

EL CONTROL AUTOMÁTICO Y SUS APLICACIONES NAVALES

Juan L. Hernández S., Ph.D.

Introducción

Desde tiempos inmemoriales y en sus diversas actividades, el hombre ha usado implícitamente principios que en las centurias recientes han sido formalizados en las llamadas ciencias naturales. Pero paralelamente ha empleado otros principios o conceptos más abstractos que sólo en el presente siglo han sido reconocidos como susceptibles de construir la base de ciencias conceptuales como la *cibernética*, o ciencia del control automático, cuya disciplina aplicada es la ingeniería del mismo nombre.

La ingeniería de control automático¹ posee actualmente un avanzado nivel científico y tecnológico, que se ha logrado en varias etapas pero más aceleradamente a contar de la Segunda Guerra Mundial.

En especial, la introducción del computador digital en el control directo de plantas y sistemas ha revolucionado el control automático a partir de 1960²⁻⁷. El advenimiento del microcomputador ha permitido, desde 1975, aplicar más inteligencia de control a niveles cada vez más próximos al, o dentro del proceso mismo, a un costo aceptable y con múltiples ventajas⁸⁻¹⁴.

Aunque la cibernética y el control automático son útiles y empleados en muchas actividades o áreas de la sociedad, en determinadas épocas han sido particularmente notables sus nexos con el ámbito naval. En una especie de simbiosis, los sistemas a bordo de naves (sistemas de navegación, propulsión, generación eléctrica, artillería, antenas, y otros) han planteado exigencias tales que se ha debido crear o inventar nuevos medios de control para satisfacerlos. A la inversa, nuevos métodos o tecnologías de control automático han contribuido a mejorar los citados sistemas, o a implantar otros nuevos.

Este artículo describe algunos aspectos modernos del control automático, que son universales en su aplicabilidad pero con énfasis en el ámbito naval. Los aspectos de aplicación en, por ejemplo, aviones, astronaves, vehículos militares, y otros, son similares.

Principios cibernéticos

Desde el remoto pasado, el control y la regulación se desarrollaron como un arte pragmático y manual —no automático— esto es, con un operador humano como parte del proceso. En casos singulares, a través de la historia se hizo necesario reemplazar al humano por algún regulador o control automático. El caso más conocido es el regulador centrífugo de Watt, desarrollado heurísticamente para regular la velocidad de la máquina a vapor. Este regulador fue analizado teóricamente por Maxwell, lo que puede ser considerado ahora como el comienzo del uso de un modelo matemático para el estudio de tales controles, un método estándar de la ingeniería moderna. Dicha máquina, junto con su regulador, pasó a ser parte de los primeros buques a vapor.

Otro hito importante en el control naval, aparece en 1920 cuando N. Minorsky crea y aplica un sistema de control automático eléctrico para la guía de buques. Básicamente, con

él se comparaba, mediante potenciómetros, la posición del timón con una posición correspondiente al rumbo deseado, y la discrepancia en forma de voltaje de error, se amplificaba y aplicaba a un motor eléctrico que accionaba el timón apropiadamente. El sistema de Minorsky empleaba, en forma explícita, el principio de retroalimentación, más desarrollado por Black, Bode, Nyquist y otros en la ingeniería electrónica de esos años. Dicho principio es uno de los pilares del control automático moderno.

Hacia 1940, N. Wiener publicó su famoso libro *Cibernética: la Ciencia del Control y Comunicación en el Animal y en la Máquina*, en el que planteaba los principios científicos de dicha disciplina, que él llamó "cibernética". Posteriormente se descubrió que este vocablo ya había sido usado por Ampere en el sentido de "gobernar", y por Platón en el sentido de "timonear".

Así, cibernética es la ciencia subyacente del control y regulación automáticos.

En la década reciente se ha empleado el vocablo cibernética también en relación con la "inteligencia artificial" y con la ciencia de la computación. En este artículo usaremos "cibernética" en el sentido de ciencia del control automático o relacionado con este.

En la figura 1 se resume simbólicamente los principios cibernéticos más relevantes para este artículo. **P** representa una planta, sistema o proceso a controlar en algún sentido. En una aplicación naval, **P** podría ser la nave misma o alguna parte de ella; por ejemplo, los subsistemas de control de cañones, de navegación, de planta de poder, de antenas, u otros.

En otros ámbitos, **P** podría ser un avión, nave espacial, una acería, planta petroquímica, central nuclear, sistema macroeconómico, sistema circulatorio humano o animal, u otro ejemplo.

Un principio cibernético se refiere; al empleo de un patrón de datos, rasgos, o imágenes como modelo de referencia (**M**), que representa la conducta que se desea que tenga el sistema controlado **P**. Otro principio es la idea de determinar la conducta actual del sistema **P** midiendo, o "sensando", alguna variable que la identifique (bloque **S**). Un tercer principio es el de retroalimentación (**B**) de la determinación de dicha conducta y su comparación con el patrón de referencia. La comparación es simbolizada por el bloque **D**. Finalmente, un cuarto concepto consiste en el aprovechamiento de la discrepancia encontrada por **D** para activar (**A**) algunos efectos que modifiquen la conducta del sistema **P**, en forma tal que **E** coincide con **R**, o que la conducta real del sistema sea idéntica a la prescrita por el modelo referencial.

La conducta real del sistema generalmente no coincide con la representada por el modelo, debido a la presencia de variables exógenas no controlables, llamadas perturbaciones o ruidos, y de carácter aleatorio. Entre estos se puede citar oleaje, viento, temperatura atmosférica, reflexiones de ondas o ecos, fluctuaciones de voltaje o vapor, y muchos otros, dependiendo del tipo de sistema o aplicación. En sistemas militares, algunas de las perturbaciones o ruidos pueden ser intencionales, para decepción; por ejemplo, interferencias para engaño de misiles o bloqueo de comunicaciones.

En el ámbito naval, que nos interesa en este artículo, estos principios cibernéticos han sido aplicados en dos sentidos generales: exógeno, o relativo a navegación y guía de misiles; endógeno, o referente a sistemas de control automático dentro del buque".

La aplicación de principios cibernéticos en la navegación se extiende desde el remoto pretérito del hombre como navegante, hasta los sistemas satelitales más recientes (NAVSAT, NAVSTAR y otros GPS). Algunos misiles que se autoguían comparando un patrón estelar que

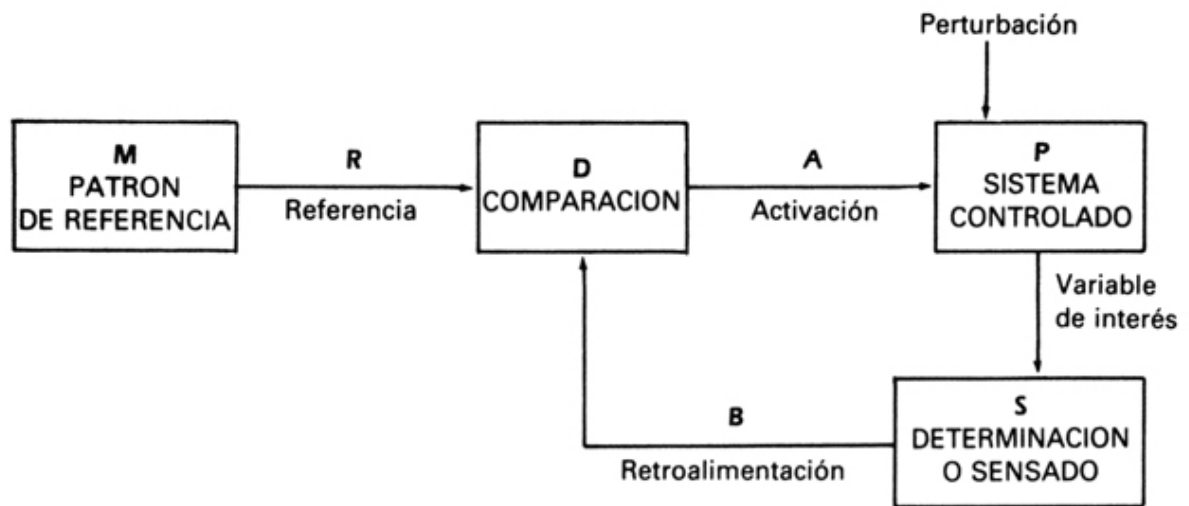


Fig. 1. Ilustración de principios cibernéticos.

sensan, o "ven", con otro referencial almacenado en la memoria de uno de sus computadores, están aplicando los mismos principios cibernéticos que un navegante fenicio, polinésico, u otro de cualquier época. Se supone que los vikingos podían ubicar la dirección del sol, aunque estuviera oculto por la niebla, con un mineral —tal vez la cordierita— que cambiaba de color si su plano de alineación molecular no estaba a 90° del plano de polarización de la luz solar. Así, un vikingo navegando en la bruma usaba los mismos principios cibernéticos que un submarino nuclear desplazándose bajo los hielos y empleando como referencia un giroscopio. Las tecnologías en todos estos ejemplos son muy diferentes, obviamente, pero los principios cibernéticos son los mismos.

En el ámbito naval endógeno, los principios cibernéticos de la figura 1 son usados, al igual que en la industria y empresas productivas, en la forma más concreta indicada en la figura 2, muy conocida en la literatura. Básicamente, la variable controlada c es medida como una variable b , que es retroalimentada y restada de la referencia R . La diferencia, o señal de error de accionamiento e es amplificada y usada para activar en la planta a controlar (P) ciertos efectos que hagan variar c hasta que e se anule. M , además de medir o sensor c , debe dar una señal b que sea de la misma naturaleza física que R . conversión que se llama "transducción".

El esquema de la figura 2 sirve para los diversos sistemas de control dentro del buque, como por ejemplo, control de nivel de calderas, reactor nuclear, turbogenerador, artillería, guía del buque mismo, antenas, radar y otros. Este artículo está destinado a estos tipos de controles navales, en sus versiones actuales.

A veces se distingue entre control automático, regulación automática y servomecanismo, aunque los métodos cibernéticos son válidos para todos los casos. En la figura 2, si R es variada y se desea que c siga fielmente esta variación, se dice que se trata de un problema de control. Si R es constante y c debe mantenerse igual a R , se habla de problema de regulación. Si c es una variable mecánica, como posición o velocidad de un eje, se usa el término servomecanismo.

Algunos aspectos de la evolución del control naval hasta 1960

En las secciones precedentes se ha mencionado algo sobre el desarrollo del control automático naval, hasta los sistemas de guía de barcos de N. Minorsky (1920)

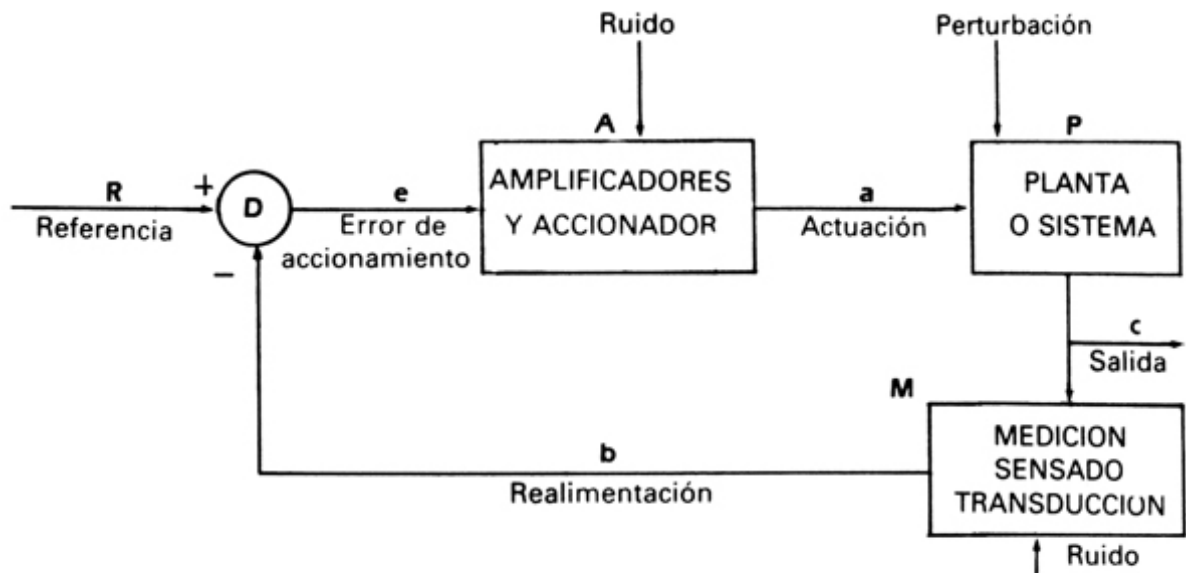


Fig. 2. Lazo típico de control automático

En el esquema de Minorsky, y usando la figura 2, la "planta" **P** sería el barco completo, La referencia **R** y la realimentación **b** se obtenían como voltajes de sendos potenciómetros rotatorios conectados mecánicamente a la "caña" y el timón, respectivamente. El error de discrepancia **e**, otro voltaje, era amplificado para dar el voltaje de "actuación" **a** que permitía activar un motor eléctrico el que finalmente giraba el timón en el ángulo apropiado para reducir a cero el error **e**.

Durante la Segunda Guerra Mundial hubo avances en la teoría y tecnología del control automático, que establecieron firmemente la disciplina de esta especialidad y, como se dijo antes, la creación de la cibernética como ciencia.

En este artículo sólo se mencionará algunos de los desarrollos más notables, sin pretender exhaustividad ni correcta secuencia histórica.

El incremento del tonelaje de los buques de guerra, y de sus cañones, cuyo control seguía el esquema eléctrico de Minorsky, figura 2, obligó a usar motores eléctricos más grandes. Para alimentar estos motores hubo de usarse dos generadores eléctricos en cascada, lo que hacía lento el control y aumentaba su tendencia a la inestabilidad, un fenómeno ligado a los lazos de control realimentado (como el de la figura 2). Esto llevó al desarrollo de generadores eléctricos (de corriente continua) de dos etapas de amplificación de voltaje dentro de una misma máquina; estos fueron llamados amplidinas, rototroles o regulex, según el fabricante y el principio electromecánico usado. Al mismo tiempo se reemplazó, a veces, los potenciómetros, antes mencionados, por nuevos dispositivos sensores y comparadores electromecánicos, conocidos por nombres tales como sincros, sincroties, autosyns, u otros.

También se desarrolló el amplificador magnético estático, que fue muy usado en submarinos alemanes. Las necesidades de contar con plataformas estabilizadas para cañones y de disponer de referencias inerciales para guía automática de buques y aviones, condujo al desarrollo de sistemas giroscópicos y de sus correspondientes sensores eléctricos, conocidos con nombres tales como girosyn, diehlsyn, y otros.

El desarrollo del radar exigió un fuerte desarrollo en varias disciplinas, como microondas, antenas y otras, y en los diversos países se estableció grupos o laboratorios para su investigación y materialización. Esto condujo a un significativo y paralelo avance en

métodos de análisis y diseño de “servomecanismos”. Particularmente en el Laboratorio de Radiación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en Estados Unidos, dedicado al desarrollo del radar en su versión estadounidense. El famoso texto de servomecanismos de James-Nichols-Phillips (*Principles of Servomechanisms*), escrito allí, contiene prácticamente todos los métodos que se ha usado en la ingeniería de control automático —sucesora de los servomecanismos— hasta aproximadamente 1960. Una excepción era el “método del lugar geométrico de raíces”, desarrollado más tarde por Evans.

El citado texto de servomecanismo será dedicado a sistemas de control automático con un solo lazo de control como el de la figura 2, con una referencia R y una variable controlada c . Los sistemas modernos pueden tener hasta miles (como una planta termoeléctrica) o cientos de miles (como el sistema eléctrico interconectado de un país o continente) de variables de interés, y cientos o miles de lazos de control interactuantes.

También, el libro citado usaba en su enfoque matemático el operador de Heaviside. Posteriormente se ha usado la transformada de Laplace en dicho enfoque operacional.

Un aspecto importante, de gran interés actual, introducido en el libro de James-Nichols-Phillips, es el desarrollo y empleo de métodos no determinísticos para el análisis y diseño de sistemas con perturbaciones y señales aleatorias, como son los efectos del viento sobre la antena de radar y los ecos radáricos. Hasta entonces, los sistemas se consideraban determinísticos, esto es, con señales y parámetros conocidos de antemano. Pero, en verdad, en los sistemas reales hay muchos efectos no determinísticos, llamados aleatorios, probabilísticos o estocásticos, según el caso, como se ha indicado en las figuras 1 y 2.

Durante esa guerra, los aviones y buques fueron haciéndose cada vez más rápidos y evasivos. El famoso matemático Norbert Wiener, del MIT, al desarrollar métodos estocásticos para analizar la conducta evasiva de aviones, creó en gran medida los principios estocásticos de la comunicación y del control automático, y, más aún, ello le llevó a establecer después la ciencia de la cibernética (el computador digital no salía aún de los laboratorios universitarios). Después de la guerra se supo que trabajos estocásticos habían sido hechos independientemente en otros países.

En general, en los sistemas de control automático de la época se había considerado que los parámetros de la planta o sistema a controlar eran conocidos y constantes durante su operación. Así, los parámetros aerodinámicos de un avión o los hidrodinámicos de un submarino se suponían constantes durante su vuelo o travesía. Pero al desarrollar bombarderos de gran altura se vio que las condiciones aerodinámicas a baja, mediana y gran altitud eran muy diferentes, lo que hizo necesario el desarrollo de los sistemas de control adaptables o adaptativos. Estos sistemas ajustan sus propios parámetros para poder controlar el avión adecuadamente a las diversas altitudes. La alternativa de usar tres o más sistemas de control automáticos, uno para cada rango de altitud, no es aceptable, por razones de peso, volumen y costo. Necesidades de control adaptativo surgieron también en aviones de gran velocidad y en submarinos, entre otros casos.

En los párrafos anteriores se resume lo más notable del control automático desde 1939 hasta 1959, habiéndose generado en ese período las raíces de otros métodos de control automático.

Desarrollo del control automático desde 1960

Desde la década de los años 60, el desarrollo del control automático, tanto en teoría como en tecnología y aplicaciones, ha sido explosivo y muchos de los avances han sido promovidos por necesidades militares, incluidas las navales y espaciales, o han sido traspasados a ellas desde las industrias de producción, y viceversa.

Un primer impulso a este desarrollo provino de la invención del transistor y de los dispositivos semiconductores controlados (tiristores, y otros). Estos dispositivos permitieron el empleo de técnicas de computación analógica, el amplificador operacional, sensores e instrumentación, electrónicos diversos, y accionamientos electrónicos.

Los computadores electrónicos analógicos permitieron estudiar, simular y realizar prácticamente esquemas de control de tipos nuevos, por ejemplo, óptimos. En estos, el control debe ser realizado de modo que se satisfaga, algún criterio, de desempeño o comportamiento y sin que las variables del proceso, tanto internos como los de control, violen ciertas restricciones físicas o económicas.

El amplificador operacional electrónico hizo posible realizar esquemas de control lineales o alineales, en que se debe calcular rápidamente fórmulas algebraicas o ecuaciones diferenciales, para deducir de ello señales de control diversas. También permitió realizar las primeras aplicaciones de métodos estocásticos y de estimación e identificación de modelos matemáticos y sus parámetros, lo que es necesario como primera parte de controles adaptativos óptimos o de otros tipos. Finalmente, el amplificador operacional fue la base para los primeros controladores electrónicos, como se verá en la sección que sigue.

La disponibilidad de una variedad de sensores y transductores, y otros instrumentos electrónicos, hizo posible la medición más exacta y rápida de variables de distinto tipo a controlar. Para algunos tipos de éstas no existían instrumentos hasta entonces, pero sí para otras, cuyo costo o tamaño no eran adecuados; finalmente, para otras los dispositivos de medición electrónicos presentaban ventajas considerables o eran los únicos factibles o disponibles.

En el caso de los accionamientos electrónicos con dispositivos semiconductores controlados, la revolución que introdujeron en el control automático y en la electrónica industrial fue considerable, pues han desplazado a muchos accionadores de otras clases, entre ellos la amplidina y el rototrol, y en parte a actuadores mecánicos diversos, dependiendo ello de la aplicación específica.

Hacia fines de la década de los años 50 se empezó a emplear el computador digital en esquemas de supervisión y control fuera de línea. En 1960 se empleó el computador digital en el control directo de una acería en Pittsburgh, Estados Unidos, pero en aviones y buques de guerra hubo antes aplicaciones de computadores digitales *ad hoc* más pequeños.

En la figura 3 se ilustra una planta o sistema controlado por un computador digital, llamado de procesos. Tales computadores eran de gran tamaño pero de rapidez de operación compatible para el uso de aplicaciones reales, a diferencia del empleo habitual en procesamiento de datos. El esquema general de dicha figura sirve también para los minicomputadores, que sucedieron a los computadores de procesos, y para los microcomputadores, más recientes. Como es sabido, un microcomputador actual, del tamaño de un televisor o menos, es más poderoso computacionalmente que un computador de procesos, que era del tamaño de una habitación.

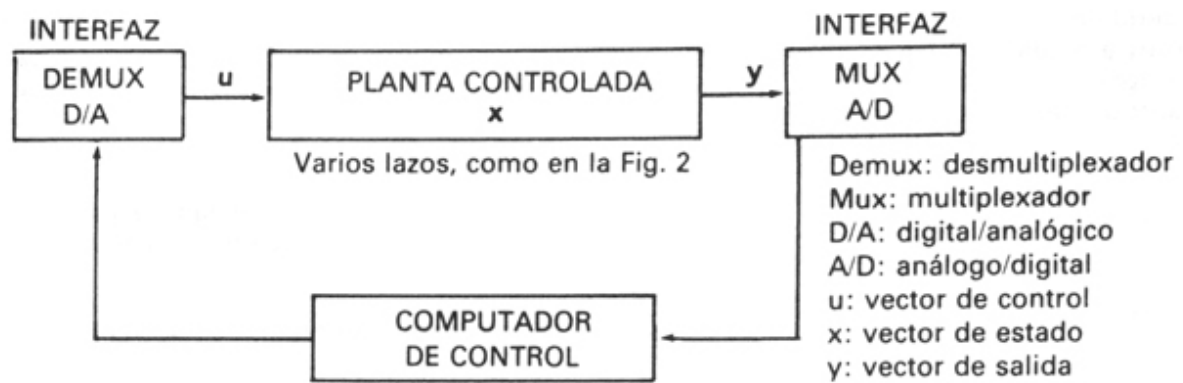


Fig. 3. Esquema de control por computador

Un mini o microcomputador, pese a su bajo costo, solo es justificable en control si es usado para controlar varios o muchos lazos, como el de la figura 2.

En la figura 3, el computador fue desempeñando diversas tareas. Al comienzo se usaba el computador como supervisor de operación y monitor; luego fue usado para computar algoritmos de control y variar las referencias de los diversos lazos, similares al de la figura 2. Finalmente, tras varias etapas de evolución, el computador ha pasado a ser parte integral del sistema de control, en lo que se llama aplicación "en línea". En este esquema, el computador recibe información medida, o sensada, de las variables de interés del proceso, planta o sistema controlado, de acuerdo a algoritmos, que resuelve con dicha información y otros datos. Genera señales para controlar directamente el proceso de modo que éste opere satisfactoriamente, conforme a algún criterio de comportamiento. En tales casos, la velocidad del proceso global es determinada por la del computador. En los casos de control "en tiempo real", la velocidad es dictada por el proceso o planta controlado, y el computador debe responder con una rapidez compatible con aquélla.

Cabe señalar aquí que como las variables de la planta o sistema a controlar son continuas en tanto que el computador digital opera con series discretas (pulsos o niveles de voltaje), se debe emplear dispositivos electrónicos para efectuar las conversiones necesarias.

Las variables controladas de los diversos lazos de control son muestreadas secuencialmente por un multiplexador electrónico sincrónico. Estas lecturas son convertidas a señales discretas (digitales) por un conversor análogo/digital, en forma secuencial, e introducidas al computador, el que computa con ellas ciertos algoritmos para generar señales de control; éstas, de forma digital, son convertidas a continuas o "analógicas" por un conversor digital/analógico, y aplicadas en sucesión, por un desmultiplexador electrónico sincrónico, a los lazos de control respectivos. Los microcomputadores modernos generalmente tienen incorporados esos dispositivos electrónicos, o pueden estos ser agregados en el caso contrario. En la figura 3, ellos han sido indicados como interfaces.

Otros aspectos del uso de microcomputadores serán vistos en las siguientes secciones de este artículo.

Teoría moderna de control automático

La teoría clásica del control automático era aplicable básicamente a lazos de una entrada y una salida.

A partir del lanzamiento del primer satélite artificial, en 1957, se aceleró la tendencia a estudiar problemas más reales, una de cuyas características es la de contener muchas variables. Hacia 1960 se generalizó el uso de variables de estado y de modelos matemáticos matriciales, con fuerte apoyo de computadores. Estos últimos, como se ha mencionado, fueron siendo aplicados directamente al control (figura 3)

R.E. Kalman, en Estados Unidos, planteó las bases del control automático moderno introduciendo en forma matemática rigurosa conceptos nuevos tales como controlabilidad, reconstructibilidad, y otros. Diversos autores mejoraron los métodos para el estudio de problemas de control óptimo e introdujeron otros nuevos, tales como el principio de Pontryagin, programación dinámica de Bellman y métodos numéricos de gradiente.

También se ha avanzado mucho en otras áreas, tales como control de sistemas con parámetros distribuidos, control adaptativo, y otras.

En la figura 3 se ha indicado los tres vectores principales de lazos multivariables de control: el vector de control, \mathbf{u} , el vector de estado \mathbf{x} y el vector de salida medida \mathbf{y} . Las componentes de \mathbf{x} , por ejemplo, podrían ser presiones, caudales, niveles, temperaturas, ángulos de ejes, o corrientes eléctricas, según el caso.

En el último tiempo ha habido gran interés en la identificación de modelo y estimación de parámetros de sistemas a partir de mediciones externas, problemas íntimamente ligados al control automático pero aplicables en una variedad de otras áreas de la actividad humana.

Evolución del controlador automático

El componente básico de los sistemas de control o regulación automáticos prácticos ha sido, y en gran medida sigue siéndolo, el controlador. Este dispositivo, muy empleado en las diversas industrias y empresas productivas, tiene versiones apropiadas para sistemas navales, aeronáuticos, u otros.

Considerando el esquema de la figura 2, un controlador automático es un equipo o dispositivo que efectúa las operaciones indicadas en dicha figura, salvo las de la planta misma. Tiene medios para recibir las señales de referencia (\mathbf{R}) y de realimentación (\mathbf{b}) y para entregar una señal de actuación (\mathbf{a}), además de efectuar la comparación \mathbf{D} , generar el error \mathbf{e} , amplificar éste, y realizar la transducción \mathbf{M} .

Generalmente, deben ser provistas otras etapas de amplificación externas al controlador (en \mathbf{A}). El controlador dispone de ajustes para variar la referencia y sus propios parámetros, previo a ponerlo en funcionamiento.

El controlador usual es análogo, esto es, trabaja con señales continuas. En condiciones normales la planta está operando en un punto nominal deseado, en el cual todas las variables tienen valores estacionarios y no hay discrepancias entre \mathbf{b} y \mathbf{R} , por lo cual el error \mathbf{e} es nulo. Pero al haber perturbaciones o cambios en el punto nominal surge un error \mathbf{e} y una señal de actuación \mathbf{a} que activa en la planta \mathbf{P} ciertos efectos que modifican la variable controlada hasta que el error se anule. Los ajustes del controlador deben ser tales que el sistema global mostrado en la figura 2 sea estable (no oscile).

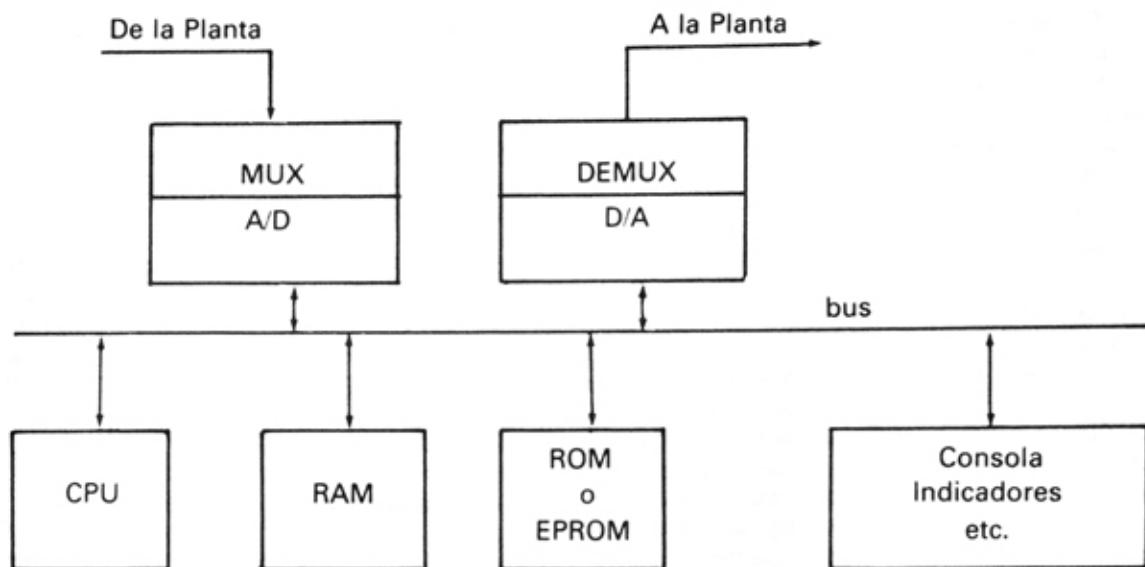


Fig. 4. Esquema de microcomputador

El controlador continuo más conocido es el tipo proporcional-integral-derivativo (PID). En este controlador, la señal a es una suma de tres señales dependientes del error e . Una de estas señales es proporcional a e (efecto **P**), otra es proporcional a la integral de e (efecto **I**) y la tercera es proporcional a la derivada, o razón de cambio, de e (efecto **D**). Los factores de proporcionalidad de estos efectos son ajustables para lograr las mejores condiciones de operación del controlador en cada caso de aplicación.

Hay controladores PID neumáticos, hidráulicos, mecánicos, eléctricos y electrónicos, pero hay una tendencia a preferir estos últimos por varias ventajas que presentan. Con controladores electrónicos se puede realizar acciones de control más complejas que las del PID, lo que no es fácil o factible con controladores no electrónicos. Además, los controladores electrónicos presentan gran facilidad de uso con computadores en esquemas de control distribuido o jerárquico.

Controladores con microcomputadores

Se mencionó antes que desde 1960 se empezó a usar computadores digitales en el control de plantas, procesos y sistemas, primero con computadores de control, luego con minicomputadores y más recientemente con microcomputadores. En el esquema de la figura 3, el computador mostrado puede ser de cualquiera de dichos tipos. Las funciones de control son realizadas, para los diversos lazos de control, mediante algoritmos programados en el computador. Se puede programar algoritmos PID u otros más complejos, lo que constituye una especie de "controladores por software". Pero la continua reducción de tamaño y costo de los microcomputadores y el aumento de su poder computacional, junto a la adición a ellos de otros elementos de circuitos integrados, como convertidores A/D y D/A, ha permitido incorporar los dichos microcomputadores en equipos de control u otros, lo que en sí constituye otra revolución.

Una dirección que ha tomado la incorporación de microcomputadores en equipos de control ha llevado a la invención de "controladores programables". Estos son equipos que permiten realizar diversas y multivariables acciones secuenciadoras para el control de equipos, tales como motores eléctricos u otros. Los controladores programables han reemplazado a los conjuntos de relés electrónicos y solenoides, tan comunes en la industria

y en otras áreas. Son fácilmente programables por teclado usando algebra de Boole u otros métodos simples.

En otra dirección, los microcomputadores permiten realizar controladores electrónicos (como el citado PID) con tecnología digital integrada, como se muestra en la figura 4. El microcomputador consta de una unidad central de procesamiento (CPU), memoria de lectura (ROM o EPROM), buses de control y comunicación y elementos de interfaz, como multiplexadores (mux, demux) y conversores (A/D y D/A).

En el caso del controlador microcomputarizado, diseñado y construido por el autor y sus colegas, en la Universidad Técnica Federico Santa María, con dos microcomputadores incorporados, se tiene las siguientes especificaciones¹².

Unidad central de procesamiento principal con estructura de 8 bits; multiplicación y división en hardware; direccionamiento para 64 Kbytes de memoria; 2 Kbytes de EPROM; 128 bytes de RAM; 2 puertas de 8 bits para entrada/salida de datos; dos puertas, de 8 bits, para salida de direcciones; una línea de comunicación bidireccional, serial, asincrónica (hasta 9.600 bauds); 2 líneas de interrupciones. Además, dispone de fuente de polarización y reloj de tiempo real programable.

Este controlador microcomputarizado permite programar acciones PID, y otras más complejas para uso en esquemas jerárquicos y distribuidos, por ejemplo.

Como se explica en la referencia 12, un controlador digital debe ser diseñado con la tecnología electrónica más reciente y de bajo costo. El empleo de dichas tecnologías asegura o permite modularidad, flexibilidad para programación, mínimo número de componentes y consumo. Debe permitir algoritmo PID, al menos, pero con extensibilidad a algoritmos y esquemas modernos más complejos. Naturalmente, el controlador debe cumplir con protocolos estandarizados para comunicación con computadores externos. Debe, asimismo, proveer compatibilidad con la instrumentación convencional y similitud de comandos que los del controlador convencional.

Control jerárquico y distribuido

En aplicaciones diversas, incluyendo las navales, hay una tendencia a distribuir la inteligencia del control a través de la industria, buque u otro sistema. Se crea así esquemas de control jerárquico y distribuido, sin entrar en detalles sobre definiciones técnicas de estos términos.

Los controladores descritos gobiernan partes específicas de una subsección de la planta o sistema y se comunican con algún microcomputador que controla o supervisa una sección. Este, a su vez, se comunica con otro minicomputador supervisor más remoto, y así sucesivamente, en varios niveles.

En tales casos, desde el punto de vista de un controlador automático puede haber varios modos de operación: control del proceso en modo manual; control del proceso en modo automático local; control del proceso en modo de supervisor; control digital directo del proceso.

El modo de control digital directo es el más interesante; en él el controlador funciona como unidad de entrada y salida de datos. Efectúa la lectura y transmisión de la variable del proceso y recibe y convierte a analógica la variable de accionamiento. Esta última es elaborada por el computador de procesos, basado en el cálculo de un algoritmo. El operador

local puede autorizar la operación en control digital directo o puede transferir imperativamente el control a un modo local.

La comunicación entre unidades puede ser, por ejemplo, con transmisión serial asíncrona basada en estándar RS-232, u otro más reciente y con algún protocolo apropiado.

Además de cumplir las funciones indicadas en la figura 2, el controlador electrónico debe aceptar más señales de referencia, como, por ejemplo, para esquemas de control de prealimentación (*feedforward*), control de razón y control multivariable. También debe aceptar otros parámetros remotos (además de **P**, **I**, **D**), producir otras señales, por ejemplo, de alarmas y accionamientos automáticos distintos a PID, generar parámetros para estos algoritmos y, finalmente, permitir elección de **R** y **a** entre más alternativas.

En la comunicación con procesos, el controlador debe continuar recibiendo un **R** remoto y **b**, enviando **a**, todas en forma analógica, conforme a ciertas normas de voltaje usuales.

En la comunicación con computadores, el controlador debe recibir señales, parámetros y órdenes sobre el modo de trabajo y debe enviar otras señales, parámetros y solicitudes sobre modo de operación, obedeciendo todo ello una norma digital, usualmente la RS-232.

En la comunicación con operadores, el controlador debe recibir posiciones de conmutadores y enviar indicaciones luminosas de **R**, **b** y **a** y los parámetros, el modo de trabajo, y otros.

Comentarlos finales

En este artículo se ha presentado una vista panorámica de la ingeniería del control automático y de su ciencia subyacente, la cibernética (en el sentido de Wiener), hasta sus aspectos más modernos y recientes, con particular mención de algunas de sus aplicaciones navales.

Más recientemente, la "inteligencia artificial" ha empezado a ser aplicada prácticamente y, en el ámbito cubierto en este artículo, ha surgido lo que se llama "control inteligente". Este ha emanado más bien de la robótica, pero se está expandiendo a otros ámbitos de la automática.²

Los principios y métodos de la cibernética y la automática son también de gran aplicabilidad en robótica y en sistemas flexibles de manufactura^{2,4}.

El Departamento de Defensa de Estados Unidos y sus servicios armados, entre ellos la armada, han apoyado fuertemente muchos de los desarrollos del pasado y del presente, descritos en este artículo, lo que también han hecho otras potencias y naciones avanzadas.

REFERENCIAS

1. K. OGATA: *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, 1970.
2. JUAN L. HERNÁNDEZ S.: "Niveles de automatización requeridos para la renovación industrial en una era de robótica e inteligencia artificial", *Gestión Tecnológica* N° 8, pp. 4-7 UTFSM, Valparaíso, 1963.
3. JUAN L. HERNÁNDEZ S.: "Algunos resultados de una investigación sobre procesos digitales distribuidos" *Gestión Tecnológica* N° 10, pp. 43-46. UTFSM, Valparaíso, 1964.
4. JUAN HERNÁNDEZ S.: "Aspectos y resultados de una investigación sobre aplicaciones de computadores en procesos y sistemas industriales", *Gestión Tecnológica* N° 11, pp. 7-10, UTFSM, Valparaíso, 1984.
5. J.A. CADZOS H.R. MARTENS: *Discrete-time and computer control systems*. Prentice-Hall, 1970.
6. R. ISERMANM: *Digitale regelsysteme*, Springer, 1977. (Traducido también al inglés).

7. K. J. ASTROM, B. WITTENMRSK: *Computer-controlled systems*, Prentice-Hall. 1984.
8. D.M. AUSLANDER, Y. TAKAHASMI, M. TOMIZUKA: "Direct digital process control: Practice and algorithms for microprocessor application", *Proceedings of the IEEE*, Feb. 1978, pp. 199-208.
9. S.W. GULLY, N. COLEMAN: "Microcomputer control algorithms for weapon pointing and stabilization", *IEEE de Control Systems Magazine*, Sept. 1981, pp 22-28.
10. C.S. CHEN: "Application of one-chip signal, processor in digital controller implementation", *IEEE Control Systems Magazine*, Sept, 1982, pp. 16-22.
11. JUAN RUIZ E., JUAN L. HERNÁNDEZ S.: "Diseño Interactivo de controladores a lineales mediante el método inecuacional zafiano modificado", *Anales del VI Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático*, Santiago, octubre 1984, pp. 34-37.
12. J.L. HERNÁNDEZ. S., R. FEICK L., F. SOLIS U., J. Glaria B.: "Controlador microcomputarizado para esquemas modernos de control automático industrial", UTFSM, Valparaíso, 1985, por aparecer.
13. JUAN L. HERNÁNDEZ S.: "Antenas adaptivas: Aplicaciones navales y aéreas", *Revista de Marina* N° 1/1983, pp., 97-100, Valparaíso, 1983.
14. JUAN L. HERNÁNDEZ S.: "Robótica: Perspectivas y aplicaciones", *Revista de Marina* N° 5/1983, pp. 609-615, Valparaíso, 1983.