

## PREFACIO

Cuando un profesor planea la clase de una asignatura; independientemente de la asignatura que sea, realiza un trabajo previo que consiste en consultar la bibliografía pertinente y en esquematizar los temas, de modo que éstos sean presentados a los estudiantes en forma dinámica, práctica y sistemática; con el objetivo de facilitar la comprensión y la posterior profundización de los temas en la bibliografía recomendada.

Con el propósito de facilitar la actividad de comprensión temática y profundización bibliográfica, en la Asignatura Control I, de la Escuela de Ingeniería Electrónica, de la UPTC, Seccional Sogamoso, está diseñado este libro de apuntes de clase, que además intenta brindarle al estudiante una herramienta guía que le permite tener acceso a la información de las clases respectivas.

La temática presentada se inicia desde el Modelaje de Sistemas Dinámicos, Análisis de Sistemas en el Dominio del Tiempo y la Frecuencia, para terminar con el Diseño de Controladores; utilizando diferentes técnicas tanto de análisis como de diseño.

Cabe señalar, que, aunque no se puede considerar como un libro de Control Análogo, sí es esa pauta teórica y conceptual que como estudiantes necesitamos y que generalmente buscamos obtener a través de los apuntes de clase.

De otro lado, agradezco posibles sugerencias u opiniones orientadas al mejoramiento de este texto, para posteriores presentaciones.

Liliana

## UNIDAD I

## 1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL

### 1.1 Generalidades

La teoría de control es una herramienta general que puede ser aplicada en diversas ramas del conocimiento. No solamente los ingenieros electrónicos estudian control, también lo hacen los economistas, ingenieros químicos, ingenieros de sistemas, expertos en finanzas, etc., y por supuesto los ingenieros de control.

Todos los sistemas que puedan ser modelados o analizados a través de modelos matemáticos o lingüísticos están disponibles para ser trabajados con ésta teoría. Una vez se obtiene un modelo matemático es indiferente si se dedujo de un sistema económico o mecánico ya que, para el análisis es simplemente un "modelo".

El control automático aparece como una aplicación de la teoría de control con el fin de manejar una o varias variables de salida a partir de la manipulación de una o varias variables de entrada; dicha manipulación debe ser efectuada por un "*controlador*" sobre una planta o proceso de interés.

Antes de seguir hablando sobre el controlador, es necesario conocer algunos conceptos claves que permiten aclarar diversos interrogantes en el tema:

#### 1.1.1 Plantas:

Una planta es el objeto que requiere control, puede ser un conjunto de elementos o piezas de una máquina que realizan una operación establecida. Entonces, como ejemplo de planta se tiene un motor D.C, un horno de calentamiento, una caldera, un tanque de almacenamiento de líquidos, una banda transportadora, etc., Cualquier "objeto" que necesite control-.

#### 1.1.2 Proceso:

Es un conjunto o secuencia de pasos o acciones que busca obtener un resultado final. Como ejemplo están los procesos económicos, financieros, químicos etc.

#### 1.1.3 Señales

Son funciones que están definidas en el dominio del tiempo y proporcionan información sobre las variables de entrada, salidas o intermedias de un proceso y/o planta.

#### 1.1.4 Variables de Entrada:

Una variable de entrada es aquella que es independiente de la salida, de otras variables de entrada, y del proceso y/o planta, pero que permite su manipulación con el fin de obtener unas variables de salida con características determinadas. Por ejemplo, en un motor D.C.

las variables de entrada pueden ser el voltaje de alimentación de la armadura y/o el de la excitación del campo magnético.

#### 1.1.5 Variables de Salida:

Las variables de salida son el resultado del proceso, dependen de las variables de entrada manejadas y de la dinámica de la planta. Utilizando el ejemplo anterior como variables de salida en el motor D.C. se tendrían la posición y/o la velocidad.

#### 1.1.6 Sistema:

Es una agrupación de elementos que trabajan conjuntamente y tienen un objetivo final (Buscan determinadas características en una variable de salida). Como ejemplo de éstos están el sistema digestivo, sistema respiratorio, sistema de suministro de agua etc. En la naturaleza existen sistemas en lazo abierto y cerrado, que pueden ser SISO (*Single Input, Single Output*) una entrada una salida o MIMO (*Multiple Inputs, Multiple Outputs*) múltiples entradas múltiples salidas.

#### 1.1.7 Sistemas de Control Realimentado:

Un sistema de control realimentado utiliza para realizar el control la comparación entre la salida y una señal de referencia (salida deseada), obteniendo una señal conocida como  $e(t)$  ya que es la diferencia entre lo que se *tiene* como salida(s) y lo que se *quiere* en la salida(s). Hay sistemas que no poseen retroalimentación negativa (diferencia) sino positiva; esto trae como consecuencia que el error se hace cada vez más grande y el sistema no se puede controlar.

#### 1.1.8 Sistema de Control en Lazo Abierto:

Un sistema en lazo abierto es aquel que para buscar su objetivo final no utiliza información de la salida. Como ejemplo de esta clase de sistema se tiene una lavadora cuyo objetivo final es limpiar la ropa, sin embargo, ella una vez termina el ciclo de lavado no indaga sobre el estado final de la ropa, para saber si se cumplió o no con el objetivo.

#### 1.1.9 Sistema de Control en Lazo Cerrado:

Un sistema en lazo cerrado verifica el objetivo final con el fin de saber si lo obtuvo correctamente, en otras palabras, observa la salida y devuelve esa información para corregirla a través de la manipulación de las señales de entrada (operación realizada por el controlador). Los sistemas de control en lazo cerrado hacen parte de **los sistemas de control realimentados y son la base en control automático**. Como ejemplo de sistemas en lazo cerrado esta la cisterna del tanque de agua del inodoro, ya que una vez se baja el agua del tanque, éste se vuelve a llenar de manera automática.

#### 1.1.10 Sistemas de Control Automático

Son sistemas que realizan operaciones determinadas sin necesidad de la intervención de los operarios. En la automatización de procesos se busca hacer que las plantas operen de forma automática con el fin de que el proceso opere de forma similar; teniendo como

premisa la alta productividad y el control de las variables que determinan la calidad del servicio o producto.

### 1.1.11 *Perturbaciones:*

Son señales que afecta adversamente la salida de un sistema. Los sistemas realimentados buscan anular el efecto de las perturbaciones en la salida.

## 1.2 Partes que conforman un Sistema de Control

Un sistema de control está compuesto de varias partes que cumplen con una tarea específica. En la figura 1.1a aparecen las partes generales que conforman un sistema de control en lazo abierto y en la figura 1.1b las partes generales que conforman un sistema en lazo cerrado.



Figura 1.1a. Sistema de Control en Lazo Abierto

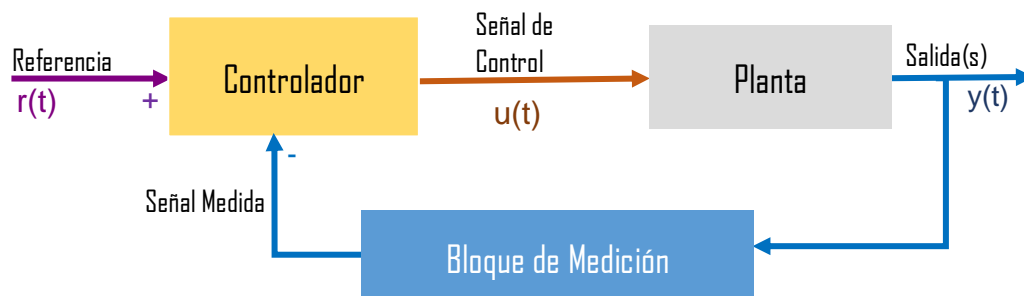


Figura1.1b. Sistema de Control en Lazo Cerrado

Figura 1.1 Diagrama de bloques de un Sistema de Control.

En la gráfica se observa la planta que es el objeto de control; el controlador, que es el encargado de mantener las variables de salida con unas características determinadas; y el bloque de medición. En el caso de los sistemas en lazo cerrado, el bloque de medición es el encargado de medir y convertir la señal de salida en una señal que se pueda comparar con la referencia.

En los sistemas en lazo abierto los controladores cumplen con tareas que han sido prescritas a través de la experiencia (información obtenida de un operario), o con análisis estadísticos del comportamiento de la planta. Si los parámetros o las condiciones de operación de la planta cambian el sistema quedaría sin control (Para el ejemplo de la lavadora cada ciclo ha sido diseñado con el fin de que satisfaga las necesidades de limpieza requeridas por un tipo

de ropa, si es ropa delicada el ciclo dura menos que uno para ropa fuerte; sin embargo, el primero puede resultar lesivo para una ropa muy delicada, así como el segundo resultaría insuficiente para una ropa dura y de gran percutido. Sería de gran utilidad una lavadora automática, pero a lazo cerrado que midiera el grado de suciedad de la ropa durante todo el tiempo del ciclo, y así se controlara su duración). No obstante, los sistemas en lazo abierto generalmente están supervisados por un operario, él hace la medición, la comparación y se convierte en parte del controlador, en consecuencia, el sistema quedaría en lazo cerrado.

Se puede hacer una descripción más detallada de los elementos que harían parte de un sistema de control teniendo en cuenta los conocimientos adquiridos en instrumentación industrial. En la Figura 1.2 aparece un sistema de control en lazo cerrado y todas sus posibles partes. Cabe aclarar que, si se va a identificar un sistema de control, éste puede poseer todas o algunas de estas partes, en ocasiones un mismo elemento cumple con diversas funciones (Un sistema en lazo abierto podría estar formado por las mismas partes del sistema en lazo cerrado, pero no existiría el comparador; los sistemas de control en lazo abierto también pueden poseer sistema de medición con el fin de ayudar al operario a establecer el estado de las variables del sistema).

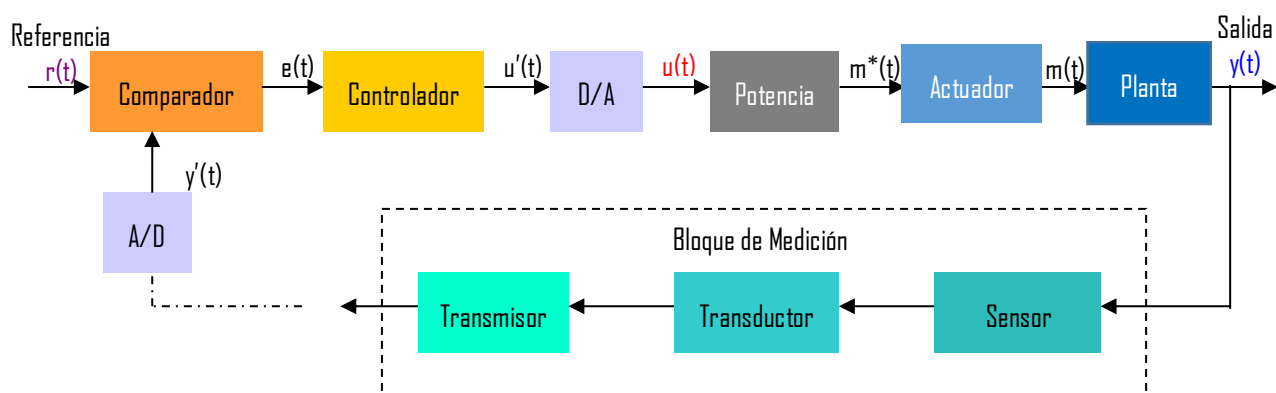


Figura 1.2. Diagrama de bloques detallado de un sistema de Control a lazo cerrado.

Con el avance tecnológico del último siglo los computadores, los microprocesadores, microcontroladores, DSP y en general los sistemas digitales resultan una forma económica y de gran capacidad de procesamiento, para diseñar controladores que actúen sobre sistemas analógicos, para esto los conversores Análogo- Digital y Digital – Análogo vistos en los cursos de Instrumentación y Electrónica III sirven como puente entre las dos formas de tratar las señales. Sin embargo, de forma analógica también se pueden diseñar controladores, comparadores y demás elementos del sistema, generalmente implementados con amplificadores operacionales.

Las partes que conforman un sistema de control, además de la planta son:

### 1.2.1 Comparador:

Como su nombre lo indica es el encargado de “comparar” la señal de salida (señal que envía el sistema de medición) con la señal deseada que recibe el nombre de referencia, consigna o *set point*; y así obtener la señal de error ( $e(t)$ ). En la realidad consiste en un circuito compuesto por amplificadores operacionales configurado como restador, cuando el sistema de control es análogo, o en un algoritmo que cumple con esta labor entre dos registros; si el controlador es digital. Aunque su función es específica generalmente se considera parte del controlador.

### 1.2.2 Controlador:

Recibe la señal de error y de acuerdo con su valor decide que señal de control ( $u(t)$ ) enviar hacia el actuador. Puede ser análogo (función implementada con Op-Amp.) o digital (Algoritmo dentro del sistema digital).

### 1.2.3 Bloque de Potencia:

Aparece cuando la señal enviada hacia el actuador por el controlador no tiene la suficiente potencia para excitarlo; haciéndose necesario un sistema de potencia adicional. En el caso de un motor D.C. cuya velocidad es controlada con el voltaje de armadura, el rectificador controlado por el PWM, que proporciona dicho voltaje conformaría el bloque de potencia; la señal de control solo tiene que comandar al PWM, más no proporcionar el voltaje de alimentación al motor.

### 1.2.4 Actuador:

Generalmente hace parte de la planta está encargado de recibir la señal de control ( $u(t)$ ) y “actuar” sobre las entradas de la planta para que las salidas sean similares a las deseadas. En el ejemplo de un horno eléctrico la resistencia sería el actuador, ya que es el elemento que incide directamente en el cambio de la temperatura (señal de salida).

### 1.2.5 Bloque de Medición:

En este bloque están todas las componentes necesarias para llevar la señal de salida a una señal que se pueda trabajar en el sistema de control. Si se va a diseñar un controlador análogo de temperatura para un horno eléctrico, generalmente un Ingeniero Electrónico busca llevar la señal de temperatura a una señal que se pueda manipular de forma análoga, por ejemplo, voltaje; para lo cual se utilizan elementos que sensen, transduzcan, transmitan y adecuen dicha señal en los rangos y características que se desean; de ser así, la señal de referencia debe tener las mismas características (también sería de voltaje).

La automatización de sistemas no es reciente, data incluso de siglos A.C. Actualmente la automatización industrial incorpora nuevas teorías para la realización de algoritmos de control y nuevas tecnologías que hacen más eficientes los procesos. Muchas empresas tienen sistemas automáticos que son obsoletos, no por el tipo de algoritmo de control que utilizan, sino por el tipo de tecnología con el que se implementaron.

### IDEAS COMPLEMENTARIAS...

Aunque los ejemplos presentados en las anteriores definiciones fueron solamente técnicos; en procesos y sistemas que no son industriales también se pueden identificar las componentes más generales de un sistema de control, como son Planta, Comparador, Controlador, Actuador, Bloque de Medición y las variables que lo conforman, en estos casos generalmente las variables tienen otra presentación. Por lo tanto, la teoría de control es general y no particularizada para sistemas industriales con mando electrónico, eléctrico o mecánico como se tiende a pensar inicialmente. Por ejemplo:

- El cuerpo humano posee sistemas en lazo cerrado y se pueden identificar las partes de estos sistemas con claridad, el controlador es el cerebro, como sensores están los cinco sentidos la visión, el oído, el gusto el olfato y el tacto; y se poseen diversos actuadores como músculos, glándulas etc.
- En el proceso enseñanza aprendizaje también se pueden identificar las partes de un sistema de control. En un caso el profesor hace las veces de controlador y el objeto de control sería el conocimiento que sobre su clase tengan los alumnos, la referencia estaría dada por un mínimo conocimiento sobre el tema, el cual se mediría a través de quices, parciales etc.

Se presentan confusiones entre la señal de control y la señal manipulada. Cuando se tiene un motor D.C. controlado por voltaje de armadura la señal del controlador es la referencia de PWM que 'manipula' el nivel de voltaje de armadura con el cual se va a controlar el motor.

### REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- R. C. DORF Y R. H. BISHOP, "Sistemas de Control Moderno", Editorial Pearson, 10a Edic, 2005.  
 DORF, R. C. & BISHOP, R. H. 2011. Modern control systems, Pearson.  
 K. OGATA, "Ingeniería de Control Moderna", Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, 5a Edic, 2010.  
 B. KUO, "Automatic Control Systems", Editorial Wiley, 9a Edic, 2009.  
 K. OGATA, "Modern Control Engineering", Editorial Prentice-Hall, 6a Edic, 2012.