema. Los ojos se usan como dispositivos de exploración y continuamente “retroalimentan” hacia el cerebro la información sobre la posición de la mano. La salida del sistema es la posición de la mano. La entrada es la posición del objeto.

El objetivo del sistema de control es reducir la distancia entre la posición de la mano y la del objeto a cero. La figura 2.11 es un diagrama esquemático. La línea punteada y las flechas representan la dirección del flujo de información.



**Figura 2.11: Ser Humano que toma un objeto**

Componentes:

- **Objeto:** Persona que desea tomar un objeto.
- **Subsistema Controlador:** El cerebro.
- **Variable por controlar:** La distancia entre la mano y el objeto que se desea agarrar.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Los ojos los cuales nos sirven para observar, a través del tiempo, la distancia a la que nos encontramos del objeto que se desea agarrar.
- **Comparador:** Desviación = distancia actual (8 m) versus distancia deseada (10 m).
- **Reacción:** Acercarse más al objeto, ya sea extendiendo más los brazos o caminando más cerca del objeto.

## 2.8.4 Sistema de Información

### Auditoría en un Contexto Computarizado

#### Objetivo:

Integrar los conceptos de factores y riesgos de control en un sistema computarizado y su incidencia en el enfoque de auditoría que se desee aplicar.

#### Enunciado:

La siguiente es una descripción resumida de la aplicación computarizada de cobranzas de cuentas corrientes de Computer Company al 31 de marzo de 1994.

La aplicación de cobranzas de cuentas corrientes fue adquirida del estudio de consultoría MSC y Asociados, que vendió el producto llave en mano, es decir, en funcionamiento y sin que los usuarios ni los miembros del centro de cómputo tengan acceso a los programas.

La cajera, al cabo de cada día, ingresa al sistema la totalidad de los recibos que le entregan los cobradores. Previamente los totaliza en la forma manual y arma un comprobante con los recibos del día.

Para ingresar al sistema debe colocar su identificación de usuario y su clave de acceso que le fue asignada en enero de 1995, fecha de la implantación del sistema. La cajera debe ingresar el total del comprobante antes de comenzar a cargar cada recibo en particular. A medida que esto se produce, el sistema controla la información de los recibos validando, entre otros, los siguientes datos: número de cliente, número de factura e importe de la factura.

Además, el sistema se inhabilita para el procesamiento de dos cobranzas por la misma factura, ya que la modalidad de cobro consiste en recaudar la totalidad de las facturas. Cuando las cobranzas son rechazadas por el sistema, la cajera las coloca en una carpeta para el análisis diario. Cuando el total del comprobante cargado al sistema balancea con la suma de los recibos ingresados, tiene lugar la actualización de los archivos de cuentas corrientes. Los comprobantes diarios de recibos son enviados para su proceso en lote al Centro de Informática mediante el ingreso al sistema de tesorería y de contabilidad, afectando, entre otras, las cuentas de caja, bancos, cuentas locales y del exterior.

Mensualmente el supervisor de contaduría concilia el listado de cuentas con la cuenta control mayor, investigando las diferencias y dejando constancia de su aprobación.

#### Solución:

Puntos débiles de control	Riesgo afectado
La clave de acceso no se cambia habitualmente	Acceso a la aplicación

Puntos fuertes de control	Riesgo disminuido
Controles de validación en el ingreso de los recibos	Ingreso de datos
Controles de totales sobre los ingresos de los recibos	Ingreso de datos
El sistema inhabilita el doble procesamiento de las facturas	Ingreso de datos

### Enfoque de la Auditoria Propuesta:

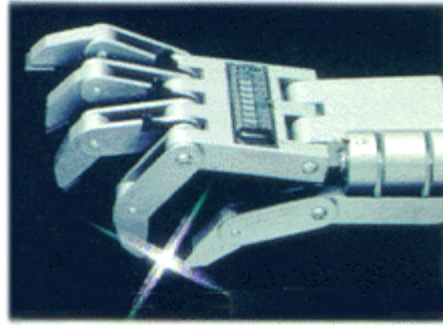
- Revisión de la conciliación mensual del auxiliar de cuentas versus el mayor.
- Revisión de los comprobantes rechazados al cierre de un período y del adecuado seguimiento por parte de la cajera.

### Componentes:

- **Objeto:** Sistema de información computarizado
- **Subsistema Controlador:** Sistema de Auditoría (ejemplo: ACL)
- **Variable por controlar:** Un campo de una tabla de la base de datos
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Programa computacional que indague el campo de la tabla.
- **Comparador:** Programa computacional que compare el valor del campo para ver si cumple con sus características (ejemplo: campo tipo moneda)
- **Reacción:** Reporte de Inconsistencias que encuentre el programa computacional.

### 2.8.5 Sistema de Control de la Fuerza de Agarre de la Mano de un Robot

En la figura 2.12 se puede ver el diagrama esquemático de un sistema de control de la fuerza de agarre, que utiliza un dispositivo sensor de fuerza y otro de deslizamiento. Si la fuerza de aprehensión es demasiado pequeña, la mano del robot dejará caer el objeto mecánico y si es demasiado grande, lo puede dañar o aplastar. La mano recoge y levanta el objeto con la fuerza de agarre preajustada. Si hay algún deslizamiento durante el ascenso, será detectado por el dispositivo censored de deslizamiento, el que enviará una señal de retorno al controlador, el cual a su vez aumentará la fuerza de agarre. De este modo, se puede lograr una fuerza razonable que evite el deslizamiento, pero que no produzca ningún daño al objeto.



**Figura 2.12: Fuerza de Agarre de la Mano de un Robot**

Fuente: [www.aurova.ua.es](http://www.aurova.ua.es)

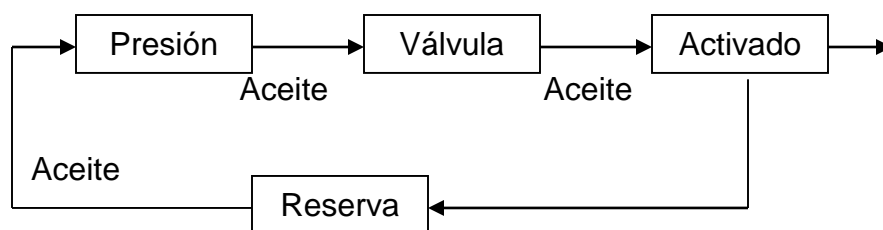
Componentes:

- **Objeto:** Brazo robot.
- **Subsistema Controlador:** Sensor electromecánico de agarre.
- **Variable por controlar:** Presión sobre el objeto.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Sensor de medición de presión sobre el objeto.
- **Comparador:** Dispositivo que compare el valor de la presión sobre el objeto y el valor máximo permitido.
- **Reacción:** Apretar o aflojar.

### 2.8.6 Sistema de Control Hidráulico

En un sistema hidráulico el medio de transmisión de potencia es un fluido bajo presión. El fluido es generalmente aceite debido a que también actúa como lubricante. Los sistemas neumáticos trabajan de la misma forma que los sistemas hidráulicos con la excepción de que en este caso el medio utilizado es aire, lo que es una ventaja cuando el riesgo de fuego o explosión debe ser minimizado.

Un ejemplo de sistema mecánico hidráulico es el mecanismo de *power steering* en un automóvil (véase la figura 2.13).



**Figura 2.13: Sistema Hidráulico**



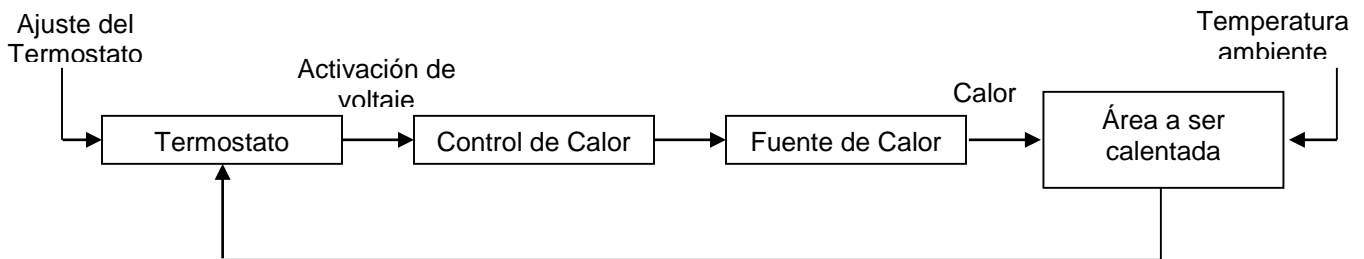
Componentes:

- **Objeto:** Aceite.
- **Subsistema Controlador:** Válvula.
- **Variable por controlar:** Presión sobre el fluido.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Sensor de presión sobre el fluido.
- **Comparador:** Sistema que compare la presión y el valor máximo permitido.
- **Reacción:** Disminuir o aumentar la presión.

### 2.8.7 Sistema de Control de Calefacción

Los sistemas de control de calefacción son pocas veces como los hidráulicos. La mayoría de los sistemas de calefacción no tienen capacidad de enfriar. Si la temperatura excede el valor seleccionado, los sistemas de calefacción meramente se apagan y esperan a que el área se enfríe. Una recepción a esto es el sistema de control de clima usado en algunos automóviles, los cuales es el ciclo de acondicionamiento de calor y aire.

A continuación, presentamos un típico sistema de calefacción casero.



**Figura 2.14: Control de Calefacción**

Componentes:

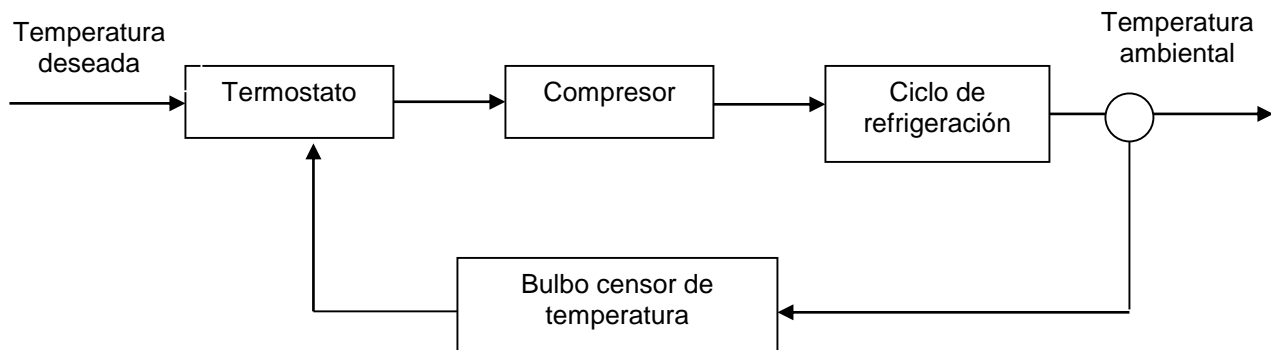
- **Objeto:** Sistema de calefacción.
- **Subsistema Controlador:** Control del calor.
- **Variable por controlar:** Temperatura del aire.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** El termostato que se encarga de sensar la temperatura del aire.
- **Comparador:** Dispositivo que compare la temperatura con el valor deseado.
- **Reacción:** Apagar o encender el sistema de calefacción.

### 2.8.8 Control de Temperatura de la Cabina de Pasajeros de un Coche

Imaginemos la dinámica de sistemas para este caso. La entrada al controlador es la temperatura deseada, convertida a un voltaje. La temperatura efectiva de la cabina se convierte a un voltaje por medio de un sensor, y se le retroalimenta al controlador para su comparación con la entrada. La temperatura ambiente y el calor del sol, transferido por radiación, actúan como perturbaciones debido a que no son constantes durante la marcha del vehículo. Este sistema utiliza tanto control retroalimentado como control de realimentado (el control de realimentación brinda acción correctiva antes que las perturbaciones afecten la salida).

La temperatura en la cabina del vehículo varía considerablemente, según el lugar en que se mida. En vez de instalar múltiples sensores para medir la temperatura, y obtener un promedio de los mismos, es más económico colocar un ventilador de succión en el sitio donde normalmente los pasajeros sienten la temperatura. Entonces la temperatura del aire del extractor brinda una indicación de la temperatura de la cabina y se le considera como salida del sistema.

El controlador recibe la señal de entrada, la señal de salida y las señales de sensores desde las fuentes de perturbación. A su vez, el controlador envía una señal óptima de control al equipo acondicionador de aire para controlar la cantidad de aire refrigerado, de modo que la temperatura sea igual a la temperatura deseada.



Componentes:

- **Objeto:** Cabina de pasajeros de un coche.
- **Subsistema Controlador:** El control retroalimentado
- **Variable por controlar:** Temperatura de la cabina de pasajeros de un coche.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Sensores que midan el valor de la temperatura de la cabina.
- **Comparador:** Dispositivo que compare la temperatura efectiva de la cabina de pasajeros con la temperatura deseada.
- **Reacción:** Aumentar o disminuir la cantidad de masa de refrigerante en el evaporador a fin de manejar la carga térmica y alcanzar el valor de la

temperatura deseada.

### 2.8.9 Sistema de Control de Tráfico

Como se ha indicado anteriormente, el control de tráfico por medio de señales activadas sobre una base de tiempo, constituye un sistema de control de ciclo abierto. Sin embargo, si la cantidad de automotores esperando en cada señal de tráfico en un área congestionada se mide continuamente, y esa información se lleva a una computadora central que controla tales señales, el sistema se convierte en sistema de ciclo cerrado.

El movimiento de tráfico en redes es muy complejo porque la variación en el volumen de tráfico depende mucho de la hora y el día de la semana, así como de muchos otros factores. En algunos casos se puede suponer una distribución de Poisson de llegadas a las intersecciones, pero esto no es necesariamente válido para todos los problemas de tráfico. De hecho, minimizar el tiempo de espera es un problema de control muy complejo.

Componentes:

- **Objeto:** Tráfico.
- **Subsistema Controlador:** Sistema de señales de tráfico.
- **Variable por controlar:** Flujo del tráfico.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Sensores que midan el movimiento del tráfico.
- **Comparador:** Dispositivo que mida la variación en el volumen de tráfico.
- **Reacción:** Transmitir las señales de tráfico necesarias para descongestionar el flujo automovilístico.

### 2.8.10 Sistema de Control de Inventario

Otro ejemplo de sistema de control de ciclo cerrado lo constituye la programación industrial del ritmo de producción y nivel de inventario. El nivel de inventario real, que es la salida del sistema, se compara con el nivel de inventario deseado que puede variar ocasionalmente según el mercado. Si aparece una diferencia entre el nivel de inventario real y el deseado, el ritmo de producción se ajusta de manera que la salida siempre iguale o esté cercana al valor deseado, que se elige para maximizar las utilidades.

Componentes:

- **Objeto:** Procesadores
- **Subsistema Controlador:** Sistema de Inventario
- **Variable por controlar:** Cantidad de procesadores en existencia
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Programa computacional que lee la cantidad existente cada vez que un vendedor vende y factura procesadores
- **Comparador:** Programa computacional que compara la cantidad en existencia

con el punto de reorden de este artículo.

- **Reacción:** No hacer nada o solicitar que se compren más; ya que la existencia se encuentra por debajo del punto de reorden.

### 2.8.11 Sistemas Empresariales

Un sistema empresarial puede consistir de varios grupos. Cada tarea asignada a un grupo, representa un elemento dinámico del sistema. Para el funcionamiento correcto de tales sistemas, hay que establecer métodos retroalimentados para el control de los logros de cada grupo. El acoplamiento mutuo entre grupos funcionales debe ser mínimo para reducir atrasos inútiles en el sistema. Cuanto menor sea el acoplamiento más suave será el flujo de señales y de materiales.

Componentes:

- **Objeto:** Empresa
- **Subsistema Controlador:** Gerencia General y otras gerencias.
- **Variable por controlar:** Grupos de Trabajo.
- **Un observador o detector, que se encargue de revisar las señales que se reciban de la variable:** Asistente Ejecutivo de la Gerencia General.
- **Comparador:** Resultados de los grupos versus plan estratégico de la empresa.
- **Reacción:** Decisiones que toma el Gerente General para mejorar el acoplamiento de los grupos.

El capítulo 10 de este libro trata en mayor detalle la temática de la dinámica de una empresa. Este tema se ha convertido en algo muy crucial para la gerencia de una empresa en este nuevo siglo y se ha descubierto que la dinámica de sistemas puede aportar considerablemente al mejoramiento de la eficiencia.

## 2.9 Resumen

Toda actividad que implique el cumplimiento de una función para lograr un propósito, depende de un sistema de control. Los modelos matemáticos son el arma fundamental en el diseño de los sistemas de control, porque sirven para la elaboración de una teoría unificada de control.

La precisión dentro de un sistema de ciclo abierto depende en gran medida del criterio y estimación de su operador. Un sistema de ciclo cerrado puede diseñarse para tratar de obtener error cero (o casi cero).

En un sistema retroalimentado, la variable es controlada por la salida del sistema, la cual es constantemente revisada y corregida para llevarla al nivel deseado lo que puede producir variaciones en la salida del sistema manteniéndola en constante cambio.

El controlador, dentro de un sistema de ciclo cerrado, compara una salida deseada de la planta con la salida real y actúa en consecuencia para reducir las dos.

## 2.10 Revisión Histórica

El primer trabajo significativo en control automático fue el **regulador centrífugo** de James Watt para el control de la velocidad de una máquina de vapor en el siglo XVIII. En 1922 Minorsky trabajó en controles automáticos de dirección en barcos y mostró como se podría determinar la estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1934, Hazen, que introdujo el término “**servomecanismo**” para los sistemas de control de posición, estudió el diseño de servomecanismos repetidores capaces de seguir estrechamente una entrada cambiante.



**Figura 2.15: Regulador Centrífugo de James Watt**

Al inicio de los años 40, los **métodos de respuesta de frecuencia** posibilitaron a los ingenieros, el diseño de sistemas de control retroalimentado lineal que satisficieran las necesidades de comportamiento. A finales de esta década e inicios de los años 50, se desarrolló completamente el **método del lugar de las raíces** en el diseño de sistemas de control.

Los métodos de respuesta de frecuencia y del lugar de las raíces, que son el corazón de la **Teoría de Control Clásica**, llevan a sistemas que son estables y que satisfacen un conjunto de requerimientos de funcionamiento. La teoría de control Clásica trata problemas de entrada y salida única, por tanto, se vuelve impotente ante sistemas de múltiples entradas y salidas. Desde 1960, se ha desarrollado la **Teoría de Control Moderna** para hacerle frente a las plantas modernas y las necesidades rigurosas en exactitud, peso y costo en aplicaciones militares, espaciales e industriales. Gracias a la disponibilidad de computadoras, se ha desarrollado en gran manera esta metodología y actualmente se están desarrollando aplicaciones de la Teoría de Control Moderna a campos no ingenieriles como la Biología, Economía, Medicina y Sociología, esperando resultados óptimos en un futuro.