

TEMA 48: *Técnicas avanzadas de regulación automática: Control de proceso en el espacio de estados. Control distribuido. Control adaptativo. Sistemas de supervisión y control. Sistemas scada. Tecnología Fuzzi.*

Esquema:

1. Técnicas avanzadas de regulación automática.
2. Control de proceso en el espacio de estados.
3. Control distribuido.
4. Control adaptativo.
5. Sistemas de supervisión y control.
6. Sistemas scada.
7. Tecnología Fuzzi.
8. Bibliografía.

1. Técnicas avanzadas de regulación automática.

La creciente complejidad tecnológica con la que se están diseñando hoy en día los sistemas, cualquiera que sea su naturaleza (electrónicos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos, etc), requiere que se disponga de controladores capaces de responder a las elevadas prestaciones que se les exige. Existen necesidades de control que, cada vez con más frecuencia, no pueden satisfacerse con controladores convencionales,

especialmente en aquellos casos en los que los procesos a controlar son muy complejos.

La tendencia moderna en los sistemas de ingeniería camina hacia una mayor complejidad, debido principalmente a los requerimientos de las tareas complejas y la elevada precisión. Los sistemas complejos pueden tener entradas y salidas múltiples y pueden variar en el tiempo. Debido a la necesidad de alcanzar los requerimientos cada vez más restrictivos en el desempeño de los sistemas de control, al aumento en la complejidad del sistema y a un acceso fácil a los ordenadores de gran potencia, aproximadamente después de 1960 se ha desarrollado la teoría de control moderna, que consiste en un nuevo enfoque del análisis y diseño de sistemas de control complejos. Este enfoque nuevo se basa en el concepto de estado. El concepto de estado por sí mismo no es nuevo, dado que ha existido durante largo tiempo en el campo de la dinámica clásica y en otros medios.

1.1. Teoría de control moderna frente a teoría de control convencional.

La teoría de control moderna contrasta con la teoría de control convencional en que la primera se aplica a sistemas con entradas y salidas múltiples, que pueden ser lineales o no lineales, en tanto que la segunda sólo se aplica a sistemas lineales con una entrada y una salida e invariantes con el tiempo. Asimismo, la teoría del control moderna es esencialmente un enfoque en el dominio del tiempo, en tanto que la teoría de control convencional es un enfoque complejo en el dominio de la frecuencia. Veamos las definiciones de estado, variables de estado, vector de estado y espacio de estados.

A pesar del importante desarrollo analítico y metodológico que se ha alcanzado, es bien conocido que la teoría de control moderna no es todo

lo exitosa que cabría esperar a la hora de plantear soluciones prácticas y viables para muchos de los procesos que se dan en el entorno industrial o en los productos actuales.

Actualmente, los diseñadores cuentan con:

- la teoría del control clásico, desarrollada en los años 1940-50 y que fue formulada empleando técnicas en el dominio de la frecuencia;
- el control óptimo, que se enriqueció notablemente en los años 1960 con la incorporación de principios estocásticos;
- las teorías de control adaptativo y del control predictivo, que a finales de los 60 y principios de los 70, respectivamente, desarrollaron metodologías para tratar sistemas de mayor complejidad que los precedentes, y por último,
- la teoría del control robusto, que se ha extendido con éxito en los años 80, una vez que se han puesto a punto ciertas metodologías de diseño que la han hecho ciertamente útil. Todas estas teorías requieren el conocimiento de los modelos matemáticos de los sistemas a los que se pretenden aplicar, mientras que
- la teoría de control borroso (fuzzy), que infiere reglas de comportamiento sencillas a partir de entornos no cuantificables o con extremada complejidad.

2. Control de proceso en el espacio de estado.

Estado.

El estado de un sistema dinámico es el conjunto más pequeño de variables (denominadas *variables de estado*), de modo que el conocimiento de estas variables en $t = t_0$, junto con el conocimiento de la

entrada para $t \geq t_0$, determina por completo el comportamiento del sistema para cualquier tiempo $t \geq t_0$.

El concepto de estado no está limitado de ningún modo a los sistemas físicos, se puede aplicar a sistemas biológicos, económicos, sociales y otros.

Variables de estado.

Las variables de estado de un sistema dinámico son las que forman el conjunto más pequeño de variables que determinan el estado del sistema dinámico.

Si se necesitan al menos n variables x_1, x_2, \dots, x_n para describir por completo el comportamiento de un sistema dinámico (por lo que, una vez que se proporciona la entrada para $t \geq t_0$ y se especifica el estado inicial en $t = t_0$, el estado futuro del sistema se determina por completo), tales n variables constituyen un conjunto de variables de estado.

Las variables de estado no necesitan ser cantidades medibles u observables físicamente. Las variables que no representan cantidades físicas y aquellas que no son medibles ni observables pueden seleccionarse como variables de estado. Esta libertad al elegir las variables de estado supone una ventaja de los métodos de espacio de estados. Sin embargo, en la práctica es conveniente elegir cantidades que se midan con facilidad para las variables de estado, si es posible, debido a que las leyes del control óptimo requerirán la realimentación de todas las variables de estado con una ponderación adecuada.

Vector de estado.

Si se necesitan n variables de estado para describir por completo el comportamiento de un sistema determinado, estas n variables de estado se consideran los n componentes de un vector x . Este vector se denomina **vector de estado**. Por tanto, un vector de estado es aquel

que determina de manera única el estado del sistema $x(t)$ para cualquier tiempo $t \geq t_0$, una vez que se obtiene el estado en $t = t_0$, y se especifica la entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$.

Espacio de estados.

El espacio de n dimensiones cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje x_1 , el eje x_2 , ..., el eje x_n , se denomina **espacio de estados**. Cualquier estado puede representarse mediante un punto en el espacio de estados.

Ecuaciones en el espacio de estados.

En el análisis en el espacio de estados, nos concentramos en tres tipos de variables involucrados en el modelado de sistemas dinámicos: variables de entrada, variables de salida y variables de estado. La representación de un determinado sistema en el espacio de estados no es única, excepto en que la cantidad de variables de estado es igual para cualquiera de las diferentes representaciones en el espacio de estados del mismo sistema.

El sistema dinámico debe incorporar elementos que memoricen los valores de la entrada para $t \geq t_1$. Dado que los integradores de un sistema de control en tiempo continuo funcionan como dispositivos de memoria, las salidas e tales integradores se consideran las variables que definen el estado interno del sistema dinámico. Por tanto, las salidas de los integradores funcionan como variables de estado. La cantidad de variables de estado necesarias para definir completamente la dinámica del sistema es igual a la cantidad de integradores que contiene el sistema.

Supongamos que un sistema de entradas y salidas múltiples contiene n integradores. Supongamos también que existen r entradas $u_1(t)$, $u_2(t)$, ..., $u_r(t)$, y m salidas $y_1(t)$, $y_2(t)$, ... $Y_m(t)$. Definimos las salidas de los

integradores como variables de estado: $x_1(t)$, $x_2(t)$, ..., $x_n(t)$. A continuación el sistema se describe mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ &\dots \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)\end{aligned}$$

Las salidas $y_1(t)$, $y_2(t)$, ..., $y_m(t)$ del sistema se obtienen mediante las ecuaciones:

$$\begin{aligned}y_1(t) &= g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ y_2(t) &= g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ &\dots \\ y_m(t) &= g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)\end{aligned}$$

Todo lo anterior, en formulación matricial quedaría:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones para las variables de estado (ecuación de estado), y para las salidas quedarían:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$$

Si las funciones vectoriales \mathbf{f} y/o \mathbf{g} involucran explícitamente el tiempo t , el sistema se denomina variante con el tiempo.

Si se linealizan las dos ecuaciones anteriores alrededor del estado de operación, tenemos las siguientes ecuaciones de estado y de salida linealizadas:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t)$$

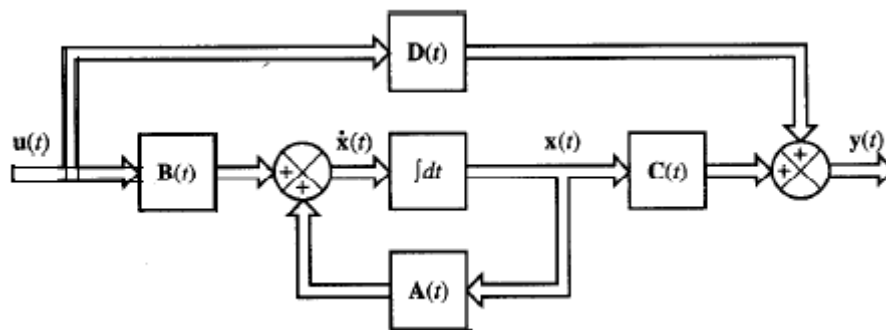
En donde $\mathbf{A}(t)$ se denomina matriz de estado, $\mathbf{B}(t)$ matriz de entrada, $\mathbf{C}(t)$, matriz de salida y $\mathbf{D}(t)$ matriz de transmisión directa.

Si las funciones vectoriales \mathbf{f} y \mathbf{g} no involucran el tiempo t explícitamente, el sistema se denomina sistema invariante con el tiempo. En este caso, las ecuaciones de estado y de salida linealizadas se simplifican en:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

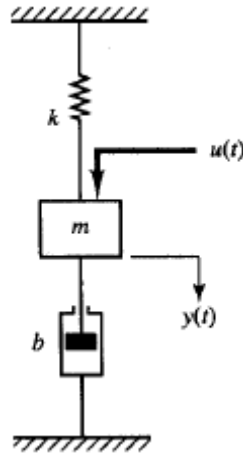
$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t)$$

Aclara un poco los conceptos el siguiente diagrama de bloques del sistema de control lineal en tiempo continuo representado en el espacio de estados:



Veamos un **ejemplo** para obtener una ecuación de estado y una ecuación de salida.

Consideremos el sistema mecánico que aparece en el esquema siguiente:



Suponemos que el sistema es lineal. La fuerza externa $u(t)$ es la entrada para el sistema, el desplazamiento $y(t)$ de la masa (m) es la salida. El desplazamiento $y(t)$ se mide a partir de la posición que sería de equilibrio si no existiese la fuerza externa. Este sistema tiene una sola entrada y una sola salida.

A partir del diagrama, la ecuación del sistema es:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = u$$

El sistema es de segundo orden, lo que significa que contiene dos integradores. Definimos las variables de estado $x_1(t)$ y $x_2(t)$ como:

$$x_1(t) = y(t)$$

$$x_2(t) = \dot{y}(t)$$

A continuación obtenemos:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m} (-kx_1 - bx_2) + \frac{1}{m} u$$

La ecuación de salida es:

$$Y = x_1$$

En forma matricial, las ecuaciones anteriores se escriben:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} u$$

La ecuación de salida se escribe como:

$$Y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

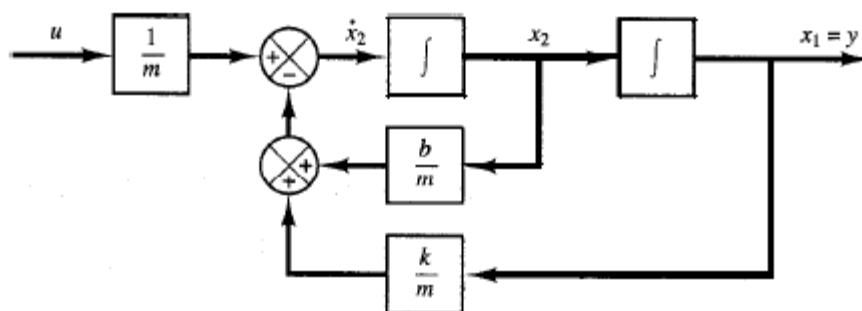
Las dos ecuaciones anteriores (la primera de estado y la segunda de salida para el sistema), se encuentran en la forma estándar:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ y &= \mathbf{cx} + Du \end{aligned}$$

En la cual:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \ 0], \quad D = 0$$

Se puede representar el funcionamiento del sistema mediante el siguiente diagrama de bloques:



3. Control distribuido.

Bajo esta denominación se engloban los sistemas destinados al control de grandes o pequeñas plantas de proceso, fundamentalmente de tipo continuo (papeleras, cementeras, petroquímicas, energía, siderurgia...), con capacidad de llevar a cabo el control integral de la planta. Se caracterizan por un fuerte componente informático y por una estructura jerarquizada.

A grandes rasgos, se constituyen por un conjunto de controladores programables (PLC's), y uno o varios ordenadores centrales enlazados por un canal muy rápido de comunicaciones.

Las ventajas que presenta el sistema de control distribuido frente a los sistemas anteriores consisten en:

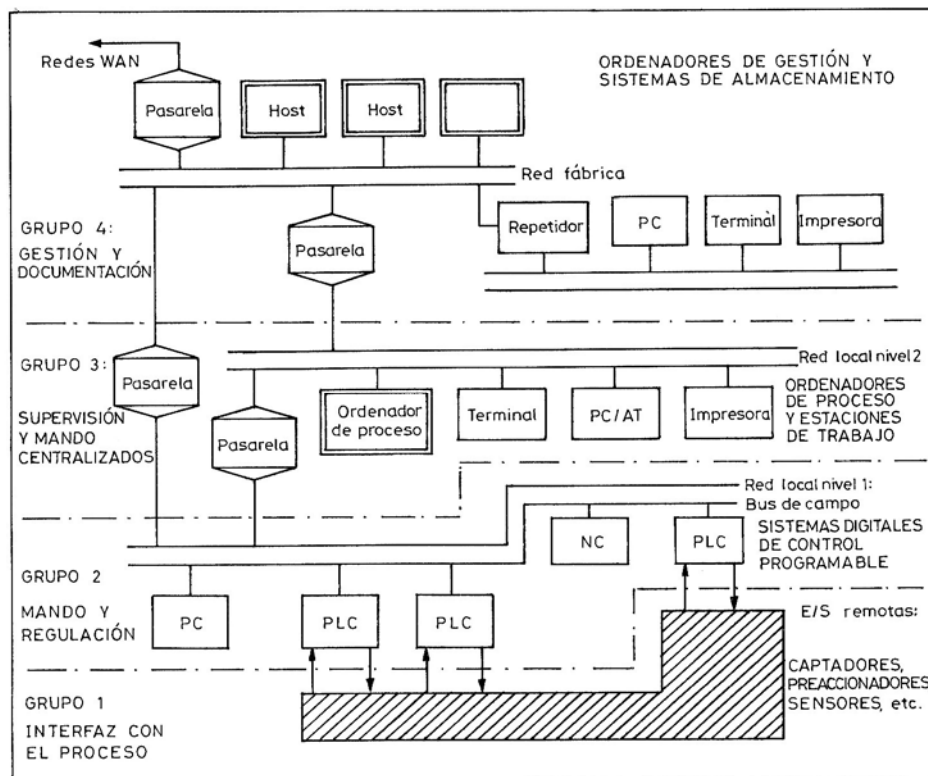
- Desarrollo de sistemas a base de módulos (hardware y software), que facilitan los cambios, el aislamiento y localización de averías, etc.
- Amplio abanico de algoritmos de regulación, seleccionables por programa.
- Redundancia en los equipos y en las comunicaciones. En las grandes instalaciones el coste del sistema de control no llega al 5% del coste total de la instalación. Para evitar paradas que pueden suponer cuantiosas pérdidas, se recurre a la duplicación de los sistemas de control y sistemas antifallo para que se detecte rápidamente la procedencia de los fallos y se informe a los usuarios de las correcciones a realizar.
- Gran capacidad de comunicaciones, gracias a la constante superación de la velocidad de transmisión de los datos.
- Mantenimiento fácil sustituyendo tarjetas o módulos y compatibilidad de los nuevos equipos con los anteriores.

En un sistema industrial de control distribuido, las tareas se suelen dividir en cuatro niveles distintos. Cada uno de estos niveles se ocupa de las tareas:

- **NIVEL 1: INTERFAZ CON EL PROCESO.** Este nivel está constituido básicamente por unidades de captación de señales y entrada/salida de datos del proceso o de un operador local. Su conexión a red permite la comunicación con sensores, captadores y accionamientos y el control manual a pie de proceso. El enlace entre unidades de este nivel suele efectuarse mediante redes simples o buses de campo, cuya estructura suele ser del tipo maestro-esclavo.
- **NIVEL 2: MANDO Y REGULACIÓN.** Constituido por unidades de control, con CPU y programas propios tales como autómatas, controladores de robots, controles numéricos, etc., que se encargan del control automático de partes del proceso. La integración en red de estas unidades permite que intercambien datos e información que son de utilidad para el control global de dicho proceso. Estas unidades suelen ejercer el papel de maestro en la comunicación con el nivel inferior (bus de campo), pero a su vez permiten el enlace con niveles superiores, enlace que suele requerir redes con protocolos más elaborados que el bus de campo.
- **NIVEL 3: SUPERVISIÓN Y MANDO CENTRALIZADOS.** Este nivel incluye una serie de unidades destinadas al control global del proceso, tales como ordenadores de proceso, terminales de diálogo, sinópticos, terminales de enlace con oficina técnica (CAD), etc. Desde estas unidades se tiene acceso a la mayor parte de variables del proceso, generalmente con el propósito de supervisar, cambiar consignas, alterar programas y obtener datos con vistas a su posterior procesado.

- NIVEL 4: GESTIÓN Y DOCUMENTACIÓN. Este nivel incluye la comunicación con ordenadores de gestión y se encarga del procesamiento de los datos obtenidos por el nivel 3 para efectos estadísticos, control de producción, control de calidad, gestión de existencias y dirección general. En algunos casos, las unidades de este nivel pueden disponer de conexión a redes más amplias de tipo WAN.

Un esquema global de esta estructura se encuentra en la figura siguiente:



Esta inteligencia, obtenida incorporando microprocesadores y subsistemas de electrónica digital permite al elemento final funciones avanzadas, como:

- Comunicaciones, que bajo el protocolo adecuado permiten al elemento transferir al ordenador "host" informaciones como valores de las variables de proceso, estado actual del elemento, configuraciones, ajustes, identificación, históricos de proceso, etc.

- Autodiagnóstico, para permitir al equipo verificar a intervalos regulares su propio funcionamiento y/o el del lazo en que se encuentra, transmitiendo al “host” cualquier anomalía.
- Parametrización del software, que permite al elemento, tanto de entrada como de salida, recibir órdenes de configuración dinámica desde el ordenador, según éste decida en función de la evolución de la planta.
- Ejecución local de ciertas funciones, que descargan al ordenador de trabajo adicional, como regulaciones PID, corrección local de errores debidos a factores externos (presión, temperatura, ...), cambios de escala, etc.

4. Control adaptativo.

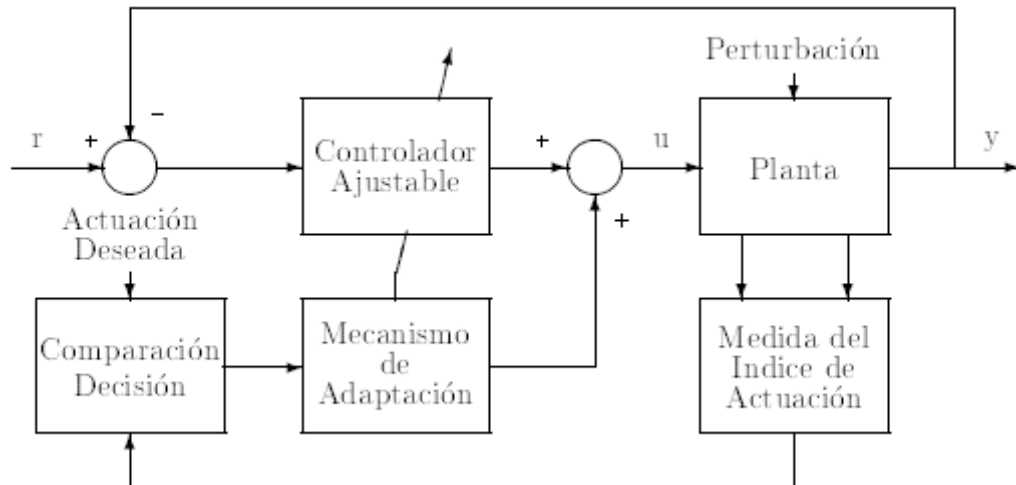
El término **adaptativo** significa cambiar el comportamiento conforme a nuevas circunstancias. Un regulador adaptativo es un regulador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a las perturbaciones.

Este mismo objetivo es el de la inclusión de la realimentación en el bucle de control, por lo que surge la pregunta de cuál es la diferencia entre control realimentado y control adaptativo.

Existen muchas definiciones de control adaptativo, siendo una de las más aceptadas la que enuncia que control adaptativo es un tipo especial de control no lineal en el que el estado del proceso puede separarse en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferente velocidad. La escala lenta corresponde a los cambios de los parámetros y, por consiguiente, a la velocidad con la que los parámetros del regulador se modifican, y la

escala rápida corresponde a la dinámica del bucle ordinario de realimentación.

El esquema básico de control adaptativo se muestra en la figura siguiente:



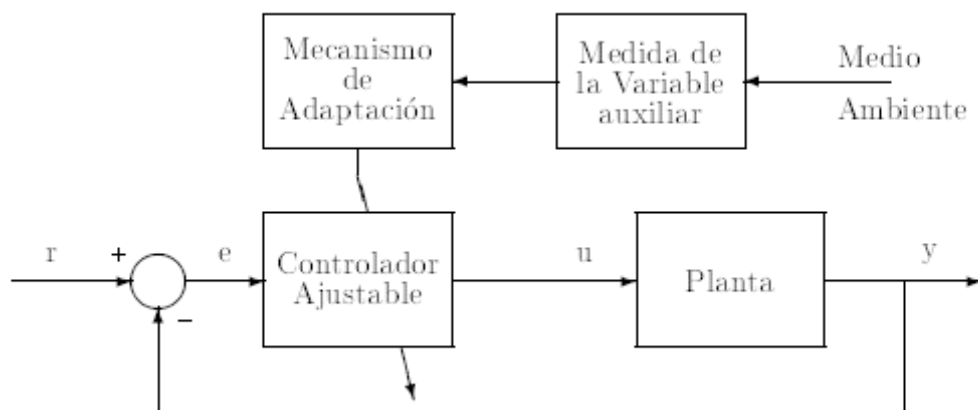
Se compone de un bucle principal de realimentación negativa en el que actúa, al igual que en los sistemas convencionales, un regulador y de otro bucle en el que se mide un cierto índice de funcionamiento, el cual se compara con el índice deseado y se procesa el error en un mecanismo de adaptación que ajusta los parámetros del regulador y en algunos casos actúa directamente sobre la señal de control. También puede existir un tercer bucle dedicado a supervisar la marcha de los dos bucles anteriores, con objeto de asegurar la estabilidad del sistema y mejorar la actuación del conjunto.

El mecanismo de adaptación presenta una solución en tiempo real al problema de diseño para sistemas con parámetros conocidos, aunque puede ir a un tiempo de muestreo superior al correspondiente al regulador e identificador.

La característica fundamental que distingue a los sistemas adaptativos es la presencia de un bucle de control en el que se compara un índice de funcionamiento.

Existen muchos tipos de controladores que proporcionan buenas características de regulación en presencia de cambios de los parámetros del sistema y que según la definición anterior no son realmente adaptativos, puesto que la adaptación se realiza en bucle abierto.

Un ejemplo muy utilizado de control adaptativo en bucle abierto es el denominado *Cambio por tabla*. Consiste en la modificación de los parámetros del controlador a partir de una tabla que ha sido calculada previamente para distintos puntos de funcionamiento, en función de una variable auxiliar. Un caso típico consiste en el control de vuelo de un avión, cuyo regulador puede ser cambiado en función de la altura de éste. El esquema del sistema adaptativo en bucle abierto sería el de la figura siguiente:



Se supone que existe una fuerte relación entre la variable auxiliar y la dinámica de los parámetros del sistema. Este tipo de adaptación tiene la ventaja de que el controlador puede ser cambiado muy rápidamente, dependiendo de la rapidez con que la variable auxiliar refleje el cambio

de la dinámica del proceso, siendo muy importante la elección de dicha variable. Sin embargo, estos reguladores consumen mucho tiempo en la realización de la tabla de parámetros, presentando así mismo algunos problemas en la conmutación de unos parámetros a otros.

Según se diseñen los bloques descritos anteriormente, podemos tener uno u otro tipo de control adaptativo, pudiéndose dividir principalmente en dos grupos:

- Controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC), y
- reguladores autoajustables (STR).

MRAC y STR se pueden considerar como una aproximación a la solución del problema de control adaptativo. La hipótesis que justifica la aproximación es que para cualquier juego de valores posibles de los parámetros de la planta y las perturbaciones, existe un controlador lineal con una complejidad fijada, tal que el conjunto de controlador y planta tienen características preespecificadas.

Las ventajas del MRAC residen en su rápida adaptación para una entrada definida y en la simplicidad de tratamiento de la estabilidad, utilizando la teoría de estabilidad de sistemas no lineales. Sin embargo, no se adapta convenientemente si la señal de entrada al sistema tiene poca riqueza.

El STR tiene la ventaja de que se adapta para cualquier caso y en particular para perturbaciones no medibles, teniendo al mismo tiempo una estructura modular, lo que hace posible la programación por bloques, siendo fáciles de realizar distintos reguladores.

5. Sistemas de supervisión y control.

Bajo la denominación de “sistemas de supervisión y control” se engloban distintos conjuntos de dispositivos orientados a la adquisición de datos, visualización, registro, actuación y regulación que permiten el control integral de un proceso. El sistema de control incluye a todos los dispositivos que sirven de interfase con el usuario y a todo el conjunto de elementos que sirven de puente entre los distintos elementos de campo (entre los elementos primarios o de medida y los finales). El elemento fundamental de estos sistemas de control será el dispositivo capacitado para la incorporación de lógica o “inteligencia” para las tareas de regulación.

La lógica incorporada puede ir desde la secuenciación de operaciones todo-nada (habitual en procesos de operaciones discretas o discontinuas), hasta la aplicación de algoritmos de control dentro de un lazo, simple o multivariable (típicamente en procesos continuos).

El algoritmo es la expresión matemática que efectúa, dentro de un lazo de control, la evaluación de la modificación analógica requerida en la variable manipulada para conseguir, reducir o eliminar el error de la variable controlada. El algoritmo lo ejecuta un controlador, dispositivo básico dentro del conjunto de elementos de un sistema de control para procesos continuos.

Como **antecedentes de los sistemas actuales** se consideran los sistemas típicamente instalados entre los años 60 y 80, algunos de los cuales perviven todavía en instalaciones en funcionamiento, a saber:

- **Sistemas con panel de control centralizado.** La primera tendencia hacia la centralización de los sistemas de control se inicia con la instalación de paneles de control centralizados, que colocaban en

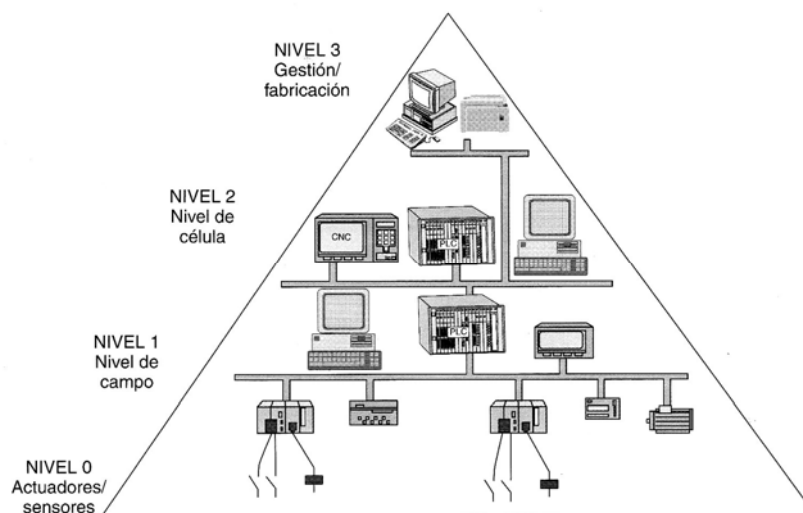
grandes armarios longitudinales todos los elementos individuales de indicación, registro y regulación de una planta o unidad de proceso. Los elementos digitales de indicación son inicialmente diales analógicos, incorporándose indicadores digitales sólo en los últimos tiempos de utilización de paneles. El panel requiere una atención importante por parte del personal (impuesta por su propia distribución física), y no facilita la gestión de datos, que se efectúa manualmente (prestándose a errores de anotación), y con una extensión lógicamente limitada. La operación está también limitada por las características de los controladores empleados, con una flexibilidad mínima y limitación de estrategias, establecidas por hardware y, por tanto, no modificables con facilidad.

- **Control digital directo.** La reducción de costes (relativa a la época), la confianza creciente y la apuesta de futuro por la utilización de ordenadores en niveles de producción desemboca en un nuevo concepto de sistemas de control: todas las tareas lógicas se confían a un único ordenador central que actúa como controlador de todos los lazos existentes, esta concepción se denomina Control Digital Directo. El ordenador centraliza la recepción de todas las señales de medida, mediante los adecuados multiplexores y convertidores A/D, procesa los diversos algoritmos de cada lazo de control y reenvía al campo la señal adecuada a cada elemento final (actuador), mediante convertidores D/A. De esta forma se elimina la multiplicación de dispositivos locales o de panel, cubriendo la misma funcionalidad, permite una mejor gestión de la información, con acceso a labores de supervisión similares o superiores a las descritas en la tecnología anterior y ofrece posibilidades de control a un nivel superior (algoritmos más complejos y flexibles). Como contrapartida, presenta una serie de inconvenientes entre los que se pueden destacar el volumen, todavía muy elevado, de los ordenadores de la época, su

alto precio y, sobre todo, su escasa fiabilidad como para hacer depender de un único elemento todas las tareas de control de un proceso y, por tanto, el total de la producción.

- **Sistemas a base de relés.** El sistema paralelo, en procesos discretos o discontinuos, a los paneles centrales de control utilizados en procesos continuos, lo constituían los armarios de relés. En éstos se establecía, mediante el cableado, la lógica de actuaciones toda-nada para la apertura-cierre de válvulas, paro-marcha de motores, etc., con la cadencia y temporización adecuadas y con la incorporación, además, siempre mediante cableados, de los enclavamientos y dependencias adecuados.

La estructura de un **sistema de supervisión y control actual**, se describe a continuación, basándose en el elemento fundamental que lo constituye, el controlador programable o PLC. Todos los elementos que intervienen en un proceso productivo hoy en día están interconectados entre sí siguiendo un sistema jerárquico de supervisión y control con estructura piramidal como el que se muestra en la figura siguiente:



Nivel 0. Corresponde al nivel más bajo del automatismo y en él se encuentran los sensores y captadores, así como los actuadores. La información se trata de forma mayoritaria a nivel de bit.

Nivel 1. Es el denominado nivel de campo. Está formado por los automatismos específicos de cada una de las máquinas controladas por autómatas programables. La información se trata de forma mayoritaria a nivel de byte.

Nivel 2. Denominado también nivel de célula. Está formado por uno o varios autómatas modulares de gran potencia que se encargan de gestionar los diferentes automatismos de campo. La comunicación se realiza en forma de paquetes de información.

Nivel 3. Es el nivel más alto del sistema automático. Está formado por uno o varios ordenadores tipo Workstation, que se encarga de la gestión total de la producción de fábrica, con aplicaciones tipo SCADA.

La unión entre los diferentes niveles se realiza con las denominadas redes de comunicación industrial. A medida que el nivel del automatismo es superior, la informática cobra más importancia respecto de la automática.

6. Sistemas SCADA.

El objetivo principal de la automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua del operador humano.

En procesos de fabricación rígidos, de poca variación en el tiempo, o de carácter autónomo, sin interdependencias con otros tratamientos anteriores o posteriores de los productos, este objetivo se cumple programando sobre los controles locales de planta las secuencias de control deseadas y cerrando los lazos de control necesarios para

mantener los valores de variables en los rangos fijados por las consignas.

Desgraciadamente, la mayor parte de los procesos industriales no cumplen aquellas condiciones, sino más bien las contrarias: han de ser flexibles para adaptar la fabricación a la demanda de forma continua, y están firmemente interrelacionados entre sí por exigencias de factores no sólo específicos de la producción, como la coordinación de las acciones o la continuidad del suministro en fabricación serie, sino también por otros como la minimización de costes de stocks, la calidad integral del producto y el impacto sobre el medio ambiente.

Estas necesidades obligan a disponer de sistemas automatizados de control de procesos industriales con un alto grado de complejidad y autonomía de funcionamiento, y funciones adicionales a las básicas de ejecución de tareas y monitorización del proceso. Aspectos como la toma automatizada de decisiones, la gestión de los menús de producción, la generación de históricos, la gestión de alarmas, etc., así como los relativos al control de calidad y mantenimiento quedan cubiertos en niveles de control de producción y supervisión de planta del modelo jerárquico de automatización visto en el apartado anterior.

Los sistemas de interfaz entre usuario y planta basados en paneles de control repletos e indicadores luminosos, instrumentos de medida y pulsadores e interruptores cableados de forma rígida y con elevados costes de instalación y mantenimiento se sustituyen en la actualidad por sistemas digitales que emplean informática industrial para la representación de la información de planta sobre las pantallas de los ordenadores de control.

Con una supervisión inteligente, que permite al operario interactuar con el proceso de forma dinámica, apoyándose en factores tales como la capacidad de almacenamiento y proceso del ordenador y su facilidad de comunicación con los controladores de planta, el operador conoce inmediatamente cualquier variación significativa del proceso mientras observa su evolución a lo largo del tiempo y sus posibles tendencias.

Mediante un sistema SCADA típico, el control directo de la planta lo realizan los controladores autónomos digitales y/o autómatas programables, mientras que el ordenador, conectado con ellos, realiza las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de la información del proceso y control de producción. En esta estructura, el ordenador no actúa directamente sobre la planta, sino que se limita a la supervisión y control de los elementos de regulación locales instalados en ella, además de procesar y presentar la información. Eventualmente, podría también ejercer acciones directas de control (lectura de sensores, activación/desactivación de actuadores), por medio de un hardware adicional conectado a sus buses internos, aunque no es ésta la opción más frecuente.

El ordenador u ordenadores se apoyan en la estructura de dispositivos locales, uniéndose a ellos mediante líneas de interconexión digital (buses de campo, redes locales), por donde recoge información sobre la evolución del proceso (adquisición de datos), y envía las órdenes o comandos para el gobierno del mismo (control de producción): arranque, parada, cambios de consignas, etc.

Los programas necesarios, y en su caso el hardware adicional que necesiten, se denominan en general sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

Estos paquetes están ya en disposición de ofrecer unas prestaciones impensables hace unos pocos años:

- posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias,
- generación de históricos de señal de planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo,
- creación de informes, avisos y documentación en general,
- ejecución de programas, que modifican la ley de control o incluso el programa total sobre el autómatas, bajo ciertas condiciones,
- posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador, y no sobre la del autómatas, menos especializado para estas tareas, etc.

Con ellas, se pueden desarrollar aplicaciones basadas en PC, con captura de datos, análisis de señales, presentaciones en pantalla, envío de resultados a disco o impresora, control de actuadores, etc.

Los paquetes SCADA suelen estar formados por dos programas: editor y ejecutor (run-time). Con el primero se generan las aplicaciones descritas, aprovechando los editores, macros, lenguajes y ayudas disponibles y con el segundo se compilan para obtener el fichero .EXE de ejecución continua tras la puesta en tensión o el arranque.

7. Tecnología Fuzzi.

La aplicación de las restantes teorías de control moderno requiere el conocimiento de los modelos matemáticos de los sistemas a los que se pretende aplicar.

En aquellos sistemas relativamente complejos o cuyo comportamiento interno es de difícil caracterización, resulta muy difícil y laboriosa la obtención de un modelo matemático representativo adecuado que de pie a la realización de estrategias de control mediante la teoría de control moderno, debido a la difícil caracterización analítica de los comportamientos no lineales y a la incertidumbre inherente a un gran número de estos procesos industriales. En muchos casos, el control de los procesos requiere la atención continuada de operadores expertos que generan acciones directas de control basándose en la experiencia y heurística acumuladas sobre el proceso, o bien que supervisan su funcionamiento mediante algoritmos simples de regulación. Prontamente se hace evidente la importancia en el control de aquellos que eran capaces de tomar decisiones a partir de información imprecisa de carácter no numérico.

7.1. Control Fuzzy y teoría de conjuntos borrosa.

La lógica borrosa, que se basa en la teoría de conjuntos borrosa, utiliza dichos conjuntos para modelar la incertidumbre y los conceptos imprecisos o ambiguos. Mientras que en la teoría de conjuntos clásica un elemento pertenece o no a un conjunto, la teoría de conjuntos borrosa reconoce que puede haber elementos que pertenezcan parcialmente a más de un conjunto. En ese sentido, los conjuntos borrosos permiten hacer un tratamiento lingüístico de elementos y, aunque ésta nos sea la manera perfecta de describir la realidad, sin duda ya es una forma muy adecuada de hacerlo.

Una de las formas básicas de representar el conocimiento es bajo la forma de reglas de decisión o control del tipo “Si ... (condición) ... entonces ... (decisión)”. Pero, generalmente, el conocimiento de un experto (o la información que se obtiene de un proceso), se explica en

términos de conceptos imprecisos e implica operaciones y decisiones no bien definidas o concretas.

Los conjuntos borrosos representan, en cierta manera, “valores lingüísticos” de una determinada magnitud. Surge así el concepto de “variable lingüística”, como aquella que toma valores “lingüísticos”, p.ej. Altura = “muy alto”, “bajito”, etc., frente a la variable numérica clásica, que sólo admite valores numéricos concretos, p.ej. Altura = 1,95 m, 1,54 m, etc.

La lógica borrosa analiza los métodos y principios de razonamiento a partir de proposiciones imprecisas que relacionan magnitudes y valores lingüísticos y cualitativos modelados por conjuntos borrosos. El elemento primario de la lógica borrosa es el lenguaje natural, y sus esquemas de razonamiento son esquemas de “razonamiento aproximado”, con proposiciones imprecisas, típicamente de carácter lingüístico, como podrían ser las reglas que se obtienen a partir de la expresión lingüística del conocimiento de un operador humano versado en el control de un determinado proceso. En suma, la lógica borrosa, o teoría de conjuntos borrosa, encuentra sus aplicaciones más importantes en sistemas complejos que contienen no linealidades en su forma de operar y que por extensión ha encontrado una de sus aplicaciones más fructíferas en el control de:

- Sistemas demasiado complejos como para ser modelizados con precisión.
- Sistemas con moderadas o significativas no linealidades operacionales.
- Sistemas que tienen incertidumbre tanto en su definición como en sus entradas.

7.2. Aplicaciones de la lógica borrosa.

Algunos de los campos en los que se ha aplicado con éxito la lógica borrosa son:

- Control de sistemas.
- Modelado.
- Sistemas de información inteligente.
- Reconocimiento de formas.
- Tratamiento de señal.
- Análisis de decisiones.
- Sistemas para vehículos inteligentes.

Probablemente sea el control de procesos el área en que la lógica borrosa ha tenido mayor difusión, desarrollándose sistemas de supervisión, reguladores con control borroso directo, reguladores híbridos e incluso mecanismos de sintonía de otros algoritmos de control.

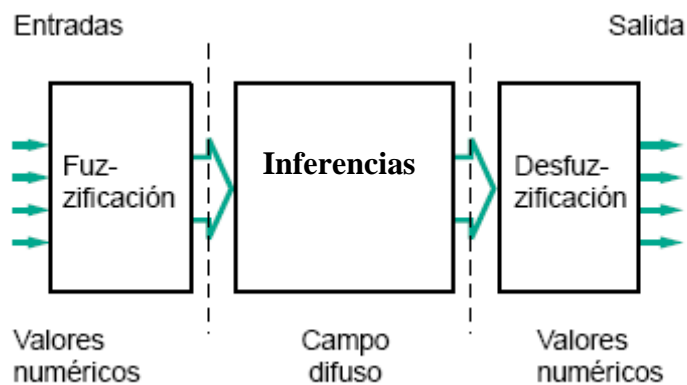
Los datos que se ponen en juego en la regulación de procesos complejos pueden provenir de diferentes fuentes: en algunas ocasiones tales datos son objetivos y exactos (medidas efectuadas por sensores precisos); otras, en cambio, son objetivos poco fiables debido a la existencia de perturbaciones y ruidos que pueden falsear las medidas; por último, los datos de entrada incluso pueden ser subjetivos y vagos, como aquellos obtenidos a partir de la observación humana.

La introducción de la heurística en forma de reglas puede complementar y mejorar el comportamiento de un algoritmo de control discreto, como el de un regulador PID, introduciendo reglas “clásicas” basadas en la lógica binaria clásica. Sin embargo, la experiencia de un experto puede aparecer recogida en un conjunto de reglas cualitativas del tipo:

**“Si (la *temperatura* es *ALTA*) Y (la *presión* es *BAJA*)
ENTONCES
(*reducir LIGERAMENTE la Apertura de la Válvula*)”**

que pueden entenderse como combinaciones de ciertas variables y magnitudes lingüísticas dentro del ámbito de la teoría de conjuntos borrosos y la lógica borrosa.

Los controladores basados en lógica borrosa pueden considerarse como controladores digitales en los que la señal de control que se aplica sobre el proceso se obtiene tras una “inferencia borrosa” a partir de las variables actuales del proceso (normalmente salida y consigna actuales), y una matriz de reglas (base de conocimiento), obtenida como un protocolo lingüístico proporcionado por ingenieros u operadores del proceso. El esquema sería el siguiente:



En definitiva, el desarrollo de controladores basados en reglas de naturaleza heurística necesita de los conjuntos borrosos para modelar los conceptos e informaciones vagas e imprecisas, necesita de una teoría de conjuntos borrosos que defina las propiedades y operaciones características de este nuevo tipo de conjuntos, que nos permitan desarrollar operadores y conectivos lógicos adecuados para combinar la información cualitativa formando proposiciones lógicas que reflejen la

heurística de control (reglas), así como realizar los esquemas de inferencia o “razonamiento aproximado” que requiere esta nueva concepción lógica (lógica borrosa).

7.3. Conclusión Fuzzy.

Como conclusión, podemos decir que la aplicación de la lógica borrosa al control es adecuada cuando se tienen que manejar numerosas variables, cuando el modelo matemático del proceso a controlar no existe o es difícil de obtener y cuando el nivel de ruido de las medidas es elevado o es importante utilizar sensores de bajo costo. Los controladores borrosos son, de hecho, más fáciles de implementar, más sencillos de describir y verificar y pueden mantenerse y mejorar con mayor precisión y en menos tiempo que los controladores convencionales, como el clásico PID. La capacidad de la lógica borrosa para desarrollar sistemas de control ha llegado tan lejos en la actualidad que ya no sólo se piensa en utilizar estos controladores como técnicas apropiadas para desarrollar algoritmos de control intrínsecamente no lineales, sino que se están dando avances para implementar sistemas borrosos adaptativos capaces de ajustarse a las variaciones del entorno de regulación.

8. Conclusión del tema.

Este tema abarca una serie de técnicas modernas y avanzadas de regulación automática y de cierta dificultad. Tan es así que el autor opina que incluso, en la primera de ellas, (el control en el espacio de estados), no es posible evitar una cierta formulación matemática si realmente se pretende reflejar el significado de la teoría.

En este tema la estructura es sencilla y el mayor esfuerzo habrá que realizarlo en la captación de una forma real de los conceptos que están detrás de cada una de las técnicas modernas de regulación (sus denominaciones son bastante conocidas en términos generales pero no es así con sus conceptos). En definitiva, un tema con contenidos quizá no muy conocidos que, a diferencia de otros, sí requerirá un cierto esfuerzo de estudio, más intenso, por parte del lector.

9. Bibliografía.

Para la elaboración de este tema el autor ha consultado la documentación referente a las publicaciones que a continuación se detallan.

Se incluyen también publicaciones que el autor considera interesantes para ampliar conocimientos relativos al tema.

- “Control adaptativo y robusto”. Universidad de Sevilla.
- “Sistemas de control basados en lógica borrosa: Fuzzy control”. Ikerlan – Morón.
- “Autómatas programables”. Marcombo.
- “Cuaderno técnico 191: La lógica difusa”, Schneiderelectric.
- “Manual de instrumentación y control de procesos”. Alción.

Email: información@preparadoresdeoposiciones.com • Web: <http://www.preparadoresdeoposiciones.com>

NOTAS

REV.: 02/08