

## TEMA I

# CONCEPTOS DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA

- 1.-Introducción.
- 2.-Historia de la Ingeniería de Control.
- 3.-Componentes básicos de un Sistema de Control
- 4.-Tipos de Sistema de Control:
  - 4.1.-Lazo abierto y lazo cerrado.
  - 4.2.-Control Continuo y Control Discreto.
  - 4.3.-Sistemas Lineales y No Lineales.
  - 4.4.-Sistemas Variantes o Invariantes con el tiempo.

## **1.-Introducción.**

El control automático ha jugado un papel vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia. Además de su extrema importancia en vehículos espaciales, guiado de proyectiles y sistemas de pilotaje de aviones, el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos; maquinado, manejo y armado de piezas mecánicas en las industrias de fabricación, entre otros muchos.

Como los avances en la teoría y práctica del control automático brindan medios de lograr el funcionamiento óptimo de sistemas dinámicos, mejorar la calidad y abaratar los costos de producción, expandir el ritmo de producción, liberar de la complejidad de muchas rutinas, de las tareas manuales repetitivas, etc., la mayoría de los ingenieros y científicos han de tener buenos conocimientos en este campo.

El estudio de los Sistemas de Control puede ser de gran ayuda para establecer lazos de unión entre los diferentes campos de estudio, haciendo que los distintos conceptos se unan en un problema común de control. En este sentido, la Ingeniería de Control no es sino una pequeña parte de una teoría más genérica denominada Ingeniería de Sistemas, que estudia el comportamiento de un sistema dinámico, esto es, de un sistema que evoluciona en el tiempo y que puede incluir un proceso de cualquier tipo: biológico, económico, de ingeniería, etc. Desde este punto de vista, la Ingeniería de Control proporciona una comprensión básica de todos los sistemas dinámicos, así como una mejor apreciación y utilización de las leyes fundamentales de la Naturaleza.

Definiremos un *Sistema* como un conjunto de componentes interconectados, formando un bloque coherente y cuya misión es caracterizar una función que no es posible lograr con cada una de las partes consideradas individualmente. Un *Sistema de Control* representa un conjunto de aparatos coordinados de tal manera que proporcionan la respuesta deseada de un determinado proceso. La *Ingeniería de Control* se refiere al estudio del control o regulación de sistemas físicos. La base para el análisis de la Teoría de Control se encuentra en la teoría de los Sistemas Lineales, la cual supone una relación causa-efecto para los componentes del sistema, que obedece al Principio de Superposición.

## 2.-Historia de la Ingeniería de Control.

Las primeras aplicaciones del control con realimentación datan del tiempo de los griegos, en el que realizaron mecanismos regulados con flotador. Herón de Alejandría (siglo 1 D.C.) publicó un libro titulado "Pneumática", en el cual mostraba varias formas de mecanismos de agua mediante reguladores con flotador. Los árabes recogieron estos conocimientos y perfeccionaron la construcción de relojes de agua, cuya edad de oro finalizó en 1258, con la toma de Bagdad por la invasión mongol.

Los mecanismos de regulación vuelven a renacer en el siglo XVI en Europa. Cornelius Drebbel (1572-1633) de Holanda, diseñó un regulador de temperatura que empleó en incubadoras de pollos. Dennis Papin (1647-1712) inventó el primer regulador de presión para calderas de vapor en 1681 (especie de regulador de seguridad, semejante a la válvula de las ollas a presión).

El primer regulador con realimentación automática usado en un proceso industrial, y que para muchos representa el primer sistema de control automático y punto de partida de esta ciencia, fue el regulador centrífugo de James Watt, desarrollado en 1770 para controlar la velocidad de una máquina de vapor. El dispositivo, completamente mecánico, según se muestra en la figura 1, medía la velocidad del eje de salida por medio de un tren de engranajes; unas masas esféricas, al girar, debido a la fuerza centrífuga, regulaban, por medio de un sistema de palancas, el movimiento de una válvula mariposa que controlaba la entrada de vapor a la máquina. Conforme aumenta la velocidad de la máquina, se levantan los pesos que hacen deslizar un collar móvil, provocando el cierre de la válvula de entrada de vapor. Si la velocidad disminuye, se produce la acción contraria. El cambio en la velocidad deseada de régimen se lograba ajustando los brazos de la palanca de las barras o enlaces mecánicos.

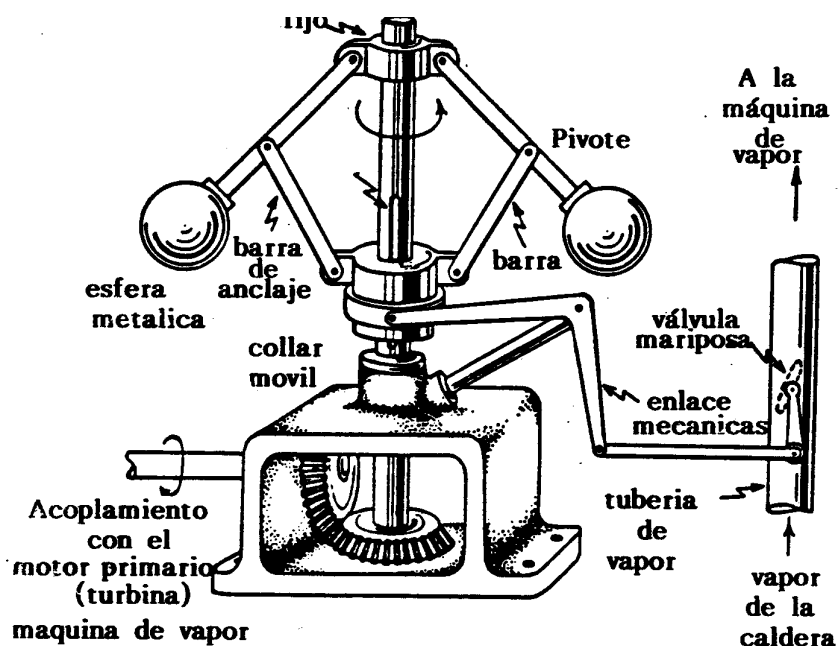


Figura 1

#### -4- Conceptos de Regulación Automática

Desgraciadamente, el regulador centrífugo de Watt era propenso a las oscilaciones (inestabilidad) y ello hizo que fuera objeto de muchas investigaciones.

En 1868, J.C. Maxwell, en un artículo publicado con el título "On Governors", propuso una solución al problema de los reguladores centrífugos, utilizando una ecuación diferencial y analizando las condiciones de estabilidad para un sistema de tercer orden, pero fue incapaz de extender su teoría a sistemas de un orden más elevado. En 1874, John Routh, nacido en Canadá, pero profesor en Cambridge, fue capaz de determinar las condiciones de estabilidad para sistemas de hasta 5º orden. En 1895, Hurwitz resolvió el problema para orden 7 y en 1911, Bompiani estableció la equivalencia de los criterios empleados por Routh y Hurwitz que, de forma independiente, llegaron a las mismas conclusiones. En 1892, el ruso Liapunov publicó su tesis doctoral "On the General Problem of Stability of Motion", ideando una teoría sobre la estabilidad que era aplicable incluso a sistemas no lineales (desgraciadamente, este trabajo no se conoció en occidente hasta la década de los 50).

De forma paralela, el ingeniero inglés Oliver Heaviside publicó en 1893 un trabajo que llevaba por título "On operators in mathematical physics", donde desarrollo unas teorías sobre cálculo operacional y que utilizó en el estudio del comportamiento transitorio de circuitos y que permitían analizar una ecuación diferencial lineal como si fuera una ecuación algebraica. Esta técnica fue justificada rigurosamente en 1917 por los matemáticos Carson y Bromwich, y vieron que las ideas de Heaviside se asentaban en los trabajos de Laplace (1749-1827) y este método, denominado "transformada de Laplace" fue el que sirvió de inicio al estudio matemático de los sistemas de control lineal (aunque no se aplicó a este campo hasta la década 1940-1950).

A principios del siglo XX, el desarrollo del control automático fue muy lento, debido a que se basaba primordialmente en sistemas mecánicos. Cabe destacar, sin embargo, el trabajo realizado por Minorsky en 1920, en sistemas de dirección automática de barcos y control de posición de cañones de abordó. No obstante, el verdadero desarrollo de la teoría de control va unido al desarrollo de la electrónica. En 1927, Harold Black, ingeniero de los laboratorios Bell, inventó el amplificador con realimentación negativa. Se observó que este amplificador tendía a oscilar a ciertas frecuencias. El análisis directo de la estabilidad del amplificador basándose en el planteamiento de las ecuaciones diferenciales era inviable, dado el alto orden de la ecuación. Harry Nyquist (1889-1976), un sueco emigrado a Estados Unidos, que trabajaba con Black en la Bell Telephone, publicó en 1932 su célebre artículo "Regeneration Theory", en el que analizaba la estabilidad del amplificador realimentado en el dominio de la frecuencia, utilizando el concepto de anchura de banda y otras variables dependientes de la frecuencia. Esta teoría dio origen a los métodos de la respuesta en frecuencia, para el análisis de la estabilidad de los amplificadores realimentados. Otras investigaciones en este campo fueron también realizadas por Hendrik W. Bode en 1940, a quien se debe la introducción de las unidades logarítmicas de ganancia (bel) y frecuencia, y a quien se debe el procedimiento de diseño que lleva su nombre.

Una fecha importante en la ingeniería de control fue el año 1934, en que Hazen publicó el primer trabajo analítico sobre el diseño de sistemas de lazo cerrado y que fue origen de los que se sucedieron después. La palabra “servomecanismo” y su contracción “servo” fue inventada por él y se aplicó a los sistemas de control realimentados. Hoy día, la palabra servomecanismo se reserva, exclusivamente, a los sistemas de control en los que la variable controlada es una posición mecánica o derivadas de ésta (velocidad y aceleración).

Hasta 1940, la teoría de control se desarrolló en EEUU y Europa, en base a la respuesta en el dominio de la frecuencia. En Rusia se tendió a utilizar una formulación en el dominio del tiempo, usando ecuaciones diferenciales.

Durante la II Guerra Mundial se realizó un gran avance en la teoría y práctica del control automático, ya que fue necesario diseñar y construir pilotos automáticos para aeroplanos, sistemas de dirección de tiro de cañones y antenas de radar y otros sistemas militares basados en los métodos de control por realimentación. La complejidad y funcionamiento de estos sistemas militares hizo necesario una ampliación de las técnicas de control disponibles y fomentó el interés en los sistemas de control y en el desarrollo de nuevos métodos e ideas.

Antes de 1940, en la mayoría de los casos, el diseño era un arte que comprendía aproximaciones por el procedimiento de ensayo y error. Durante la década de 1940 se incrementaron en número y utilidad los métodos matemáticos y analíticos, y la ingeniería de control llegó a ser una disciplina completa. M. Harris defendió en un artículo publicado en 1942, el uso de las funciones de transferencia y los diagramas de bloque. Nichols realizó nuevos procedimientos gráficos para el estudio de la estabilidad en el dominio de la frecuencia; Guillemin introdujo la síntesis de redes y Evans, en 1948, desarrolló el método del lugar de las raíces.

En la década 1950-1960 se hizo extensivo el uso de la Transformada de Laplace y el plano de la frecuencia compleja. Además durante esa época fue posible la utilización de los ordenadores analógicos y digital como componentes del control. Estos nuevos elementos proporcionaron una capacidad para calcular con rapidez y exactitud, que no existían antes para el ingeniero de control. En esta época se suceden con gran rapidez los artículos y textos sobre ingeniería de control y temas afines. En 1947, Von Newman y Morgenstern crean la teoría de juegos y James, Nichols y Phillips escriben “Theory of servomechanism” donde exponen y resumen las teorías más importantes sobre el control, e incorporan el tratamiento estadístico. En 1948, Norbert Wiener publica su famosa obra “Cybernetics” (la palabra cibernética, creada por Wiener es de la raíz griega “kybernetike”, y significa piloto o timonel). En 1949 Shannon y Weaver desarrollan la teoría de la información. En 1956, S.J.Mason publica su célebre artículo sobre diagramas de flujo. Aparecen trabajos sobre sistemas de control no lineal, sistemas de control multivariable, control digital, etc.

Debido a la complejidad de los sistemas, se hace preciso un nuevo enfoque matemático de la teoría de control, y aparece el concepto de variables de estado. El espacio de estados ya había sido utilizado por el matemático

## -6- Conceptos de Regulación Automática

francés Poincaré en 1892, pero no es sino a partir de 1950 cuando se incorpora para el análisis de sistemas de control.

Con el advenimiento de Sputnik y la era espacial, se dio otro nuevo impulso a la ingeniería de control. Se hizo necesario diseñar sistemas de control complejos y altamente precisos para proyectiles y pruebas espaciales. Se amplían los métodos en el dominio del tiempo, espacio de estados, y sistemas no lineales. Se amplían los trabajos de Liapunov sobre estabilidad. Se estudian los servomecanismos de tipo "On/Off" de control por relés y se empiezan a estudiar los sistemas de control óptimo y control adaptativo. Los procesos de diseño se realizan tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

La teoría del control sigue incorporando nuevos métodos que se aplican a nuevas ramas del saber y son parte de un contexto más amplio, denominado "Ingeniería de Sistemas" (término introducido por Von Bertalaffy en 1954). La ingeniería de control está, por ello, interesada en el análisis y diseño de sistemas dirigidos hacia un objetivo. Como consecuencia, la mecanización de planes de acción dirigidos hacia un objetivo se ha incrementado hasta establecer una jerarquía de control con cualidades de autoorganización, adaptación, aprendizaje, ...

El control de un proceso industrial (fabricación, producción, etc) por medios automáticos en vez de humanos se conoce frecuentemente como "automatización".

Una nueva área de la ingeniería de control es la "robótica industrial", que en la actualidad representa una realidad más que una ficción. Los robots industriales son un hecho cierto en la mecanización de procesos productivos, en los que ordenadores, sensores y mecanismos se integran de un modo inteligente para producir autómatas cada vez más sofisticados.

No cabe duda de que en la actualidad, las técnicas de *Inteligencia Artificial* son las que más atención están acaparando en el mundo de la ingeniería de control. Los espectaculares avances de la Electrónica Integrada crean saltos cualitativos y generan nuevas expectativas, insospechadas hasta no hace mucho: el futuro de la nanotecnología, computación molecular y computación cuántica, son algunas de las puertas que la ciencia está intentando abrir y que a buen seguro, supondrán nuevos saltos cualitativos y cuantitativos en el desarrollo de la ingeniería de control.

### **3.-Componentes básicos de un Sistema de Control**

Los componentes básicos de un sistema de control se pueden describir mediante:

- i)Objetivos de control.
- ii)Componentes del sistema de control.
- iii)Resultados o salidas.

La figura 2 muestra la relación básica entre estos tres componentes. En términos más técnicos, los objetivos se pueden identificar como entradas, o

señales actuantes  $u$ , y los resultados también se llaman *salidas* o *variables controladas*  $y$ . En general, el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma preestablecida mediante las entradas a través de los elementos del sistema de control.



Figura 2

Los sistemas de control de *lazo abierto* constituyen el tipo más sencillo y económico de los sistemas de control. Los elementos de este tipo de sistemas pueden verse en la figura 3, y consta de dos partes: el *controlador* y el *proceso* (o planta) *controlado*. Una señal de entrada o comando  $r$  se aplica al controlador, cuya salida actúa como señal actuante  $u$ ; la señal actuante controla el proceso de tal forma que la variable controlada  $y$ , se desempeñe de acuerdo con lo preestablecido. En los casos simples, el controlador puede ser un amplificador, unión mecánica, filtro, u otro elemento de control. En los casos más complejos, el controlador puede ser una computadora. Debido a la simplicidad y economía de los sistemas de control en lazo (o bucle) abierto, se les encuentra en aplicaciones no críticas.

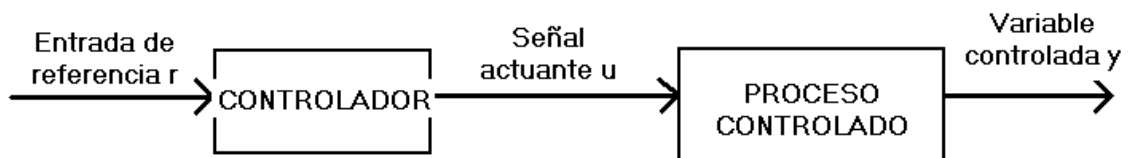


Figura 3

Lo que hace falta en el sistema de control en lazo abierto para que sea más exacto y más adaptable es una conexión o realimentación desde la salida hacia la entrada del sistema. Para obtener un control más exacto, la señal controlada debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, y se debe enviar una señal actuante proporcional a la diferencia de la entrada y la salida a través del sistema para corregir el error. Un sistema con una o más trayectorias de realimentación se denomina *sistema en lazo* (o *bucle*) *cerrado*.

La figura 4 muestra un sistema simple en lazo cerrado, donde podemos destacar la presencia de un *comparador* o *detector de error*, así como un *transductor* o *captador* que toma la medida en la salida del sistema, para poderla comparar con la consigna o entrada de referencia. Cualquier diferencia entre estas dos señales constituye una *señal de error* o *de actuación*. El controlador recibe esta señal y modifica la llamada *variable manipulada* en tal sentido que obliga al proceso o planta a reducir el error original. El control realizará su acción correctora hasta que el error  $e(t)$  sea nulo, obligando, de este modo, a que la salida siga a la entrada de referencia (que representa la salida deseada). Está claro que de este modo, se obtiene un sistema de control

## -8- Conceptos de Regulación Automática

con un comportamiento totalmente automático, ya que no es precisa la intervención humana para adaptar la salida a la entrada, de ahí el nombre con que también se conocen los sistemas realimentados o de lazo cerrado: *sistemas de control automático*.

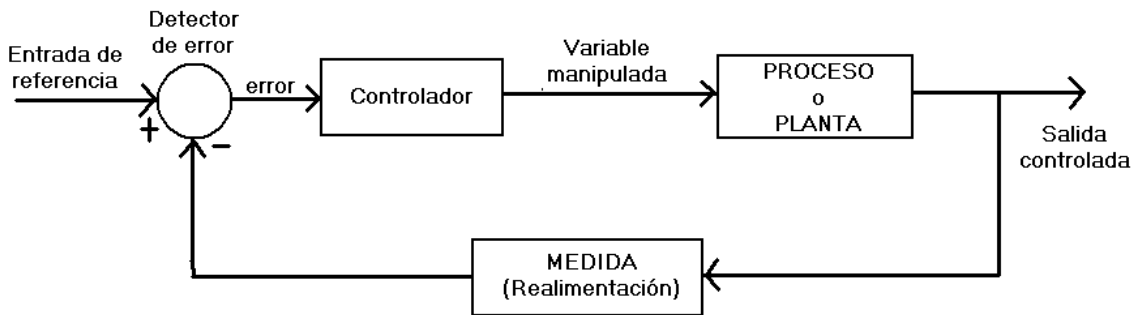


Figura 4

Desgraciadamente, y aunque un sistema de lazo cerrado puede proporcionar un control más preciso que uno de lazo abierto, tiene el inconveniente de que puede provocar inestabilidad. En la práctica, es indispensable llegar a un compromiso entre dos factores antagónicos: estabilidad y precisión.

El concepto fundamental visto en este apartado es el de la *realimentación*, sobre el que vamos a detenernos para profundizar un poco en sus efectos. El significado de los efectos de la realimentación en sistemas de control es más complejo que lo indicado anteriormente. La reducción del error del sistema es sólo uno de los efectos más importantes que la realimentación realiza sobre el sistema. Veremos que también tiene efectos sobre la estabilidad, ancho de banda, ganancia global, perturbaciones y sensibilidad. De hecho, solamente hablaremos de la llamada *realimentación negativa* (aquella en la que la señal muestreada en la salida se resta o compara con la de entrada). Pero indicamos que también existe la llamada realimentación positiva, en la que la señal realimentada se suma a la de entrada, con lo que se pueden conseguir efectos altamente "sorprendentes" e interesantes que, desgraciadamente, hacen de este tipo de realimentación presenta casi siempre un comportamiento inestable, por lo que su campo de aplicación es bastante más restrictivo, pero no por ello menos importante.

Puede demostrarse que, para un sistema simple realimentado negativamente, como el indicado anteriormente, si suponemos que las funciones de transferencia (posteriormente veremos la interpretación de este concepto) de la planta (incluido el controlador) y el transductor son  $G$  y  $H$ , respectivamente, la función de transferencia del sistema completo realimentado tiene la forma:

$$T = \frac{y}{r} = \frac{G}{1 + G \cdot H}$$

en este caso, al ser el denominador (a priori) mayor que la unidad, es obvio que este tipo de realimentación disminuye la ganancia del proceso en lazo abierto



(al contrario que para el caso de realimentación positiva, donde el denominador es  $1-G\cdot H$ , y puede ser inferior a la unidad -¡incluso nulo!-, lo que provocaría un aumento de la ganancia). En cualquier caso,  $G$  y  $H$  serán, por lo general, funciones de la frecuencia, por lo que la magnitud de realimentación  $1 + GH$  puede ser mayor que la unidad para un intervalo de frecuencias, y menor que uno para otro. Consecuentemente:

i) *la realimentación puede incrementar la ganancia del sistema en un intervalo de frecuencias, pero reducirla en otro.*

La estabilidad es una noción que describe si un sistema es capaz de seguir el comando de entrada, o en general, si dicho sistema es útil. En forma rigurosa, un sistema se dice inestable si sus salidas salen de control. Observando la anterior fórmula, si  $GH = -1$ , la salida del sistema es infinita para cualquier entrada finita, y el sistema se vuelve *inestable*. Por tanto, se debe establecer que:

ii) *la realimentación puede ocasionar que un sistema que es originalmente estable (en lazo abierto), se convierta en inestable.*

Evidentemente, la realimentación es un arma de doble filo, cuando se usa inadecuadamente puede ser dañina.

También se puede demostrar que una de las ventajas de incorporar realimentación es que

iii) *se puede estabilizar un sistema inicialmente inestable.*

En resumen:

ii)-iii) *La realimentación puede mejorar la estabilidad o serle dañina si no se aplica adecuadamente.*

A menudo, las consideraciones sobre sensibilidad son importantes en el diseño de sistemas ya que todos los elementos físicos tienen propiedades que cambian con el ambiente y la edad, por lo que no se pueden considerar a los parámetros de un sistema de control como completamente estacionarios durante la vida de operación del sistema. En general, un buen sistema debe ser insensible a la variación de los parámetros, pero sensible a los comandos de entrada. Al igual que ocurre con la estabilidad y la ganancia, se puede demostrar que

iv) *la sensibilidad de un sistema puede ser mejorada o perjudicada mediante la realimentación.*

Igualmente, puede verse que bajo ciertas circunstancias,

v) *la realimentación puede reducir los efectos del ruido y las perturbaciones externas en el funcionamiento del sistema.*

Por último, solamente indicar que mediante realimentación, se puede variar el ancho de banda de un sistema, sus impedancias de entrada y salida (en sistemas eléctricos), y un conjunto de propiedades tan importante y amplio, que hacen de este fenómeno uno de los más importantes, por el elevado poder de su influencia (dado un sistema inicial, mediante realimentación adecuada, podemos hacer que éste se comporte de forma completamente opuesta a su finalidad original).

#### **4.-Tipos de Sistemas de Control**

Los sistemas de control pueden clasificarse de muy distintas maneras, atendiendo al criterio usado como discriminador. Por ejemplo, una primera clasificación, atendiendo a si existe o no bucle de realimentación, podría dividirlos en sistemas de lazo abierto y de lazo cerrado. Si por el contrario, atendemos a si el control se hace sobre señales continuas o discretas en el tiempo, tendríamos sistemas de control continuos o discretos. Si clasificamos los sistemas en lineales y no lineales, podríamos tener otra clasificación de esa índole para los sistemas de control. Otra posibilidad sería la de considerar que los parámetros componentes del sistema sean fijos o varíen con el tiempo, lo que nos daría otra posibilidad: sistemas variantes e invariantes con el tiempo. A menudo, los sistemas de control se clasifican de acuerdo con su propósito principal, teniendo así sistemas de control de posición, de control de velocidad, ... En capítulos posteriores también veremos que se define el *tipo* de un sistema, de acuerdo con la forma de la función de transferencia en lazo abierto. Nosotros solamente vamos a comentar algunos aspectos respecto a algunas de estas posibles clasificaciones de los sistemas de control.

##### **4.1.-Lazo abierto y lazo cerrado.**

Aunque ya se han adelantado anteriormente algunas cosas, vamos a realizar aquí una pequeña comparación entre los sistemas controlados mediante lazo abierto y mediante lazo cerrado, desde un punto de vista eminentemente práctico. Desde este punto de vista, algunas ventajas del control realimentado frente al de lazo abierto podrían ser:

i) *Incremento en la exactitud.* El sistema de ciclo cerrado se puede diseñar para llevar a cero el error entre las respuestas medida y deseada.

ii) *Pequeña sensibilidad a los cambios en los componentes.* El sistema puede diseñarse para tratar de obtener un error cero, a pesar de los cambios de la planta.

iii) *Reducidos efectos de las perturbaciones.* Se pueden atenuar notablemente los efectos de perturbaciones al sistema.

iv) *Incremento en la rapidez de respuesta y anchura de banda.* La retroalimentación puede utilizarse para incrementar la gama de frecuencias sobre la cual el sistema responderá, y hacer que responda más satisfactoriamente.

En cuanto al lazo abierto, presenta las siguientes ventajas frente al cerrado:

i) *Montaje simple y facilidad de mantenimiento.*

ii) *Mayor economía que un sistema de lazo cerrado equivalente.*

iii) *No hay problemas de estabilidad (habitualmente).*

iv) *Es conveniente cuando es difícil o económicamente inconveniente medir la salida* (por ejemplo, el coste de un dispositivo para determinar la calidad de la salida de un tostador podría encarecer terriblemente su coste).

Por el contrario, este sistema presenta las siguientes desventajas adicionales:

i) *Las perturbaciones y las modificaciones en calibración introducen errores y la salida puede diferir de la deseada.*

ii) *Para mantener la calidad necesaria a la salida, periódicamente hay que efectuar una recalibración.*

## **4.2.-Control Continuo y Control Discreto.**

Los sistemas de control en tiempo discreto difieren de los sistemas de control en tiempo continuo en que las señales en uno o más puntos del sistema son en forma de pulsos o de un código digital. A su vez, los sistemas en tiempo discreto se subdividen en *sistemas de control de datos muestreados* (señales en forma de pulsos de datos) y *sistemas de control digital* (uso de computadoras o controladores digitales).

En general, un sistema de datos muestreado recibe datos o información sólo en forma intermitente en instantes específicos.

El control por computadoras se ha hecho muy popular en los últimos años debido al bajo coste y alto nivel de integración que permite la construcción de sistemas muy potentes con un tamaño cada vez menor.

## **4.3.-Sistemas Lineales y no Lineales.**

Estrictamente hablando, los sistemas lineales no existen en la práctica, ya que todos los sistemas físicos presentan cierto grado de alinealidad en

algún punto de su funcionamiento. Los sistemas de control realimentados lineales son modelos ideales fabricados por el analista para simplificar el análisis y diseño. Cuando las magnitudes de las señales en un sistema de control están limitadas en intervalos en los cuales los componentes del sistema exhiben una característica lineal (y, por tanto, son susceptibles de serles aplicado el Principio de Superposición), el sistema es esencialmente lineal. Pero cuando las magnitudes de las señales se extienden más allá del intervalo de porción lineal, dependiendo de la severidad de la no linealidad, el sistema no se debe seguir considerando lineal.

Para sistemas lineales, existe una gran cantidad de técnicas analíticas y gráficas para fines de diseño y análisis. Por el contrario, los sistemas no lineales son difíciles de tratar en forma matemática, y no existen métodos generales disponibles para resolver una gran variedad de clases de sistemas no lineales. Es norma habitual, el partir siempre de un sistema lineal, para, posteriormente, rediseñar en base a las alinealidades presentes.

#### **4.4.-Sistemas Variantes e Invariantes con el tiempo.**

Cuando los parámetros del sistema de control son estacionarios con respecto al tiempo durante la operación del sistema, se denomina *Sistema Invariante con el tiempo*. En la práctica, la mayoría de los sistemas físicos contienen elementos que derivan o varían con el tiempo. Por ejemplo, la resistencia de la bobina de un motor eléctrico variará cuando el motor es excitado por primera vez y su temperatura está aumentando. Otro ejemplo de un sistema variante es el sistema de control de un misil guiado en el cual la masa del misil decrece a medida que el combustible a bordo se consume durante el vuelo. Aunque un sistema variante en el tiempo sin no linealidades es aún un sistema lineal, el análisis y diseño de esta clase de sistemas es mucho más complejo que el de los sistemas lineales invariantes con el tiempo.