

1 Introducción al control de procesos

La asignatura de Regulación Automática queda encuadrada dentro del área de conocimiento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Por tanto, como punto de partida para la comprensión de esta asignatura resulta conveniente utilizar la definición del término de Automática que realiza la Real Academia de la Lengua Española: *Automática es la disciplina que trata de los métodos y procedimientos cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una tarea física o mental previamente programada*. Otra definición dada por el Diccionario de la Lengua Española, en su edición de 1996, dice que la Automática se define como *la Ciencia que trata de sustituir en un proceso el operador humano por dispositivos mecánicos o electrónicos*. Ambas definiciones implican la idea de la automatización de las tareas desarrolladas por el hombre.

Dos ideas principales se pueden extraer de estas definiciones: la relacionada con la metodología de la Ciencia como parte de ésta y el concepto de Automatización.

Desde el punto de vista de la metodología, la Automática ofrece tanto las técnicas como los procedimientos de análisis y diseño sobre los sistemas evolutivos con el tiempo. El ámbito de esta disciplina tiene como objetivo predecir y controlar de la mejor manera los procesos productivos. Estos beneficios se transforman en una optimización de los procesos, así como en la eliminación de las tareas repetitivas, peligrosas y alienantes efectuadas por los humanos.

El impacto actual de este conocimiento, dentro del ámbito académico, es tan importante que se convierte en asignatura troncal en muchas carreras de las Ingenierías y de las Ciencias Experimentales.

La segunda idea está relacionada con la Automatización. Si bien es verdad que la Automatización tiene ahora sus retos más importantes en el ámbito industrial, no hay que olvidar otros tan importantes como en la sanidad, las infraestructuras, el transporte, la agricultura, etc. Por ejemplo, centrándose en las aplicaciones industriales, se han automatizado operaciones básicas tales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad o flujo en las industrias de procesos. Pero también incide en el control de las máquinas herramientas o en el diseño de los automóviles. En el sector servicios, cada vez hay más automatismos en la hostelería: expendedores de tabaco, electrodomésticos inteligentes, etc. Tampoco habría de olvidar la gran incidencia del control en la sanidad, sistemas de vigilancia intensiva a pacientes, robots cirujanos, procesamiento de imágenes médicas,... En casi todas las actividades humanas, hay artefactos que ayudan automáticamente al desempeño de tareas que antes realizaban los hombres.

Al principio del siglo XX, la Automatización tuvo su origen en el campo de los Servosistemas y de la Ingeniería de Control, pero su ámbito se ha ido ampliando con los desarrollos de otras disciplinas, tales como las Ciencias de la Computación, la Teoría de la Información, el Procesamiento de Señales, la Inteligencia Artificial,... Hoy en día, los ordenadores juegan un papel fundamental como el elemento que procesa la información de manera automática. La utilización del computador en el control de procesos ha permitido también la aparición de nuevos campos de interés como el de la Robótica o la posibilidad de utilizar sensores inteligentes (visión, tacto).

1.1 La historia de la Automática

Desde el advenimiento de la civilización, el hombre ha intentado constantemente reemplazar el esfuerzo humano por máquinas y por sistemas de control. Las primeras evidencias de la actividad consciente del hombre en el campo del Control Automático se encuentran en los sistemas de regadíos en Babilonia, sobre el 2000 A.C. y conocidas a través de las leyes grabadas en el código de Hamurabi. También en la Antigüedad Griega se encuentran vestigios del uso de sistemas de control realimentado. Los reguladores de flotación fueron usados en los relojes de agua Ktesibios y en las lámparas de aceite de Philon, allá en el 250 A.C. Trescientos años más tarde, Herón de Alejandría publicó su libro de *Pneumatic*. En este tratado se presentan varias formas de control del nivel del agua, en los que se incluían reguladores de flotación. El conocimiento de los sistemas de control en el periodo helénico fue preservado por la cultura

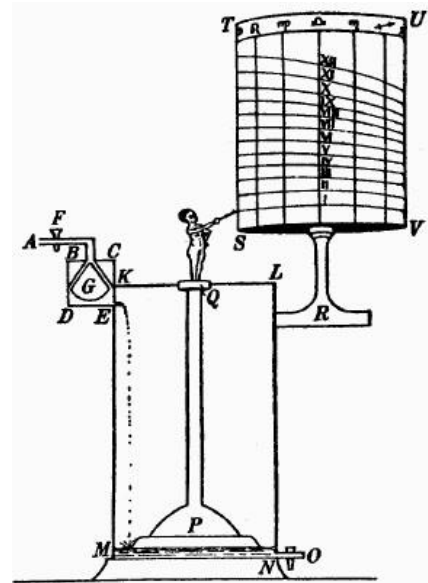


Figura 1. 1. Reloj de agua de Ktesibios

islámica y redescubierto al final del Renacimiento.

El primer sistema de control realimentado, reconocido oficialmente en la Europa Moderna, es el regulador de temperatura inventado por el alemán Cornelius Drebbel (1572-1663), desarrollado para calentar un incubador. Otro sistema automático de control que goza de auténtico crédito es el sistema inventado por Meikleen en 1750, consistente en colocar unas aspas auxiliares de cola en el mismo eje de las aspas principales de los molinos con el objeto de optimizar el aprovechamiento de la energía eólica.

Si bien a lo largo del siglo XVIII se empiezan a despuntar los dispositivos de control automático, su zenit llega con el regulador centrífugo de James Watt (1736-1819). A éste se le puede tomar como punto de partida para trazar el desarrollo del control automático como disciplina científica. Se trataba de un dispositivo que proporcionaba una acción de control proporcional en la regulación de la velocidad en las máquinas de vapor. A mediados del XIX, Siemens (1823-1883) modifica el regulador de Watt, dotándole de acción integral, e introduciendo la acción de control “flotante”, sin referencia fija.

A mediados del siglo XIX, cuando cambiaron las técnicas de diseño de las máquinas y se mejoró el proceso de fabricación, se hizo explícita una tendencia creciente que mostraba que la velocidad de la máquina variaba cíclicamente con el tiempo. Este fenómeno también se observó en el regulador centrífugo de velocidad de un telescopio astronómico accionado por un mecanismo de relojería, y fue investigado por G.B. Airy (1801-1892). En 1840 mostró que la dinámica de un regulador puede ser descrita por ecuaciones diferenciales, pero encontró algunas dificultades para determinar las condiciones de un comportamiento estable. En 1851, Airy consiguió llegar a la raíz del problema matemático, aunque desgraciadamente su trabajo era un tanto intrincado y difícil de seguir por lo que no tuvo la difusión deseada. Este trabajo permaneció en el más absoluto de los secretos para los ingenieros que estaban tratando de resolver el problema de la fluctuación de la velocidad de las máquinas.

El problema era tan serio que atrajo la atención de un gran número de importantes científicos e ingenieros de la época. Finalmente fue resuelto por Maxwell (1831-1879), quien inició así la teoría de los sistemas de control automático con su

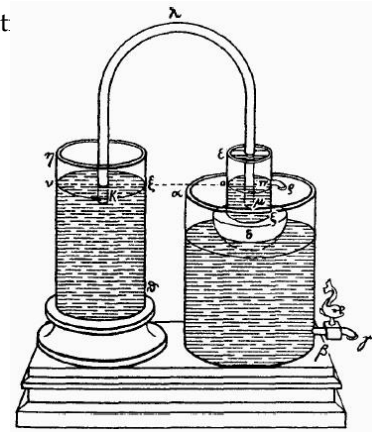


Figura 1. 3. Sifón de Herón

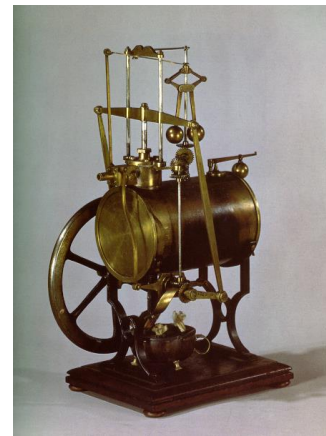


Figura 1. 2. Regulador de Watt



Figura 1. 4. Maxwell

trabajo *On governors* (1868). La contribución de Maxwell fue reconocer *que la conducta de un sistema de control automático en la velocidad de una posición de equilibrio se podía aproximar por una ecuación diferencial lineal, y por tanto su estabilidad se podía discutir en términos de las raíces de una ecuación algebraica asociada*. De esta manera, Maxwell planteó el problema general de investigar la estabilidad de un sistema dinámico en función de localizar las raíces de su ecuación característica. Él llegó a especificar que un sistema era inestable cuando la parte real de sus raíces complejas fuesen positivas, pero el problema era cómo determinar la localización de las partes reales sin calcular las soluciones de la ecuación para sistemas de orden elevado.

La solución del problema planteado por Maxwell la dio Edward J. Routh (1831-1907) en 1877, abordando de forma matemática la estabilidad de sistemas de alto orden basándose en los trabajos de Cauchy. En 1895, Adolf Hurwitz resolvía el problema de la estabilidad de sistemas lineales en términos de un conjunto de determinantes. También el matemático ruso A. M. Lyapunov estudió el tema de la estabilidad en 1892, utilizando las ecuaciones no lineales del movimiento; sin embargo, sus trabajos no se aplicaron al Control hasta 1958.



Figura 1. 5. Lyapunov

La mayor parte de las invenciones y aplicaciones de este periodo están relacionadas con actividades básicas, como son el control de temperaturas, presiones, nivel de los líquidos, velocidades de rotación en ejes de maquinaria, etc. El objetivo era regular y asegurar la estabilidad. La introducción de sistemas neumáticos, de vapor o hidráulicos, en grandes buques y cañones inicia el interés hacia los mecanismos de control de posición hacia el último cuarto de siglo del XIX, apareciendo el término de *servomotor* en 1873.

Conforme los dispositivos y los sistemas de control empezaron a ser utilizados en diferentes áreas de la Ingeniería, se hicieron patentes dos problemas básicos:

1. La falta de entendimiento teórico para discutir los problemas que surgían, sin un lenguaje en común.
2. No existían métodos de análisis y diseños simples y fáciles de aplicar.

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

Por otro lado, en esta época comienza a manifestarse dos tipos de enfoques distintos para el análisis de los sistemas dinámicos:

1. El uso de las ecuaciones diferenciales, utilizadas por los especialistas en Mecánica, con el auxilio de las técnicas de transformación desarrolladas por Laplace.
2. La representación de los aparatos como cajas en las que entran y salen ciertas señales adecuadas, enfoque preferido por los expertos en comunicaciones. Estas cajas reales fueron sustituidas por cajas abstractas cuyo análisis se realizaba mediante técnicas basadas en las transformadas de Fourier.

La necesidad de obtener amplificadores de señal para compensar las pérdidas en los cables de transmisión, con muy bajo nivel de distorsión, llevaron a Harold S. Black (1898-1983) en 1934 a la invención del amplificador realimentado. A pesar de su importancia, esta invención fue acogida con recelo en algunos sectores al ir en contra de ciertos artículos que afirmaban que la salida de un amplificador no se podía conectar a su entrada y permanecer estable a menos que la ganancia del lazo fuese menor que uno. En efecto, los amplificadores contruidos hacia 1932 presentaban cierta tendencia, mal comprendida, a inestabilizarse. El análisis de estos sistemas utilizando técnicas clásicas basadas en ecuaciones diferenciales (el enfoque “mecánico”) era impensable, ya que estos dispositivos podían contener más de 50 elementos almacenadores de energía independiente.

Harry Nyquist (1889-1976) propuso, en 1932, una solución a este problema basándose en la forma de la respuesta en frecuencia de la ganancia en lazo abierto. La gran importancia de este trabajo radica en su enfoque totalmente novedoso al basarlo únicamente en medidas experimentales y no en la disponibilidad de un modelo en forma de ecuaciones diferenciales. Además, el *lugar de Nyquist* indicaba claramente cómo mejorar la estabilidad de un sistema realimentado modificando adecuadamente su ganancia en lazo abierto en función de la frecuencia. Aunque Nyquist dejó abierto el problema de cómo se relacionan la amplitud y la fase, este problema fue resuelto por Hendrik Bode, en 1940, al introducir los términos de margen de fase y de margen de ganancia.

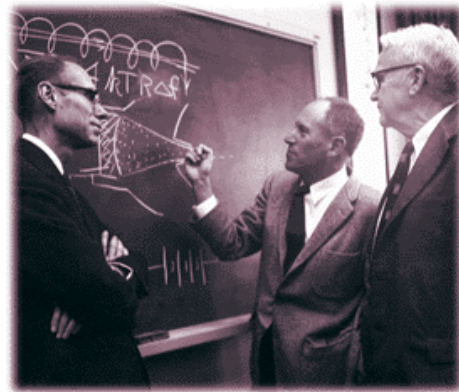


Figura 1. 6. Nyquist (derecha)

Aunque desde la mitad de los años 20 del siglo XX los controladores todo-nada (*on-off*) habían sido muy utilizados en los procesos industriales, es durante estos años cuando empiezan a mejorar los problemas de regulación de las máquinas mediante controladores más avanzados. En 1922, Nicholas Minorsky (1885-1970) presenta un análisis claro de los sistemas de control de posición y formuló la ley de control que hoy se conoce como control PID. Una contribución de gran importancia fue la de J.G. Ziegler y N.B. Nichols (1942), que propusieron unas fórmulas empíricas para asignar los coeficientes de las distintas acciones basándose en valores del proceso a controlar y que son medidos experimentalmente.

No es posible dar una visión global de la llamada Teoría Clásica de Control, sin detenerse en el trabajo de Evans. En 1948, completó el desarrollo de las técnicas basadas en variable compleja al introducir el lugar de las raíces. Este método permite hacer deducciones sobre las raíces de la ecuación característica en lazo cerrado cuando varía un parámetro de la planta, y por lo tanto, estudiar así su estabilidad.

La necesidad de controlar la posición de las antenas de radar en función de unos datos disponibles de forma intermitente, motivó el estudio de los sistemas muestreados. La aplicación de las computadoras al control de procesos industriales en los años cincuenta, favoreció el estudio y desarrollo de los *sistemas discretos*. Los primeros estudios publicados sobre estos temas son los de Shanon (1948), que trataban sobre el muestreo de señales. Posteriormente Salzer utilizó por primera vez la transformada z , sobre la que desarrolló la teoría sobre sistemas muestreados. Posteriormente, estos avances fueron sintetizados con las aportaciones de Jury, Ragazzini, Franklin, Tou, entre otros. Hasta ese momento, gran parte de la teoría de Control Discreto se apoyaba en métodos de análisis y diseño basados en la frecuencia, pero la interpretación de z^{-1} como operador retardo hizo evolucionar la teoría al análisis en el dominio del tiempo.

En su mayor parte, la Teoría Clásica de Control estudia sólo los sistemas dinámicos deterministas, lineales y de parámetros constantes, de una sola entrada y una sola salida, y resultaba de gran complejidad cuando se tratan de sistemas de múltiples entradas y salidas, no lineales, de parámetros variables con el tiempo o de carácter estocástico.

Estas limitaciones, junto con la necesidad de una mayor precisión en el diseño de sistemas de control, que surgió como consecuencia de los avances en las tecnologías aerospaciales, hacía que la Teoría Clásica de Control fuera insuficiente para la resolución de los problemas que se presentaban. Por otro lado, el desarrollo del computador digital ofrecía una potente herramienta sobre cómo implementar algoritmos de control complejos.

A partir de la segunda mitad del siglo XX se inicia una gran revolución en las técnicas de control; la guerra fría, la era espacial y la aparición de los computadores digitales produce un efervescencia de las nuevas teorías de Control; un nuevo paradigma científico está en marcha y desembocará en lo que se ha llamado la segunda revolución industrial. Sin embargo, estos nuevos enfoques, por su extensión y por la propia naturaleza de un curso básico de control, se salen del temario que recorre la asignatura. Por tanto, se da por finalizada este breve recorrido por la apasionante Historia de la Automática¹.

¹ Monografías en castellano sobre la Historia del Control puede encontrarse en Internet (<http://automata.cps.unizar.es/Historia/Webs/IntroduccionI.htm>, consultada septiembre 2014)

1.2 Nomenclatura y definiciones

La teoría de la Automática estudia el comportamiento dinámico de los sistemas. Pero, ¿qué se entiende por sistemas?. El concepto de sistema todavía hoy en día se sigue redefiniendo, no por que sea una realidad cambiante sino porque el término posee diferentes connotaciones según el contexto que se esté considerando y es uno de los términos más utilizados con diferentes significados². Aun así, se tiene una idea general e intuitiva de qué es un sistema. Basta con mirar alrededor para darse cuenta de que el mundo está formado por ellos: colecciones complejas de elementos altamente relacionados, en los que todo va más allá de la suma de las partes que lo componen.

Desde el punto de vista ingenieril, el concepto de sistema queda muy bien reflejado por las siguientes definiciones, dadas por Aracil y Ljung respectivamente:

“Sistema es una entidad formada por un conjunto de elementos o componentes básicos del sistema, y por las relaciones existentes entre ellos, así como con el entorno. Estas relaciones se expresan formalmente empleando lenguaje matemático”.

“Sistema es un objeto en el que variables de distintos tipos interactúan y producen señales observables. Las señales observables que nos son de interés se suelen denominar salidas. El sistema está afectado también por estímulos externos. Las señales externas que pueden ser manipuladas por el observador se denominan entradas; las que no se pueden manipular se denominan perturbaciones y se dividen en aquellas que son directamente medibles y aquellas que son sólo observables por su influencia sobre la salida”.

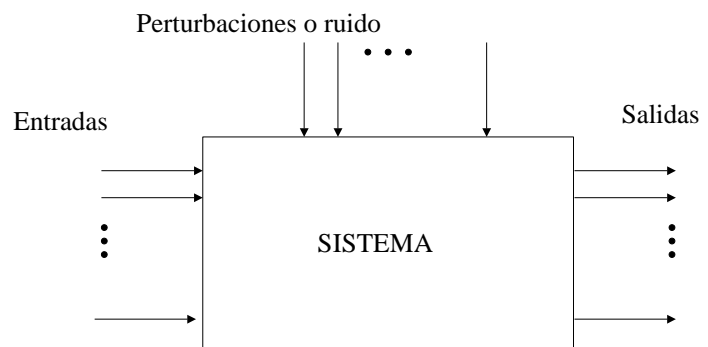


Figura 1. 7. Flujo de la información en los sistemas

Atendiendo a esta última definición se pueden distinguir cuatro tipos bien diferenciados de variables. Por un lado, las variables de entrada y las de perturbación y por otro, las denominadas variables de salida y las variables de estado. Estas últimas son el conjunto mínimo de variables del sistema, tal que, conocido su valor en un instante dado de tiempo permite conocer la respuesta del sistema. Además, aquellas variables de estado que sean medibles serán señales de salida y aquellas que sean modificables desde el exterior serán señales de

² El concepto de sistemas como una entidad dinámica que lo une a otros sistemas y al ambiente era un requisito previo para el desarrollo de la Teoría de Control Automático. Durante los siglos XVIII y XIX con los trabajos de Adam Smith, en Economía, y el Origen de la Especies de Darwin, en Biología, tienen un gran impacto en el conocimiento humano. A inicios del XX, Whitehead, con su filosofía de “El mecanismo orgánico”, se inicia las teorías de los sistemas generales. Es en este contexto donde la teoría de Control evoluciona.

entrada. En definitiva, las variables del sistema que sean capaz de determinarse su valor en el tiempo mediante operativa de instrumentación, se las llamará señales. Éstas no necesariamente deben de ser de naturaleza eléctrica, pueden ser temperaturas, velocidades, presiones, etc. Sin embargo, debido a que la tecnología humana actual se basa en el procesamiento eléctrico de señales, muchas de éstas emplean transductores para convertir las señales de cualquier naturaleza a otras de tipo eléctrico.

De un sistema interesa comprender su comportamiento y poder controlarlo y predecirlo. El hecho de comprender significa conocer y explicar. Este proceso de análisis y de síntesis (conocimiento y explicación) del sistema, normalmente desemboca en la construcción, testeo y validación de un modelo.

Normalmente, un sistema se presenta gráficamente mediante un grafo en el que los nudos son las partes (componentes individuales o subsistemas) y los arcos son las relaciones de influencia. Aunque esta representación es muy útil en un estudio inicial, es esencialmente cualitativa su información.

Una de las aproximaciones más efectiva es la construcción de un modelo matemático que describa las interacciones del sistema de forma cuantitativa³. Los modelos pueden integrarse en dos grupos: los axiomáticos y los empíricos. Los primeros basados en ecuaciones físico – matemáticas explican las interioridades dinámicas del sistema, mientras las segundas emplean relaciones de entrada y salida empleando el conocido concepto ingenieril de ‘caja negra’. En ambos casos, el objetivo es el mismo, obtener una expresión matemática, llamada función de transferencia del sistema, tal que explique cuantitativamente el comportamiento dinámico del sistema ante cualquier tipo de excitación temporal. La función de transferencia refleja la relación causa efecto en la disciplina de la Automática.

En el vocabulario técnico, el concepto de sistema es descendido y concretado con el de planta o el de proceso. Se entiende por planta a un sistema físico, al cual se le desea controlar su dinámica, por ejemplo, la temperatura en una célula Peltier, la posición del eje de un motor o la evolución temporal de la tensión de salida de una fuente conmutada. En cuanto a proceso se entenderá como cualquier operación que se va a controlar. Por ejemplo, la limpieza de la pasta de papel, el espesor del aluminio en el laminado, etc.

1.3 Aplicaciones de los sistemas de control

Los sistemas de control tienen como objetivo que las señales de salida sean capaces de ser gobernadas por las directrices marcadas por las señales de entrada con independencia de las perturbaciones. Algunos ejemplos podrían citarse.

³ Albert Einstein (1921)” ¿Cómo puede ser que la matemática – un producto del pensamiento humano independiente de la experiencia- se adecúe tan admirablemente a los objetos de la realidad?”

El control automático de la dirección de un coche. La entrada sería el volante del conductor, la salida la dirección del automóvil y las perturbaciones las inclemencias del tiempo o las irregularidades del asfalto. El objetivo del sistema de control será que la dirección del vehículo siga los deseos del conductor.

El control automático sobre la climatización de un hogar. El termostato servirá para que el usuario ponga la temperatura deseada (entrada), la temperatura de una habitación será la salida y las pérdidas de calor por transmisión serán las perturbaciones. El objetivo será que la temperatura de la habitación se mantenga al valor deseado.

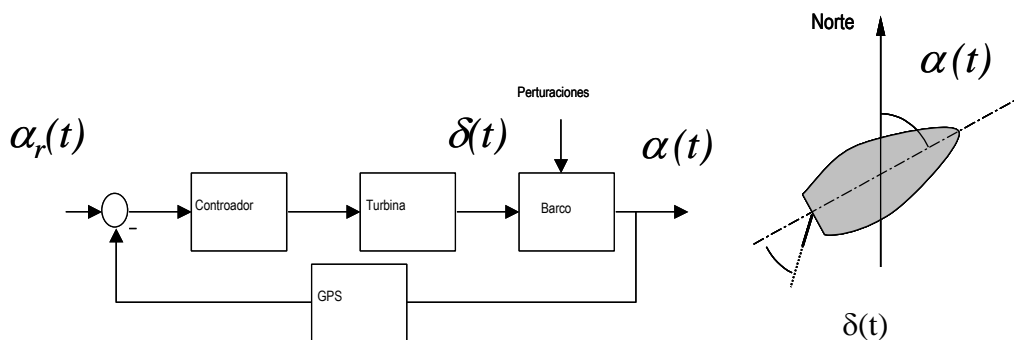
El control automático de una lavadora. El sistema de control efectuará las operaciones precisas de remojo, centrifugado, prelavado, etc., para que el número de programa marcado por el usuario (entrada), cumpla con la limpieza de la ropa (salida).

En el control automático de unos paneles solares, para la maximización del rendimiento energético, éstos deberán de seguir la trayectoria del Sol. Por tanto, el sistema de control deberá de tener unos transductores que permitan localizar la posición del Sol (entrada) y gobernarán el servosistema de posicionamiento de los paneles (salida), independientemente de la velocidad del aire y de otras posibles perturbaciones.

Véase algunos ejemplos con un mayor detenimiento:

Ejemplo 1.1

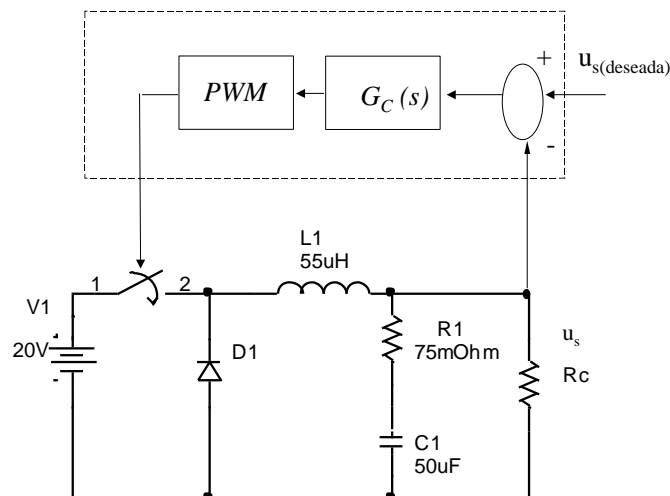
Para mantener el rumbo de un barco se suele emplear un control con realimentación en posición. La mejora de su comportamiento dependerá de un diseño que sea insensible a las perturbaciones, tales como vientos, corrientes y oleajes. En este caso se muestra un diagrama a bloques a través de un GPS.



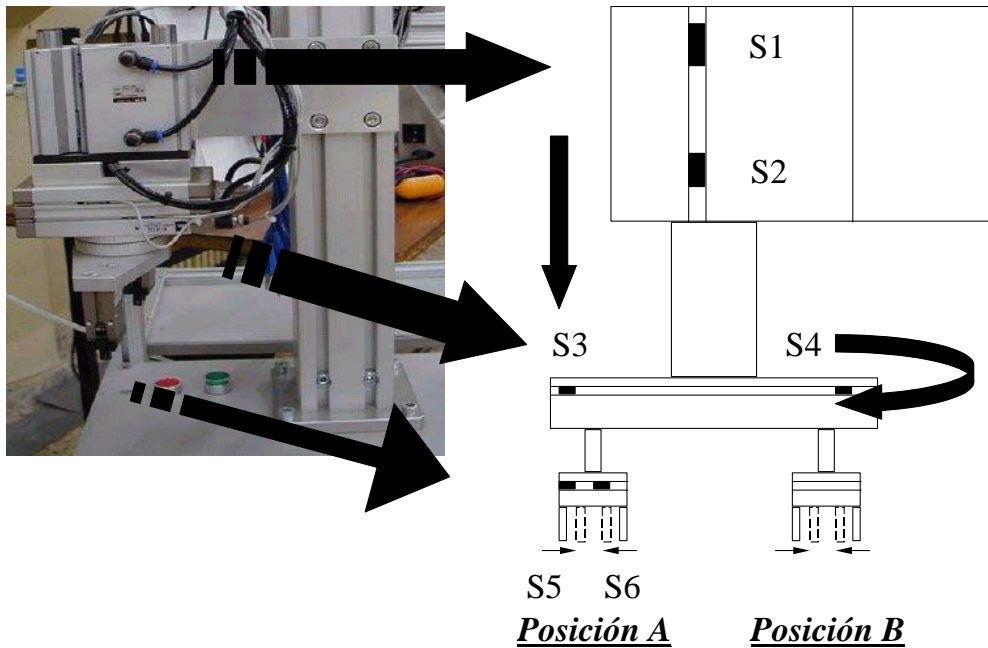
El timón marcará el rumbo deseado, α_r , y el sistema de control manipulará la dirección de la turbina, $\delta(t)$. El objetivo será que la dirección real del barco, $\alpha(t)$, siga a la posición deseada, con independencia de las perturbaciones.

Ejemplo 1.2

Las fuentes conmutadas son equipos de la Electrónica de Potencia que se alimentan de corriente continua a un determinado nivel de tensión y entregan a la carga también corriente continua con otro nivel de tensión (cc/cc). El esquema que se presenta en la figura muestra un reductor, por que la tensión de entrada, V_1 , es mayor que la salida. En este caso la entrada es a 20V y la salida es a 5V. El control sobre este sistema depende del ciclo de trabajo del interruptor, al que se le denomina d (*duty cycle*). Este valor es la relación entre el tiempo de encendido del interruptor y el periodo de trabajo de la fuente conmutada. La regulación del sistema se hace a través de la modulación por ancho del pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM), que ataca al interruptor, garantizando que la tensión en la carga sea siempre constante.

**Ejemplo 1.3**

Los manipuladores electroneumáticos son sistemas ampliamente utilizados en la industria. Sus aplicaciones están relacionadas con la automatización de algunas operaciones básicas en los procesos de ensamblaje. En estos casos, los sistemas de control deben de ser máquinas de estados finitos que controlen la secuencialidad de las tareas. Nótese el carácter distinto de actuación; las variables no son continuas en el tiempo y además, son de naturaleza binaria. A este tipo de regulación se le llama Control Todo/Nada.



1.4 Sistemas de control automático

Como se acaba de comentar, los sistemas de control automático se caracterizan por el gobierno de las variables de salida a través de las variables de entrada, con independencia de las perturbaciones que ataquen al sistema. En concreto y dentro de este curso básico de control, la teoría que se va a desarrollar se centrará en el caso mono-variable, i.e. una señal de entrada, a la que también se la llama de mando, de referencia o de control, es empleada para controlar una variable de salida. Aunque parezca una reducción drástica del dominio de trabajo, hay muchas aplicaciones cotidianas que emplean este conocimiento. Por ejemplo, el termostato de una habitación sería la variable de entrada y la salida correspondería con la temperatura del recinto. Otras muestras serían el acelerador de un automóvil (la señal de mando) y la velocidad del vehículo o el botón de volumen de un amplificador y la potencia de la onda sonora.

En todos los casos mencionados, los sistemas de control podrían ser modelados por sus correspondientes funciones de transferencia y representados de forma esquemática según aparece en la figura 1.8. Estos esquemas, al que se les llama diagramas a bloques, facilitan sus comprensiones al abstraer las complejidades de los sistemas, dando a entender el tipo de procesamiento que va a ser realizado y cómo es el flujo de la información. Nótese que la orientación de las flechas indica el sentido del procesamiento de la señal.

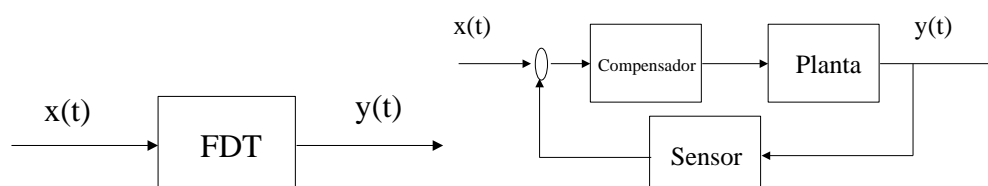


Figura 1. 8. Diagrama a bloques a) Serie, b) Cadena cerrada

Los sistemas de control automático se clasifican en aquellos que procesan la información en serie o en cadena cerrada. Los sistemas en serie actúan sobre la planta o el proceso, sin considerar el valor de la señal de salida, i.e. la salida no se compara con la entrada. Hay una gran variedad de ejemplos de esta forma de trabajar. La luz de escalera de un edificio de viviendas; cuando un vecino llega a su portal y pulsa el botón de la luz de escalera, éstas estarán encendidas durante un tiempo determinado y no considerará que la persona haya llegado o no a la puerta de su casa. Otro ejemplo es el microondas. El usuario pone una comida para calentar, fija un tiempo determinado y una potencia. Sin embargo, el sistema de control no garantiza que la temperatura sobre el objeto a calentar, alcance la temperatura deseada.

Los sistemas de control en serie se basan en temporizaciones y en un conocimiento exacto entre la entrada y la salida, sin ninguna consideración sobre las posibles perturbaciones internas o externas. El ruido o perturbación sobre estos equipos de control provocarán que no se realice la tarea deseada.

En los sistemas de control en cadena cerrada, la señal de salida se compara con la entrada para obtener la señal de error, la cual actúa sobre la planta. Esta característica hace que este tipo de regulación sea más insensible a las perturbaciones. Por ejemplo, si en una casa, su sistema de calefacción depende sólo del encendido o apagado manual, i.e. control en serie, la temperatura de las habitaciones dependerá del tiempo de conexión de la caldera y de las pérdidas producidas por la transmisión del calor, alcanzando valores quizás no deseados. En cambio, al emplear un termostato, el sistema de control realimentado apagará automáticamente la calefacción cuando alcance la temperatura deseada y volverá a conectarla cuando descienda ésta, atendiendo a las posibles perturbaciones (aperturas de ventanas o puertas, número de personas, pérdidas por conducción, etc.). Obsérvese que se ha empleado el término realimentado, en esta disciplina se entienden como sinónimos de *realimentación* con las palabras de *lazo cerrado* o *cadena cerrada*.

La realimentación no sólo está presente en las ramas de la ingeniería sino también en gran multitud de las aplicaciones de la vida. Por ejemplo, se podría citar, el seguimiento de las trayectorias a partir del sentido de la vista, las acciones meteorológicas para el control de la temperatura de la Tierra, la regulación de los precios en el mercado, etc.

Pero no todo son ventajas. Los sistemas realimentados tienden a ser inestables, lo que dificulta su diseño, mientras en serie resulta más fácil de desarrollar debido a que la estabilidad no está tan comprometida. El concepto de inestabilidad o de estabilidad está relacionado con la capacidad de que un sistema de control sea capaz de seguir la señal de entrada sin perder el gobierno de la salida. Un ejemplo inmediato, los sistemas de control de una aeronave deben de garantizar la estabilidad de ésta ante las órdenes dadas por el piloto y con independencias de las perturbaciones que sufra el avión. Es fácil de suponer lo que pasaría si el sistema de control del avión fuese inestable.

La complejidad de los sistemas en cadena cerrada respecto a los de en serie, implica que su realización física sea más costosa, al aumentar el número de subsistemas que son necesarios de construir.

En términos generales, los proyectos de control están definidos tanto por etapas con procesamiento de la señal en serie, como otros en cadena cerrada, trabajando todos ellos en el cumplimiento de los objetivos de control definidos.

1.5 Naturaleza del problema técnico de control

El diseño de un sistema de control no corresponde con un proceso exacto de elaboración sino por aproximaciones sucesivas y en diferentes grados de versiones. Aunque hay muchas técnicas de control, las experiencias de los ingenieros que participan en ese proyecto van a ser decisivas. Las problemáticas no se resuelven sólo con los aspectos metodológicos del diseño, además hay que añadir la creatividad e ingeniosidad del grupo. Estos problemas, normalmente, no se abordan individualmente. Detrás de ellos hay un colectivo de personas, mayoritariamente con enfoque multidisciplinar. Supóngase por ejemplo el control sobre edificios inteligentes, la automática, cada vez mayor, de los automóviles o el robot cirujano procediendo a una extirpación de un tumor.

¿Qué pasos habrá de dar?. Lo primero limitar el universo del problema, indicando cuales son los objetivos del sistema de control. Seguidamente se procederá a localizar cuales son sus entradas, sus salidas y las posibles perturbaciones que pueda sufrir. Un mayor conocimiento de la planta requerirá de su modelado. Quizá un diagrama de bloques, buscando los subsistemas que lo constituye, o una descripción textual de la planta indicando cómo se procesan las señales de entrada y de cómo se comporta.

Pero la mayoría de las técnicas de Control requieren de un conocimiento que expresen el comportamiento de la planta o el proceso, i.e. la relación causa-efecto, en un modelo matemático. Si bien es verdad que en general estas relaciones son no lineales, se procederá a una linealización a partir de un punto de funcionamiento. La necesidad de esta etapa viene justificada ya que la Teoría Clásica de Control, el núcleo de este curso, se fundamenta en modelos dinámicos lineales e invariantes en el tiempo (*Linear Time Invariant, LTI*). En definitiva, los modelos que usa la Teoría Clásica de Control son las ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes.

Una vez modelada la planta habrá de verificar que la respuesta del modelo y de la planta, ante determinados impulsos de entrada, resultan ser similares. La exigencia de este test requiere de técnicas de análisis que muestren el comportamiento del modelo tanto en el dominio temporal como en el dominio de la frecuencia. La comparativa entre el modelo y la planta física se dará en términos de rapidez de respuesta, errores en el seguimiento, anchos de banda o en el nivel de estabilidad.

A veces el modelo es inexacto y habrá de recurrir a técnica de identificación más sofisticadas, pero que no entran en este temario básico de Control.

Suponiendo poseer un modelo adecuado, se procederá a emplear las técnicas de diseño. El diseño pretende que el sistema de control haga que la planta sea más eficiente en su comportamiento dinámico. La eficiencia se mide en la rapidez de respuesta, en

convertirse más insensible a las perturbaciones, en la precisión en la respuesta o en la estabilidad del equipo. Tres técnicas se emplearán en este curso: las basadas en el lugar de las raíces de Evans, en los reguladores empíricos de Ziegler-Nichols y en la compensación en frecuencia. Esta última es muy empleada en el diseño de los sistemas electrónicos.

Obtenida la configuración del *regulador* o *compensador* se simulará la respuesta antes de proceder a su implementación física, ya que seguramente requerirá de un proceso de tanteo antes de llegar al regulador final. Los parámetros del regulador serán ajustados hasta hacer cumplir con un compromiso aceptable de los requisitos del proyecto.

Para acabar con el sistema de control habrá de montarlo físicamente. Esta operación, cada vez más, está unida a la programación de algoritmos de computación, acompañadas por una Instrumentación Electrónica para la adquisición de las señales, y una Electrónica de Potencia capaz de movilizar a las plantas a gobernar.

Derecho de Autor © 2014 Carlos Platero Dueñas.

Permiso para copiar, distribuir y/o modificar este documento bajo los términos de la Licencia de Documentación Libre GNU, Versión 1.1 o cualquier otra versión posterior publicada por la Free Software Foundation; sin secciones invariantes, sin texto de la Cubierta Frontal, así como el texto de la Cubierta Posterior. Una copia de la licencia es incluida en la sección titulada "Licencia de Documentación Libre GNU".

La Licencia de documentación libre GNU (GNU Free Documentation License) es una licencia con [copyleft](http://www.gnu.org/copyleft/) para [contenidos abiertos](http://www.gnu.org/copyleft/). Todos los contenidos de estos apuntes están cubiertos por esta licencia. La versión 1.1 se encuentra en <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>. La traducción (no oficial) al castellano de la versión 1.1 se encuentra en <http://www.es.gnu.org/Licencias/fdles.html>