

Capítulo 1

Introducción

Cuando un estudiante comienza los estudios de ingeniería con clara vocación por la que será su profesión, debe considerar que ésta comprende los conocimientos, técnicas y habilidades aplicadas al ingenio o la inventiva, de forma que estén a disposición de la sociedad. Su trabajo se orientará al diseño, a la resolución de problemas, al desarrollo de soluciones y siempre buscando la transformación de una idea en una realidad útil desde cualquier ámbito, sea éste industrial, económico, social u otro.

Por otro lado, mientras la sociedad puede tener una imagen clara del ámbito de conocimiento o trabajo del ingeniero mecánico, el ingeniero químico o el ingeniero naval, dada la dilatada tradición e historia de su adjetivo, el *Ingeniero de Control* o *Ingeniero Automático* no es demasiado conocido, ni siquiera en los países llamados desarrollados. Un ingeniero de control se ve en la necesidad de explicar a qué se dedica. En palabras de K.J. Åmström, el *Control Automático* puede considerarse como la tecnología oculta o transparente (*Hidden Technology*), poniéndose de manifiesto únicamente cuando se produce un fallo o el sistema se queda *sin control*.

Procediendo el término *automática* de la voz griega *autonomos* y de un modo intuitivo, se entiende que un sistema está automatizado cuando funciona de forma autónoma, es decir, sin intervención del ser humano. El funcionamiento del automatismo obedece a unas señales de entrada que se le aplican. El problema de controlar (*comandar*) el sistema se reduce a establecer las señales de entrada (*órdenes*) a que deberá ser sometido éste para que su funcionamiento sea el apetecido.

Hablar de sistemas de control automático significa hablar de realimentación. En palabras de N. Wiener, *Realimentación* es un modo de controlar un sistema reinsertando en él los resultados de su comportamiento anterior. Desde un punto de vista más restrictivo, un sistema de control realimentado (o sistema en bucle cerrado) es aquel que tiende a mantener una relación

prevista de una variable del sistema con otra, comparando funciones de estas variables y utilizando su diferencia como medio de control.

Una actividad tan cotidiana como conducir un vehículo es un ejemplo natural de realimentación. Tras la selección de un destino con un camino preconcebido, el conductor primero percibe y capta toda la información que hay a su alrededor para, después de un procesamiento natural y cierto entrenamiento, hacer llegar las órdenes a los mandos del vehículo de modo que éste alcance su destino por el camino seleccionado. De nuevo, realimentación y control son términos tan unidos y tan transparentes (*Hidden Technology*), que cuando el conductor comete un fallo se dice que éste *perdió el control*.

1.1. El control automático

El *Control Automático* está presente en prácticamente todos los aspectos de nuestra vida cotidiana por contraposición con el *Control Manual* cuando interviene el ser humano. Un ejemplo donde coexisten los dos modos es el del control de velocidad en un coche circulando en carretera. El control manual se lleva a cabo actuando sobre el acelerador, mientras que el control automático corresponde a los vehículos dotados de control de velocidad (a veces llamado *-Control de Crucero* o *Cruise Control-*). Otros ejemplos similares son el gobierno de un buque o de un avión cuando el control de rumbo (rumbo y altitud en el avión) deja de ser manual al conectarse el *Autopiloto* o el *Piloto Automático*, respectivamente.

En otros casos, como puede ser el control de profundidad y rumbo de un submarino (principalmente a bajas profundidades, donde el efecto de las olas puede ser muy notable), la acción humana para el control puede requerir tal cantidad de concentración y esfuerzo físico que resulta imposible hacerlo sin ayuda de un control automático más allá de un corto período de tiempo, lo que obligaría a embarcar a varios pilotos según el número de turnos.

Otras aplicaciones, sencillamente, son imposibles de realizar de un modo manual. Sirva como ejemplo el manejo de muchos de los aviones de combate modernos en lo que se refiere a prestaciones de maniobrabilidad y acierto en el blanco objetivo. Menos bélico y quizás más cotidiano resulta el ejemplo de una intervención quirúrgica para eliminar la miopía. En este último tipo de intervenciones se posiciona un láser utilizando un robot quirúrgico, cuyos movimientos ofrecen prestaciones de precisión, fiabilidad y estabilidad inalcanzables por el mejor de los cirujanos.

En la actualidad, un sistema de control automático se suele implementar en forma de un algoritmo sobre un sistema digital computerizado, con lo que

se resalta la diferencia entre el algoritmo que obtiene las acciones a llevar a cabo para conseguir el objetivo propuesto, del sistema electrónico sobre el que se lleva a cabo. En este sentido, se puede decir que el *Control Automático* es a la *Electrónica* lo que la *Inteligencia* es al *Cerebro*.

Un error muy común consiste en pensar que son los sistemas electrónicos los responsables del control (por ejemplo, el *-ordenador de a bordo-* en los coches) y no los algoritmos de control que se han programado sobre estos sistemas. Es del todo cierto que sin estos sistemas electrónicos la implementación de estos algoritmos sería mucho más compleja, pero es el algoritmo y no el sistema electrónico el que dota al conjunto de una nueva o mejor prestación.

Con el fin de disociar electrónica de control, un ejemplo final de sistema realimentado en el ámbito residencial son los denominados *grifos termostáticos*, capaces de ofrecer el caudal y la temperatura seleccionados por el usuario en función de la posición angular de sus mandos. Estos dispositivos no disponen en su interior de circuito electrónico alguno, sino elementos deslizantes, membranas, muelles y un sensor de temperatura que proporciona su medida a partir de la dilatación provocada por la acción del calor del agua.

1.1.1. La realimentación

Como ya se ha anticipado en el apartado anterior, el término *Realimentación* consiste básicamente en medir una o varias variables del sistema a controlar para tomar decisiones en función de estos valores medidos y de la respuesta deseada. De un modo gráfico, la realimentación más sencilla consiste en realizar una comparación (diferencia o resta) entre el valor deseado y el valor medido de modo que cuanto mayor sea esta diferencia o error, de mayor valor será la señal con la que actuar sobre el sistema. Esta señal hará evolucionar al sistema hasta alcanzar un valor nulo en el error o diferencia, que implica la igualdad entre el valor deseado y la respuesta del sistema, coincidiendo finalmente ambas.

De esta idea surge el que en todo sistema realimentado se requiere la medida de, al menos, la/s variable/s a controlar y un elemento comparador para la toma de decisiones con el que generar las órdenes al sistema. La figura 1.1 muestra la idea general de sistema realimentado. A estos sistemas se les llama *Sistemas Realimentados* o en *Bucle Cerrado* (del inglés *Loop*).

La necesidad de la realimentación frente al manejo de un sistema en bucle abierto (*Open Loop*) o sin realimentación, incluso disponiendo de un modelo matemático con buena correspondencia con el sistema real, puede comprenderse cuando las pequeñas discrepancias de modelado o ciertas incertidum-

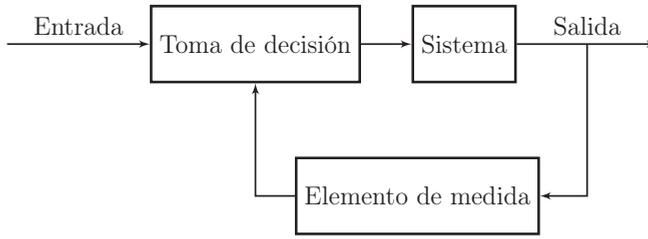


Figura 1.1: Esquema general de la realimentación

bres impiden que se consigan los objetivos previstos. Sirva como ejemplo el lanzamiento de una pelota de tenis hacia arriba y su posterior recogida por la misma persona. Por muy buen conocimiento que tenga el lanzador del modo en que realizó el lanzamiento, necesita ver caer la pelota para recogerla. Intentar realizar el mismo lanzamiento sin la información sensorial -ojos vendados- hará que la pelota caiga al suelo o no le dará tiempo a cogerla cuando sienta la pelota en la mano. La realimentación se encarga de corregir, en cierta medida, los pequeños errores del modelo, pudiendo adoptar decisiones más acertadas para conseguir el objetivo, en este caso, recoger la pelota.

Un último ejemplo cualitativo para justificar la necesidad de la realimentación puede ser el control de temperatura en una sala mediante un sistema de bomba de calor. Conociendo las dimensiones de la sala y disponiendo de sensores varios para la medida de temperaturas en distintos puntos, e incluso en el exterior, el mejor o peor cierre de las ventanas y puertas, el calor variable desprendido por los elementos de iluminación o la presencia de más o menos personas en la sala que implica un cambio en el calor sensible y latente, resulta de difícil cuantificación, y se requiere de la realimentación para poder mantener la sala a la temperatura deseada.

1.1.2. Etapas de diseño de un sistema de control

Con los elementos presentados hasta el momento, donde se han mostrado diversos ámbitos de aplicación de la realimentación o control en bucle cerrado, cabe considerarse el *Diseño de un sistema de control* como una actividad ingenieril, por contraposición con la opción de fijar unas reglas estrictas o poco flexibles, repetitivas o rutinarias. Esta segunda opción reduciría la creatividad o limitaría la inventiva de quien siguiese fielmente estas reglas. Es por ello que la defensa de una metodología detallada para la concepción de cualquier sistema de control no tiene demasiado sentido. Sin embargo sí se pueden dar unas pautas o etapas secuenciales de trabajo, que permitan al ingeniero de control realizar su cometido de un modo organizado, basadas en la experiencia de varias décadas diseñándose reguladores con distintas técnicas,

e interaccionando y coordinándose con otros profesionales que intervienen en la concepción o diseño del sistema completo en el que se integrará su controlador. Éstas se proponen a continuación:

1. Estudiar y conocer el sistema que se desea controlar desde una visión de conjunto. Los objetivos de control deben ser el primer paso para plantearse diseñar un controlador.
2. Modelar matemáticamente el sistema a controlar con un equilibrio de compromiso entre la complejidad del modelo matemático y la correspondencia con el sistema real. Sin duda que la obtención de un modelo sencillo y preciso es el deseo de cualquier ingeniero de control. Cuando ya se dispone del sistema real a controlar, las técnicas de identificación permiten ajustar parámetros al modelo matemático en base a ensayos experimentales.
3. Estudiar propiedades del sistema así como definir las variables que se desean controlar. Decidir con qué variables y de qué modo se hará evolucionar al sistema. De este estudio deben salir definidos los sensores y accionamientos del sistema.
4. Fijar los objetivos detallados de control. Definición de las especificaciones que deberá satisfacer el sistema controlado. Puede ser necesaria una solución de compromiso entre los objetivos a cumplir y la evolución de otras variables o puede plantearse un sistema de control multiobjetivo, que requerirá, en general, un mayor esfuerzo de diseño.
5. Diseñar e implementar el controlador en un entorno de simulación donde el sistema real a controlar es sustituido por el modelo matemático en el que se incluyen variaciones en los parámetros, perturbaciones externas, desajustes cuantificados en la calibración de los sensores, etc. para validar el funcionamiento previo del controlador.
6. Implementar el controlador en la plataforma final donde vaya a ejecutarse éste y validar su funcionamiento. Realizar ajustes en el controlador a partir del funcionamiento conjunto *Controlador-Sistema*. Cuando los sistemas son críticos, novedosos, o grandes, las pruebas para validación se suelen llevar a cabo en un prototipo, quizás a escala reducida.
7. Comprobar e implementar las acciones del sistema de control ante situaciones inesperadas o críticas. El conjunto controlador-sistema debe ofrecer respuestas seguras y fiables también en casos de parada, de falta de energía, o de fallo en alguno de los elementos del propio sistema de control, entre otras.

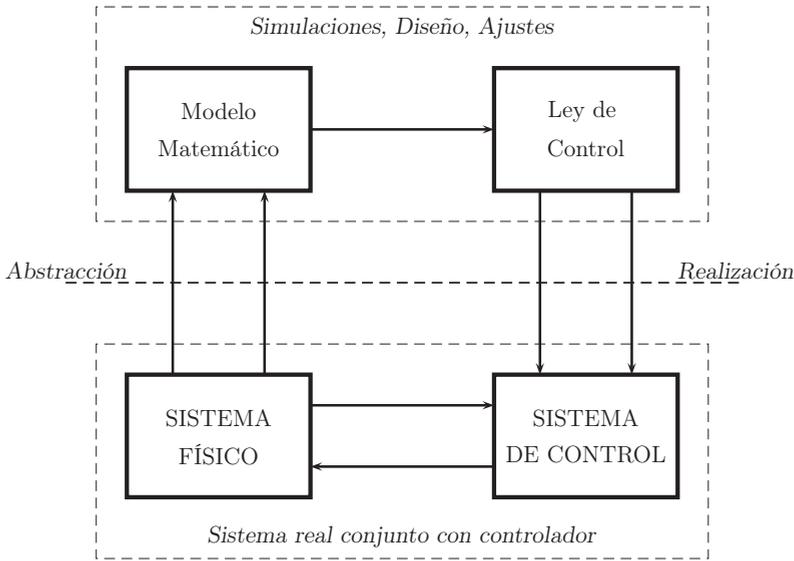


Figura 1.2: Fases básicas del método de diseño

Obsérvese que los pasos anteriores no marcan un camino único. Ante resultados no plenamente satisfactorios en algún punto puede ser necesario retornar a algún paso anterior, lo que implica tener que redefinir hasta los objetivos de control o modificar algún elemento constructivo en el que no se había considerado algún aspecto. Ante el caso de que sea necesaria la redefinición del modelo matemático, se añadirán elementos de mayor complejidad.

Aún cuando se finalizan todas las etapas anteriores, suele requerirse de algún sistema supervisor o de monitorización y registro para evaluar el funcionamiento del conjunto a más largo plazo, en condiciones que pueden no haberse tenido en cuenta. El comportamiento del sistema conjuntamente con el controlador ofrecerá respuestas a partir de las cuales se reajustarán ciertos valores o parámetros que no pudieron ser evaluados de forma precisa hasta entonces o que hayan dado lugar a comportamientos no del todo esperados.

Puede pensarse erróneamente que cualquier sistema puede ser controlado de una forma u otra. Un buen diseño del proceso o planta está por encima de lo que luego pueda hacer por él un controlador. Ningún controlador puede enmascarar debilidades de funcionamiento en el sistema a controlar. Un buen ejemplo es el de una articulación de un robot. No es posible llevar a cabo un control preciso de posición articular si el conjunto motor-reductora ofrece un juego u holgura por encima de los valores fijados por la repetibilidad de diseño del robot por más que el sistema sensorial del motor nos informe de que existe este juego y se disponga del modelo matemático de este defecto.

La posibilidad evidente de la existencia de múltiples soluciones satisfactorias ante un problema idéntico da sentido a lo que se denomina *Ingeniería de control* de la misma forma que un ingeniero civil puede llevar a cabo una infraestructura diferente a la que realizaría un colega con idéntica formación y experiencia para el mismo proyecto, o dos ingenieros navales pueden concebir buques distintos para una misma aplicación y especificaciones, existiendo sin duda, elementos comunes en el diseño y concepción del producto de cada uno de los profesionales mencionados.

1.2. Reseña histórica del control automático

Los primeros sistemas de control documentados datan de muchos años atrás, como los sistemas de regadío empleados en Babilonia 2000 años a.C., los cuales son conocidos a través del Código de Hamurabi.

Herón de Alejandría (Siglo I) describía un conjunto de autómatas que empleaban mecanismos de realimentación. La palabra *Realimentación* es un neologismo del siglo XX introducido sobre 1920 por los ingenieros de radio para describir los fenómenos parásitos que aparecían en los amplificadores (influencia positiva de las señales de salida en las de entrada). Este vocablo es utilizado comúnmente tanto en su acepción inglesa *feedback* como en la asimilada por el castellano, a partir de la segunda mitad del siglo XX.

Si bien existen distintas clasificaciones de las etapas de la historia del control automático, se ha optado por dividirla en cuatro períodos fundamentales, de las que se resumen algunos hitos importantes:

1. Desarrollos iniciales: hasta 1900.
2. periodo pre-clásico: de 1900 a 1935.
3. periodo clásico: de 1935 a 1950.
4. Control moderno: de 1950 hasta nuestras fechas.

Quizás el primer sistema automático de control que goza de crédito es el de la orientación de las aspas de un molino de viento en 1745, que mediante unas aspas de cola accionadas por las aspas principales, conseguía colocar a éstas de cara al viento en la posición óptima para el aprovechamiento de la energía eólica. Los modernos aerogeneradores siguen utilizando versiones actuales de este sistema automático para el mismo fin.

Sin embargo, el desarrollo más significativo durante el siglo XVIII fue el regulador de máquinas de vapor. Estos mecanismos fueron descritos por M.

Boulton en 1788 a James Watt (1736-1819) quien lo adaptó en 1789 para regular la velocidad de rotación de las máquinas de vapor. Se ha estimado que hacia 1868 había unos 75.000 reguladores de este tipo en Inglaterra.

Uno de los avances destacados de la etapa pre-clásica es el sistema de control de dirección de barcos desarrollado en 1911 por E. Sperry, el cual incorporaba control PID y ajuste de ganancia para compensar perturbaciones. Observando el modo en que un timonel gobierna un barco, en 1922, N. Minorsky (1885-1970) presentó un análisis claro de sistemas de control de posición y formuló la ley que actualmente es conocida como control PID.

Caben destacarse también de esta época los trabajos de E.J. Routh (1831-1907), junto con el posterior trabajo independiente de A. Hurwitz (1859-1919) para el estudio de la estabilidad de sistemas lineales, así como los trabajos de A. Lyapunov (1857-1918) publicados en 1892, que resultan hoy en día fundamentales en el estudio de la estabilidad de sistemas no lineales.

Del periodo clásico se destacan los trabajos de H.W. Bode (1905-1982) relacionados con la realimentación y la respuesta frecuencial de amplificadores, los trabajos de H.S. Black (1898-1983) y de H. Nyquist (1889-1976) sentando las bases del criterio de estabilidad y análisis en el dominio frecuencial, así como los llevados a cabo por J.G. Ziegler y N.B. Nichols, publicando un conjunto de reglas para el ajuste de parámetros en controladores PI y PID.

La llegada de la II Guerra Mundial llevó a la concentración de los trabajos sobre sistemas de control en una serie de problemas específicos, siendo el más importante el desarrollo de cañones antiaéreos. De esta época son los desarrollos por H. Harris en 1942 de la Función de Transferencia para el análisis de un sistema realimentado general, o el estudio por N. Wiener (1894-1964) de sistemas estocásticos para la predicción de la trayectoria futura de aviones.

Al final de la guerra habían sido establecidas las bases de las técnicas clásicas de control, a excepción del método del Lugar de las raíces, introducido por W.R. Evans (1920-1999) entre 1948 y 1950. La conferencia sobre *Control automático* celebrada en julio de 1951 en Gran Bretaña y el *Simposio sobre respuesta en frecuencia* de Nueva York en 1953 marcaron el comienzo del periodo de transición hacia la que se denominó *Teoría de control moderna*.

Entre 1948 y 1952, R. Bellman (1920-1984) estudió el problema para que los misiles llegaran a su objetivo provocando el máximo daño, formulando el *Principio de optimalidad* y las bases de la programación dinámica. El problema dinámico que trata la maximización o minimización de un cierto índice de comportamiento presentaba una analogía clara con las formulacio-

nes variacionales clásicas de mecánica analítica de Lagrange y Hamilton. La generalización de la aproximación de Hamilton a la óptica geométrica realizada por L.S. Pontryagin (1908-1988) en 1956 en forma de su *Principio del máximo*, sentó las bases de la *Teoría del control óptimo*.

Tras el lanzamiento en 1957 del primer satélite *Sputnik 1*, se celebró en 1960 una conferencia en Moscú donde R.E. Kalman (1930-) presentó *On the General Theory of Control Systems*. A partir de los trabajos de Kalman se establecieron los conceptos de *Controlabilidad y Observabilidad*, además de poderse realimentar sistemas ubicando los polos en bucle cerrado en posiciones determinadas, incluso obteniendo los estados sin tener acceso a ellos mediante la teoría de observadores de Luenberger (1964).

La introducción en 1947 por W. Hurewicz (1904-1956) de la transformada de una secuencia, la definición en 1952 de la *Transformada z* por J.R. Ragazzini y L.A. Zadeh y el desarrollo en 1954 por Salzen de la teoría de la Transformada z para sistemas descritos por ecuaciones en diferencias y el criterio de estabilidad de E. I. Jury (1923-) análogos a la transformada s de Laplace para sistemas regidos por ecuaciones diferenciales ordinarias, permitió una fácil reelaboración de las teorías clásicas con técnicas similares para el estudio de sistemas muestreados por computador.

Los desarrollos posteriores fueron encaminados a la ampliación de las posibilidades de los computadores para la implementación de estrategias de control no convencionales. El número de computadores de procesos creció desde unos 5.000 en 1970 a unos 50.000 en 1975. Sin embargo, debido al tamaño del minicomputador y aunque los precios iban disminuyendo, el control por computador estaba todavía fuera del alcance de muchos problemas de control. La llegada del microprocesador en 1972, combinando una gran potencia de cálculo con precios más bajos, significó que el control por computador podía considerarse en ese momento como una alternativa a tener en cuenta, sin importar lo reducido del tamaño de la aplicación.

Los avances en microelectrónica con la tecnología *VLSI (Very Large Scale Integration)* durante los años 80 produjeron unos desarrollos todavía más drásticos, registrándose un gran aumento en las aplicaciones del control por computador. Los microprocesadores produjeron un impacto apreciable sobre los equipos de control sustituyendo a los circuitos analógicos incluso en los controles de un solo bucle.

La utilización masiva de computadores y la aparición de lenguajes y sistemas operativos de tiempo real *RTOS (Real-Time Operative System)*, los sistemas empotrados (*Embedded systems*) o lenguajes de alto nivel de des-

cripción de Hardware como *VHDL*, acrónimo resultante de la combinación de *VHSIC* (*Very High Speed Integrated Circuit*) y *HDL* (*Hardware Description Language*) que permite describir de forma general cualquier circuito digital, analógico o mixto y programar *PLD* (*Programmable Logic Devices*), *FPGA* (*Field Programmable Gate Arrays*), *ASIC* (*Application-Specific Integrated Circuits*) y similares abren infinitas posibilidades de diseño e implementación de sistemas de control.

El desarrollo del software ha permitido la aparición de paquetes de diseño asistido por ordenador dedicados a los sistemas de control, los cuales proporcionan facilidades de modelado y simulación, identificación y análisis y procesamiento de señal, etc. además de mejorar la interacción con los usuarios y desarrolladores de estos sistemas de control.

Recientemente se han producido cambios debido a consideraciones sobre ahorro energético, fiabilidad, seguridad, medio ambiente y calidad de los productos. Esto supone la incorporación de algoritmos de control cada vez más sofisticados que requiere a su vez de una mayor interrelación entre ramas del conocimiento: *Automática*, *Inteligencia artificial*, *Informática*, *Tecnología de procesos*, *Comunicaciones*, etc. o un enfoque con una perspectiva *Mecatrónica* donde se unen la *Ingeniería mecánica*, *Ingeniería electrónica*, *Ingeniería de control* e *Ingeniería informática* para diseñar y desarrollar productos o procesos cada vez más inteligentes.

Líneas de trabajo con identidad propia en el marco de la ingeniería de control como son el *Control adaptativo*, *Control estocástico*, *Control inteligente* (neuronal, borroso...) o *Control en modo deslizante* entre otras, tienden cada vez más a integrarse en las nuevas máquinas, buques, edificios, etc. En un mundo universalmente conectado se espera que en 2020 haya unos 20.000 millones de aparatos/máquinas con conexiones *M2M* (*Machine To Machine*), lo que anticipa una fuerte dedicación de la *Ingeniería de control* al control *Distribuido*, *Jerárquico* y *Supervisado*, *Asíncrono* y *Conectado en red*.

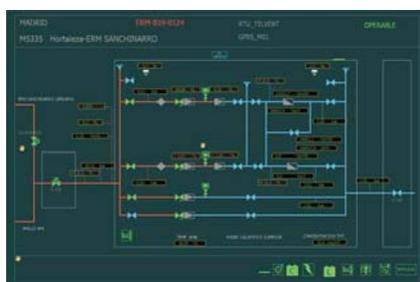
La figura 1.3 muestra en su parte superior (a) la interfaz gráfica principal del sistema SCADA. (*Supervisory Control And Data Acquisition*) del Centro de Control de Distribución de la empresa Gas Natural-Fenosa en su sede de Barcelona, mientras que la parte inferior muestra una pantalla del Centro en Madrid con información de la red de distribución en la Comunidad de Madrid (b), junto con la monitorización de la *Estación de Regulación y Medida* (*ERM*), de Hortaleza-Sanchinarro (Madrid) (c) que da servicio a unos 100.000 habitantes.



a) Centro de Control de Distribución (CCD). Barcelona



b) CCD. Madrid



c) ERM. Hortaleza-Sanchinarro

Figura 1.3: Sistema de supervisión y control distribuido.
Cortesía de Gas Natural SDG SA

1.3. El control en el ámbito naval y marítimo

Se presentan de un modo muy introductorio algunas de las formas en que la ingeniería de control está presente en el ámbito naval, marítimo y oceánico. No se contemplan aquí las múltiples y muy variadas aplicaciones en las que el control interviene como parte en distintos elementos o componentes de los buques, plataformas y artefactos marinos, puesto que la lista resultaría interminable.

1.3.1. Aprovechamiento económico de explotaciones

De las siguientes actividades consideradas en este apartado se pretende únicamente resaltar la influencia de los sistemas de control sobre su rendimiento.

- *Rutas marítimas.* La gestión de rutas óptimas, el aprovechamiento máximo de la energía para realizar trayectos, la minimización de tiempos, etc. Cada vez con mayor frecuencia se usa la realimentación para la toma de decisiones.

- *Control de UMV's y AUV's.* Los *Unmanned Maritime Vehicle's* y *Autonomous Underwater Vehicle's* resultan útiles tanto para minimizar los costos de personal como para llevar a cabo operaciones irrealizables por un humano o que le resultan altamente hostiles.
- *Automatización de tareas.* Como ejemplo, la automatización de puertos con gran tonelaje en mercancías: minimiza los tiempos de carga y descarga de buques, clasifica la carga, computa la evolución del centro de gravedad del buque en función del peso de los contenedores, reduce las tasas de fallos, el espacio necesario y los costos de almacenaje. La presencia de inevitables movimientos pequeños que pueden tener tanto el buque amarrado como los cables de la grúa en la carga y descarga de contenedores sobre el buque requiere todavía la intervención humana. (Tareas similares en robótica industrial se llaman *Packaging* o *Paletizing*)
- *Control de crecimiento de especies en explotaciones de acuicultura.* Si hoy en día cualquier granja de engorde de animales terrestres para el consumo humano no se concibe sin altas tasas de automatización, las técnicas de control utilizadas para estas fábricas son tomadas como referencia para su adaptación y aplicación a las granjas de cultivo y engorde de pescado para consumo humano.

1.3.2. Mejora de prestaciones en buques y artefactos marinos

La clasificación en este apartado se ha llevado a cabo a partir de las condiciones de operación, atendiendo en concreto a los rangos de velocidad en los que operan cada uno de los grupos.

- *Posición estática o de baja velocidad.* Las plataformas petrolíferas, de extracción de gas, así como los barcos de baja velocidad ofrecen diversos problemas de control como su posicionamiento dinámico, el mantenimiento de una posición respecto de otra posición balizada fija, o de movimiento a baja velocidad (*stationkeeping*) así como seguimiento de trayectorias en actividades como el tendido de cables oceánicos.
- *Control de buques de velocidad normal.* Como ejemplo, la dotación de accionamientos adicionales y sistemas de control adecuados permiten mejorar las condiciones de confort en pasajeros a bordo, pudiendo reducirse el denominado *Índice de mareo* (*Motion Sickness Incidence MSI*).
- *Control de buques de alta velocidad.* En los que son objeto de estudio la obtención de un buen seguimiento de trayectorias con buena estabilidad, errores mínimos de seguimiento sin afectar a las condiciones de confort y con altas prestaciones de velocidad.

1.3.3. Control de maniobras en aplicaciones novedosas

Los sistemas de control, junto con los avances tecnológicos actuales en campos como la computación y las comunicaciones de bajo costo, que ha dado lugar a la denominación de *Triple C*: (*Control+Computación+Comunicación*), permiten el desarrollo de dispositivos y aplicaciones novedosas o la realización de sistemas marítimos u oceánicos que no se habían podido llevar a cabo hasta ahora. Por considerarse novedosas, existen muy diversos proyectos en mayor o menor grado de madurez. Se presentan únicamente dos grupos de entidad suficiente.

- *Nuevos dispositivos de exploración oceánica*. Como ejemplo pueden considerarse los denominados *Gliders*, submarinos de muy bajo consumo que permiten realizar tareas de exploración sumergida durante largas estancias de tiempo, incluso de varios meses, y recorridos de varios miles de kilómetros. Basan su propulsión en cambios de flotabilidad y están siendo utilizados en ámbitos militares y de exploración oceánica.
- *Dispositivos para la extracción de Energías Renovables Marinas (ERMs)*. A partir de la energía eólica fuera de costa (*Offshore*), de la energía de las olas, de las corrientes marinas, gradientes salinos y otras. Sus sistemas de control no sólo son los responsables de extraer energía de calidad para poder verterlos a la red eléctrica, sino de su estabilidad, de ejecutar diferentes maniobras para distintos modos de operación, de la monitorización y supervisión de valores, gestión de alarmas, señalización, etc.

1.4. Organización de este texto

Este texto está organizado en 9 capítulos entre los que se incluye esta introducción. Se dedica el capítulo 2 a presentar los conceptos básicos de sistemas y señales con el fin de centrar el estudio de los sistemas continuos con una única entrada y una única salida, lineales e invariantes en el tiempo, que pueden ser tratados bajo la transformación de Laplace. Esta transformación matemática es introducida en el capítulo 3 como generalización de la transformada de Fourier, previa descripción de las series de Fourier desde la perspectiva del procesamiento de señal. El lector familiarizado con estas transformaciones puede omitir la lectura de este tercer capítulo.

A partir del capítulo 4 se trata el concepto de función de transferencia. En el capítulo 5 se obtienen respuestas temporales y caracterización de sistemas de orden reducido para profundizar en la correspondencia entre régimen transitorio y ubicación de polos y ceros en el plano complejo, incluido el criterio de estabilidad de Routh. También se estudian las constantes de error para el estudio de la respuesta en régimen permanente. A continuación, en el

capítulo 6 se estudia la respuesta frecuencial de sistemas, su representación en los diagramas de Bode y el criterio de estabilidad de Nyquist.

El resto del texto está dedicado al diseño de reguladores bajo técnicas temporales-complejas y técnicas frecuenciales, siempre desde la perspectiva de la representación externa. Tras un capítulo introductorio de los sistemas realimentados, donde se definen diversos juegos de especificaciones, tanto temporales como frecuenciales, para el diseño de reguladores. Se finaliza con dos capítulos dedicados al diseño de reguladores: el capítulo 8 dedicado al diseño de reguladores a partir de especificaciones temporales y su correspondencia con el plano complejo y las constantes de error, y el capítulo 9, menos extenso, dedicado al diseño de redes de compensación a partir de la respuesta frecuencial.