

en el plano-s. Por consiguiente, durante la década de 1950, muchos de los trabajos de control se enfocaron sobre el plano-s, a los fines de obtener una característica deseada de respuesta en lazo cerrado a un escalón, sobre la base del tiempo de crecimiento, % de sobreerror, etc.

Análisis Estocástico

Durante este periodo, también se introdujeron técnicas estocásticas en la teoría del control y las comunicaciones. Durante 1942 en el M.I.T, N. Wiener analizó los sistemas de procesamiento de la información utilizando modelos de procesos estocásticos. Trabajando en el dominio frecuencial, desarrolló el *filtro estadístico óptimo*, para señales estacionarias y continuas en el tiempo, que mejoraron la relación señal-ruido en los sistemas de comunicaciones. El ruso A.N.Kolmogorov, en 1941, desarrolló la teoría para los procesos estocásticos discretos y estacionarios en el tiempo.

El periodo Clásico de la Teoría del Control.

Por ahora, la utilización de las técnicas del dominio frecuencial en la teoría del control automático ha llegado a la mayoría de edad, estableciéndose como un patrón o paradigma. Por una parte se estableció una firme teoría matemática de los servomecanismos y, por otra se han provisto técnicas de diseño para la ingeniería. El periodo hasta 1960 aproximadamente se conoce como *periodo clásico* del control automático, en el cual aparecieron los primeros libros de texto como ser: McColl en 1945, Lauer-Lesnicks-Matdon en 1947, Brown & Campbell en 1948, Chestnut & Mayer en 1951 y Truxal en 1955, y por herramientas de diseño directas que proveían una importante intuición y garantizaban la solución de los problemas de diseño. Estas herramientas se aplicaban utilizando cálculos hechos a mano o a lo sumo con regla de cálculo, en combinación con técnicas gráficas.

Era del Espacio/Computación y el Control Moderno

El paradigma de la teoría del control clásico fue muy conveniente para resolver problemas de diseño en control durante e inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial. La técnica del dominio frecuencial fue muy apropiada para los sistemas *lineales e invariantes* en el tiempo (LTI systems). El tratamiento es óptimo con sistemas de *simple-entrada/simple-salida*, ya que las técnicas gráficas son inadecuadas para aplicar a sistemas con múltiples entradas y salidas.

El diseño clásico de controles tuvo cierto éxito con los sistemas no-lineales. Empleando las propiedades del rechazo al ruido con las técnicas del dominio frecuencial, se puede diseñar un sistema de control para que sea *robusto* a las variaciones de parámetros, errores de medición y perturbaciones exteriores. De esta manera, las técnicas clásicas se pueden utilizar con una versión linealizada del sistema no-lineal, lo cual da buenos resultados en el punto de equilibrio, alrededor del cual el comportamiento del sistema es aproximadamente lineal.

Las técnicas del dominio frecuencial se pueden aplicar a sistemas con no-linealidades simples, utilizando el método de la *función descriptiva*. Esta técnica fue utilizada por primera vez por el ruso J.Groszkowski en el diseño de transmisores de radio antes de la Segunda Guerra Mundial y fue formalizada en 1964 por J. Kudrewicz.

Lamentablemente, no es posible diseñar sistemas de control, empleando la suposición de linealidad y tratando la transmisión entre los pares de entradas/salidas una a la vez, para sistemas no lineales multivariables, como los que se encuentran en las aplicaciones espaciales.

En la Unión Soviética hubo un gran campo de actividad en el diseño de controles no-lineales. Siguiendo la guía de Liapunov, se prestó atención a las técnicas del dominio temporal. Así en 1948, Ivachenko investigó el principio del control On-Off, y Tsytkin utilizó en 1955, la técnica del plano de fase para el diseño de controles no-lineales. En el año 1961, V.M.Popov presentó el *criterio del círculo* para el análisis de la estabilidad no lineal.

de la función compleja en relación con la frecuencia. En 1938-1940 investigó la estabilidad en lazo cerrado utilizando las nociones de *margen de ganancia y fase*.

Las guerras mundiales y el control Clásico.

Como la comunicación de masas y los medios cada vez más rápidos para viajar achicaron el mundo y generaron mucha tensión a medida que el hombre probaba su lugar en una sociedad global. El resultado fueron las guerras mundiales, durante las cuales el desarrollo de los sistemas de control realimentados se transformaron en una forma de supervivencia.

Control de barcos.

Un importante problema militar durante este periodo fue el control y la navegación de barcos, que se volvían cada vez más avanzados en su diseño. Entre los primeros desarrollos estaba el diseño de sensores con el propósito de controlar sistemas a lazo cerrado. En el año 1910, E.A. Sperry inventó *el giróscopo* que utilizó en la estabilización y dirección de barcos y más tarde en control de aviones.

En 1922 N. Minorsky introdujo su controlador de tres términos para el control de la dirección de barcos. De esta manera fue el primero en utilizar el controlador PID (proporcional-integral-derivativo). En su estudio consideró los efectos no-lineales sobre el sistema a lazo cerrado.

Desarrollo de armas y puntería para cañones.

Un problema muy importante durante el periodo de las dos guerras fue lograr exactitud en la puntería de cañones hacia barcos y aviones en movimiento. Con la publicación de "Teoría de los Servomecanismos" por parte de H.L. Házen en 1934, se inició el uso de la teoría matemática del control en la solución de dichos problemas. En su publicación, Házen introdujo la palabra *servomecanismo*, que significa una relación maestro/esclavo en los sistemas.

Los visores de bombardeo Norden desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial, utilizaban sincro-repetidores para relevar la información sobre altitud y velocidad del avión, y perturbaciones debidas al viento sobre los visores de bombardeo, a los fines de asegurar un despacho exacto del sistema de armas.

Laboratorio de Radiación del M.I.T.

Para estudiar los problemas de control y procesamiento de la información asociados con el nuevo invento del radar, se estableció en 1940, el Laboratorio de Radiación en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T). Muchos de los trabajos en teoría de control durante la década de 1940, salieron de este laboratorio.

Mientras trabajaban en un Proyecto conjunto entre el M.I.T y Sperry Corporation, en 1941, A.H. Hall reconoció los efectos perjudiciales de ignorar el ruido en el diseño de los sistemas de control. Así se dio cuenta que la técnica del análisis frecuencial desarrollada en los laboratorios Bell, se podía emplear para comparar los efectos del ruido, y utilizar dicha técnica para diseñar un sistema de control para el radar transportado en un avión. El éxito obtenido demostró en forma concluyente la importancia de la técnica del dominio frecuencial en el diseño de sistemas de control (Hall 1946).

Utilizando técnicas de diseño basadas en la función transferencia, diagramas en bloques, y métodos del dominio frecuencial se obtuvieron muchos éxitos en el diseño de sistemas de control en el Laboratorio de Radiación. En el año 1947 N.B. Nichols, desarrolló las *Cartas de Nichols* para el diseño de sistemas realimentados. Con el trabajo del Laboratorio de Radiación del M.I.T, la teoría de los servomecanismos lineales quedó firmemente establecida. Una síntesis de dicho trabajo está contenida en el libro "Teoría de los servomecanismos" de James, Nichols y Phillips, año 1947.

Trabajando en la compañía de aviación, North American Aviation, W.R. Evans (1948) presentó su técnica del *lugar de raíces*, la cual suministra un camino directo para obtener la ubicación de los polos de lazo cerrado

Teoría de la estabilidad

El primer trabajo sobre análisis matemático de un sistema de control se realizó sobre la base de ecuaciones diferenciales. J.C. Maxwell realizó el análisis del regulador de watt en 1868. La técnica empleada consistió en linealizar la ecuación diferencial del movimiento, para hallar la *ecuación característica* del sistema. A través de ella estudió el efecto de los parámetros del sistema sobre la estabilidad y demostró que el sistema es estable si las raíces de la ecuación característica tienen *parte real negativa*.

En 1877 E.J.Routh introdujo una técnica numérica para determinar si la ecuación característica tiene raíces estables.

En 1877 el ruso I.I.Vishnegradsky analizó la estabilidad de los reguladores utilizando ecuaciones diferenciales, en forma independiente de Maxwell.

En 1893 A.B.Stodola estudió la regulación de una turbina de agua empleando la técnica de Vishnegradsky. Para ello obtuvo el modelo de la dinámica del actuador e incluyó, en su análisis, el retardo del mecanismo de actuación. Stodola fue el primero en mencionar la noción de *constante de tiempo* del sistema. Sin conocer los trabajos de Maxwell y Routh, le planteó a su compatriota A. Hurwitz el problema de determinar la estabilidad de la ecuación característica, quien lo resolvió independientemente.

El trabajo de A.M. Liapunov ha sido original y de gran influencia en la teoría del control. Entre otras cuestiones, estudió en 1892, la estabilidad de ecuaciones diferenciales no lineales utilizando la noción generalizada de energía. Lamentablemente en Occidente recién se pudo apreciar la importancia de su trabajo, en el año 1960 aproximadamente.

El ingeniero inglés O. Heaviside inventó el cálculo operacional en 1892-1898. Aplicó su invento a la solución del comportamiento transitorio de sistemas, e introdujo una noción equivalente a la de *función transferencia*

Teoría de Sistemas

Es dentro del estudio de *sistemas* que la teoría del control automático tiene su lugar en la organización del conocimiento humano. Así el concepto de sistema como entidad dinámica con “entradas” y “salidas” definidas, unidos a otros sistemas y al medio ambiente ha sido el requisito clave para el desarrollo ulterior de la teoría del control automático.

Comunicación de masas y el sistema telefónico de Bell.

Al comienzo del siglo XX ocurrieron dos hechos importantes desde el punto de vista de la teoría del control: el desarrollo del teléfono, la comunicación de masas y las guerras mundiales.

Análisis en el dominio frecuencial.

El análisis matemático de los sistemas de control había sido realizado hasta aquí utilizando ecuaciones diferenciales en el dominio temporal. Durante los decenios 1920 y 1930 en los Laboratorios Bell, las técnicas desarrolladas por P. S. de Laplace(1749-1827), J. Fourier (1768-1830), A.L. Cauchy (1789- 1857) y otros fueron exploradas y utilizadas en los sistemas de comunicaciones.

Es conocido que uno de los problemas en las comunicaciones telefónicas sobre grandes distancias es la necesidad de amplificar la señal de voz a lo largo de la línea telefónica. Desgraciadamente al amplificar la información, también se amplifica el ruido. Con lo cual el diseño de adecuados amplificadores es de vital importancia.

Para reducir la distorsión en los amplificadores repetidores, H.S.Black demostró la utilidad de la realimentación negativa en 1927. El problema del diseño era introducir un desplazamiento de fase en las frecuencias correctas del sistema. La teoría de la realimentación para el diseño de amplificadores estables fue desarrollada por H. Nyquist en 1932. Así fue como derivó el *Criterio de estabilidad* de Nyquist basado en un gráfico polar de la función compleja. En el año 1938 H.W. Bode utilizó los *gráficos de la magnitud y fase*

popularidad en Europa. Este fue *el primer uso del control realimentado* que tuvo reconocimiento general. Ver fig. 3.

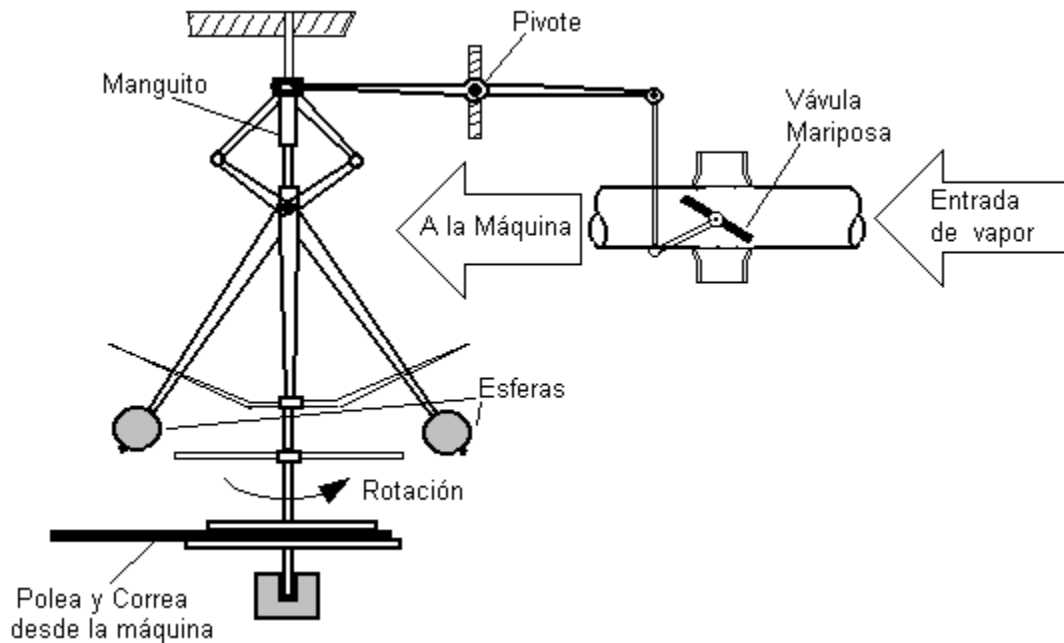


Fig. 3. Regulador de velocidad de Watt(1778)

Reloj controlado por realimentación.

El reloj mecánico inventado en el siglo XIV no es un sistema de control realimentado, pero si, es un dispositivo oscilatorio de precisión (a lazo abierto) cuya exactitud se asegura protegiéndolo contra las perturbaciones externas. En el año 1793 el franco-suizo A.L. Breguet inventó un sistema de control a lazo cerrado para sincronizar los relojes de bolsillo(Pendule Sympathique).

Nacimiento de la teoría matemática del control

Hasta la revolución industrial el diseño de los sistemas de control se realizaba mediante prueba y error, unido con una gran cuota de intuición de ingeniería. De tal manera que era más un arte que una ciencia. En la mitad del siglo XVIII, la matemática fue utilizada para analizar la estabilidad de los sistemas de control realimentado. Como la matemática es el lenguaje formal de la teoría del control automático, se conoce al periodo previo a ese tiempo como la *prehistoria* de la teoría del control.

Ecuaciones diferenciales

El astrónomo inglés G.B.Airy en el año 1840, desarrolló un dispositivo realimentado para apuntar un telescopio. Su dispositivo era un sistema de control de velocidad que retornaba automáticamente el telescopio para compensar la rotación de la tierra, permitiendo el estudio de una estrella durante un tiempo prolongado.

Airy descubrió, lamentablemente, que por un diseño inapropiado del lazo de control realimentado, aparecían oscilaciones en el sistema. Así se convirtió en el primero que trató la *inestabilidad* de un sistema a lazo cerrado y el primero en utilizar las *ecuaciones diferenciales* para su análisis.

La utilización de las ecuaciones diferenciales para analizar el movimiento de los sistemas dinámicos fue establecida por J.L.Lagrange(1736-1813) y W.R. Hamilton(1805-1865).

primera máquina a vapor en el año 1712. No obstante, estas primeras máquinas se regulaban a mano y eran muy ineficientes, lo cual las hacía poco aptas para el uso industrial. Es muy importante darse cuenta que la Revolución Industrial no comenzó hasta la invención o mejora de las máquinas y los sistemas automáticos para regularlas.

Los constructores de molinos, en Inglaterra, desarrollaron muchos dispositivos de control realimentado para aplicación en los molinos.

Para construir un controlador por realimentación, es muy importante tener, *adecuados dispositivos de medición*. Por eso los fabricantes de molinos desarrollaron varios dispositivos para medir velocidad angular. Posteriormente la tecnología desarrollada por los fabricantes de molinos se utilizó para la regulación de la máquina a vapor.

Regulador de temperatura

En el año 1624 el holandés C. Drebbel desarrolló un sistema de control automático para la temperatura de un horno, motivado por su creencia que ciertos materiales básicos se podían convertir en oro si los mismos se mantenían a temperatura constante durante largos periodos de tiempo. Posteriormente aplicó su *regulador de temperatura* a la cría de pollos.

Los reguladores de temperatura fueron estudiados por J.J. Becher en el año 1680, y fueron utilizados nuevamente en incubadoras en el año 1754 por el príncipe de Conti y A.F. Réaumur. En 1771 W. Henry (EEUU) desarrolló el registrador "Sentinel" y sugirió su empleo en los hornos químicos para la fabricación de acero y porcelana y en la regulación de temperatura de un hospital. Sin embargo, recién en 1777 se desarrolló, por parte de Bonnemain, el primer regulador de temperatura apto para uso industrial. Se lo utilizó en incubadoras y posteriormente en el horno de una planta de agua caliente.

Reguladores de nivel

Los *reguladores de nivel* para líquidos se necesitaron en dos áreas principales, a fines del 1700: en la caldera de una máquina a vapor y en un sistema de distribución domiciliar de agua. Así el regulador a flotante de Ktesibios recibió un nuevo impulso en Inglaterra.

En el año 1775 se patentó la primera válvula reguladora a bola para uso en inodoros. El primer uso de la válvula reguladora a flotante en una caldera a vapor data de 1758 (patente de J. Brindley).

En el año 1791 la firma de Boulton & Watt adoptó el regulador a flotante y a partir de allí pasó a ser de uso común en las máquinas a vapor.

Reguladores de presión

Un problema asociado con las máquinas a vapor es la *regulación de presión* del vapor en la caldera. En el año 1681, D. Papin inventó una válvula de seguridad para una olla a presión, y en el año 1707, la utilizó para regular la presión en su máquina a vapor. A partir de allí pasó a ser un dispositivo común en las máquinas a vapor.

El regulador de presión fue mejorado en el año 1799 por R. Delap y M. Murray. En el año 1803 Boulton & Watt combinaron el regulador de presión y el regulador a flotante para uso en máquinas a vapor.

Reguladores de velocidad

Las máquinas a vapor rotativas necesitaban la *regulación de la velocidad angular*. Algunos de los dispositivos utilizados por los fabricantes de molinos se adaptaron para el uso en las máquinas a vapor. En el año 1778 J. Watt completó el diseño de su *regulador centrífugo por esferas* para regular la velocidad de la máquina a vapor rotativa. Por su naturaleza visible y su eficacia este regulador de Watt alcanzó gran

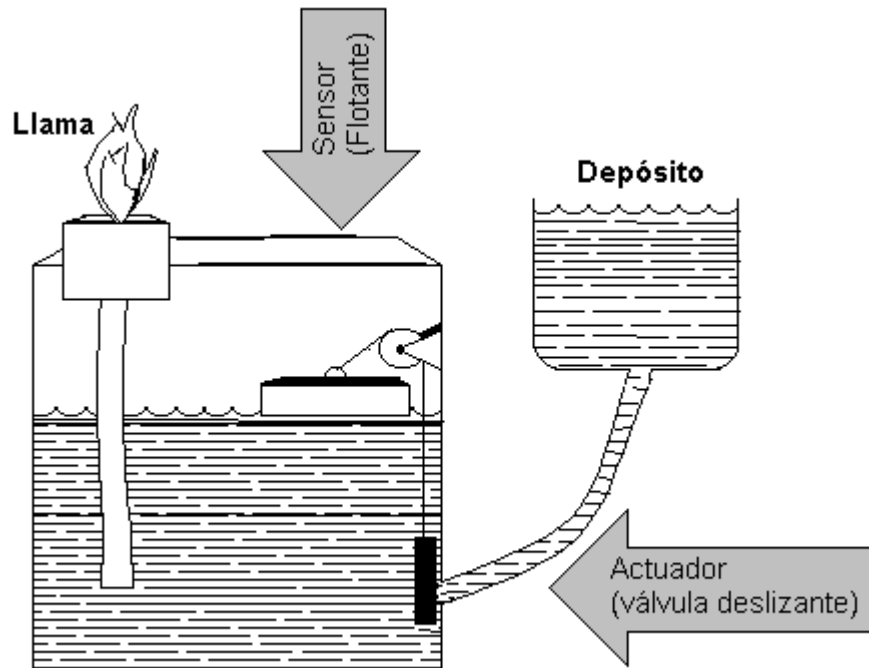


Fig.2. Regulador a flotante en la lámpara de aceite de Philon(250 años a. de C.)

Durante el siglo I después de C., Heron de Alejandría desarrolló reguladores a flotante para relojes de agua.

Los griegos utilizaron el regulador a flotante y dispositivos similares para propósitos tales como suministro automático de vino, diseño de sifones para mantener constante la diferencia de nivel entre dos recipientes, dispositivos para apertura de puertas en templos, etc. Estos dispositivos se han llamado “artefactos” o “cachivaches” porque fueron los primeros ejemplos de una idea pensada para una aplicación.

Desde el año 800 hasta fines del 1200 los árabes, principalmente tres de ellos : Musa, Al-Jazari e Ibn Al-Saati utilizaron reguladores a flotante para relojes de agua y otras aplicaciones. Durante este periodo se utilizó el importante principio del control “On/Off”.

Cuando Bagdad expulsó a los Mongoles en el año 1258, todos los pensamientos con relación a esta línea llegaron a su fin. Más aun, la invención del reloj mecánico en el siglo XIV, hizo que el reloj de agua con su control realimentado se volvieran obsoletos.(El reloj mecánico no es un sistema de control realimentado). Así el regulador a flotante no aparecerá hasta su empleo en la Revolución Industrial.

También vale la pena mencionar, que los chinos en el siglo XII, desarrollaron un sistema de control “pseudo-realimentado” (no incluía técnicamente la realimentación, por lo cual no es un sistema de control automático, pues el lazo lo cerraba el conductor del vehículo)con fines de navegación.

La Revolución Industrial siguió a la introducción de las primeras máquinas con accionamiento propio. Entre ellas: moladora de granos, hornos, calderas y la máquina a vapor. Estas máquinas no se podían regular adecuadamente a mano, así surgieron requerimientos nuevos para los sistemas de control automático. Debido a esta necesidad, se inventaron varios dispositivos entre ellos: reguladores a flotante, reguladores de temperatura, reguladores de presión y reguladores de velocidad.

En el año 1769, James Watt inventó su máquina de vapor, por lo cual dicha fecha se acepta como el comienzo de la Revolución Industrial. A pesar que otras personas, como ser T. Newcomen, que construyó la

Con referencia al control realimentado se puede decir [Friedland, 1986] que el periodo que va desde la antigüedad hasta 1868 (fecha del primer análisis matemático riguroso de un sistema de control realimentado efectuado por J.C. Maxwell) es el “*periodo prehistórico*” del control automático. El periodo que va desde 1868 hasta comienzo de 1900 es el “*periodo primitivo*” del control automático. El periodo que va desde principios de 1900 hasta 1960 es el “*periodo clásico*”. El periodo que va desde 1960 hasta nuestros días se conoce como “*periodo moderno*” del control automático.

Regulador a flotante

La primera motivación para considerar el control realimentado en época antigua ha sido el reloj de agua de los griegos y árabes, como medio para lograr medir el tiempo con cierta exactitud. En el año 270 antes de J.C el griego Ktesibios inventó el *regulador por flotante* para un reloj de agua. La función de dicho regulador era mantener constante el nivel de agua en un recipiente. Este nivel constante producía un caudal constante dentro de un tubo que salía del piso del primer recipiente, que a su vez llenaba un segundo recipiente. El nivel del segundo recipiente dependía del tiempo transcurrido. (Ver Fig. 1.)

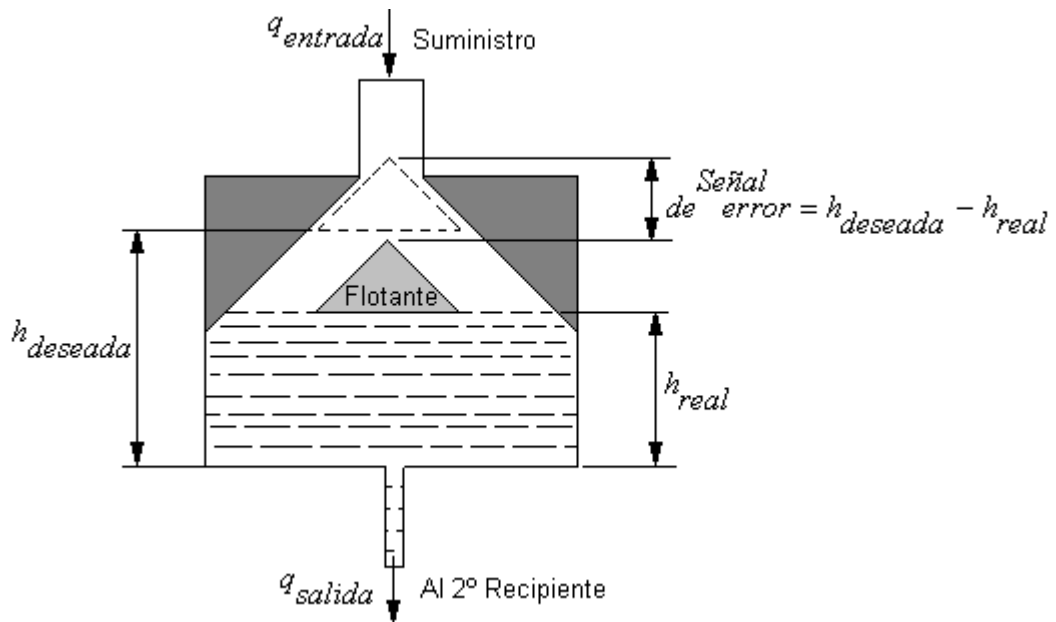


Fig.1. Regulador a flotante (Ktesibios 270 a de C)

El regulador a flotante fue utilizado en el año 250 antes de J.C., por Filon de Bizancio, para mantener constante el nivel de aceite en una lámpara. Ver fig. 2.

BREVE RESEÑA HISTORICA SOBRE EL CONTROL AUTOMATICO

Ing. A.M.Mariani

ammariani@electron.frba.utn.edu.ar

Lic. E. Ciccolella

eciccolella@fra.utn.edu.ar

Resumen

En la certeza que la mejor manera de comprender un área del conocimiento es examinando su evolución y las razones de su existencia y, si se considera que el Control Automático es una “*disciplina de la ingeniería*”, se concluye que su progreso está estrechamente vinculado a los problemas que fue necesario resolver durante las diferentes etapas del desarrollo humano. Este trabajo se realizó sobre la base de la premisa precedente y, está dirigido a todos aquellos lectores que deseen comenzar a interiorizarse sobre el tema o, bien, aumentar sus conocimientos, en relación con la evolución histórica del Control Automático y, las enseñanzas que se obtienen del mismo.

Abstract:

Realizing that the best way to understand an area is to examine its evolution and the reasons for its existence, we shall first provide a short history of automatic control theory. Then we give a brief discussion of the philosophic base of classical and modern control theory. Feedback control is an engineering discipline. As such, its progress is closely tied to the practical problems that needed to be solved during any phase of human history. The present paper is for those readers that wish to begin or increase its knowledge about the history of automatic control theory.

Introducción

El sistema de control realimentado es un mecanismo básico a través del cual los sistemas eléctricos, mecánicos, electrónicos, biológicos, etc., mantienen su equilibrio. Para ello utilizan una señal diferencia, obtenida por comparación del valor actual de la variable a controlar del sistema con el valor deseado, como un medio para gobernar el sistema. Es difícil realizar un análisis imparcial de un área que está en continuo desarrollo, sin embargo mirando hacia atrás sobre el progreso de la teoría del control realimentado, es posible distinguir algunos desarrollos “clave” en la historia de la humanidad que han afectado el progreso del control realimentado:

1. La preocupación de los griegos y árabes para realizar mediciones exactas del tiempo. Esto comprende, aproximadamente, desde el año 300 antes de J.C hasta el año 1200 después de J.C.
2. La Revolución Industrial en Europa. Casi todos los historiadores están de acuerdo que la Revolución Industrial comenzó en el tercer cuarto del siglo XVIII; sin embargo sus orígenes o raíces pueden hallarse dentro del siglo XVII.
3. El comienzo de la comunicación de masas y la primera y segunda guerra mundial, abarcando un periodo que va desde 1910 hasta 1945, aproximadamente.
4. El comienzo de la era espacial y de la computadora en 1957.

Dentro de la primera etapa, el hombre estaba preocupado en entender su lugar en el espacio y el tiempo. En la segunda etapa su preocupación fue dominar su medio ambiente y lograr que su existencia fuese más confortable. En la tercera etapa su interés ha sido establecer su lugar en la comunidad global. Finalmente su preocupación pasa en establecer su lugar en el cosmos.