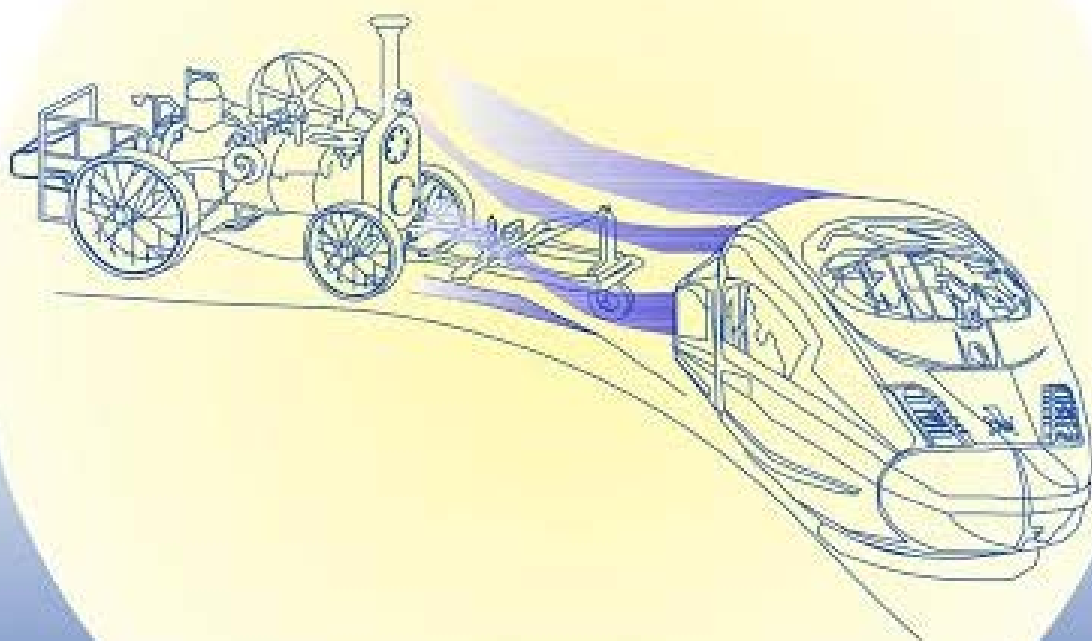


INGENIERÍA DE SISTEMAS DE CONTROL CONTINUO



ISIDRO I. LÁZARO CASTILLO

Segunda edición



INGENIERÍA DE SISTEMAS DE CONTROL CONTINUO

2da Edición

Edición limitada



INGENIERÍA DE SISTEMAS DE CONTROL CONTINUO

M.I. ISIDRO IGNACIO LÁZARO CASTILLO

Profesor Investigador Jubilado de la
Facultad de Ingeniería Eléctrica de la
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Mich. México

Revisiones Técnicas

Dr. Juan Anzures Marín
Profesor Investigador de la
Facultad de Ingeniería Eléctrica de la
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Morelia, Mich. México

PhD Student José Alberto Álvarez Martín
Centre for Rehabilitation Engineering
University of Glasgow

Para establecer comunicación
(comentarios y pedidos)

E-mail: ilazaro@ieee.org

Twitter: @ilazaroc

<http://isidrolazaro.com>

Isidro Ignacio Lázaro Castillo
Ingeniería de Sistemas de Control Continuo

Segunda Edición, Agosto de 2015
Morelia, Mich. México

Diseño de portada:
Arq. Carlos A. Lázaro Castillo

Derechos reservados conforme a la ley
© Isidro Ignacio Lázaro Castillo

ISBN

Queda prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del contenido de la presente obra, sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento previo y por escrito del autor.

Impreso en México/ Printed in Mexico

DEDICATORIA

A la memoria de mi Profesor Dr. Edmundo Barrera Cardiel[†], gracias por todas sus enseñanzas en el área de Sistemas de Control.

A mis ahijados y sobrinos: Edgar Ginnori, Daniel Ernesto, Derek Jafté, Nidia Fernanda, Carlos, Andrea, Estefanía y José Luis Maciel.

A mis Padres: José y Luz María.

A mis hermanos: Lourdes A, José Luis, Luz María Magdalena, Carlos A. y Benjamín.

A los revisores Dr. Juan Anzurez Marin y M.C. José Alberto Álvarez Martín, por el tiempo dedicado a la revisión de este libro.

A mis amigos del equipo Wombats: Alberto y Omar.

A mis amigos de Scrimmage Sports: Eduardo, Diego y Federico.

A mis exalumnos de todas las generaciones que tuve la dicha de colaborar en su formación profesional.

CONTENIDO

PRÓLOGO	xiii
PREFACIO	xv
CAPÍTULO 1 Introducción a los Sistemas de Control	1
Sinopsis	1
1.1 Introducción	2
1.2 Revisión histórica del control	2
1.2.1 Inicios del control hasta 1900	2
1.2.2 El periodo preclásico: 1900 - 1935	6
1.2.3 El periodo clásico: 1935-1950	8
1.2.4 Periodo moderno 1955	10
1.3 Terminología	11
1.4 Características de los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado	13
1.5 Comparación entre los sistemas de lazo abierto y cerrado	18
1.6 Proceso de diseño de sistemas de control	19
Referencias	21
Problemas propuestos	22
Problemas complementarios	25

CAPÍTULO 2 Modelado de Sistemas	29
Sinopsis	29
2.1 Introducción	30
2.2 Funciones de transferencia	33
2.3 Función de transferencia de elementos en cascada	39
2.4 Diagrama de bloques	45
2.4.1 Reglas del algebra de bloques	46
2.4.2 Reducción de diagramas de bloques usando las reglas	53
2.5 Sistemas múltiple-entrada múltiple-salida y matrices de transferencia	63
2.5.1 Matriz de transferencia	63
2.6 Sistemas sometidos a una perturbación	69
2.7 Gráficos de flujo de señal	71
2.7.1 Terminología	71
2.8 Fórmula de ganancia de Mason	72
2.9 Modelos matemáticos de sistemas físicos y conceptos de no linealidades	78
2.10 Modelado de sistemas de nivel de líquido	83
2.10.1 Sistemas de nivel de líquido acoplados	91
2.11 Modelado de sistemas eléctricos	96
2.12 Modelado de amplificadores operacionales	101

2.12.1 Características del amplificador operacional	101
2.12.2 Amplificador inversor	102
2.12.2 Amplificador no inversor	104
2.13 Modelado de sistemas mecánicos	107
2.13.1 Sistemas mecánicos de traslación	108
2.13.2 Sistemas mecánicos de rotación	115
2.13.3 Sistemas mecánicos de rotación que incluyen tren de engranes	121
2.14 Modelado de motores de CD	126
2.14.1 Modelado de un motor de cd controlado por armadura	126
2.15 Linealización de sistemas no lineales	133
2.16 Aproximación de Padé	138
Referencias	143
Problemas propuestos	144
Problemas complementarios	154
CAPÍTULO 3 Análisis de Respuesta Transitoria	159
Sinopsis	159
3.1 Introducción	160
3.2 Señales de prueba típicas	160
3.2.1 Respuesta transitoria y de estado estable	161

3.3 Respuesta al escalón de sistemas de primer orden	161
3.3.1 Caracterización de la respuesta transitoria a un sistema ante una entrada escalón unitario	161
3.3.2 Constante de tiempo, tiempo de crecimiento y establecimiento	164
3.3.3 Efecto de un polo adicional	171
3.3.4 Efecto de un cero adicional en un sistema dominante de primer orden	175
3.3.5 Efecto de un cero en el semiplano izquierdo	177
3.3.6 Efecto de un cero en el semiplano derecho	177
3.4 Respuesta al escalón de sistemas de segundo orden	178
3.4.1 Caso subamortiguado	183
3.4.1.1 Especificación de la respuesta transitoria	186
3.4.1.2 Influencia de los factores ξ y ω_n en la respuesta del sistema	196
3.4.2 Caso críticamente amortiguado	200
3.4.3 Caso sobreamortiguado	204
3.5 Sistemas dominantes de segundo orden	207
Referencias	209
Problemas propuestos	210
Problemas complementarios	214

CAPÍTULO 4 Estabilidad	219
Sinopsis	219
4.1 Definición de estabilidad	220
4.1.1 Estabilidad para entrada limitada-salida limitada	220
4.1.2 Estabilidad en el sentido de la respuesta al impulso	221
4.1.3 Estabilidad y polos	221
4.2 Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz	223
4.2.1 Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz para casos especiales	227
4.2.2 Estabilidad relativa	231
4.2.3 Diseño de estabilidad por medio del criterio de routh-hurwitz	233
4.3 Método del lugar geométrico de las raíces	234
4.3.1 Concepto del lugar de la raíces	235
4.3.2 Reglas para construir el lugar de las raíces	240
4.3.3 Diseño de parámetros usando el método del lugar de las raíces	253
Referencias	273
Problemas propuestos	274
Problemas complementarios	278

CAPÍTULO 5 Análisis y Diseño de Controladores Continuos en el Dominio del Tiempo	283
Sinopsis	283
5.1 Introducción	284
5.2 Clasificación de los controladores clásicos	284
5.2.1 Compensación en serie o en cascada	284
5.2.2 Compensación mediante retroalimentación	285
5.2.3 Compensación mediante la retroalimentación de estados	286
5.3 Control basado en el error del sistema	286
5.4 Acción de control de dos posiciones (On-Off)	288
5.5 Acción de control proporcional	290
5.6 Acción de control integral	296
5.7 Acción de control derivativa	299
5.8 Acción de control proporcional-integral (PI)	300
5.9 Acción de control proporcional-derivativa (PD)	303
5.10 Acción de control proporcional-integral-derivativa (PID)	305
5.10.1 Implementación analógica de un PID	307
5.10.2 Modificaciones del algoritmo PID	308
5.10.3 Fenómeno de saturación o Wind-Up	310
5.10.4 Antiwind-Up	311

5.11 Respuesta a perturbaciones	314
5.11.1 Respuesta a perturbación de un sistema con control PI	317
5.12 Sintonización de PID'S	318
5.12.1 Método de la respuesta transitoria	319
5.12.2 Método de oscilaciones sostenidas	323
5.12.3 Método de oscilaciones amortiguadas o de Harriot	329
5.12.4 Método de Cohen y Coon	311
5.12.5 Método CHR	332
5.12.6 Método basado en los criterios de sintonización	335
Referencias	338
Problemas propuestos	340
Problemas complementarios	343
CAPÍTULO 6 Técnicas de Respuesta en Frecuencia	345
Sinopsis	345
6.1 Introducción	346
6.2 Respuesta en estado estable de un sistema ante una entrada senoidal	346
6.3 Diagramas de Bode	353
6.3.1 Trazas de Bode para factores básicos	354

6.3.2 Bode de un factor K	355
6.3.3 Bode de un factor integral y un derivativo	356
6.3.4 Bode de un factor de primer orden $(1 + j\omega\tau)^{\pm 1}$	360
6.3.5 Bode de un factor cuadrático $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\pm 1}$	363
6.3.6 Frecuencia de resonancia ω_r y el valor pico de la resonancia M_r	369
6.3.7 Proceso de graficación de diagramas de bode	371
6.3.8 Retardo de transporte	378
6.4 Identificación de sistemas usando la respuesta a la frecuencia	379
6.5 Diagramas polares o de Nyquist	384
6.5.1 Factor integral y derivativo $(j\omega)^{\mp 1}$	384
6.5.2 Factores de primer orden $(1 + j\omega\tau)^{\mp 1}$	385
6.5.3 Factores cuadráticos $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{-1}$	387
6.5.4 Trazado de diagramas de Nyquist	389
6.6 Especificaciones de diseño en el dominio de la frecuencia	392
6.7 Criterio de Nyquist	399
Referencias	401
Problemas propuestos	402
Problemas complementarios	406

CAPÍTULO 7 Diseño y Compensación de Sistemas en el Dominio de la Frecuencia	409
Sinopsis	409
7.1 Introducción	410
7.2 Compensador de adelanto de fase	410
7.2.1 Diseño de la función de transferencia del compensador en adelanto dados ϕ_c y M_c a una frecuencia ω_c	415
7.2.2 Implementación del compensador en adelanto	422
7.3 Compensador de atraso	425
7.3.1 Implementación electrónica de un compensador de atraso	428
7.4 Compensador de adelanto-atraso	431
7.4.1 Diseño de la función de transferencia de un compensador adelanto-atraso a partir de ϕ_c y μ_c para una ω_c	433
7.4.2 Implementación electrónica de un compensador de adelanto-atraso	439
7.5 Diseño de compensadores utilizando diagramas de bode	443
Referencias	465
Problemas propuestos	465
Problemas complementarios	467

CAPÍTULO 8 Análisis y Diseño en el Espacio de Estado	469
Sinopsis	469
8.1 Introducción	470
8.2 Concepto de estado	470
8.1.1 Forma de las ecuaciones de estado	471
8.3 Modelado en variables de estado	472
8.3.1 Modelado de redes eléctricas en variables de estado	479
8.4 Polinomio característico y valores propios	485
8.4.1 Estabilidad de sistemas en variables de estado	487
8.5 Transformación de coordenadas	489
8.6 Solución de las ecuaciones de estado	495
8.6.1 Solución por transformada de laplace	496
8.6.2 Respuesta en el dominio del tiempo	500
8.6.3 Evaluación de la matriz e^{at}	501
8.6.3.1 Método de expansión en series para el calculo de e^{At}	505
8.7 Obtención de la función de transferencia a partir de las ecuaciones de estado	507
8.7.1 Algoritmo de leverrier	508
8.8 Obtención de ecuaciones de estado a partir de funciones de transferencia	514

8.8.1 Introducción	514
8.8.2 Forma canónica controlable	515
8.8.3 Forma canónica observable	519
8.9 Controlabilidad y observabilidad	522
8.9.1 Controlabilidad	522
8.9.2 Observabilidad	526
8.10 Diseño de sistema de control en el espacio de estado	528
8.11 Diseño de observadores	549
8.11.1 Observador de orden completo	550
8.12 Linealización de sistemas de control en el espacio de estado	558
Referencias	564
Problemas propuestos	565
Problemas complementarios	570
Apéndice A	573
Respuesta a los problemas seleccionados	575
Índice analítico	579

Capítulo 1

Introducción a los Sistemas de Control

Objetivos

En este capítulo el lector estudiará lo siguiente:

- Revisión histórica de los sistemas de control.
- Terminología.
- Características y configuraciones básicas de los sistemas de control.
- Objetivos del análisis y diseño.
- El proceso de diseño.

Sinopsis

En este capítulo se presenta una breve reseña histórica de la evolución de los sistemas de control, destacando los avances más importantes de cada periodo en que se divide la historia del control. Así mismo, se introducen las principales definiciones de esta área del conocimiento para permitir al lector una mayor comprensión de la temática a abordar.

Con el objeto de ilustrar el comportamiento de los sistemas de control de lazo abierto y cerrado, se analizan varios ejemplos representativos sobre el tema. Finalmente, se presenta una introducción al proceso de diseño de los sistemas de control.

1.1 Introducción

La materia de sistemas de control es de suma importancia para todo ingeniero, su utilización ha sido vital en el avance de la ingeniería y la ciencia, permitiendo liberar al hombre de tareas repetitivas y su exposición a ambientes inseguros que pueden ser ejecutadas fácilmente por algún sistema de control automático. En nuestra sociedad moderna, encontramos muchas de las aplicaciones de los sistemas de control, por ejemplo, en el control de vehículos espaciales, en los sistemas de guía de misiles, en las industrias el uso de robots permite la ejecución de tareas monótonas con alta precisión, el cuerpo humano es un complejo sistema de control formado por pequeños subsistemas, tales como la visión que permite el seguimiento de objetos en movimiento.

Muchos han sido los factores que impulsaron los avances en la teoría y la práctica del control automático a lo largo de la historia, tales como: la revolución industrial, la I y II guerra mundial, la conquista del espacio, etc. Sin importar las causas, el hombre ha logrado obtener un desempeño óptimo de los sistemas de control, mejorar la productividad, automatizar muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias. Para lograr comprender estos sistemas y desarrollar otros, es necesario que todos los ingenieros adquieran un conocimiento amplio del área del control automático.

1.2 Revisión histórica del control

La historia del desarrollo del control es una fascinante recopilación de logros humanos interactivos que ha resultado en el control de máquinas, barcos, aviones, vehículos espaciales y muchos otros sistemas físicos. Su motivación radica generalmente en un deseo emergente por crear y controlar máquinas.

Los sistemas de control retroalimentados han sido conocidos y utilizados por muchos años, su historia puede dividirse básicamente en 4 periodos:

- * Periodo del arte o inicios del control (hasta 1900)
- * El periodo pre-clásico o de transición: (1900-1935)
- * El periodo clásico o científico: (1935-1950)
- * El control moderno: (después de 1950)

1.2.1 Inicios del control hasta 1900

Se tiene conocimiento de que los sistemas de control automático fueron utilizados hace más de 2000 años, los avances se fueron dando a través del

tiempo. La primera motivación para los sistemas retroalimentados en la antigüedad fue la necesidad de medir el tiempo, Así hacia el año 270 A.C. el griego Ktesibius inventó un control de la taza de flujo para regular un reloj de agua. De hecho este se reduce a un control de nivel de líquido, donde el mecanismo de control usado en la antigüedad es todavía utilizado para controlar el nivel de agua de un inodoro. La figura 1.1 muestra un esquema del reloj de agua de Ktesibios, en donde el flotador está fabricado de tal forma que cuando desciende el nivel, el caudal del depósito aumenta y con ello el nivel sube, disminuyendo por lo tanto el caudal. El líquido que sale del primer depósito es canalizado a un contenedor en donde un dispositivo permite llevar un registro del tiempo.

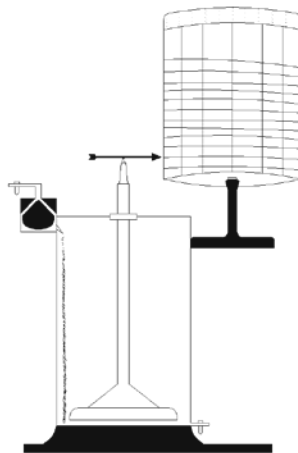


Figura 1.1 Reloj de agua de Ktesibios.

Trescientos años más tarde Herón de Alejandría describe un dispositivo para la apertura de puertas de un templo. La figura 1.2 ilustra uno de los primeros sistemas de control de lazo abierto propuesto por Herón.

El dispositivo operaba de la siguiente manera: la señal de mando del sistema era el encendido del fuego del altar. El aire caliente, al dilatarse por el fuego, trasladaba el agua del depósito a la cuba. Al incrementarse el peso en la cuba esta descendía y se abría la puerta por medio de una cuerda, esto provocaba que un contrapeso se elevara. La puerta podía cerrarse apagando o atenuando el fuego, pues esto provocaba que al enfriarse el aire en el contenedor y reducirse su presión, por el efecto sifón el agua de la cuba volvía a su depósito; con ello la cuba disminuía de peso y el contrapeso permitía cerrar la puerta. Posiblemente

el dispositivo actuaba cuando el celebrante y su séquito subían los peldaños del templo y como el sistema de apertura no era conocido por el pueblo, se creaba un ambiente de misticismo, demostrándose el poder de los dioses del Olimpo.

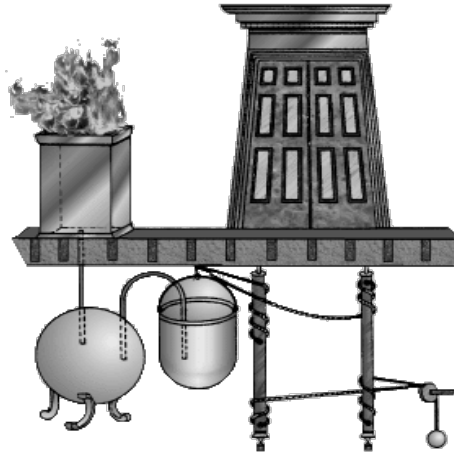


Figura 1.2 Dispositivo de apertura de puertas.

Otros hechos relevantes de este período incluyen a René-Antoine Ferchault de Réaumur(1683-1757) quien propuso un control automático de temperatura para incubadoras basado en el invento de Cornelius Drebbel (1572-1663). La figura 1.3 muestra un esquema de dicho invento, el horno consta de una caja que contiene el fuego y un tubo en la parte superior, el cual cuenta con un regulador de tiro.

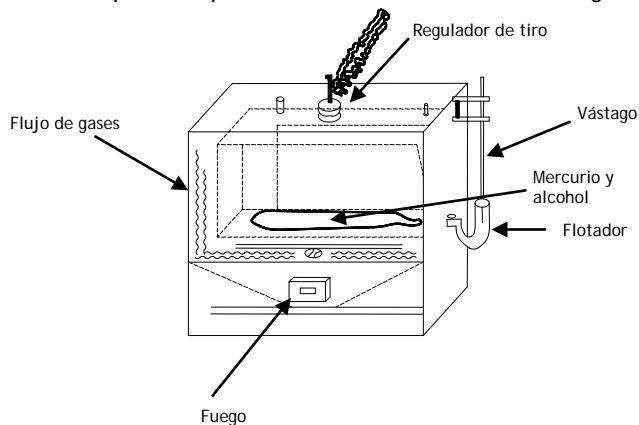


Figura 1.3 Incubadora de Cornelius Drebbel.

Dentro de la cámara de combustión esta la incubadora con doble pared y el hueco entre ellas se llena con agua. El horno cuenta también con un sensor de temperatura en un recipiente de vidrio lleno de alcohol y mercurio, estos se colocan entre las paredes del horno. A medida que el fuego calienta la caja y el agua, el alcohol se dilata y el vástago con flotador se desplaza hacia arriba, bajando el regulador de tiro sobre la boca del tubo. Cuando la caja este demasiado fría, el alcohol se contrae y por consecuencia, el regulador de tiro se abre y el fuego se incrementa. La temperatura de operación esta determinada por la longitud del vástago con flotador, misma que determina la apertura del regulador de tiro para una dilatación determinada del alcohol. Esta incubadora fue utilizada para empollar huevos de gallina.

En 1788 Matthew Boulton quien utilizaba máquinas de vapor en sus fábricas, describe en una carta a James Watt, la necesidad de un regulador automático, a partir de esto, Watt desarrolla el gobernador de velocidad de las máquinas de vapor y perfeccionó la obtención de vapor de las calderas, estos dispositivos permitían transformar el movimiento rotatorio en un de traslación, así como, regular automáticamente la velocidad angular de un motor a través de la modulación de la cantidad de vapor admitido. Este dispositivo presentaba algunas desventajas, solo empleaba un control proporcional por lo que no había un control exacto de la velocidad y tenía una sola condición de operación. El regulador de James Watt puede considerarse el primer sistema de control retroalimentado y su invención marca el origen de la ingeniería de control y se considera el punto de partida de la revolución industrial. En la figura 1.4, se muestra el regulador de Watt, el cual opera de la siguiente manera, cuando se incrementa la velocidad los contrapesos metálicos en forma de esfera se elevan, esto provoca que se alejen del eje y se cierre la válvula y por lo tanto el vapor suministrado se reduzca.

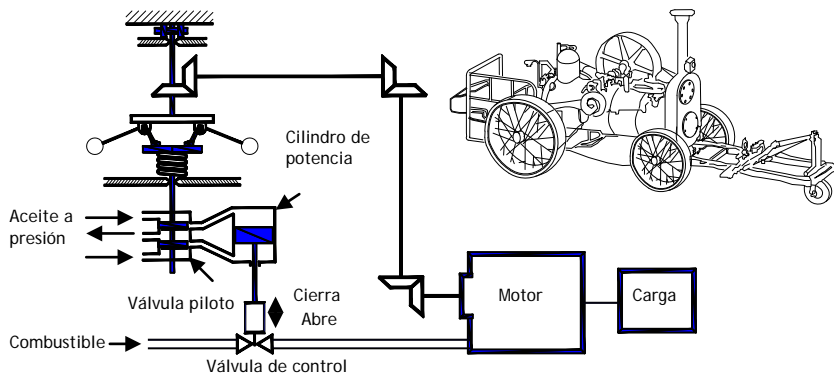


Figura 1.4 Regulador de velocidad de James Watt.

En caso contrario cuando la velocidad baja se aumenta el suministro de vapor ya que en este caso los contrapesos contribuyen a que la válvula esté abierta. De esta forma se regula la velocidad de manera proporcional.

En este periodo todos los esfuerzos se hicieron en base al arte y a la intuición, sin la aplicación de la teoría, por esta razón los progresos fueron lentos. Otras contribuciones importantes en este periodo se resumen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Resumen histórico de otros hechos relevantes de los inicios del control.

Año	Hecho relevante
1789	Surgen gobernadores típicos patentados por William Siemens, con una sustitución de acción integral por la proporcional, produciendo reguladores con puntos de operación flotantes.
1826-1836	J. V. Poncelet publica artículos en donde se mostraba la dinámica de los reguladores empleando ecuaciones diferenciales, pero encontraron dificultades para determinar las condiciones de estabilidad.
1862	Thomas Pickering y William Harthell inventaron un regulador de alta velocidad físicamente más pequeño que el de James Watt.
1868	James Clerk Maxwell publica el artículo " <i>On Governor</i> ", en el cual describe como derivar las ecuaciones diferenciales de varios reguladores. Además muestra que mediante el análisis de los coeficientes de las ecuaciones diferenciales de segundo, tercero y cuarto orden se puede determinar la estabilidad del sistema.
1874	Edgard J. Routh retoma los trabajos de Maxwell y publica su artículo "Tratado sobre la estabilidad de un estado de movimiento dado", el cual contiene lo que ahora conocemos como el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz.
1895	Adolf Hurwitz resolvía el problema de la estabilidad de sistemas lineales en términos de un conjunto de determinantes.

1.2.2 El periodo preclásico: 1900 - 1935

Este periodo se caracteriza por la utilización de la teoría en conjunción con la intuición para el diseño de sistemas de control. A continuación se presentan los hechos históricos más relevantes de este periodo.

A comienzos del siglo 20, se vio la rápida aplicación de los controladores de retroalimentación para la regulación de voltaje, corriente y frecuencia. Esto también se extendió al control de calderas para la generación de vapor, al control de velocidad en motores eléctricos, así como al control de navegación, aviación y auto-estabilización. En los procesos industriales se aplica la retroalimentación al control de temperatura, presión y fluido. Entre los años 1909 y 1929, las ventas de los controladores empezaron a incrementarse; la cantidad de dispositivos diseñados y manufacturados era grande. Sin embargo la mayoría eran diseñados sin ningún entendimiento de la dinámica de los sistemas a controlar y de la medición y actuación de los dispositivos utilizados para el

control. La mayoría de las aplicaciones fue relacionada con la simple regulación, y en tales casos esta falta de entendimiento no fue un problema serio. Sin embargo, hubo algunos mecanismos complejos que involucraban complicadas leyes de control que se venían desarrollando paralelamente. Un ejemplo son las compañías suministradoras de electricidad que lo relacionaron con la operación económica de las calderas en la generación de vapor. En 1920 varias compañías desarrollaron sistemas completos para el control de las calderas.

Como los dispositivos y sistemas de control comenzaron a ser usados en diferentes áreas de la ingeniería, dos grandes problemas aparecieron:

- 1.- Había una falta de entendimiento teórico con un lenguaje no común para discutir los problemas.
- 2.- No había análisis simples ni métodos de diseño.

La única herramienta disponible para el análisis era una ecuación diferencial y la aplicación de la aún no difundida prueba de estabilidad de Routh-Hurwitz.

Los ingenieros de control se encontraban confundidos ya que los controladores que funcionaban satisfactoriamente para una aplicación no lo hacían igual para otras. En ocasiones, se producía la inestabilidad de un sistema que en un principio era estable. No se había difundido procedimientos sistemáticos para analizar la estabilidad o para mejorarla.

En la tabla 1.2 se resumen las principales contribuciones de este periodo.

Tabla 1.2 Resumen histórico de otros hechos relevantes del periodo preclásico.

Año	Hecho relevante
1913	Henry Ford mecanizó el ensamble de la producción de automóviles.
1922	Nicholas Minorsky presentó un claro análisis de los sistemas de control de posición y formuló la ley de control que hoy se conoce como control PID y propuso un modelo matemático para describir el control de barcos.
1928	Mason desarrolló un amplificador neumático retroalimentado negativamente; él comenzó experimentando con retroalimentación con parte de la salida del amplificador y produjo un circuito retroalimentado que linealizó la operación de la válvula.
1932	Harry Nyquist propuso una solución al análisis de los sistemas de amplificación retroalimentados basado en la forma de la respuesta de la frecuencia de la ganancia en lazo abierto.
1934	Harold S. Black inventa el amplificador retroalimentado ante la necesidad de fomentar la telefonía a larga distancia compensando las pérdidas en los cables de transmisión.
1934	Harold Locked Hazen publica el artículo " <i>Theory of Servomechanism</i> ", en donde se introduce por primera vez el término servomecanismo.

1.2.3 El periodo clásico: 1935-1950

En este periodo se tienen desarrollos en el campo teórico y se planea el control automático como ciencia potencial. Entre los hechos más relevantes del periodo clásico podemos mencionar los siguientes:

Durante el periodo 1935-1940, ocurrieron adelantos en comprensión y análisis de sistemas de control, surgiendo varios grupos independientes de trabajo en varios países. El mejor trabajo conocido y el más influyente vino de tres grupos formados en los EE.UU, aunque el desarrollo de la teoría de control en EE.UU, y Europa Occidental fue algo diferente al desarrollado en Europa del Este y en Rusia, derivado del trabajo de Vyschnegndsky en Rusia y del trabajo de Barkhausen en Alemania, seguido por desarrollos de Cremer, Leonhard y Mikhailov.

El primer grupo formado por AT&T continuó con su intento por encontrar maneras de extender el ancho de banda de su sistemas de comunicación, y sobre todo con el fin de obtener buenas características de respuesta a la frecuencia, los Ingenieros de *Bell Telephone Laboratories* trabajaron extensamente en este problema, encontrando las característica de ganancia deseadas, sin embargo el retraso de la fase era demasiado grande.

En 1940 Hendrik Bode, quien había estudiado extensamente los métodos de diseño en el dominio de la frecuencia, mostró que ninguna atenuación definida y universal de fase cambia la relación para una estructura física existente, pero en este hay una relación entre una característica de la atenuación dada y la fase mínima, cambio que se puede asociar con el diagrama de bode.

Un segundo grupo importante formado por ingenieros mecánicos y físicos que trabajaron en el proceso industrial, dirigidos por Ed. S. Smith de la Compañía Constructora y Fundidora de Hierro (*Builders Iron Foundry Company*), comenzaron a desarrollar una terminología en común y los métodos de planeamiento para los sistemas de control a usar, de esta manera se formó el primer cuerpo profesional para tratar específicamente el control automático.

El tercer grupo estaba localizado en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la MIT y era encabezado por Harold L. Hazon y Gordon S. Brown, quienes emplearon métodos basados en el dominio del tiempo, iniciaron el desarrollo del uso de diagramas de bloques y la utilización del análisis diferencial para simular sistemas de control.

Durante este período los manufactureros de piezas neumáticos comenzaron a mejorar y desarrollar sus instrumentos.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la práctica y la teoría del control automático recibieron un gran impulso, ya que fue necesario diseñar y construir pilotos automáticos para aviones, sistemas de puestos de tiro, sistemas de

control por antenas de radar y otros sistemas militares basados en los métodos de control por retroalimentación. La complejidad y el funcionamiento esperado de estos sistemas militares necesitaron ampliar las técnicas de control disponibles y fomentaron 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 de los sistemas de control fue un arte que implicaba aproximaciones de prueba y error. Durante la década de 1940, se incrementaron en número y utilidad los métodos matemáticos y analíticos, y la ingeniería de control se convirtió en una disciplina por derecho propio.

En 1942, J. G. Ziegler y N. B. Nichols, propusieron unas fórmulas empíricas para sintonizar las ganancias de los controladores PI y PID, basándose en valores del proceso a controlar y que son medidas experimentales, esto ocurrió cuando estaban trabajando para la compañía Taylor Instrument, en donde sacan al mercado el primer controlador PID, Fulscope modelo 100.

Después de la Segunda Guerra Mundial, con el mayor uso de la transformada de Laplace y el plano de frecuencia compleja, las técnicas del dominio de la frecuencia continuaron dominando el campo del control.

En 1948, Walter R. Evans mientras trabajaba en el campo de guía y control de aviones para la industria de la aviación Americana del Norte, desarrollo el método del lugar de las raíces para determinar la estabilidad de los sistemas lineales de una sola entrada, esto a partir del modelo del sistema descrito por una ecuación diferencial con coeficientes constantes.

Durante la década de 1950, el énfasis en la teoría de la ingeniería de control se centró en el desarrollo y uso de los métodos en el plano s , particularmente en

Tabla 1.3 Resumen histórico de otros hechos relevantes del periodo clásico.

Año	Hecho relevante
1941	El ruso A. N. Kolmogorov desarrolla la teoría de procesos estocásticos estacionarios en tiempo discreto.
1945	H. Bode publica lo resultados de su trabajo en su libro " <i>Network análisis and Feedback amplifier Design</i> "
1946	La escuela de Moore de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pennsylvania desarrolla la ENIAC (Electronic Numerical and Automatic Calculator), primera computadora capaz de integrar un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias.
1947	James, Nichols y Phillips publican el desarrollo completo de técnicas para el diseño de servomecanismos.
1947	Un C-54 atravesó el Atlántico sin que un ser humano tocara los mandos desde el despegue hasta el aterrizaje. El avión fue controlado por el piloto automático propuesto por Sperry.
1938	Hendrik Bode utilizó la magnitud y la fase de las gráficas de respuesta a la frecuencia de una función compleja para investigar la estabilidad en lazo cerrado usando conceptos de margen de fase y margen de ganancia.

el enfoque del lugar geométrico de las raíces. Además, durante esa época se hizo posible el uso de la computadora analógica y digital como componente de control. Este nuevo elemento de control proporcionó una capacidad para calcular con rapidez y exactitud, que no existía antes para el ingeniero de control. La tabla 1.3 resume otros hechos importantes de la época.

1.2.4 Periodo Moderno 1950-

La dirección que tomó el trabajo durante la postguerra fue influenciada por la percepción y nuevas ideas desarrolladas durante la guerra. La trayectoria del crecimiento estaba determinada en gran medida por dos factores:

- a) El problema planteado por el gobierno para el lanzamiento y guía de misiles, además de la operación de vehículos espaciales.
- b) La llegada de la computadora digital.

El primer problema fue esencialmente el controlar objetos balísticos, y por lo tanto, el detallar modelos físicos construidos en término de ecuaciones diferenciales, tanto lineales como no lineales. También la medición instrumental y otros componentes de gran exactitud y precisión podrían desarrollarse y utilizarse. Los ingenieros trabajaban en industrias aeroespaciales, siguiendo el ejemplo de Poincaré, regresando a la formulación de las ecuaciones diferenciales en términos de ecuaciones y de esta manera empezar a acercarse a lo que hoy se conoce como el modelado en espacio de estado. Particularmente, el advenimiento del Sputnik y la era espacial, proporcionaron un gran impulso a la ingeniería de control.

Entre 1948 y 1952 Richard Bellman trabajó en el departamento de matemáticas de la corporación RAND, donde se dedicó al estudio del problema de aumentar la efectividad de los misiles y que estos provocaran el mayor daño posible. Este trabajo lo llevo a formular "El principio de Optimización" y de la programación dinámica.

El avance de la electrónica del estado sólido entre 1950 y 1970, dio paso a profundos cambios en las técnicas de control continuo y discreto, se desarrollaron controladores digitales y sistemas de control automatizado para máquinas y herramientas. En la industria automotriz los relevadores fueron desplazados por los controladores lógicos programables, gracias al desarrollo de los dispositivos de estado sólido.

En la década de los 70's surge el control adaptable y a partir de 1980 conceptos como control robusto, control difuso, control estocástico, control por

modos deslizantes y otros temas relacionados son ampliamente utilizados en la ingeniería de control.

Actualmente resulta importante destacar que la ingeniería de control debe considerar dos técnicas: La del dominio del tiempo y la del dominio de la frecuencia, para realizar el proceso de análisis y diseño de sistemas de control.

1.3 Terminología

Al estudiar la ingeniería de control se deben definir la terminología básica para describir los sistemas de control. En particular, un sistema de control se puede considerar como una caja negra con una entrada y una salida.

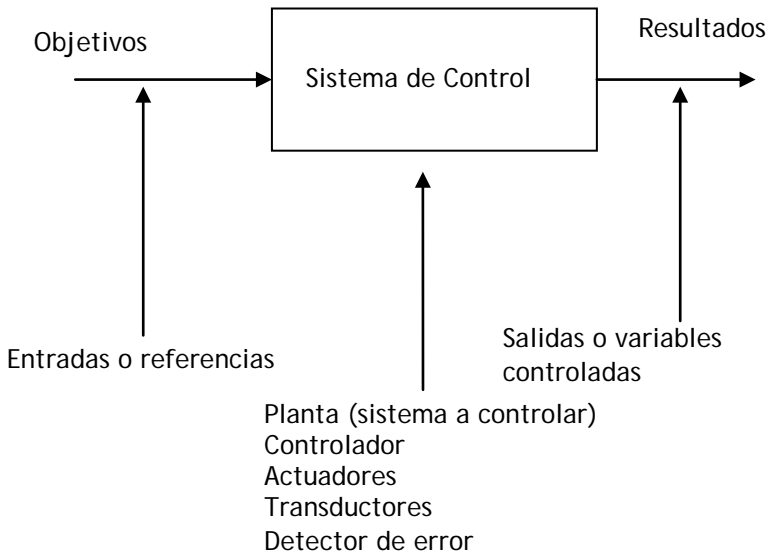


Figura 1.5 Diagrama de un Sistema de Control.

Es importante resaltar el hecho de que no es necesario conocer el funcionamiento interno o cómo actúan entre sí los diversos elementos, para caracterizar el sistema.

El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite estimar la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para

mejorarla. De esta manera, el ingeniero de control conociendo cuál es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final.

El diagrama de bloques ilustrado en la figura 1.5 muestra la representación de un sistema de control mediante una caja negra, además de señalar los elementos que conforman el sistema. A continuación se presenta la terminología fundamental para la descripción de sistemas de control:

- **Sistema.** Se emplea para describir a un conjunto de componentes que interactúan, con el fin de realizar un objetivo determinado. Existen una gran variedad de sistemas tales como físicos, químicos, biológicos, económicos, etc.
- **Variable controlada y variable manipulada.** Variable controlada (salida), cantidad y condición que se mide y controla; variable manipulada, cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
- **Planta.** Se refiere a cualquier objeto, proceso, máquina o entidad dinámica que se va a controlar, esta puede ser de diferentes tipos, por ejemplo:
Físicos.- vehículos, robots, mecanismos, aviones, naves espaciales, hornos, motores, etc.
Industriales.- refinerías, procesamiento de metales, manufactura de semiconductores, procesos de laminado, tratamiento de aguas, etc.
Biológicos.- plantas, animales, humanos.
Organizacionales.- sistemas de administración, sistemas económico-financieros, líneas de manufactura, etc.
- **Proceso.** Cualquier operación que deba controlarse, por ejemplo: el espesor del aluminio en el laminado, la temperatura de un horno, el nivel de líquido de un depósito. Además, existen varios tipos de procesos tales como: químicos, físicos, biológicos, económicos, etc.
- **Perturbación.** Señal no deseada que tiende a afectar el comportamiento de una planta. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina *interna*, en tanto que una perturbación *externa* se produce fuera del sistema y representa una entrada.
- **Controlador.** Este genera la entrada de control que se aplicará a la planta. Por ejemplo, en un automóvil el conductor es el controlador, este observa el comportamiento de cómo opera la planta (automóvil) y genera un comando apropiado para el acelerador, freno y mecanismo de dirección para que el vehículo sea controlado en la manera deseada por el controlador (conductor).
- **Salidas.** En general, las salidas describen el estado de operación de la planta que está siendo controlada.

Una planta puede tener exclusivamente una entrada y una salida, o bien múltiples entradas y múltiples salidas, para indicar lo anterior en sistemas de control se usa la siguiente notación.

- SISO (*Single-Input Single-Output*): Simple Entrada Simple Salida.

- MIMO (*Multi-Input Multi-Output*): Múltiple Entrada Múltiple Salida.

- **Sensores.** Dispositivo o elemento utilizado para determinar una cantidad física, generalmente son empleados para medir el comportamiento de una planta a través de sus salidas. Por ejemplo, si estamos interesados en controlar la velocidad de un automóvil, la salida puede medirse por medio de un velocímetro, la velocidad de una máquina por medio de un tacómetro. De esta forma, si la planta de interés es un dispositivo físico, entonces el sensor para medir la salida probablemente también será un dispositivo físico, algunos fenómenos que podemos medir son: fuerza, par, velocidad, distancia, temperatura, ángulo de rotación, etc.
- **Control realimentado.** Este se refiere a una operación que en presencia de una señal de perturbación, el sistema tiende a reducir la diferencia entre la salida y alguna entrada de referencia, y lo continúa haciendo en base a esta diferencia.
- **Sistemas de control realimentado.** Es aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control.
- **Servomecanismo.** Es un Sistema de control realimentado en el cual la salida es una posición, velocidad o aceleración mecánica.

1.4 Características de los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

En esta sección estudiaremos las dos configuraciones de los sistemas de control, además de ilustrarse éstas por medio de algunos ejemplos.

Sistemas de control de lazo abierto. La figura 1.6 ilustra este tipo de sistemas, en donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control, es decir, la salida de la planta no se mide ni realimenta, entonces es independiente de las entradas de control. Por lo tanto este tipo de controladores se emplean sólo si la relación entrada/salida de la planta es conocida y no hay perturbaciones externas o internas. Por esta razón estos sistemas son simples y económicos.

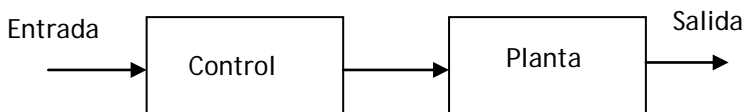


Figura 1.6 Esquema de un sistema de control de lazo abierto.

Ejemplo 1.1 Lavadora doméstica.

En una lavadora de ropa doméstica como la mostrada en la figura 1.7; el ciclo de remojo, lavado y enjuague en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida que es el grado de limpieza de la ropa.

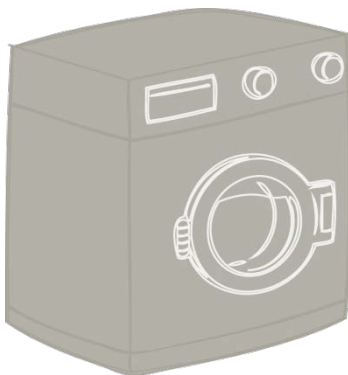


Figura 1.7 Lavadora doméstica.

Ejemplo 1.2 Alumbrado público.

En el alumbrado público preprogramado como el mostrado en la figura 1.8, el objetivo es mantener un nivel de iluminación mínimo en las calles o áreas públicas, para lo cual se requiere encender las luminarias a una hora específica y apagarlas en otra. Así pues, se puede decidir encender el alumbrado a las 6:30 p.m. y apagarlo a las 6:30 a.m. Un inconveniente de este sistema ocurre cuando se tienen días nublados o bien cuando cambia las estación del año, pues cambia la hora del atardecer y amanecer. Por lo que es necesario modificar el temporizador varias veces al año.

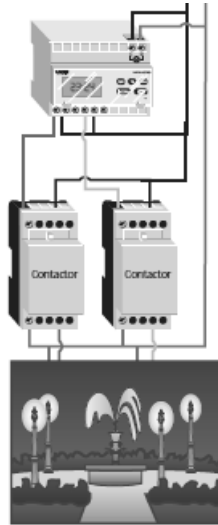


Figura 1.8 Control de iluminación usando un controlador lógico programable.

Ejemplo 1.3 Tostador.



Figura 1.9 Tostador de pan.¹

Este dispositivo está fabricado con el propósito de obtener un pan tostado más oscuro cuanto más tiempo sea sometido al calor, la figura 1.9 muestra un tostador típico. Aquí la variable de salida es el color del pan ya tostado y la variable de entrada es el color del pan deseado una vez que se ha tostado. El aparato no tiene la capacidad de medir el color del tostado, opera usando una base de tiempo que determina el grado en que se tueste el pan, por lo tanto no hay una retroalimentación de la salida y el sistema no es capaz de distinguir si el pan a tostar tiene diferente grosor, o bien está hecho de centeno o de otra

¹ Imagen obtenida de <https://www.flickr.com/photos/cgdeideas>

clase de harina. Por lo cual, no puede corregir perturbaciones externas ni internas.

Sistemas de control de lazo cerrado. En este tipo de sistema la señal de salida tiene un efecto directo sobre la acción de control, es decir, son sistemas de control realimentado, ya que la salida es comparada con la referencia y la señal de error generada alimenta al controlador el cual aplica una nueva señal a la planta con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema al valor deseado, esto se muestra en la figura 1.10.

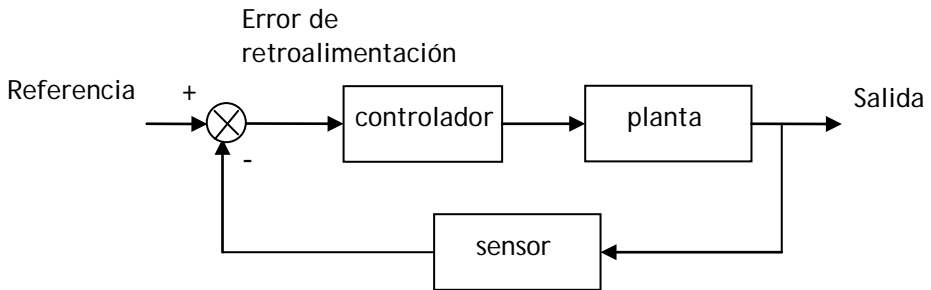


Figura 1.10 Esquema de un sistema de control de lazo cerrado.

Ejemplo 1.4 Sistema de control de nivel de líquido.

En la figura 1.11 se muestra un sistema de control de nivel de líquido, donde el objetivo es mantener el nivel en un valor deseado.

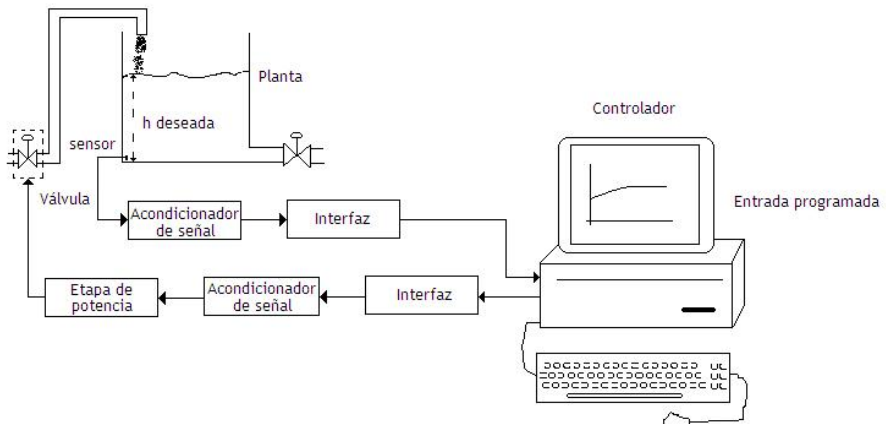


Figura 1.11 Sistema de control de nivel de líquido.

Para medir el nivel de líquido se emplea un dispositivo analógico conocido como sensor de presión, la información generada por dicho dispositivo es tratada por medio de un acondicionador de señal y convertida a un formato digital a través de una interfase para ser registrada por una computadora, en ella se compara la altura del nivel de líquido medida con la programada o deseada. La diferencia que existe entre ellas se le conoce como el error, el cual es convertido en un valor analógico a través de una interfase y acondicionado para ser utilizado por un etapa de potencia que permite la apertura o cierre proporcional de la válvula, logrando con ello la disminución o el aumento del caudal hacia el depósito, esta acción modifica el nivel del líquido. El proceso se repite hasta que la salida sigue a la referencia.

Ejemplo 1.5 Sistema térmico con retroalimentación manual.

Considere ahora el sistema térmico mostrado en la figura 1.12. El objetivo de este sistema es proporcionar agua caliente a una temperatura deseada, la cual puede ser utilizada en otra parte del proceso no mostrado, en este sistema un operador actúa como controlador, su intención es mantener la temperatura del agua caliente a un valor determinado, para monitorear la temperatura se cuenta con un termómetro instalado en la salida del sistema, en caso de que el operador observe una diferencia entre la temperatura deseada y la de salida, este tendrá que efectuar una acción de control. Si la temperatura de salida es superior a la deseada, entonces reducirá la entrada de vapor para bajar esa temperatura. En caso de que la temperatura baje demasiado, el operador realizará la secuencia de operación en sentido contrario.

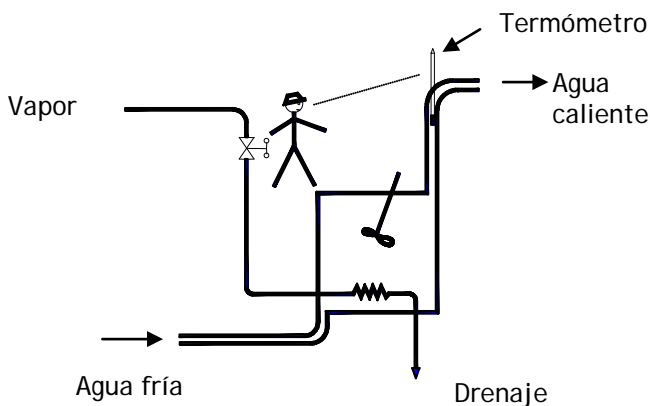


Figura 1.12 Control de retroalimentación manual en un sistema térmico.

Existen muchos sistemas similares a este en donde el ser humano realiza los actos del operador, a estos se les denominan sistemas de control manual de lazo cerrado. Uno de los principales retos del ingeniero en sistemas de control es la automatización de los procesos, es decir, reemplazar las tareas repetitivas del operador por un controlador analógico o digital, que le brinde mayor confiabilidad al sistema.

Ejemplo 1.6 Sistema de control del alumbrado público.

Este sistema ya fue descrito en los sistemas de lazo abierto, sin embargo, consideraremos ahora una modificación del mismo con el fin de convertirlo en un sistema de lazo cerrado, para ello se requiere hacer algunos cambios, es necesario eliminar el temporizador y medir la variable de salida, es decir, el nivel de iluminación actual. Para ello, se puede emplear como sensor una fotocelda y utilizar la señal obtenida a través de un circuito electrónico para encender o apagar el alumbrado de acuerdo al nivel de iluminación deseado.

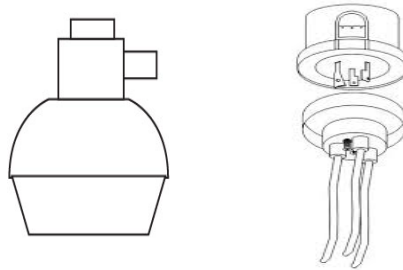


Figura 1.13 Fotocelda para control de alumbrado público.

1.5 Comparación entre los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

A continuación se presentan algunas ventajas y desventajas que tienen los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado.

- La precisión de los sistemas de lazo abierto depende directamente del conocimiento de la planta para lograr una calibración adecuada del controlador. La calibración implica un conocimiento de la relación entrada-salida con el fin de que el controlador genere la entrada apropiada a la planta.

- Los sistemas de lazo abierto no presentan problemas de inestabilidad.
- El diseño apropiado de los sistemas de lazo cerrado generalmente incrementan la precisión por esta razón su funcionamiento es conforme al valor deseado.
- Una ventaja del control de lazo cerrado es que es relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas de parámetros del sistema.
- Desafortunadamente si un sistema de lazo cerrado no está bien diseñado, este puede tender hacia la inestabilidad. Por otra parte, la estabilidad es la función principal en el sistema de control de lazo cerrado, lo cual puede conducir a corregir errores en exceso que producen oscilaciones de amplitud constante o variable.

1.6 Proceso de diseño de sistemas de control

En el diseño de los sistemas de control se busca mantener el comportamiento real de los mismos lo más próximo posible al fijado previamente. Para ello se requiere determinar la configuración, especificaciones e identificación de los parámetros más representativos del sistema propuesto con el fin de satisfacer una necesidad real.

En general, el diseño de un sistema de control puede enmarcarse en el procedimiento mostrado en la figura 1.14, a continuación se describen cada uno de los pasos a seguir.

1.- Establecer el conjunto de especificaciones para el comportamiento del sistema. En esta etapa se parte de la planta a controlar y se obtienen las especificaciones para el desempeño adecuado del sistema de control. Por ejemplo, si se desea controlar el ángulo de inclinación de una antena parabólica, en esta fase deben considerarse las dimensiones físicas y el peso de la misma. Con estos datos se pueden establecer las especificaciones de diseño como lo es la respuesta transitoria y el error en estado estable. La primera de ellas se refiere al tiempo de respuesta del sistema, es decir en cuanto tiempo y como queremos que la antena alcance la inclinación deseada, mientras que la segunda implica la precisión que deseamos del sistema.

2.-Obtener un modelo matemático. Esta es una etapa crucial del proceso de diseño, en la cual se plantean ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema, la obtención de las ecuaciones se basa en la aplicación de las leyes que rigen la dinámica del sistema. Por ejemplo, en el caso de los sistemas

mecánicos se tienen las leyes de Newton y para los circuitos eléctricos se aplican las leyes de Kirchhoff.

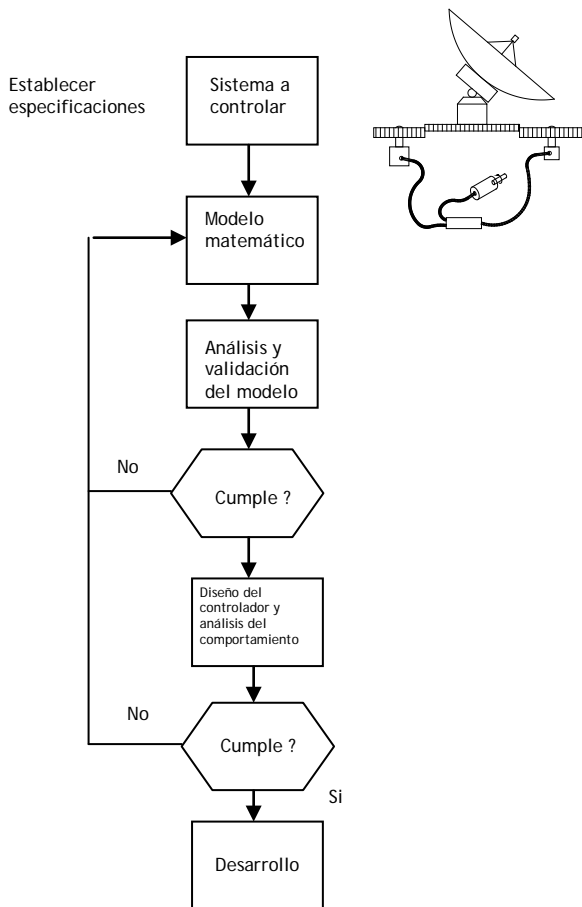


Figura 1.14 Metodología para el diseño de un sistema de control.

En el ejemplo del control de posición de una antena parabólica, el sistema contiene partes mecánicas y eléctricas. La antena es un cuerpo que desea girarse, por lo que deben considerarse la inercia de su masa y la fricción, para lograr girarla se requiere de un motor acoplado a la misma, así este sistema tiene tanto partes eléctricas como mecánicas. Adicionalmente se requieren otras

etapas como reductores de velocidad y amplificadores de potencia que permitan el control del sistema. En esta etapa pueden utilizarse diagramas de bloques que permitan visualizar de una mejor manera el comportamiento de las variables del sistema.

3.- Análisis y validación del modelo del sistema. Una vez planteado el modelo que describen el sistema, se realiza un análisis del mismo, en esta etapa a través de simulaciones se determina la validez del modelo; es decir, que su comportamiento corresponda con el funcionamiento del sistema físico. Las diferencias entre ambos pueden deberse a diversas causas, entre ellas, a parámetros del sistema despreciados o bien a no linealidades de algún parámetro que no fueron consideradas. Por ejemplo en nuestro sistema de control de posición de una antena, es común que como todo sistema mecánico se desprecie la fricción de rotación, esto generalmente es válido si existe un buen sistema de lubricación.

4.- Diseño del controlador y análisis del comportamiento. Una vez que se ha corregido el modelo matemático del sistema, el ingeniero de control propone una estrategia de control que permita cumplir con las especificaciones dadas, entre los objetivos primordiales del diseño del sistema de control están el lograr que la salida tenga una respuesta transitoria deseada, un error reducido en estado estable y lograr la estabilidad del sistema. Para ello deben realizarse varias pruebas en simulación que incluyen la aplicación de señales de entradas típicas similares a las que se aplican al sistema real, así como la aplicación de señales de perturbación. En caso de que se presente algún problema, será necesario regresar al modelo matemático, para analizar la probable omisión de algún parámetro o la inadecuada elección del controlador. Una vez resueltos estos problemas se puede construir un prototipo para el sistema físico.

Referencias

- 1.- Bennett S., A brief History of Automatic Control, IEEE Control Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 17-25, June 1996.
- 2.- Dorf B, Sistemas de Control Moderno, Pearson Prentice Hall, 10ª edición, 2005.
- 3.- Nise S. N., Control Systems Engineering, John Wiley & Sons, 4th Edition, 2004.

- 4.- Navarro R, Ingeniería de Control Analógica y Digital, McGraw Hill, 1^{ra} Edición, 2004.
- 5.- Ogata K., Ingeniería de Control Moderno, Pearson Prentice Hall, 4^{ta} edición, 2003.
- 6.- Sinha N. K., Control Systems, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1994.
- 7.- Masten M. K., Aström K. J., Lewis L. F., Modern Control Systems an IEEE/EAB Self-Study Course, IEEE, 1995.
- 8.- Franklin F. Gene, Powell J. D., Emami-Naeini A., Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación, Addison-Wesley Iberoamericana, 1^{ra} Edición, 1991.
- 9.- D´azzo J. J., Sistemas Retroalimentados de Control, Paraninfo, 4^a Edición, 1989.
- 10.- Lewis P. H., Yang C., Sistemas de Control en Ingeniería, Prentice Hall, 1^{ra} Edición, 1999.

Problemas propuestos

- 1.- Cuál es la característica común de los trabajos desarrollados durante el periodo del arte?
- 2.- Describa un breve panorama histórico de la Ingeniería de Control mencionando los acontecimientos más representativos de cada etapa.
- 3.- La figura 1.15 muestra un sistema de regulación de nivel de una lámpara de aceite construido por Philon de Bizancio, investigue como operaba dicho sistema. Determine cuál es la variable de entrada y salida del mismo, determine si se trata de un sistema de lazo abierto o cerrado, justifique su respuesta.

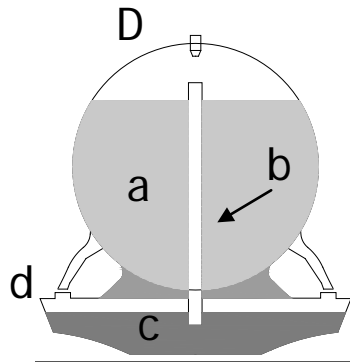


Figura 1.15 Lámpara de aceite de Philon de Bizancio².

4.- El despachador de vino mostrado en la Figura 1.16, fue diseñado por Herón de Alejandría. En este sistema, el vino era servido desde un recipiente *a* que se comunicaba con otro recipiente *c* por medio de un vaso comunicante. De tal forma que cuando se sacaba vino de *a*, el nivel de *c* baja y el flotador *d* abre la válvula. Entonces el vino cae dentro de *c* procedente de un gran depósito *e* hasta que la altura de *a* y *c* provoca que el flotador vuelva a tapar la válvula. Determine si el sistema corresponde a uno de lazo abierto o cerrado y justifique su respuesta. Para este sistema cuál es la planta y quién actúa como el controlador?

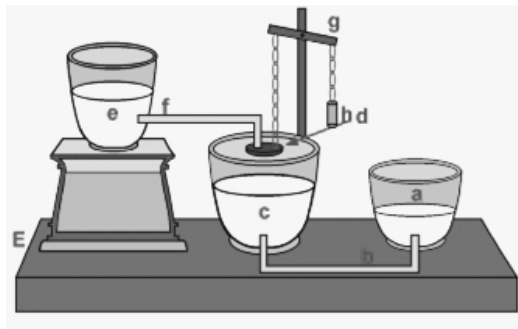


Figura 1.16 Dispensador automático de vino³.

² Imagen modificada de: http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/primeros_ejemplos_historicos_de_.htm

³ Imagen modificada de: http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/primeros_ejemplos_historicos_de_.htm

5.- Considere el reloj de agua de Ktseibios mostrado en la figura 1.1, determine cuál sería una perturbación interna y una externa para este sistema. Realice un diagrama de bloques.

6.- Considere el sistema de apertura de puertas de Herón de Alejandría mostrado en la figura 1.2 y determine:

- a) Si el sistema es de lazo abierto o cerrado? Justifique su respuesta.
- b) Identificar la planta, controlador, actuador, entrada y salida del sistema.

7.- Considerando el regulador de velocidad de James Watt mostrado en la figura 1.4, determine lo siguiente:

- a) La variable de entrada
- b) La variable de salida
- c) La planta
- d) El controlador
- e) proponga una perturbación interna y
- f) proponga una perturbación externa.

8.- En los sistemas de control retroalimentado es necesario medir la variable que está siendo controlada. Debido a la facilidad por la cual las señales eléctricas se transmiten, amplifican y generalmente se procesan, a menudo se desea que el sensor entregue como salida un voltaje proporcional a la variable que está siendo medida. Investigar los principios de operación y dibujar un diagrama de bloques adecuado para explicar la operación de los diferentes tipos de sensores que podrían medir:

- a) nivel de líquido
- b) temperatura
- b) presión
- c) posición angular
- d) velocidad angular

9.- Considere el sistema mostrado en la figura 1.12, proponga un sistema de control retroalimentado que no dependa de un operador.

10.- Identificar las variables de entrada, salida y partes principales de los siguientes sistemas de control. ¿Cuáles son de lazo abierto y cuales son de lazo cerrado?

- a) Secadora de ropa

- b) boiler con piloto automático
- c) calefactor casero
- d) semáforo
- e) conductor de vehículo
- f) refrigerador
- g) licuadora

11.- El proceso de enseñanza-aprendizaje puede considerarse un sistema de control retroalimentado, en éste la salida deseada es el conocimiento que se estudia, el estudiante puede ser considerado como la planta y las evaluaciones se consideran el mecanismo de retroalimentación. Construya un diagrama de bloques para el proceso de aprendizaje e identifique cada bloque del sistema.

12.- Enliste tres ventajas y tres desventajas de los sistemas de lazo abierto.

13.- Enliste tres ventajas y tres desventajas de los sistemas de lazo cerrado.

14.- Proporcione tres ejemplos de sistemas retroalimentados en los cuales una persona actúe como controlador, describa la operación de este en el sistema.

15.- Mencione los principales criterios de diseño que debe cumplir un sistema de control.

Problemas complementarios

1.- Investigar el principio de funcionamiento de la máquina de hilar de Basile Bouchon, ingeniero francés que construyó el telar mostrado en la figura 1.17 en 1725 y con el cual se podía tejer diseños de seda.

Determine:

- a) Si el sistema es de lazo abierto o cerrado, justificar su respuesta.
- b) Determinar la planta y el controlador.
- c) Especifique la entrada y la salida del sistema.
- d) Proponga una perturbación interna y otra externa.

2.- Identificar las variables de entrada, salida, perturbación interna y perturbación externa de los siguientes sistemas de control.

- a) Secadora de ropa
- b) Planchadora eléctrica



Figura 1.17 Máquina de Hilar de Basile Bouchon⁴.

3.- En el año 378 A.C. a Platón se le ocurre crear un sistema automático de alarma con base en una Clepsydra, como el mostrado en la figura 1.18; en el vaso de la Clepsydra se ubicó un flotador, sobre el cual se depositan unas esferas, durante un tiempo determinado el vaso es llenado a un caudal constante y al final, cuando se alcanza el nivel máximo, las esferas caen sobre un plato de cobre lo cual es indicativo que el tiempo ha transcurrido.

Determine:

- Si el sistema es de lazo abierto o cerrado, justificar su respuesta.
- Determinar la planta, el controlador, la entrada y la salida del sistema.
- Proponga una perturbación interna y otra externa.

⁴ Imagen modificada de <http://www.librosmaravillosos.com/lifemaquinas/capitulo08.html>

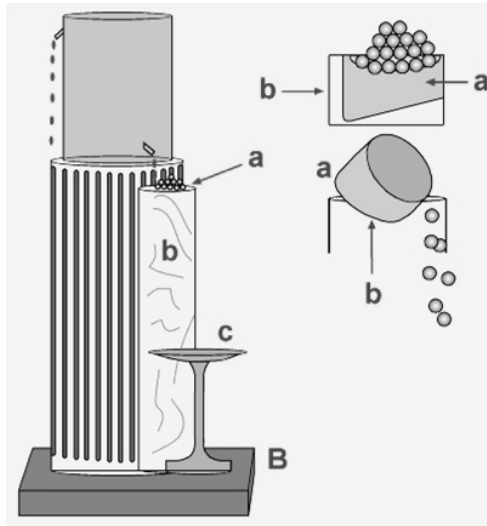


Figura 1.18 Sistema automático de alarma de platón⁵.

- 4.- El proceso de aprendizaje profesor-alumno es inherentemente un proceso con retroalimentación tendente a reducir a un mínimo el error del sistema. La salida deseada es el conocimiento que se estudia y el estudiante puede ser considerado como el proceso. Construya un diagrama de bloques para el proceso de aprendizaje e identifique cada bloque del sistema.
- 5.- Desde el punto de vista de operación cual es la diferencia de un sistema retroalimentado y uno de lazo abierto?
- 6.- Mencione dos ventajas de tener como controlador una computadora en un sistema de control retroalimentado.
- 7.- Un sistema de retroalimentación no siempre es negativo, ejemplo de ello es la inflación económica, la cual se caracteriza por la elevación continua de los precios. En este tipo de sistema el salario puede considerarse como la entrada y los precios como salida, si el proceso es la industria y la retroalimentación tiene

⁵ Imagen modificada de: http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/primeros_ejemplos_historicos_de_.htm

que ver con el aumento en los costos de la vida. Dibujar un diagrama de bloques que muestre un esquema simple de espiral inflacionaria precios-salarios.

8.- Considere el esquema simple de espiral inflacionaria desarrollado en el problema 5, agregar los bloques necesarios para tener un esquema de control de precios que permita estabilizar el sistema, tales controles pueden ser control legislativo o de tasa de impuesto.

9.- Hacia 1750 Andrew Meikle inventó una máquina trilladora accionada por la fuerza de caballos y más tarde adaptada a la fuerza producida por los molinos de viento, tal y como se muestra en la figura 1.19. Investigar como operaba el sistema, determinar si es de lazo abierto ó lazo cerrado, definir la entrada salida y posibles perturbaciones internas y externas.

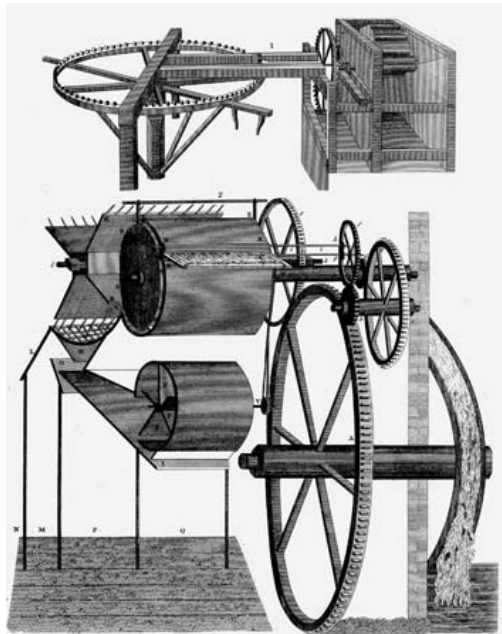


Figura 1.19 Máquina trilladora de Meikle⁶.

⁶ Imagen tomada de <http://global.britannica.com/biography/Andrew-Meikle>