

ME55A
Fundamentos de Control de Sistemas

R. H. Hernández-Pellicer
Dept. Ing. Mecánica-U. de Chile

Índice general

1. Introducción	5
1.1. Reseña histórica	6
1.2. Algunas definiciones	8
1.3. Diagramas de bloque	12
2. Modelos Dinámicos y Respuesta Dinámica	17
2.1. Sistemas Dinámicos	17
2.1.1. Mecánicos	17
2.1.2. Eléctricos	21
2.1.3. Electromecánicos	23
2.1.4. Fluidos	27
2.2. Linealización	27
2.2.1. Formulas generales	29
2.2.2. Expansión en Serie de Taylor	29
2.3. Respuesta Dinámica	31
2.3.1. Regla de Mason	31
2.3.2. Respuesta Transiente	33
2.3.3. Respuesta en Sistemas de Segundo Orden	36
2.3.4. Sistemas de Segundo Orden	39
2.3.5. Especificación en el Dominio Temporal	41
2.3.6. Efecto de Ceros y Polos Adicionales	45
2.3.7. Expansión en Fracciones Parciales	47
3. Principios Básicos de Retro-Alimentación	49
3.1. Caso de Estudio: Motor DC	50
3.2. Propiedades Generales de la Retro-Alimentación	56
3.3. Tipos de Retro-Alimentación	58
3.3.1. RA Proporcional (P)	58

3.3.2.	RA Integral (I)	60
3.3.3.	RA Derivativa (D)	60
3.3.4.	Retro-alimentación PID	61
3.3.5.	Ajuste de un controlador PID	63
3.4.	Estabilidad	66
3.4.1.	Estabilidad BIBO	66
3.4.2.	Criterio de estabilidad de Routh	67
4.	Métodos de Diseño	73
4.1.	Lugar geométrico de Las Raíces (LGR)	73
4.1.1.	Midamos la fase de $G(s)$	77
4.1.2.	Selección de Ganancia con LGR	85
4.1.3.	Compensación dinámica	87
4.2.	Respuesta en Frecuencia	93
4.2.1.	Régimen estacionario	95
4.2.2.	Gráficos de Bode	96
4.2.3.	Especificaciones de diseño	102
4.2.4.	Estabilidad: Margen de Ganancia y Fase	103
4.3.	Estabilidad	106
4.3.1.	Criterio de Nyquist	106
4.3.2.	Análisis de Estabilidad	114
6.	Instrumentación	167
6.1.	Introducción	167
6.2.	Sensores	170
6.2.1.	Temperatura	172
6.2.2.	Velocidad	176
6.2.3.	Caudal	178
6.2.4.	Luminosidad	180
6.3.	Actuadores	183
6.3.1.	Servos	185
6.3.2.	Motor paso a paso	188
7.	Bibliografía	193

Capítulo 1

Introducción

El control automático es el mecanismo de base a través del cual, los sistemas, sean mecánicos, eléctricos o biológicos, pueden mantener un determinado equilibrio y así una determinada condición de trabajo (homeostasis). Entre los ejemplos más comunes de control automático, tenemos el caso de la regulación de la temperatura del cuerpo humano ¹.

Otro caso emblemático es el sistema de control de velocidad de un automóvil. Este usa la diferencia (o error) entre la velocidad actual y aquella deseada, para decidir variar el flujo de combustible al motor y así lograr que el vehículo se desplace a la velocidad deseada (o set-point).

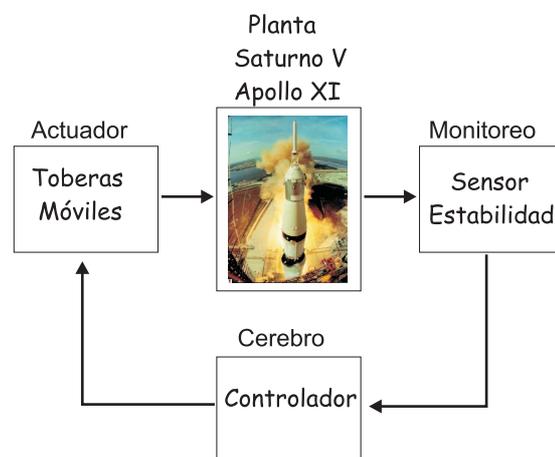


Figura 1.1: *Cohete Saturno V, Misión Apollo XI. Sistema de control de actitud del cohete.*

¹Wiener publica su libro *Cybernetics: Control and communication in the animal and the machine*, 1948

1.1. Reseña histórica

En terminos históricos, el interés por el control automático se remonta, al menos, hasta los griegos y árabes de la antigüedad, entre el 300 A.C. hasta el 1200 D.C. [7]. La gran motivación para usar el control automático en la antigüedad, fue la necesidad de determinar de manera precisa el tiempo. Es así como en 270 A.C., el griego Ktesibios inventa un regulador por flotador para un reloj de agua (Fig. 1.2). Pero también los griegos utilizaron el control automático en la vida cotidiana, como es el caso del dosificador de vino de Heros (Fig. 1.2).

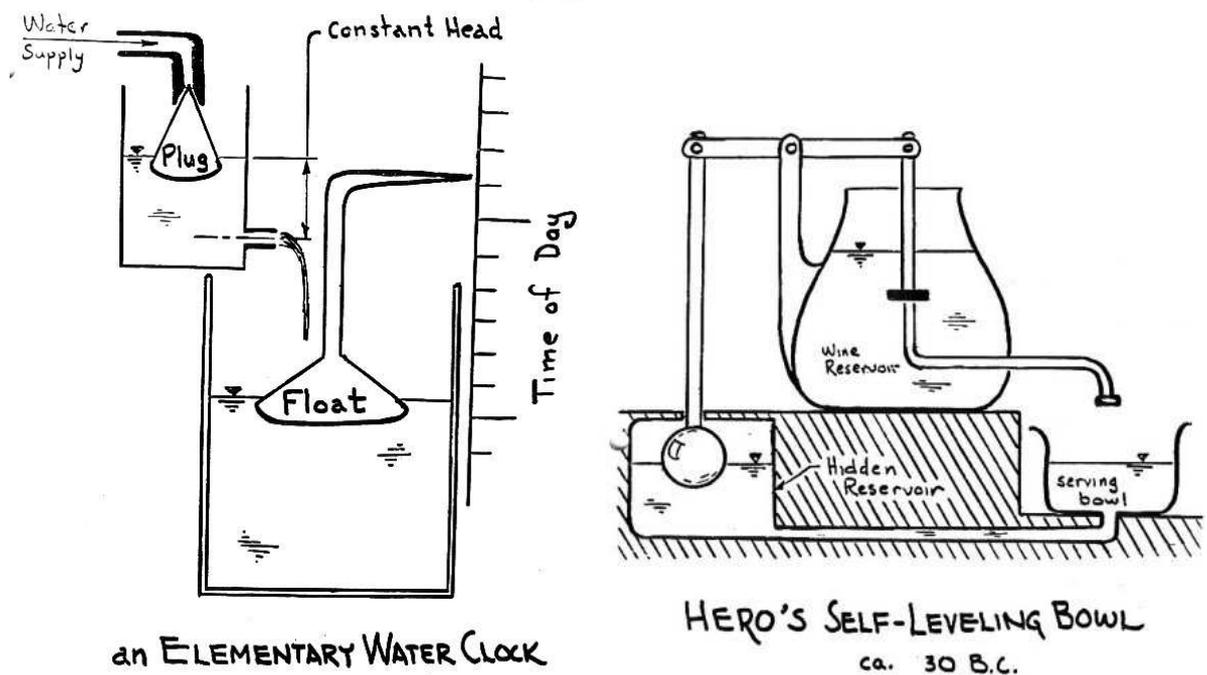


Figura 1.2: Reloj de agua de Ktesibios, 270 a.c. (izq). Dosificador de vino de Heros 30 a.c. (der)

También hay evidencia de que ingenieros arabes, entre el 800 al 1200 D.C., usaron reguladores por flotador también para relojes de agua y otras aplicaciones. (dosificador de vino de Heros). En este período, se inventó el principio del control ON/OFF, que fue re-estudiado intensamente a partir del año 1950. Posteriormente, los reguladores por flotador o también por flujo másico, aparecen nuevamente con la Revolución Industrial en el Siglo XVI que comienza con la invención del motor a vapor de J. Watt (1769) y su control de presión de vapor (Fig. 1.3).

El control automático ha jugado un rol vital en el avance de la ingeniería y la ciencia a través de su uso en diversos campos de aplicación a través de los años.

Los REGULADORES DE TEMPERATURA aparecen alrededor del año 1600 con el trabajo de Cornelis Drebbel, donde desarrolla un sistema de control automático de temperatura para un horno. Lo aplica

también a la incubación de pollos.

Los REGULADORES POR FLOTADOR reaparecen en Inglaterra en el año 1700.

Los REGULADORES DE PRESIÓN ya aparecen asociados a los motores a vapor, y en 1681 D. Papin inventa una válvula de seguridad para mantener la presión de vapor constante en la caldera del motor.

J. Watt introduce el REGULADOR CENTRÍFUGO para motor a vapor en 1788, con el objeto de regular la velocidad de rotación del motor a vapor.

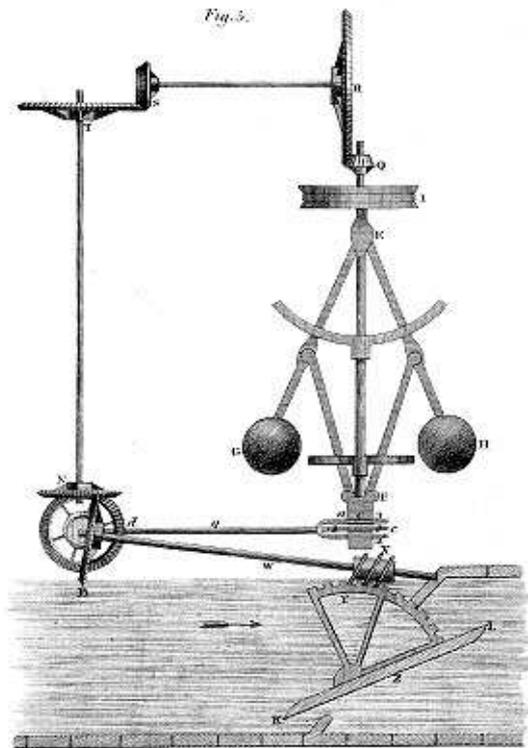


Figura 1.3: *Control de velocidad de J. Watt para su máquina de vapor, 1788*

Otro impacto significativo del control automático fue demostrado en el período pre y post II guerra mundial, con el desarrollo de la cohetaría auto-guiada. Gran parte de estos desarrollos fueron basados en la estabilización que otorga el Giróscopo, inventado en 1910, por E.A. Sperry.

En el período post-guerra su campo de aplicaciones aumenta increíblemente, como en el desarrollo de vehículos espaciales, guía de misiles, sistemas complejos de pilotaje de aviones y llegando actualmente a ser parte importante e integral de procesos modernos de manufactura.

El control automático es también esencial en procesos industriales, donde es necesario controlar variables *medibles* como la presión, temperatura, humedad, viscosidad, y flujos, sin dejar de lado el ensamblaje de piezas mecánicas en industrias manufactureras (vehículos u otras).

El hecho importante es que el control, visto desde esta perspectiva, provee mecanismos eficaces para obtener un comportamiento óptimo en sistemas dinámicos, mejorar la calidad y reducir los costos de producción así como reducir el tiempo de obra en procesos rutinarios.

El término *control* es un concepto bastante común. Hay que notar que es una ocurrencia natural, un principio de la naturaleza, como por ejemplo en el sistema de regulación de presión sanguíneo, concentración de azúcar en la sangre, diámetro de la pupila del ojo etc.

Otros trabajos significativos en las primeras etapas de la teoría de control son debidos a Minorsky, Hazen y sobre todo Harry Nyquist. Minorsky (1922) trabajó en controladores automáticos demostrando como podemos analizar la estabilidad de un sistema dinámico a través de las ecuaciones diferenciales que lo describen.

H. Nyquist (1932) desarrolló un procedimiento astuto para determinar la estabilidad de sistemas con loops-cerrados, basado en la respuesta de loops-abiertos frente a estímulos sinusoidales o estacionarios ($d/dt = 0$).

Durante la década de los 40, aparecen los métodos de respuesta en frecuencia que permiten diseñar sistemas de control con retro-alimentación lineales. Entre 1940 y comienzos de 1950 se desarrolla exitosamente el método del Lugar Geométrico de las Raíces (Root-Locus).

Ambos métodos, el corazón de la teoría clásica de control, permiten el estudio detallado de sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de condiciones de funcionamiento. A partir de 1950, se comienza a migrar desde la perspectiva del problema del diseño de las estrategias de control de un sistema dado hacia las del diseño de un sistema óptimo.

Las plantas de procesos modernas, contemplan muchos *inputs y outputs* cada vez más complejos. Esto conduce a la descripción del sistema a través de un gran número de ecuaciones diferenciales. La teoría clásica, que trata con inputs/outputs singulares pierde entonces utilidad frente a sistemas multi input/output.

Esta necesidad se hace sentir y es a partir de 1960, que se comienza a desarrollar la teoría moderna de control. Y es gracias a la aparición de computadores digitales (y análogos) que ella toma fuerza en el diseño de sistemas de control más complejos.

Los desarrollos más recientes en la teoría moderna de control automático, van en la búsqueda del control óptimo, ya sea de sistemas deterministas o estocásticos así como en búsqueda del control adaptativo (redes neuronales) de sistemas ultra complejos [1, 2, 3, 4, 5, 6].

1.2. Algunas definiciones

Definimos algunos términos necesarios en este curso

Sistema

Combinación de componentes que actúan juntos y desarrollan una cierta tarea. Un sistema no está limitado a aquellos de índole física. El concepto de sistema puede ser aplicado a fenómenos abstractos y dinámicos, como en economía.

Perturbaciones

Una perturbación (disturbance en Inglés) es una señal que tiende a afectar el comportamiento de un sistema (su output o salida). Podemos tener perturbaciones internas, generadas al interior del sistema, o externas que son consideradas como un input.

Control con retroalimentación

Es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre el output de un sistema y un valor prefijado (set-point en Inglés). Aquí las perturbaciones son sólo aquellas no predecibles (aleatorias) ya que aquellas predecibles pueden ser compensadas al interior del sistema.

Servo-mecanismo

Un servo-mecanismo es un sistema de control con retro-alimentación (Feedback en Inglés) en el cual el output es por ejemplo una posición determinada, una velocidad o una aceleración. Los servos son actualmente ampliamente utilizados en la industria.

Control de lazo cerrado

En un sistema de control de lazo-cerrado la señal de salida tiene un efecto directo sobre la acción de control. Esto quiere decir simplemente que es un sistema de control con retro-alimentación. La figura 1.4 muestra un sistema de lazo-cerrado o closed loop, a través de un *diagrama de bloque*. Es el tipo de controlador que define si el sistema será automático o no.

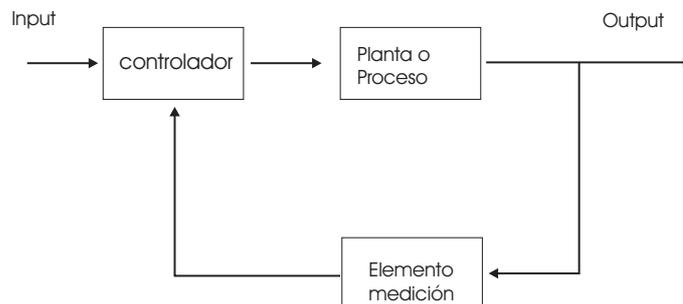


Figura 1.4: Sistema de control de lazo-cerrado

Control de loop–abierto

Son simplemente sistemas donde la señal de salida no tiene ningún efecto sobre la acción de control. No hay medición de esta señal, ni retro–alimentación, ni por ende comparación con la señal de entrada (input).(cf. Figure 1.4).

Control directo/indirecto

Para obtener buenos resultados del proceso de control es deseable medir y controlar directamente la variable que indica el estado del sistema o la calidad del producto o proceso. Si no es posible, habrá que controlar una variable secundaria relacionada a la variable de estado principal. Sin embargo, frecuentemente, esta operación no es tan eficiente como la primera.

Control adaptativo

Las características dinámicas de la mayoría de los sistemas de control no son constantes en el tiempo. Las razones son típicamente el deterioro de componentes y los cambios en las variables ambientales. Aunque pequeños cambios del sistema en el tiempo pueden ser fácilmente compensados con la retro–alimentación, los cambios significativos no. por ello se busca un sistema de control que se adapte a los cambios. Esto significa auto–ajuste o auto–modificación en concordancia con los cambios impredecibles en las condiciones ambientales y estructura del sistema. Esto obliga a identificar constantemente las características dinámicas del sistema, de manera que se pueda ajustar los parámetros de control constantemente.

Control con aprendizaje

Típicamente un sistema de control de lazo-abierto puede ser convertido en loop–cerrado si se usa un controlador humano, quién compara las señales de entrada y salida y hace cambios correctivos basados en el error o diferencia entre éstas.

Aquí no podemos escribir ecuaciones que describan esta situación, dado que existe la dificultad de expresar matemáticamente el aprendizaje del operador humano. Las redes neuronales, un operador no humano capaz de aprender y así controlar eficientemente un proceso, constituyen avances modernos sobre la teoría de sistemas de control actual.

Como hemos dicho, el control con retro–alimentación es un caso especial. Esta clase está caracterizada por el hecho que ciertas variables del sistema están siendo controladas, como puede ser la temperatura de, la velocidad o la presión medidas por algún sensor. Esta información es re–inyectada o retro–alimentada en el sistema para influenciar a su vez el output del sistema.

Este principio se entiende bien en el caso de un sistema de calefacción controlado por un termostato. En la figura 1.5 se indica el *diagrama de bloque* del sistema.

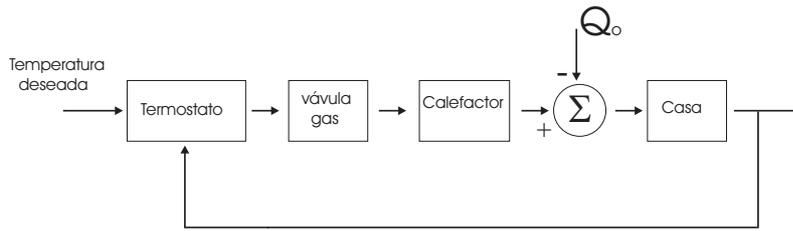


Figura 1.5: *Diagrama de Bloque del Sistema de Control de Temperatura*

Supongamos que la temperatura al interior de la casa (medida por el termostato) y aquella al exterior están por debajo de la temperatura deseada. El termostato se enciende, transmitiendo potencia a la válvula del horno (a gas), que hace que empiece la combustión al interior de éste, el soplador comienza a funcionar y un flujo de calor se establece al interior de la casa. Si el calefactor está bien diseñado, el flujo de calor Q_i es mucho mayor que las pérdidas Q_o y la temperatura de la casa aumenta, hasta que excede, por una pequeña diferencia, el valor prefijado en el termostato. Aquí el calefactor se apaga y la temperatura comienza a caer, tendiendo a la temperatura del exterior. Cuando ésta cae por debajo del valor prefijado en el termostato, el proceso comienza nuevamente. En este proceso los componentes necesarios para que exista retro-alimentación se pueden identificar en la figura 1.6.

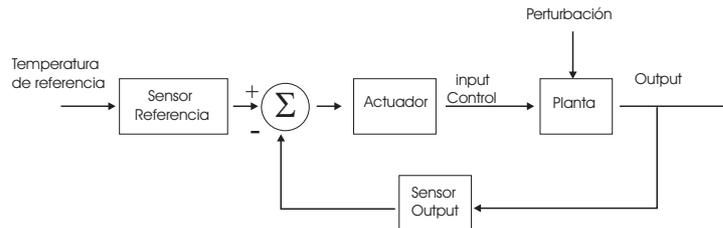


Figura 1.6: *Diagrama de Bloque del Sistema de Control Retro-alimentado*

Aquí el componente central es la *planta* (nombre genérico del objeto a controlar) o piezas de la casa, cuyas variables van a ser controladas. La señal de salida o de output es la temperatura de esta pieza, y las señales perturbativas (perturbaciones) corresponden al flujo de calor por conducción a través de las paredes de la pieza hacia el exterior (eventualmente convección y radiación).

El *actuador* es el mecanismo que modifica el proceso; el calefactor. El termostato está dividido (Figuras 1.5, 1.6) en tres elementos: La *referencia*, los *sensores de salida* y el *comparador* (símbolo Σ). El control se hace por comparación de dos señales medidas: temperatura de la pieza y temperatura prefijada (set-point).

Otro ejemplo que data desde la antigüedad. Un mecanismo de control de nivel de agua en un estanque. En la figura 1.7, si el nivel baja, el flujo de agua se incrementa, el nivel sube y el flotador logra obstruir el paso de agua. Aquí el sensor y actuador están combinados en un sólo elemento: el

flotador, de forma particular.

Otro ejemplo es el incubador de pollos de Drebbel (1620) donde el astuto sensor de temperatura es un recipiente de vidrio lleno de alcohol y mercurio en contacto con el recipiente de agua del incubador. Al aumentar la temperatura del agua el alcohol se expande elevando un flotador que cierra el escape de gases de combustión y disminuyendo el tiraje y por lo tanto la temperatura del agua y del incubador. Si el agua se enfría demasiado el alcohol se contrae y el flotador baja, abriendo el escape aumentando así la combustión.

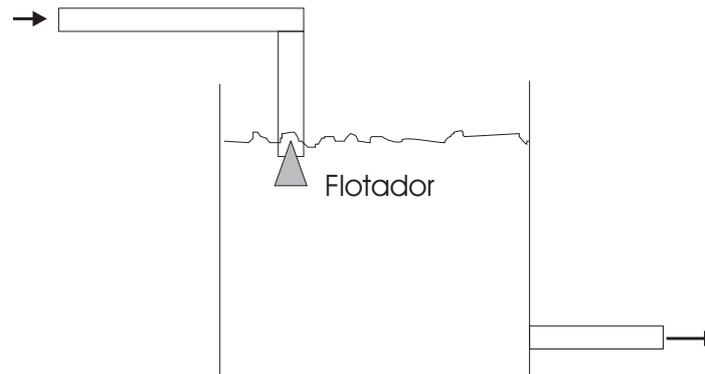


Figura 1.7: *Sistema de control de nivel de agua*

Un ejemplo más interesante aún es el uso del sistema de control de velocidad de la máquina a vapor de Watt por G.B.Airy en su telescopio. Airy (1835) necesitaba controlar la velocidad del telescopio para observar una estrella en régimen estacionario, es decir compensando la rotación de la tierra. Sin embargo el sistema, según propias palabras de Airy, se volvía completamente loco. Esta es la primera discusión sobre inestabilidad de un sistema de control con retro-alimentación conocido.

No olvidemos que el principal objetivo de este curso será proveer una introducción a las técnicas y métodos más importantes para el diseño de control de sistemas. Comenzaremos con algunos ejemplos de diagramas de bloque de sistemas a controlar en la sección que sigue y luego pasaremos a la Parte II, donde estudiaremos las técnicas modernas de tratamiento de señales, absolutamente necesarias para comprender los modelos matemáticos actuales en el diseño propiamente y los fundamentos del control de sistemas.

1.3. Diagramas de bloque

Control de nivel de líquido

En la figura 1.8 a) se aprecia esquemáticamente un diagrama del sistema de control de nivel de líquido de un estanque.

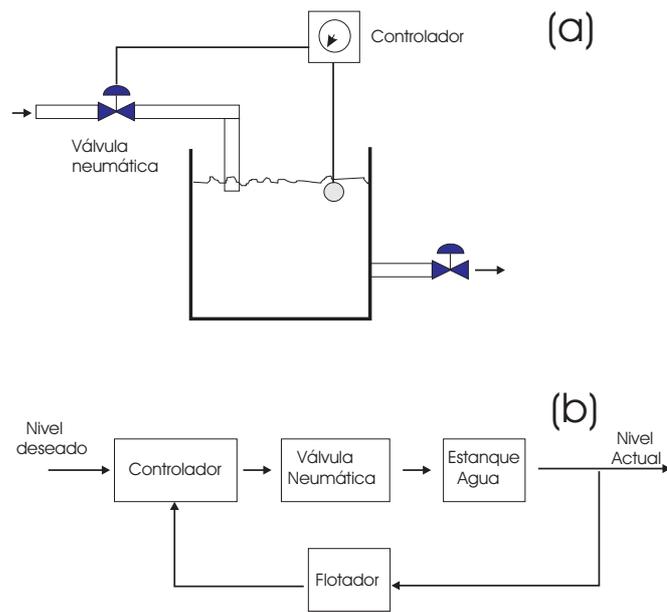


Figura 1.8: Sistema de control de nivel de agua

Aquí el controlador automático mantiene el nivel de líquido al comparar el nivel actual con un nivel deseado (set-point) y corrigiendo el error al ajustar la abertura de una válvula neumática. El diagrama de bloque correspondiente es el presentado en la figura 1.8 b). Aquí el controlador es un operario humano.

Problemas propuestos

1. Dibuje el diagrama de bloque con retro-alimentación para el sistema de conducción automático de un automóvil. Considere, tanto el trayecto como la velocidad, inputs predefinidos o de referencia. Identifique las partes separadas, en el diagrama de bloque, de la planta, actuadores (servos) y sensores.
2. Identifique y dibuje el diagrama de bloque de un estanque con control de nivel como el de la figura 1.7.
3. Dibuje el diagrama retro-alimentado de un ascensor con control de posición. como podría Ud. medir la posición del ascensor ?.

Capítulo 7

Bibliografía

Bibliografía

- [1] Coughanor, D.R., & L.B. Koppell, Process Systems Analysis and Control, McGraw-Hill, New York, 1965
 - [2] Denn, M.M., Process Modelling, Longman, New York & London, 1986
 - [3] Franks, R.G.E., Modelling, and Simulation in Chemical Engineering, John Wiley & Sons Inc., New York, 1972
 - [4] Gould, L.A., Chemical Process Control: theory and Applications, Addison-Wesley, 1969
 - [5] Luyben, W.L., Process Modelling, Simulation, and Control for Chemical Engineers, McGraw-Hill, Kogakusha, Tokio, 1973
 - [6] A. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw Hill, New York, 1965
 - [7] Capítulo 1: Introduction to Modern Control Theory, in: F.L. Lewis, Applied Optimal Control and Estimation, Prentice-Hall, 1992.
-