

Control de procesos industriales

Criterios de Implantación

Antonio Creus Solé



marcombo
BOIXAREU EDITORES

PRODUCTICA

Colección «Productica»
Dirección técnica: José Mompín Poblet

© MARCOMBO, S.A., 1988
Reservados todos los derechos
de publicación en cualquier idioma por
MARCOMBO, S.A.
Gran Via de les Corts Catalanes, 594
08007 Barcelona (España)

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema de informática ni transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros métodos sin el permiso previo y por escrito de los propietarios del Copyright.

ISBN: 84-267-0713-0
Depósito Legal: B. 32.070-88
Impreso en España
Printed in Spain
Fotocomposición: FOINSA - Gran Via de les Corts Catalanes, 569 -
08011 Barcelona
Impresión: A.G. Portavella, S. A. - Diputación, 427 - 08013 Barcelona

Presentación

La incorporación de las nuevas tecnologías en la producción industrial ha obligado a los expertos a desarrollar técnicas de control apoyadas en nuevas generaciones de maquinaria y de instrumentos para lograr un mayor rendimiento en el proceso productivo.

Por un lado, se trabaja en la innovación sobre el diseño de nuevas plantas industriales, y por otro, en la modernización y actualización de las ya existentes, sin que ello se efectúe con un coste excesivo que haga peligrar su supervivencia.

A lo largo del texto queda de manifiesto que va a ser diferente el tratamiento dado al proyecto de creación de una instalación industrial, respecto al planteamiento adoptado para renovar unas instalaciones que ya están prestando servicio. Los objetivos de ambos métodos de trabajo, van a consistir en lograr productos con unas especificaciones cada vez más ajustadas al resultado ideal, lo que permitirá aumentar su competitividad en el mercado.

Este resultado se logrará si se dispone de la máxima información sobre todas las etapas del proceso productivo, estudiando todas las variables que intervienen en el mismo (coste energético, materias primas, residuos de fabricación, material desechado, etc.), de modo que puedan introducirse inmediatamente los ajustes necesarios en cualquier punto de la línea de fabricación en donde se haya detectado la posible anomalía.

El control digital, en general, y el distribuido, en particular, son los que detectan las actuaciones de la gestión del proceso industrial para que ésta pueda efectuar las comunicaciones y órdenes adecuados a los diferentes sectores de la instalación industrial. Los transmisores y controladores efectúan la conexión al proceso, proporcionando las estrategias de control y de optimización en las diferentes secciones de la misma. Para ello, se valen de todos los instrumentos adecuados, a ser posible inteligentes, de los sistemas expertos, y utilizando sistemas de control avanzado.

En este libro se pretende dar una descripción de todos los elementos que deben tenerse en cuenta en el momento de efectuar el estudio del control de un proceso industrial, tanto si se refiere a instalaciones de nueva creación como a la modernización de las ya existentes.

El autor

Índice general

INTRODUCCIÓN	9
La necesidad del control automático	9
Definición de control automático	10
Componentes del control automático	11
Punto de vista histórico	12
Tipo de proyectos de modernización	20
SISTEMAS DE MEDIDA DE LAS VARIABLES DE PROCESO	21
Medida de presión	21
Medida de caudal	23
Medida de nivel	30
Temperatura	44
Otras variables	49
Seguridad, fiabilidad, disponibilidad	61
COMPONENTES LOCALES DEL SISTEMA DE CONTROL	63
Introducción	63
Transmisores	63
Transmisores neumáticos	65
Transmisores electrónicos	66
Transmisores inteligentes	66
Autocontroladores	69
Válvulas de control y elementos finales	69
Seguridad, disponibilidad	73
COMPONENTES DE PANEL DEL SISTEMA DE CONTROL	75
Acciones de control	75
Controladores neumáticos	85
Controladores electrónicos	85
Controladores digitales	86
Control con ordenador personal	87
Controlador universal	88
CONTROL DISTRIBUIDO	89
Aparición del control distribuido	89
Tipos de controladores	90
Via de comunicaciones	92
Estación del operador	93
Seguridad, fiabilidad, disponibilidad	95

SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO	97
Generalidades	97
Calderas de vapor	97
Reactores	98
Control estadístico del proceso	99
Sistemas expertos	100
PLANTAS ANTIGUAS	105
Criterios de implantación	105
Aspectos a considerar. Normalización	105
Planificación	111
Instrumentos de campo	116
Válvulas de control	118
Instrumentos de panel	118
Modernización	119
NUEVAS PLANTAS	121
Generalidades	121
Ingeniería	122
Instalación	129
Calibración	131
Puesta en marcha	132
Mantenimiento	136
BIBLIOGRAFÍA	139

Introducción

LA NECESIDAD DEL CONTROL AUTOMÁTICO

La medición y el control en la industria son muy importantes, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La implantación del control automático de procesos industriales es hoy en día una actividad que tiene cada vez más un carácter multidisciplinario y en la que intervienen aspectos técnicos, científicos y económicos. La visita a cualquier industria de proceso, química en particular, sugiere la idea de que la fábrica pertenece ya al futuro en el sentido de que el movimiento y transformación de las materias tiene lugar "automáticamente", al parecer sin intervención humana. Los procesos que se realizan pueden ser continuos, con un flujo ininterrumpido de materias a través de los distintos mecanismos de transporte y transformación —transportes neumáticos y de cinta, secaderos, evaporadores, hornos, cristalizadores...— y discontinuos (*batch*) con un flujo intermitente de materias, tal como ocurre en los reactores discontinuos.

En ambos casos, el control del proceso colabora en la fabricación de materiales de alto valor de venta a partir de la transformación química y mecánica de las materias primas. Así ocurre en la industria petroquímica, en la obtención de aceites y gasolina a partir del crudo, en la industria alimenticia, en la fabricación de glucosa a partir del trigo, en la industria metalúrgica con los tratamientos térmicos de metales y, en general, en las industrias papeleras, en la del vidrio, en la fabricación de pinturas, en la industria farmacéutica, etc.

En todos estos procesos se controlan diversas variables, la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, el pH, la conductividad, y se efectúan medidas de las propiedades físicas y químicas de los materiales objeto de análisis.

La necesidad de producir productos competitivos con un alto rendimiento, que tengan características repetitivas y cuya calidad se mantenga estable dentro de las especificaciones de fabricación, la creciente preocupación en el ahorro de la energía consumida en la fabricación y en la conservación del medio ambiente, obligan a controlar automáticamente el proceso industrial, puesto que las condiciones de fabricación indicadas son imposibles o muy difíciles de conseguir realizando exclusivamente un control manual. De aquí que la continua evolución de la técnica haya llevado consigo una evolución paralela de los instrumentos de control de proceso, produciendo aparatos y modos de control cada vez más perfeccionados.

DEFINICIÓN DE CONTROL AUTOMÁTICO

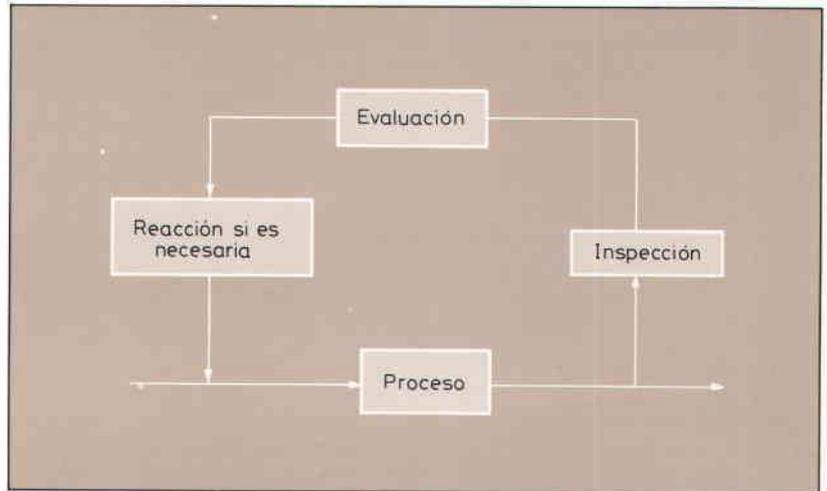
El significado del término «control automático de procesos» es un caso particular del término «automatización», el cual puede definirse de dos formas extremas:

Control automático de la fabricación de un producto a través de varias etapas con el uso libre de maquinaria para ahorrar trabajo manual y esfuerzo mental (Diccionario inglés de Oxford).

La sustitución o ayuda del esfuerzo mental del hombre en la fabricación de un producto (Thomas 1969).

La automatización se basa en el concepto de lazo o bucle de control de retroalimentación representado en la figura adjunta.

Lazo de control de retroalimentación considerando el concepto de automatización global de la fábrica.



El significado de los bloques dibujados en esta figura es:

Inspección. Medir el objeto fabricado, lo que en control de procesos equivale a captar la variable (presión, caudal, nivel, temperatura...) a través de un elemento de medida (tubo Bourdon, placa-orificio, termopar...) o de transmisión.

Evaluación de la medida en relación al algoritmo de control del proceso de fabricación, es decir comparación de la variable de proceso con el valor deseado o punto de consigna y elaboración de la señal de corrección. Por ejemplo, si se desea que el nivel de un tanque sea del 50 %, el sistema dará un valor de corrección, calculado a partir de la diferencia entre el valor real del nivel y el punto de consigna del 50 %, que depende del tipo de control y de las acciones de control que posea el aparato controlador.

Respuesta del elemento final de control, si dicha respuesta es requerida. En el caso del control de procesos, la respuesta será requerida si el valor de la variable debe ser controlado, actuando generalmente sobre una válvula

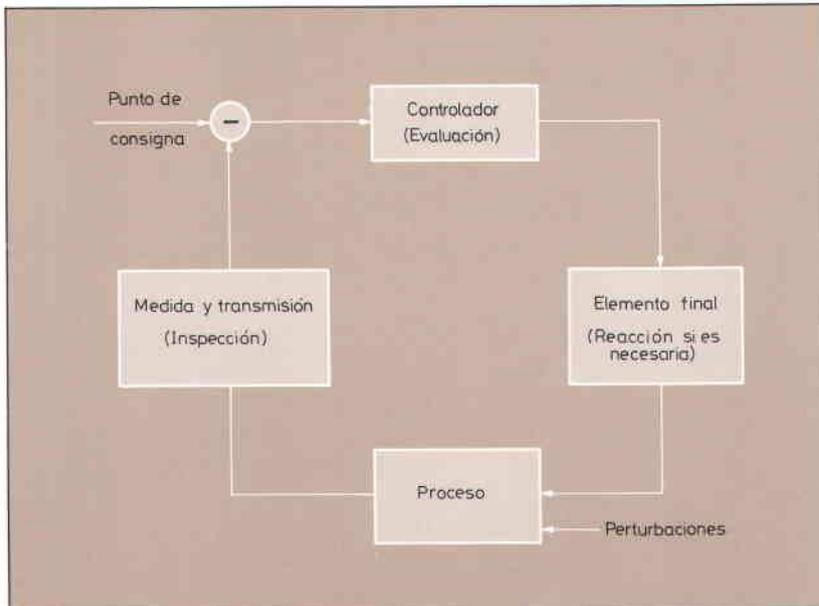
de control, sobre una bomba dosificadora o sobre la resistencia calefactora de un horno, dependiendo del tipo de proceso a controlar.

Estos términos se definieron en conjunto como *cibernética* (el arte del timonel; palabra griega *kybernetes*) por el matemático norteamericano Norbert Wiener en 1947.

COMPONENTES DEL CONTROL AUTOMÁTICO

El control clásico en la industria se basa fundamentalmente en la existencia de tres instrumentos: el transmisor, el controlador y la válvula de control, relacionados a través del lazo o bucle de retroalimentación.

El *transmisor* envía la variable de proceso en forma de señal neumática ($3 \div 15 \text{ psi}$ o $0,2 \div 1 \text{ Kg/cm}^2$) o electrónica ($4\text{--}20 \text{ mA c.c.}$) hacia el receptor (indicador, registrador, o controlador). Actualmente ya existen en el mercado instrumentos transmisores que dan directamente su señal de salida en forma digital, con lo cual el controlador digital por microprocesador del panel o de la consola de control, que recibe dicha señal, puede procesarla directamente, sin necesidad de ninguna conversión intermedia, lo que redundará en precisión de la medida y repetibilidad en el control.



Relación con el control de procesos.

El *controlador* compara el valor recibido de la variable con el valor deseado o punto de consigna y de dicha comparación calcula un valor de corrección que es enviado al elemento final de control (válvula, servomotor, bomba dosificadora, tiristor...).

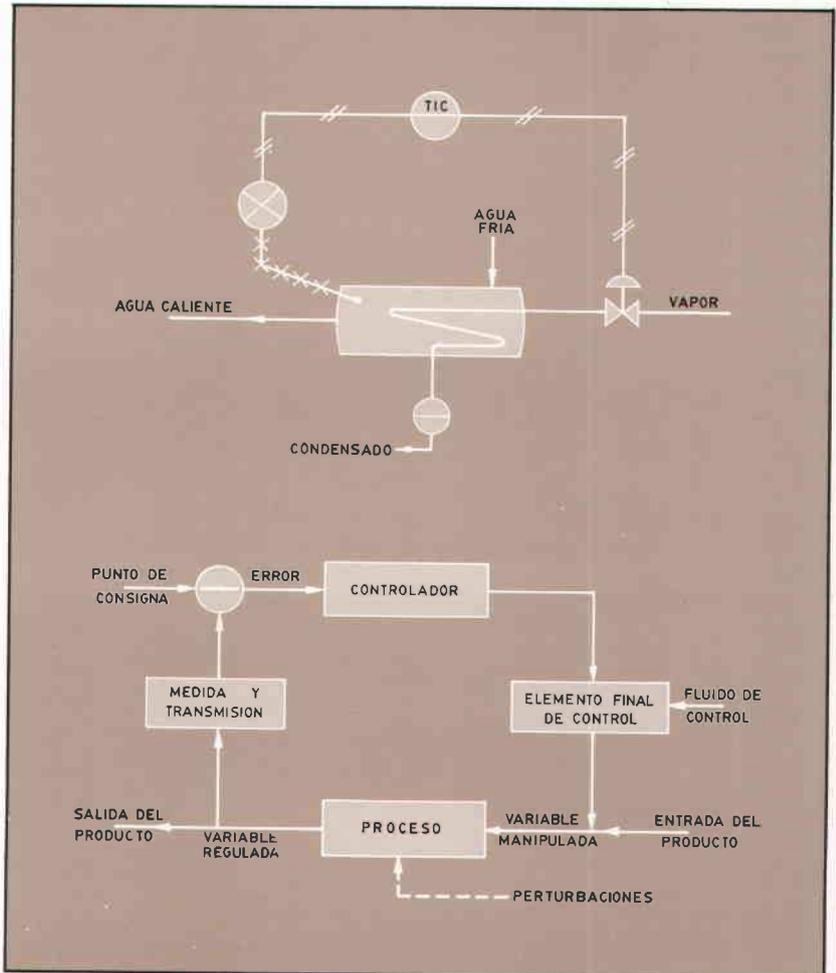
El *elemento final de control* actúa sobre el proceso modificando el valor del fluido de control, que cambia a su vez el valor de la variable medida. Pueden existir diferentes tipos de elementos finales. La válvula de control

es el elemento más utilizado en la industria química, y es accionada neumáticamente, eléctricamente a través de un servomotor, o electrónicamente a través de un transductor electroneumático o digital.

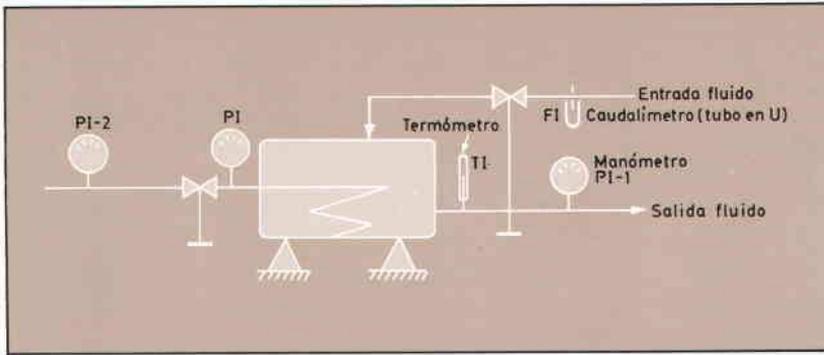
PUNTO DE VISTA HISTÓRICO

El desarrollo de los instrumentos de medición y control se inició con el uso de manómetros, termómetros y válvulas, montados localmente al

Control clásico formado por el transmisor de la variable del proceso, el controlador y la válvula o elemento final de control. En la parte superior se observa el intercambiador de calor y debajo el diagrama de bloques.



lado del proceso. El control era totalmente manual, con muchos operadores vigilando las variables y accionando las válvulas manuales para controlar el proceso. En esta fase la instalación del proceso era empírica, y estaba basada en el conocimiento y las experiencias anteriores obtenidas durante la marcha de la planta. Era necesario alargar los capilares de los instrumentos de temperatura y los tubos de conexión de presión para que el operador pudiera conducir satisfactoriamente el proceso.

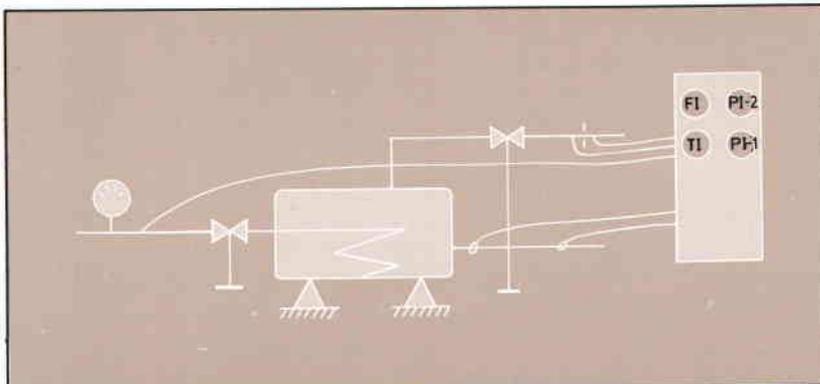


Control local de procesos clásico donde se ve la distribución de los instrumentos que permiten la vigilancia del operador.

La siguiente etapa fue la centralización de los instrumentos en un panel de control para que el operador pudiera vigilar simultáneamente las variables relacionadas con el proceso. Sin embargo, ello representaba tener dentro del panel de control tubos conteniendo fluidos, que en un momento determinado y por avería de las conducciones podían escaparse y destruir el panel, aparte del peligro potencial que representaban para el operador.

El desarrollo de los transmisores neumáticos permitió separar los fluidos del proceso del panel de control, situándolo a distancias de 100 + 200 metros del proceso. Hacia 1940 apareció el controlador neumático del tamaño de una caja, lo que permitió el control automático del proceso, no siendo ya necesario que el operario estuviera vigilando continuamente los valores de las variables y accionando manualmente las válvulas. En 1947 apareció el instrumento neumático miniatura modular con conmutación automática-manual incorporada.

Continuando el desarrollo de la instrumentación, en 1950 aparece el instrumento electrónico a válvulas, que en el año 1960 pasa a ser miniatura. Ambos instrumentos miniaturizados, neumáticos y electrónicos, se incorporan ya a los paneles, llamados de alta densidad, donde la visualización simultánea y la interpretación del proceso, a través del movimiento de los índices de las variables y de las válvulas, comienza a presentar



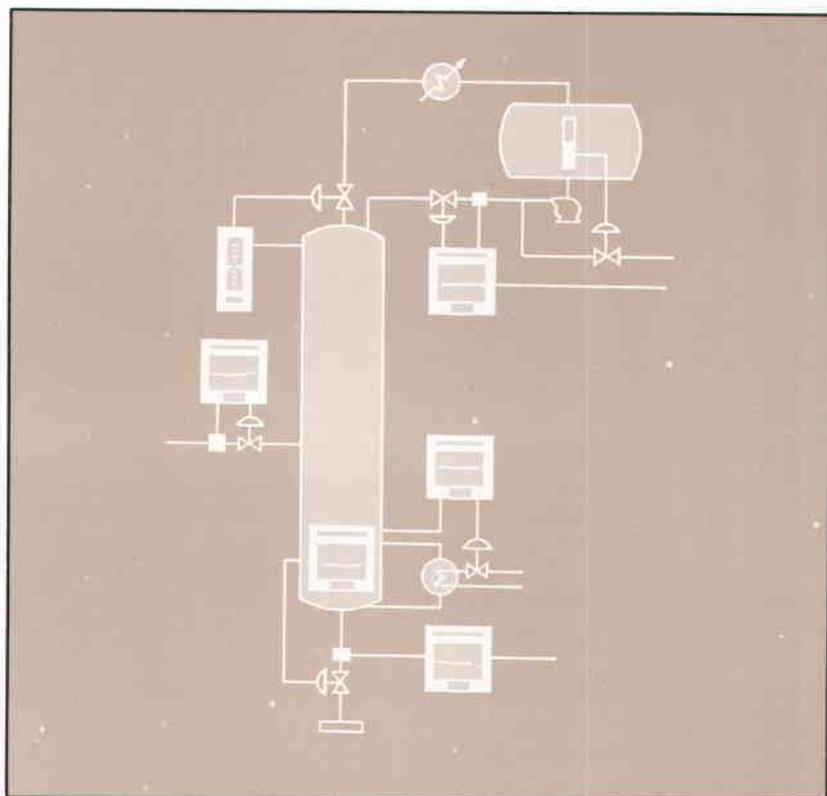
Panel de control de procesos que permite la vigilancia centralizada del operador gracias a la aparición de los transmisores.

Control de procesos industriales: criterios de implantación

problemas al operador, debido a su elevado número y a la longitud del panel de control. Aparecen soluciones parciales a este problema en la forma de paneles gráficos que incorporan los instrumentos al gráfico, de paneles semigráficos, con el gráfico dispuesto en la parte superior del panel de control, y de proyectores de diapositivas que presentan rápidamente partes del proceso. Asimismo, los instrumentos adecuan su aspecto y su montaje a esta necesidad de interpretación del proceso, mejorando la comparación de la variable con el punto de consigna y la visualización de los índices mediante colores.

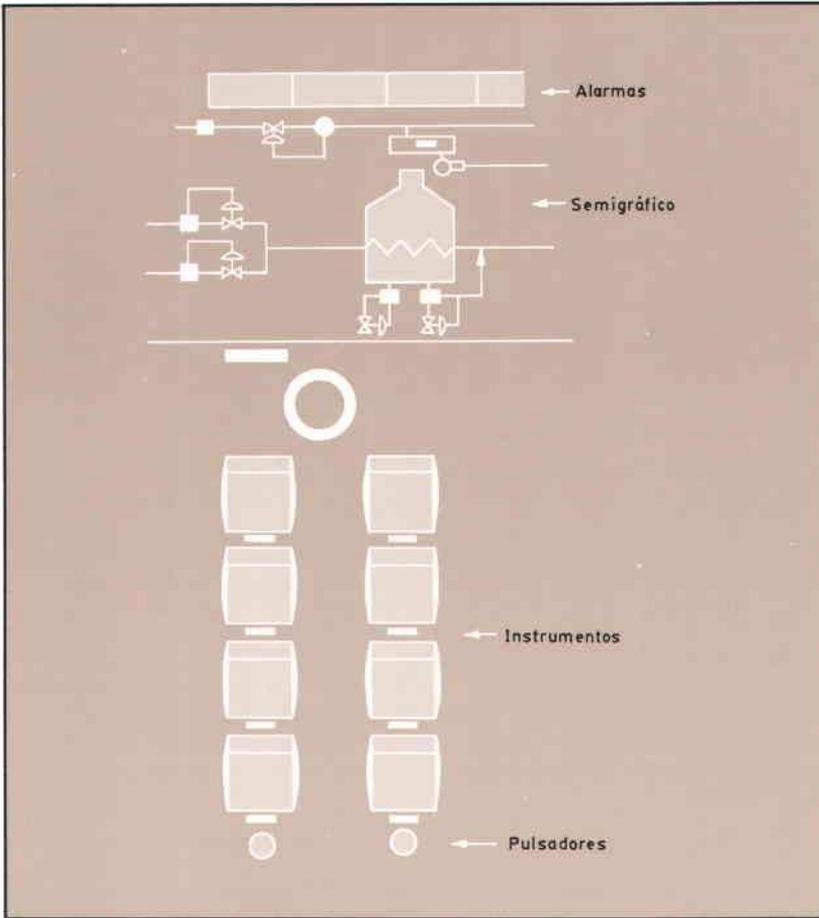
Entre 1960 y 1965 aparecen los primeros computadores prácticos de proceso, utilizados inicialmente en las centrales térmicas, industrias metalúrgicas, químicas y petroquímicas.

Panel de control de procesos con los instrumentos intercalados en las líneas del gráfico.



Los instrumentos de panel separan la parte de control de la indicación y mando del punto de consigna, para facilitar así la labor del equipo de mantenimiento y, de este modo, la parte de visualización del panel pasa a estar en la sala de control mientras que las unidades de control residen en una habitación vecina.

Hacia los años 60 aparecen en el mercado los ordenadores digitales que empiezan a aplicarse en la industria, inicialmente en el *control digital*



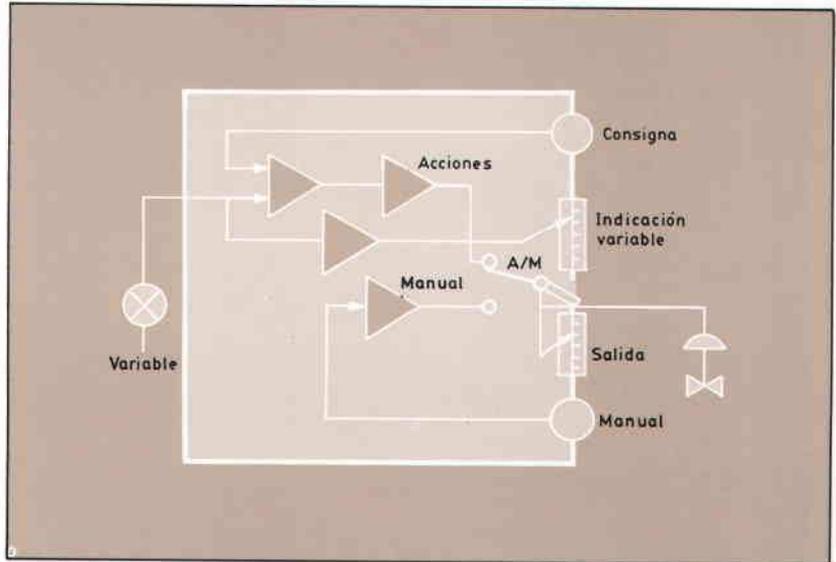
Panel semigráfico con el gráfico en la parte superior del panel y los instrumentos en su parte inferior. Los códigos de representación de los instrumentos permiten que el operador los relacione con el proceso.

directo (D.D.C.), y más adelante en el control de puntos de consigna (S.P.C.).

En el control digital directo (D.D.C.), el ordenador sustituye el instrumento controlador, efectuando los cálculos —de acuerdo con las acciones de control deseadas— y enviando las correspondientes señales de salida a las válvulas de control. Esta función de cálculo la efectúa secuencialmente para cada variable de entrada analógica o digital y para cada válvula de control del lazo correspondiente.

El problema que presenta el control digital directo es el fallo de sus componentes. En particular, los fallos en el ordenador dan lugar a la pérdida total del control de la planta, y aunque se consiga una protección parcial mediante estaciones de transferencia manual-automática y con controladores adicionales en los lazos críticos, la planta deja de ser controlada en condiciones óptimas. Lógicamente, un computador adicional interconectado proporcionaría una capacidad total de control a la instalación, pero ésta es una solución cara que en la época de su aparición sólo

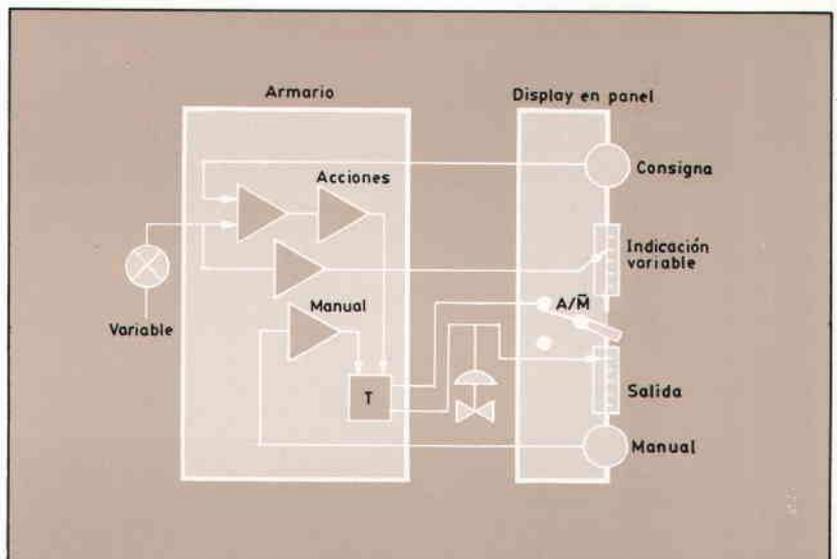
Instrumentos miniatura que permiten un montaje más compacto con una mejor visualización del estado de la planta.



estaba al alcance de las grandes empresas. En la actualidad, en lugar de dos computadores existen placas o circuitos impresos de algoritmos de control por duplicado o triplicado, situados dentro de la unidad de control; estos están fabricados de tal forma que los fallos que se presentan sólo degradan gradualmente el control de la planta (control distribuido), de tal modo que en el límite (que rara vez se alcanza) el control de la planta pasa a ser manual.

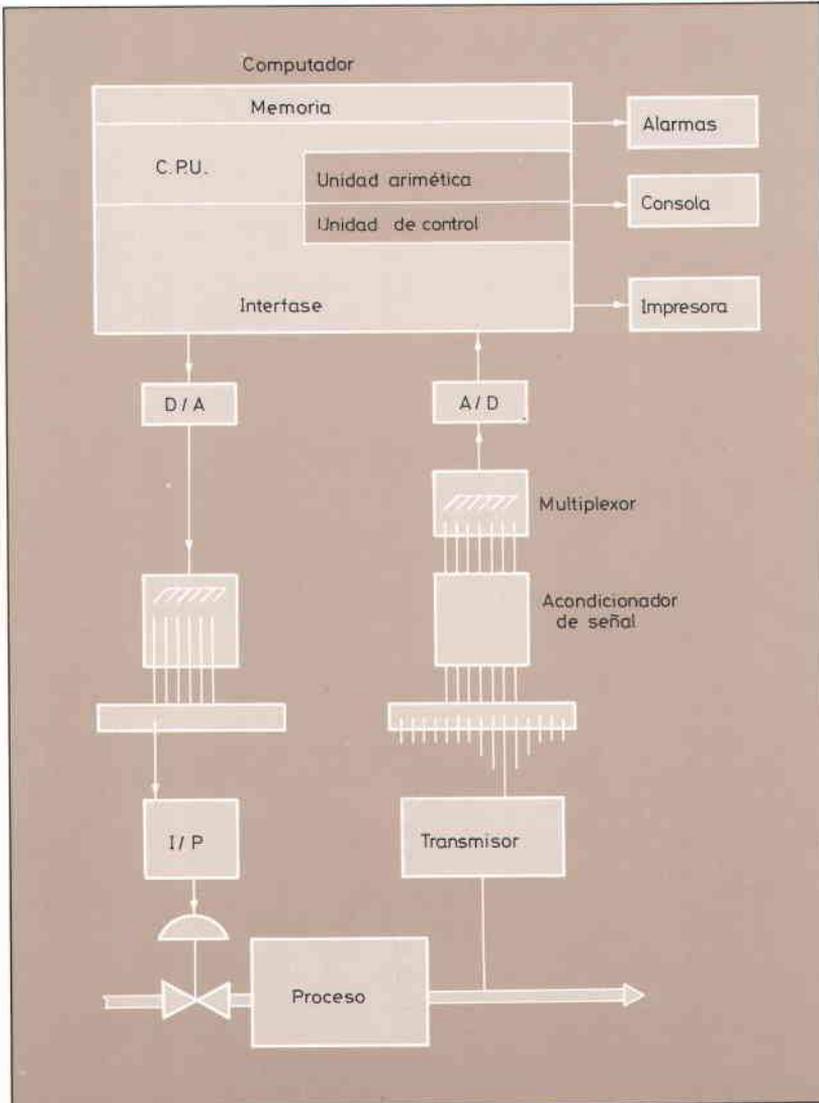
En los años 60, y para alcanzar una mayor seguridad de funcionamiento

Instrumentos de funciones separadas que separan la visualización del proceso de las partes objeto de mantenimiento.



en el control digital directo, el computador calcula los puntos de consigna más convenientes para el proceso y los envía a controladores individuales. De este modo, si el computador falla el controlador puede continuar regulando en el último punto de consigna, y si se desea puede variarlo manualmente. Este tipo de control se denomina *control de puntos de consigna* (S.P.C.). Tiene el inconveniente de que necesita un gran espacio en el panel de control equivalente al del control clásico, ya que es necesario colocar el mismo número de instrumentos controladores.

A partir de los años 70 puede decirse que no varían esencialmente los principios de funcionamiento de los instrumentos, exceptuando los analizadores. Cabe señalar que la mejora general conseguida en el lazo de

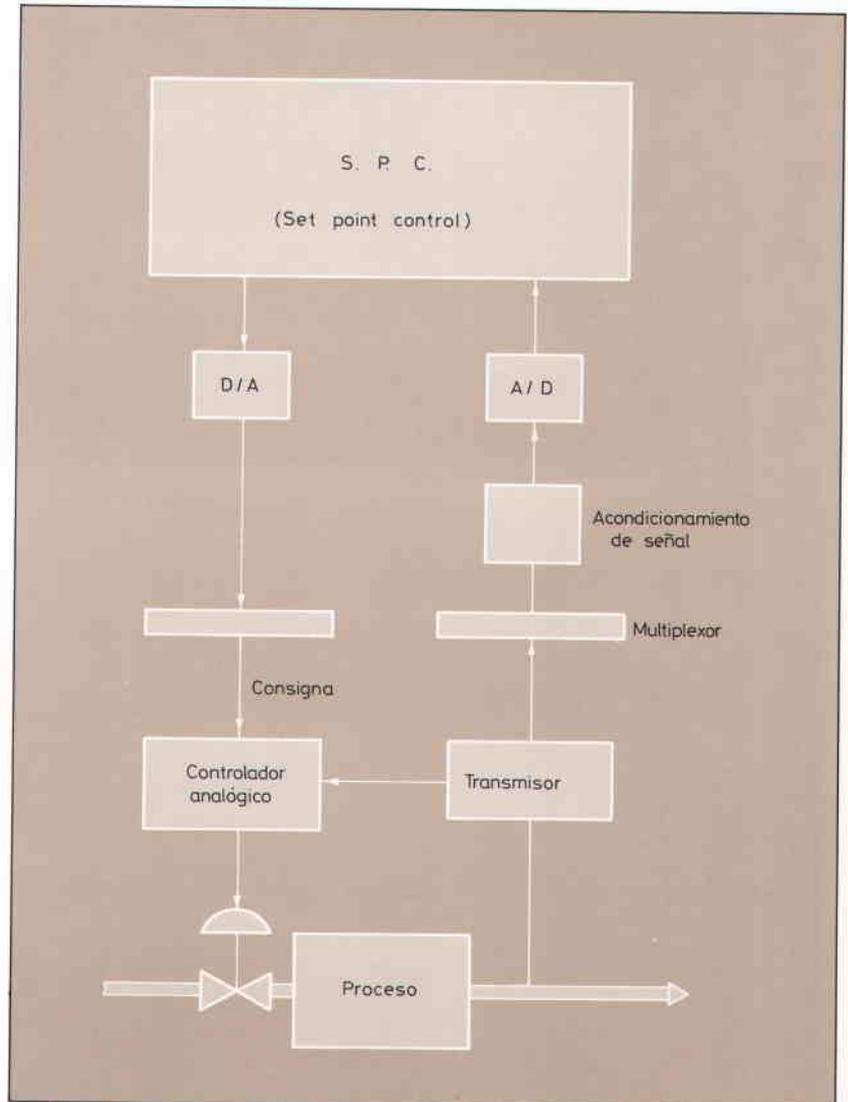


Control D.D.C. o control digital directo donde el ordenador se encarga de todas las funciones de control.

control y en la medida de las variables (presión y temperatura) ha permitido la obtención de precisiones más altas.

La adición de un microprocesador a los instrumentos permite añadir "inteligencia" al transmisor, haciendo posible la interpretación del valor real de la variable, la eliminación de falsas alarmas, y la fácil calibración del transmisor en cualquier punto de la línea de transmisión. Señalemos que el término instrumento "inteligente" se aplica a los aparatos que incorporan ciertas funciones diferentes de su función primaria de medición o de indicación, registro o control. Lógicamente, dichas funciones son proporcionadas por un microprocesador.

Control S.P.C. o de puntos de consigna donde cada instrumento controlador realiza las funciones de control y el ordenador sólo le cambia el punto de consigna o valor deseado de la variable.



Con la aparición del control distribuido en 1975, lanzado por la firma Honeywell, el lazo de control ajusta con más perfección la variable al punto de consigna, con ello la medida y transmisión de las variables se ha hecho mucho más importante. En otras palabras, la precisión del lazo de control o la lectura de las variables, desde el punto de vista de balance de materias primas o finales o de materias en transformación, obliga a que el elemento de medida o transmisión tenga una precisión que sea comparable a la conseguida con el microprocesador. Tanto es así que la persecución de este objetivo dió lugar a que en 1986 la firma Honeywell lanzara al mercado el primer aparato que transmite directamente una señal digital al receptor, sin necesidad de utilizar la clásica señal de $4 \div 20$ mA c.c. que después debe convertirse a digital para ser procesada por el ordenador.

Realmente, el microprocesador ha sido y es una verdadera revolución en el "arte" de medir y transmitir las variables del proceso con precisión. Permite la reducción del número de instrumentos transmisores al ampliar

Transmisor inteligente que aparta otras funciones distintas de la medida exclusiva de la variable del proceso.



o reducir fácilmente el campo de medida, la utilización del mismo transmisor para diferentes elementos de medida (por ejemplo, la linealización de las temperaturas para diferentes tipos de termopares o termorresistencias, o la utilización del mismo modelo de transmisor de nivel para campos de medida muy distintos que antes requerían varios instrumentos que se diferenciaban por su resorte de transmisión), la miniaturización de los

aparatos, la calibración periódica manual o automática de los instrumentos, y es de destacar que cada día se le encuentran nuevas aplicaciones, entre las que cabe mencionar su utilización en los sistemas expertos.

Señalemos también que la propia evolución de la instrumentación y las enormes posibilidades de la técnica del microprocesador han desarrollado enormemente la instrumentación de tipo electrónico y digital en comparación con la neumática, y es de prever que esta tendencia continuará en un próximo futuro.

TIPO DE PROYECTOS DE MODERNIZACIÓN

Cuando en el mundo industrial el empresario se plantea la pregunta ¿Qué instrumentación me conviene utilizar en la nueva planta que vamos a construir?, o bien ¿Qué instrumentación me interesa utilizar para la remodelación total de la planta actual?, la respuesta es inmediata: *control distribuido*.

Sin embargo, no siempre es esta la respuesta correcta, ya que depende de la inversión económica prevista, del tamaño de la fábrica, del número de lazos de control, del tipo de fabricación, del tiempo disponible para la instalación, del número de paros anuales de la fábrica desde el punto de vista de mantenimiento, etc.

En los próximos capítulos veremos los diversos tipos de instrumentos de medición y control que pueden utilizarse en la industria para tener, de este modo, un criterio correcto en la implantación del control. Veremos también las diversas fases de modernización de una fábrica en funcionamiento, y los criterios a seguir en el proyecto de una fábrica totalmente nueva. En líneas generales, y desde el punto de vista de aplicación del control distribuido, pueden presentarse varios casos:

1) *Fábrica de gran tamaño* con gran número de lazos de control (mayor de 50 lazos). Es candidata al control distribuido).

2) *Fábrica mediana* con un número de lazos entre 20 y 50. Es necesario estudiar bien el sistema y hacer una valoración económica correcta.

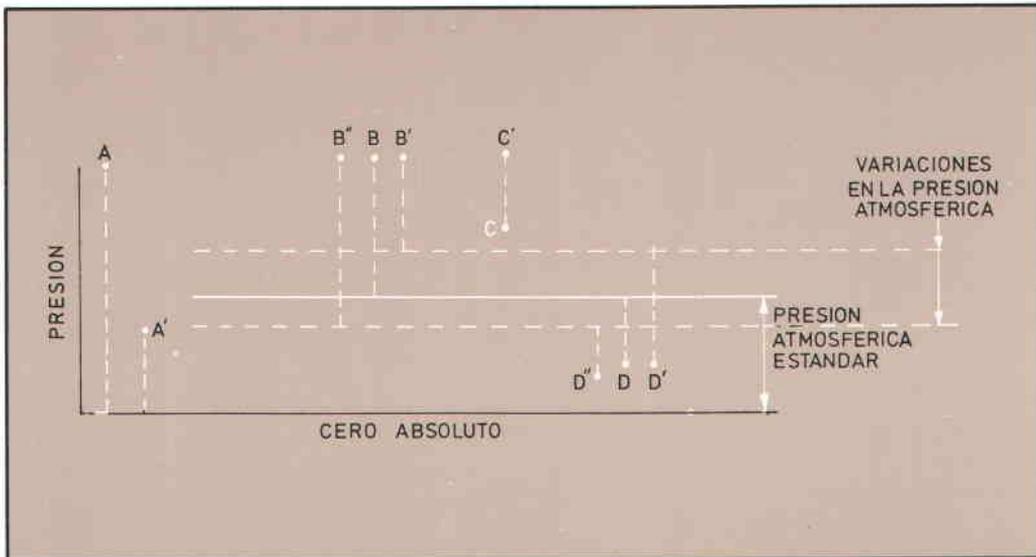
3) *Fábrica de pequeño tamaño*, con un número reducido de lazos de control (menor de 20). La decisión puede decantarse por la instrumentación neumática o electrónica clásica, a no ser que existan otros imperativos, por ejemplo, la necesidad de integrar la información del proceso a la red de ordenadores de la planta, en cuyo caso la elección sería el control distribuido.

Dentro de cada uno de estos casos las situaciones son variadas: ambiente a prueba de explosión, ambiente corrosivo, personal de mantenimiento disponible, conocimiento del proceso, productividad a alcanzar, etc.

Sistemas de medida de las variables de proceso

MEDIDA DE PRESIÓN

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como Kg/cm^2 , *bar*, *atmósferas*, *pascal*, etc.



Existen varias formas de expresar la presión:

- Presión atmosférica, que es la ejercida por la atmósfera terrestre y a nivel del mar equivale a 760 mm de columna de mercurio.
- Presión relativa, que es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se realiza la medición.
- Presión diferencial, que es la diferencia entre dos presiones.
- Vacío, que es la diferencia entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta.

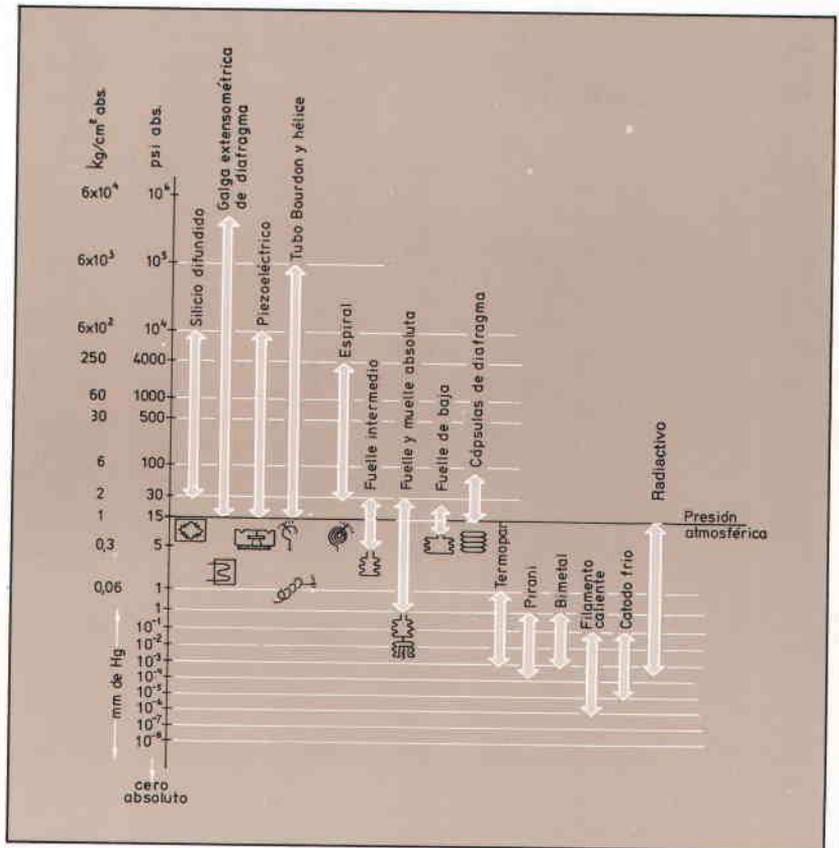
Los instrumentos para medir la presión se clasifican en tres grupos:

- 1) *Mecánicos* de tubo Bourdon, fuelle y diafragma. La selección de estos elementos de presión y de los materiales que van a estar en contacto con

Clases de presión que pueden medirse con los instrumentos.

el fluido dependen del campo de medida, de la resistencia de los materiales a la corrosión y del tipo de fluido. A veces es más barato disponer de un diafragma de aislamiento que utilizar un material especial (por ejemplo, el titanio) que resista los efectos corrosivos del fluido. La selección del diafragma de aislamiento es obligada cuando el fluido es viscoso o transporta partículas que pueden aglomerarse taponando el elemento de presión.

Instrumentos de presión que miden de acuerdo con los campos de trabajo de la presión.



2) *Electromecánicos* de equilibrio de fuerzas, resistivos, magnéticos, capacitivos, de galgas extensométricas, piezoeléctricos y de silicio difundido.

3) Transductores *electrónicos de vacío* de fuelle y diafragma, de compresión, de fundamento térmico y de ionización.

Los recientes avances en la tecnología del sensor de presión, encapsulando un sensor piezorresistivo que realiza simultáneamente la medición de la presión de la variable del proceso, la medición de la presión estática y la medición de la temperatura, permiten que el microprocesador, mediante los datos almacenados en fábrica en una memoria de sólo lectura

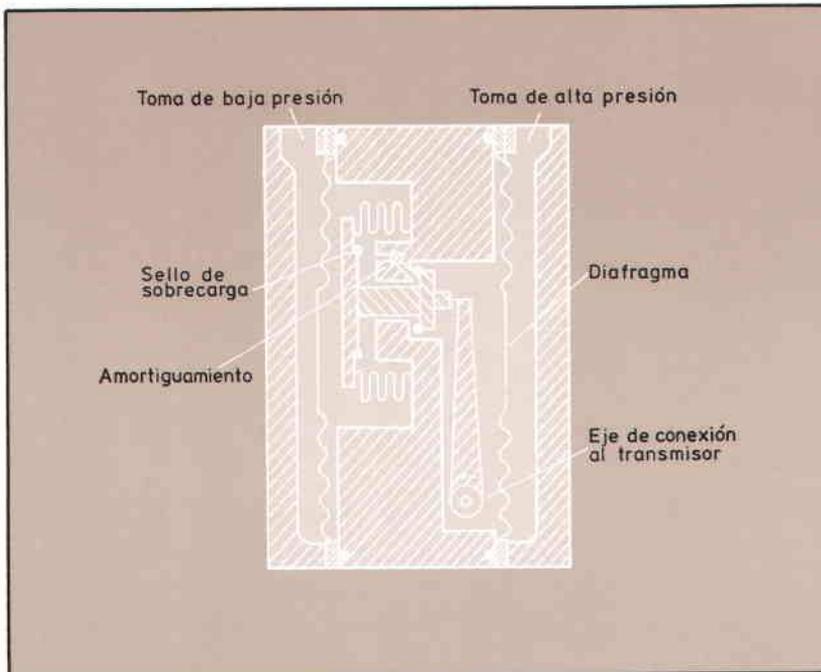
(PROM), calcule una presión compensada con una alta precisión del orden del $\pm 0,1\%$ frente al clásico valor de $\pm 0,5\%$. El valor digital calculado es convertido a la señal de salida analógica de $4 + 20\text{ mA c.c.}$, o bien, en el caso de los transmisores digitales, es pasado directamente a un formato digital, con una precisión en la lectura todavía mayor. Con la utilización de estos transductores electrónicos, los aparatos son más ligeros, más compactos, proporcionan un campo de medida más amplio (400 a 1 frente al clásico 6 a 1 de los transmisores clásicos) y, a medida que aumenta el número de sus aplicaciones, son cada vez más baratos.

MEDIDA DE CAUDAL

El caudal puede medirse en unidades de volumen (caudal volumétrico) o de peso (caudal masa).

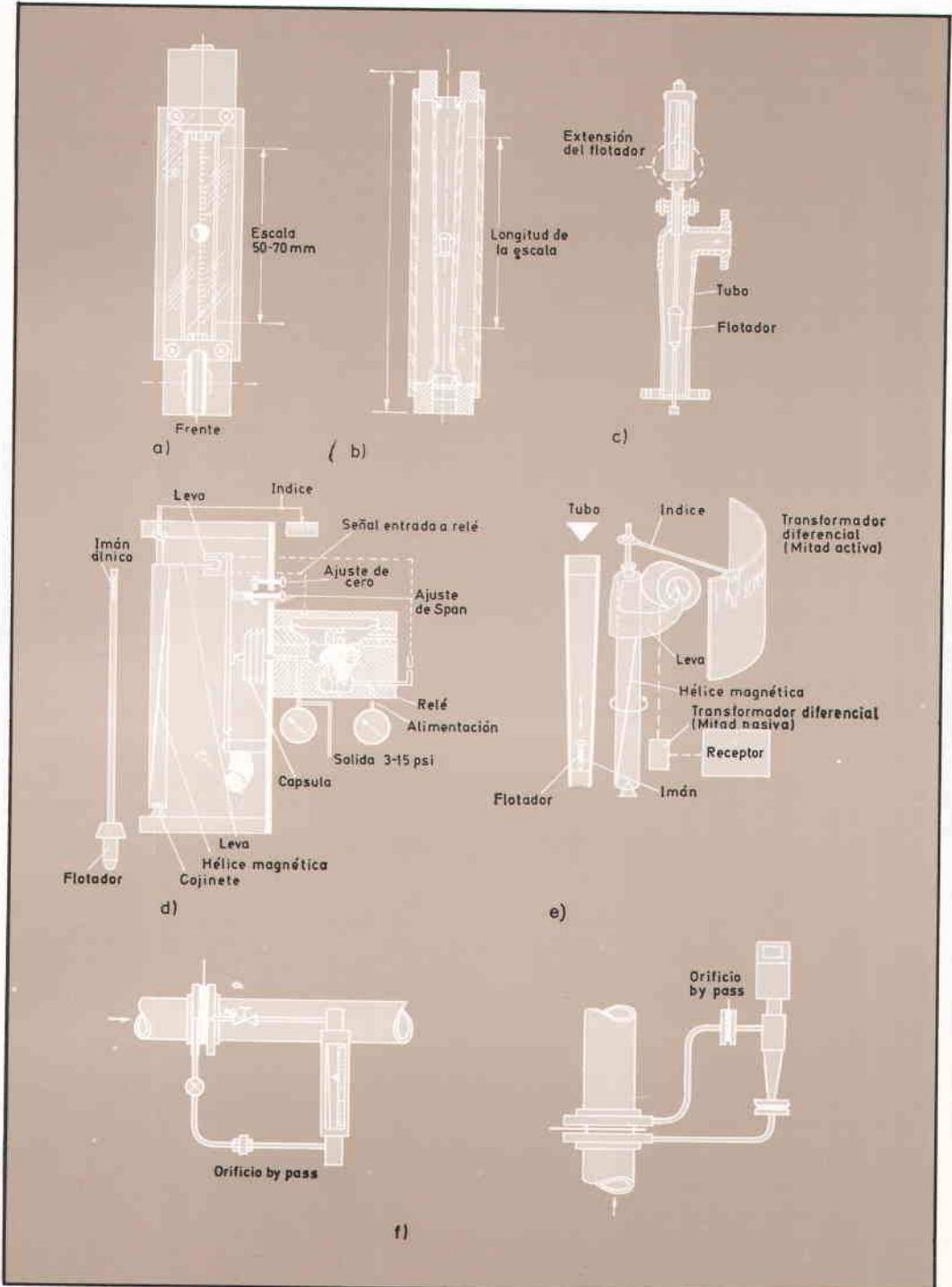
Los instrumentos de medida *volumétricos* se clasifican en:

– Instrumentos de *presión diferencial* basados en la creación de una presión diferencial en el seno del fluido mediante elementos tales como diafragmas, toberas, tubos Venturi, tubos Pitot, tubos Annubar, etc. En los tres primeros elementos (placa-orificio, tobera y tubo Venturi), el caudal es



Instrumentos de presión diferencial de medida de caudal utilizando como elemento una placa-orificio, tobera, tubo Venturi, tubo Pitot o tubo Annubar.

proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial. El cálculo de dichos elementos es empírico, y se efectúa aplicando cualquiera de las normas que existen en el mundo, tales como las ISO, AFNOR, ASME, AGA, DIN, BS, UNI, etc. Los tubos Pitot y Annubar trabajan por el principio de la presión dinámica, es decir, en ellos el caudal es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido.

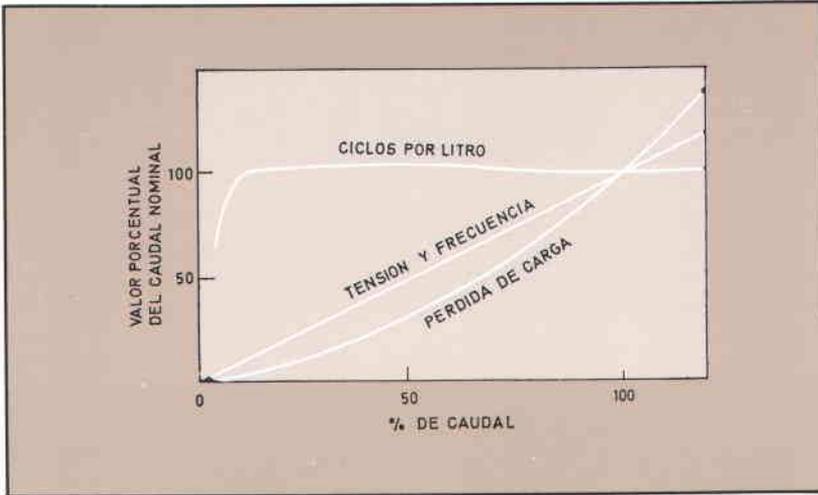


Sistemas de medida de las variables de proceso

La presión diferencial obtenida por estos elementos se mide o transmite con transmisores diferenciales, de los cuales el más utilizado es el transmisor de presión diferencial de diafragma.

— Instrumentos de *área variable*, tales como el rotámetro, donde una pieza de plástico o de acero, contenida dentro de un tubo de sección longitudinal cónica, está en equilibrio en el seno del fluido, entre su peso, el empuje y el arrastre del fluido. Este flotador señala su posición bien directamente, bien a través de algún sistema de transmisión magnética, indicando o transmitiendo el caudal del fluido. La medida viene limitada por variaciones importantes de la viscosidad del fluido y por la excesiva cantidad de sólidos en suspensión que el fluido pueda aportar. Si las condiciones de presión y temperatura del fluido son severas, el tubo debe ser de acero en lugar de vidrio. La precisión en la medida varía del orden de $\pm 5\%$ al $\pm 1\%$ dependiendo de la capacidad de caudal del instrumento y pudiendo alcanzar el valor del $\pm 0,5\%$ en diseños especiales.

Rotámetro. a) y b) Sección. c) Flotador. d) y e) Indicación magnética. f) Orificio by pass del rotámetro. (Ver figura en la página anterior).

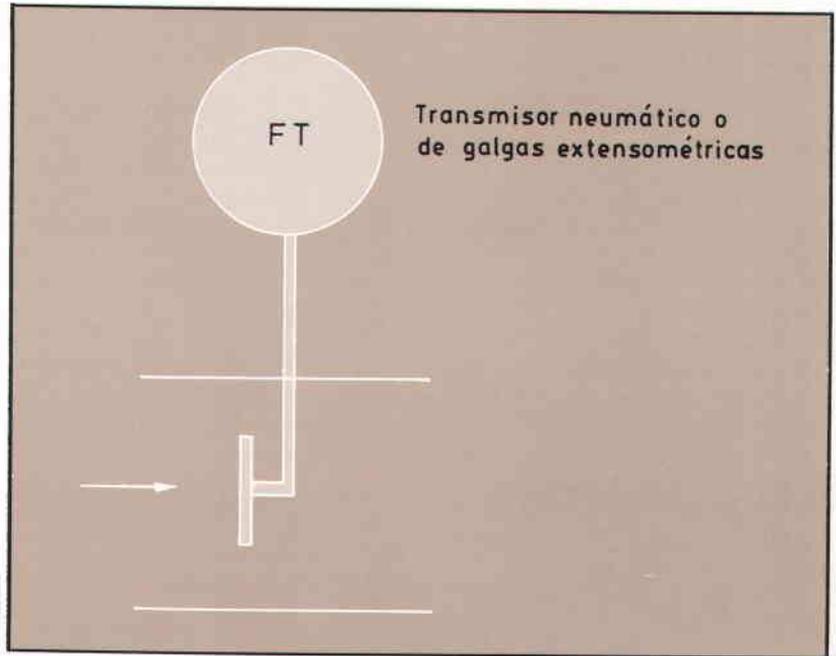


Medidor de turbina que lee el caudal contando el número de revoluciones de la turbina.

— Instrumentos de *turbina*, que constan de un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. La frecuencia que genera el rotor de la turbina es proporcional al caudal, es decir, el número de impulsos por unidad de caudal es constante. Dos limitaciones de la turbina son la viscosidad del fluido y el arrastre de sólidos por parte del mismo. Este último punto se soluciona con filtros dispuestos aguas arriba de la turbina. La precisión es elevada, del orden del $\pm 0,3\%$. El sistema requiere la instalación del elemento en un tramo recto de la tubería, al objeto de conseguir un régimen laminar en la medición.

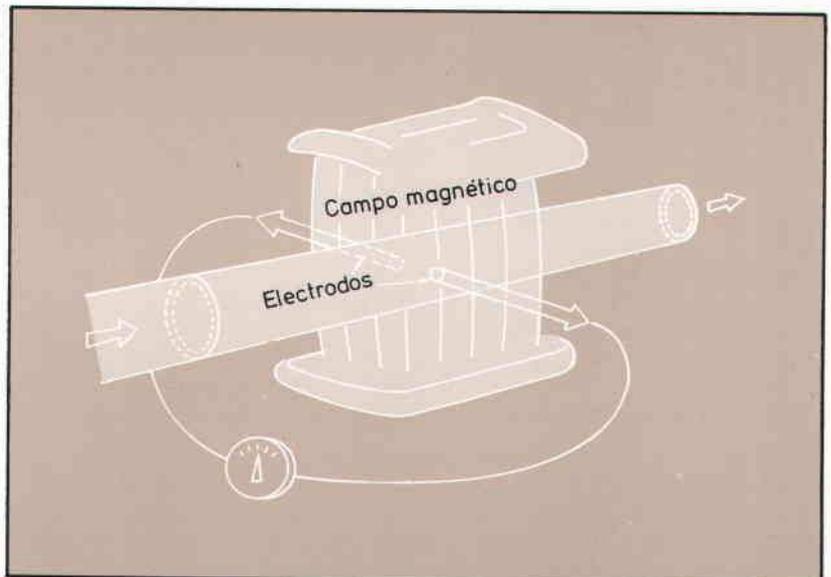
— Instrumentos medidores de la fuerza provocada por el choque del fluido sobre una placa inmersa en él (*medidores de placa*). Esta fuerza es proporcional a la energía cinética del fluido, es decir, a su velocidad. La precisión en la medida es del orden del $\pm 1\%$. El instrumento incorpora transmisores neumáticos o electrónicos.

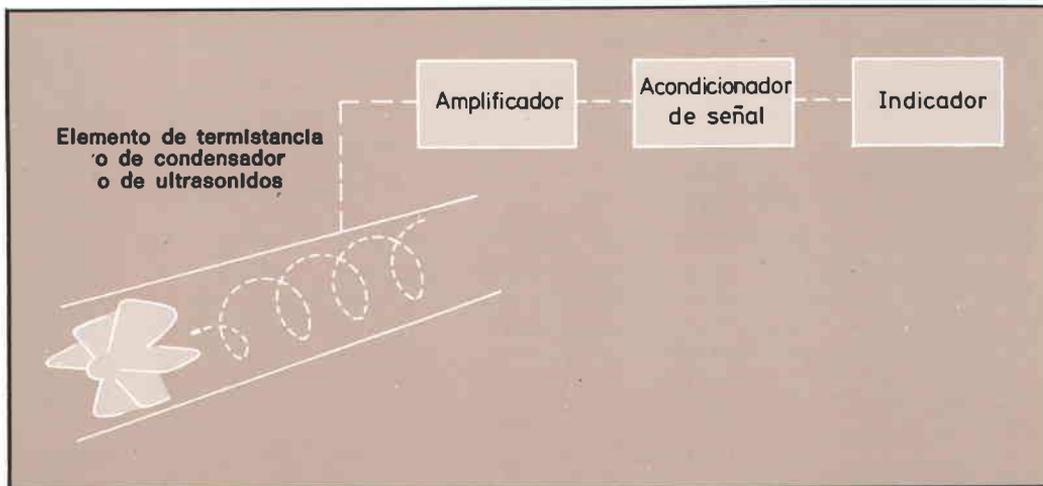
Medidores de placa por presión de impacto del fluido.



— Instrumentos medidores de la tensión inducida en el seno del líquido (que es algo conductor) por un campo magnético perpendicular a la corriente del líquido (*medidores de caudal magnético*). Esta tensión inducida es proporcional a la velocidad del fluido de acuerdo con la ley de Faraday:

Medidores magnéticos de caudal adecuados para la medida de líquidos con sólidos en suspensión gracias al tubo liso del elemento de medida.





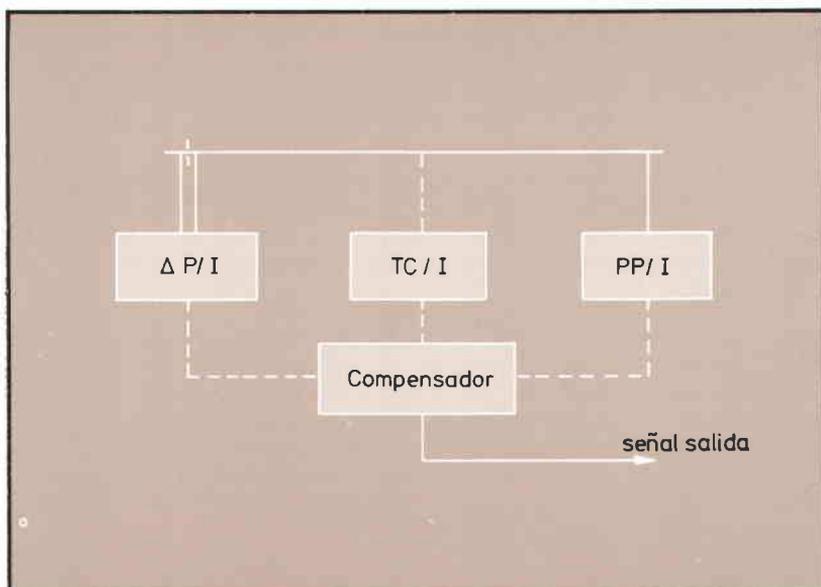
$$E = K \cdot B \cdot l \cdot v$$

en la que:

- E = Tensión generada en el fluido conductor.
- K = Constante.
- B = Densidad del campo magnético.
- l = Longitud del conductor.
- v = Velocidad del fluido.

La medida es independiente de la conductividad del fluido pero, no obstante, la conductividad debe exceder de un valor mínimo, ya que en

Medidores de torbellino que miden el caudal por detección de la frecuencia del torbellino provocado por una hélice fija situada aguas arriba del fluido.



Compensación de temperatura y presión que permite medir el caudal en peso del fluido.

Medidores de desplazamiento positivo basados en la integración de volúmenes del líquido. (Ver figura en la página siguiente).

caso contrario no es posible captar una corriente suficiente que excite el circuito electrónico.

La medición magnética de caudal tiene la ventaja de que el paso del fluido es directo, sin obstrucciones ni pérdidas de carga, al ser el elemento de medida un tubo liso interiormente, por ello se presta admirablemente a la medición de caudal de fluidos con sólidos en suspensión, por ejemplo, agua con arena o agua con maíz.

— Instrumentos medidores de *desplazamiento positivo*, tales como medidores de disco oscilante, pistón oscilante, birrotor, ovoides y cicloidales. Todos ellos están basados en la integración de volúmenes separados del líquido. Su precisión varía desde ± 1 a $\pm 2\%$ en el medidor de disco oscilante y el medidor cicloidal, pasa por el $\pm 0,2\%$ a $\pm 1\%$ en los medidores de pistón oscilante y ovoides y alcanza el $\pm 0,2\%$ en el caso del medidor birrotor.

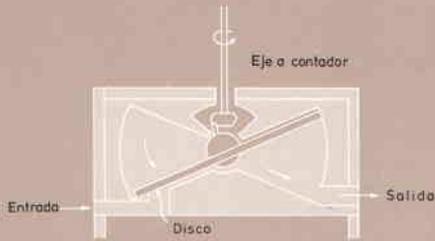
— Instrumentos de *torbellino* que detectan la frecuencia del torbellino producido por una hélice estática, situada dentro de la tubería, al circular el fluido a su través. Estas variaciones de frecuencia son detectadas por un transductor térmico o por la deformación de un diafragma. La precisión de estos instrumentos es del orden del $\pm 0,75\%$ del caudal instantáneo y se caracterizan por el alto margen de medida entre el valor máximo y el mínimo del caudal, del orden de 100 a 1.

Los medidores de *caudal masa* se basan en la determinación del caudal volumétrico y su compensación con la medición de la temperatura y de la presión, realizando los cálculos oportunos para obtener el caudal en unidades de peso. Por ejemplo, para convertir la medición volumétrica de un gas que está, en el momento de la medición, a la temperatura de 60°C y a la presión de 5 Kg/cm^2 , bastará, desde el punto de vista de cálculo, pasar el gas a condiciones normales de presión y temperatura, y multiplicar por la densidad mediante un microprocesador o bien un instrumento que realice las operaciones de conversión. La aparición del microprocesador ha permitido la determinación fácil del caudal masa y el uso masivo de este tipo de aparatos, frente a la exclusiva utilización del método de compensación, que antes se realizaba sólo cuando era realmente necesario. Téngase en cuenta que la medida compensada requería varios instrumentos, lo que representaba un mayor coste económico y una degradación de la precisión conseguida en la medida, punto éste que tenía la máxima importancia, ya que se traducía en una cifra de miles de pesetas al cabo del año y constituía un motivo de discusión entre el suministrador y el comprador.

Otros sistemas de medida directa del caudal masa son los medidores *térmicos*, basados en la elevación de temperatura del fluido a su paso por el elemento de medida calentado por una fuente calorífica controlada, los medidores *axiales*, que están basados en la recuperación del momento angular comunicado al fluido, los medidores *giroscópicos*, los medidores de *Coriolis* y los medidores de *presión diferencial*. Todos ellos son de aplicación limitada en la industria y se utilizan en general para pequeños caudales.

Todos estos instrumentos de caudal pueden disponer de unidades de transmisión inteligente que les permiten su fácil calibración, el cambio

Sistemas de medida de las variables de proceso

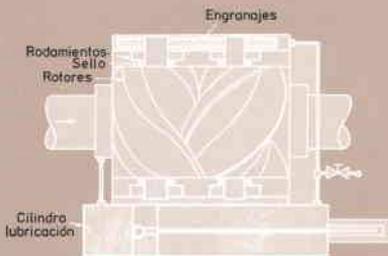


a)



1 y 3 reciben líquido de A; 2 y 4 se descargan a través de B.

b)



c)



Diagrama 1

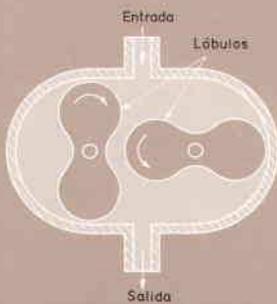


Diagrama 2



Diagrama 3

d)



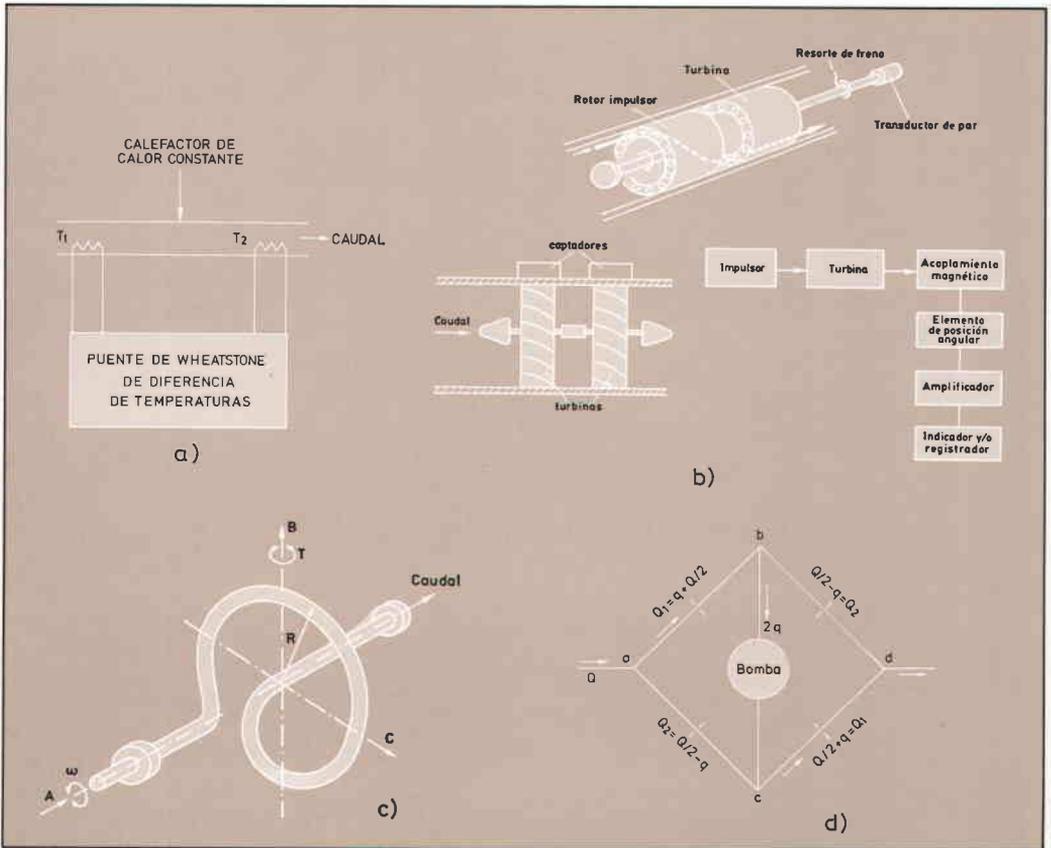
e)

rápido del campo de medida y la lectura de la variable en cualquier punto de la instalación donde se hayan previsto tomas, por ejemplo, en el transmisor y en el receptor.

Medidores de caudal masa basados en principios de medición directa del caudal en peso del fluido.

MEDIDA DE NIVEL

Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y de sólidos.



Los medidores de nivel de líquidos trabajan con varios principios de medida: por medida directa de la altura del líquido en el tanque con relación a una línea de referencia, por la medida de la presión hidrostática, por el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Los instrumentos de *medida directa* se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador.

El medidor de *sonda* consiste en una varilla o regla graduada con la longitud conveniente para introducirla dentro del tanque. La medida del nivel se efectúa por lectura directa de la longitud mojada por el líquido, y se realiza generalmente en los tanques de fuel o gasolina.

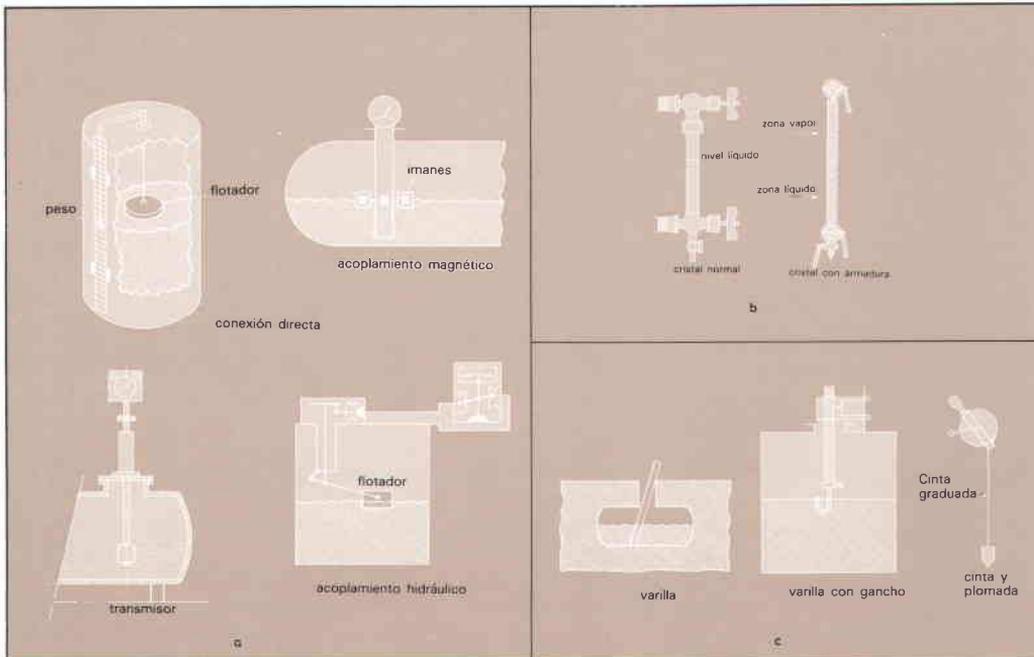
El nivel de *crystal* consiste en un tubo de vidrio conectado al tanque mediante tres válvulas, dos con cierre de seguridad en los extremos del tubo para impedir el escape del líquido en caso de rotura del cristal y una de purga.

La lectura del nivel se realiza con un cristal a reflexión o por transparencia, y puede visualizarse a distancia en el panel de control mediante cámaras de televisión, tal como se usa, por ejemplo, en la medición del nivel del vidrio en fusión.

Los instrumentos de nivel de *flotador* consisten en un flotador situado en el seno del líquido, cuya posición es detectada por una conexión al exterior del tanque, indicando directamente el nivel. La conexión puede ser directa (señalando el nivel en un índice exterior), magnética (el flotador desliza a lo largo de un tubo guía sellado situado verticalmente dentro del tanque y una pieza magnética arrastra, a través de un juego de cables y poleas, el índice del instrumento) e hidráulica.

Estos tipos de instrumentos pueden disponer de un transmisor neumático o electrónico.

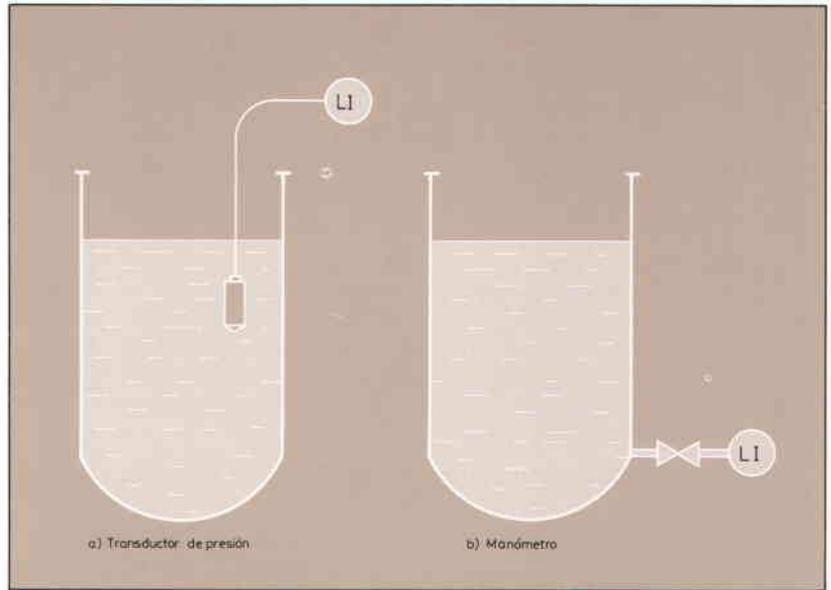
Instrumentos de medida directa del nivel de fluidos. a) Flotador. b) Cristal. c) Sonda.



Los instrumentos de *medida inferencial* a través de la presión hidrostática se clasifican en: manométricos, de membrana, de tipo burbujeo y de presión diferencial de diafragma. En este tipo de instrumentos la lectura se realiza por medición de la presión ejercida por el líquido sobre el elemento de nivel, es decir:

$$P = H \cdot \gamma$$

Medidor manométrico que actúa por medida de la presión con que el líquido actúa sobre el elemento.



en la que:

P = Presión.

H = Altura del líquido sobre el instrumento.

γ = Peso específico del líquido.

El medidor *manométrico* consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque. Una variante emplea un transductor de presión suspendido de la parte superior del tanque e inmerso en el líquido, transmitiendo la señal de $4 + 20$ mA c.c. a través de un cable que acompaña al de suspensión. La transmisión o indicación del nivel a través de una comunicación RS-232 permite conectar con la interfase de un ordenador.

El medidor de tipo *burbujeo*, utiliza un tubo sumergido dentro del líquido, a cuyo través se hace burbujear aire (o gas) suministrado por la línea de aire de la planta mediante un rotámetro con regulador de caudal incorporado. La presión del aire dentro de la tubería equivale al nivel de líquido. El regulador de caudal permite mantener un caudal de aire o de gas constante independientemente de las variaciones de nivel. El tubo suele ser de $1/2''$ con el extremo biselado para la formación fácil de las burbujas de aire. El sistema se puede utilizar en tanques abiertos y en tanques cerrados a presión, incorporando en este último caso dos juegos de rotámetro-regulador y con las señales de aire conectadas a un indicador de la presión diferencial que da directamente la lectura del nivel, o bien a un transmisor de presión diferencial neumático, electrónico o inteligente.

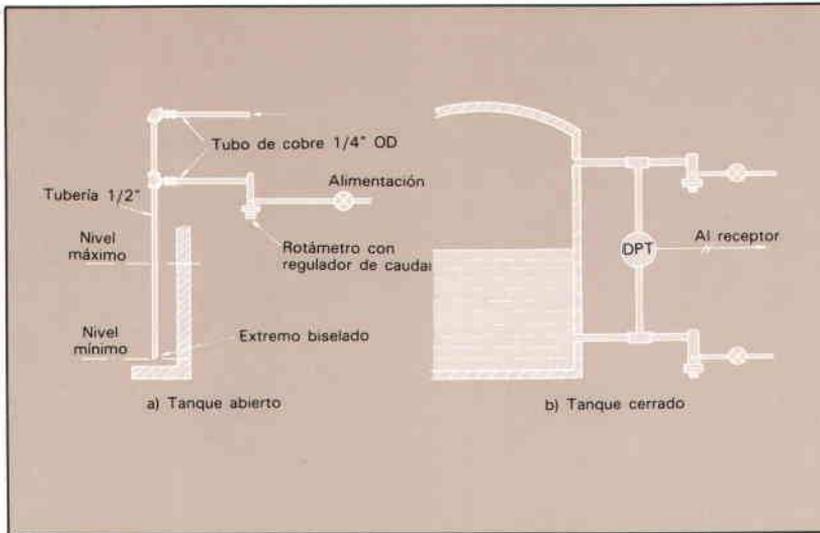
El medidor de *presión diferencial* consiste en un diafragma, en contacto con el líquido, que mide la presión hidrostática en un punto del tanque

Sistemas de medida de las variables de proceso

(caso de tanque abierto a presión atmosférica) o la presión diferencial entre un punto del tanque y su parte superior (caso de tanques cerrados a presión), bien directamente o bien a través de una cámara de medida.

El medidor de diafragma presenta como ventajas la independencia respecto a la cristalización del líquido o a la precipitación de sólidos y la inexistencia de recodos, lo que representa una gran facilidad de limpieza (idóneo en la industria alimenticia) y un menor mantenimiento.

En el caso de fluidos no demasiado limpios, muy viscosos o corrosivos, existe el riesgo de que se obturen o se destruyan las conexiones al instrumento. En este caso, o bien el cuello de la brida de acoplamiento se hace lo más corto posible y se utiliza un aparato de diafragma saliente, o bien puede emplearse un sistema de purga de aire o de gas, e incluso de líquido, a través de dos tuberías colocadas en el seno del fluido, cuyos extremos están separados una distancia fija dirigiendo el chorro de purga hacia la base del diafragma.



Medidor de burbujas (mide por lectura de la presión del aire que provoca burbujas a través del líquido).

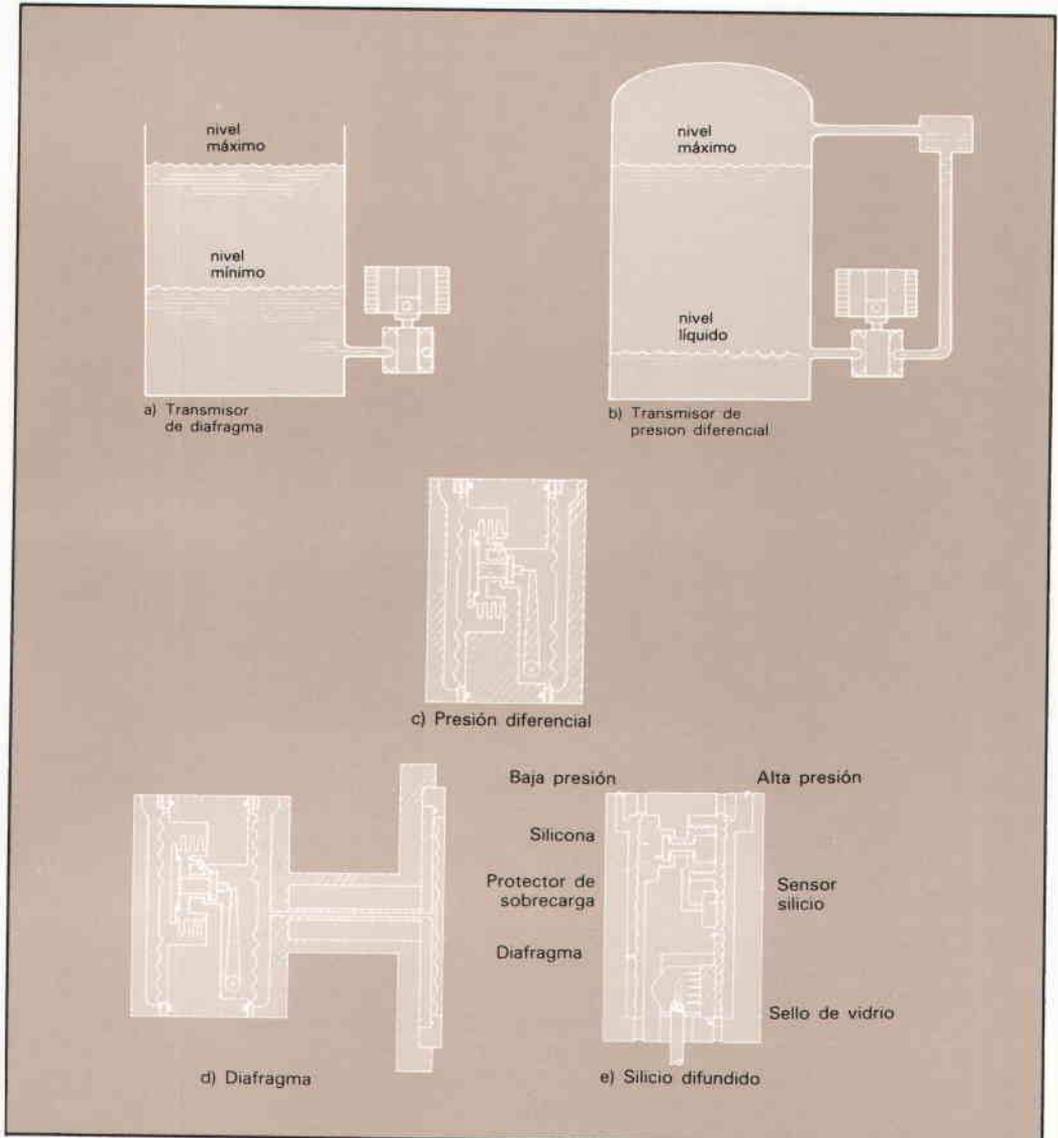
En el caso de tanques cerrados y a presión hay que corregir la indicación del instrumento para la presión ejercida sobre el líquido. Para ello, se conecta un tubo en la parte superior del tanque y se mide la diferencia de presiones entre la toma inferior y la superior mediante transmisores de presión diferencial.

Cuando los vapores del líquido son condensables, el tubo que conecta la toma superior al instrumento se llena gradualmente con el condensador, hasta hacerlo en su totalidad. De este modo, la indicación del transmisor queda invertida, inconveniente que se compensa situando en el transmisor un muelle, llamado de supresión, que produce en el transmisor una fuerza igual a la diferencia entre el nivel máximo y el mínimo. De este modo "suprime" el nivel de líquido condensado en el tubo conectado a la toma superior del tanque.

Mecedor de presión diferencial de diafragma. Es el más difundido en la industria y permite la medida de nivel en tanques abiertos y a presión.

Para evitar el riesgo de obturación de las tuberías que conectan el transmisor a las tomas superior e inferior del tanque, puede emplearse un transmisor de presión diferencial con tubo capilar y bridas, que se acoplan a las bridas de conexión superior e inferior del tanque. Es importante que los dos diafragmas estén a la misma temperatura para evitar los errores en la medida que se presentarían por causa de las distintas dilataciones del fluido contenido en el capilar.

Un caso parecido, si bien inverso, se presenta cuando se mide el nivel de un tanque elevado, habiendo situado el transmisor de nivel en la base



de la estructura que soporta el tanque para mayor facilidad de mantenimiento. El transmisor envía una señal correspondiente a la altura de líquido existente entre el nivel superior del tanque y la base donde está el instrumento. De este modo, su lectura incluye la columna de agua del tubo de salida del tanque elevado, la cual a efectos prácticos no interesa en la medida de la capacidad del depósito elevado. Para eliminar artificialmente esta columna se añade al transmisor un muelle llamado de elevación que, actuando sobre el circuito neumático o electrónico del aparato, "eleva" el transmisor hasta la toma de la tubería de salida del tanque.

El medidor de presión diferencial puede emplearse en la medida de interfases. La amplitud de la medida vendrá dada por la diferencia de presiones sobre el diafragma del elemento, primero con el tanque lleno del líquido más denso y después con el líquido menos denso. El instrumento dispone de un resorte de elevación para compensar la presión inicial del líquido menos denso.

Los instrumentos de *desplazamiento* utilizan un instrumento de desplazamiento o barra de torsión, formado por un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque. Dentro del tubo, y unida a su extremo libre, se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor situado en el exterior del depósito. El flotador está equilibrado exteriormente para que el par de torsión desarrollado represente directamente el nivel del líquido.

Según el principio de Arquímedes el flotador sufre un empuje hacia arriba igual a:

$$F = S \cdot H \cdot \gamma$$

en la que:

F =Empuje del líquido.

S =Sección del flotador.

L =Longitud del flotador.

H =Longitud sumergida en el líquido.

γ =Peso específico del líquido.

Y el momento sobre la barra de torsión es:

$$M = (S\gamma H - P) \cdot l$$

siendo l el brazo del tubo de torsión y P el peso del flotador.

Se ve en la fórmula anterior que el momento depende directamente de la densidad del líquido, ya que las demás variables dependen sólo del tipo de flotador del instrumento.

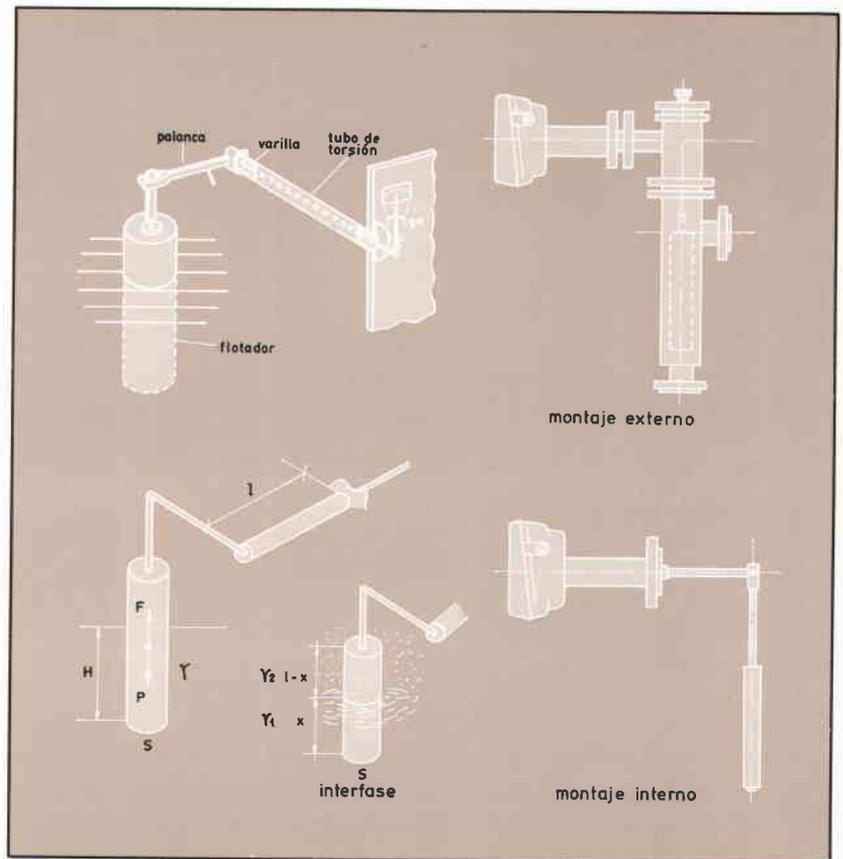
Este método tiene la ventaja de eliminar la necesidad de un nivel constante en un tanque, como en el caso de la medición por presión hidrostática.

El método de desplazamiento tiene una precisión de $\pm 1\%$. Las presiones y temperaturas de servicio alcanzan los 40 Kg/cm^2 y 200°C . Este sistema puede emplearse en líquidos limpios, no siendo adecuado en los líquidos con posibilidad de cristalización, pegajosos o con sólidos en suspensión, ya que podrían adherirse al flotador y falsear la medida.

Los instrumentos que utilizan *características eléctricas* del propio líquido se dividen en: resistivos, conductivos, capacitivos, ultrasónicos, de radiación y de láser.

Los instrumentos de tipo *resistivo* consisten en electrodos que miden la diferencia de resistividad eléctrica entre el agua y el vapor de agua, pudiendo así discriminar su separación; se utilizan por ejemplo, para medir el nivel de agua de una caldera de vapor. Montados en grupos verticales de 24 o más electrodos, pueden complementar los típicos niveles de vidrio de las calderas, y se prestan bien a la transmisión del nivel a la sala de control y a la adición de las alarmas de nivel correspondientes.

Medidor de desplazamiento de un flotador sumergido parcialmente en el líquido.

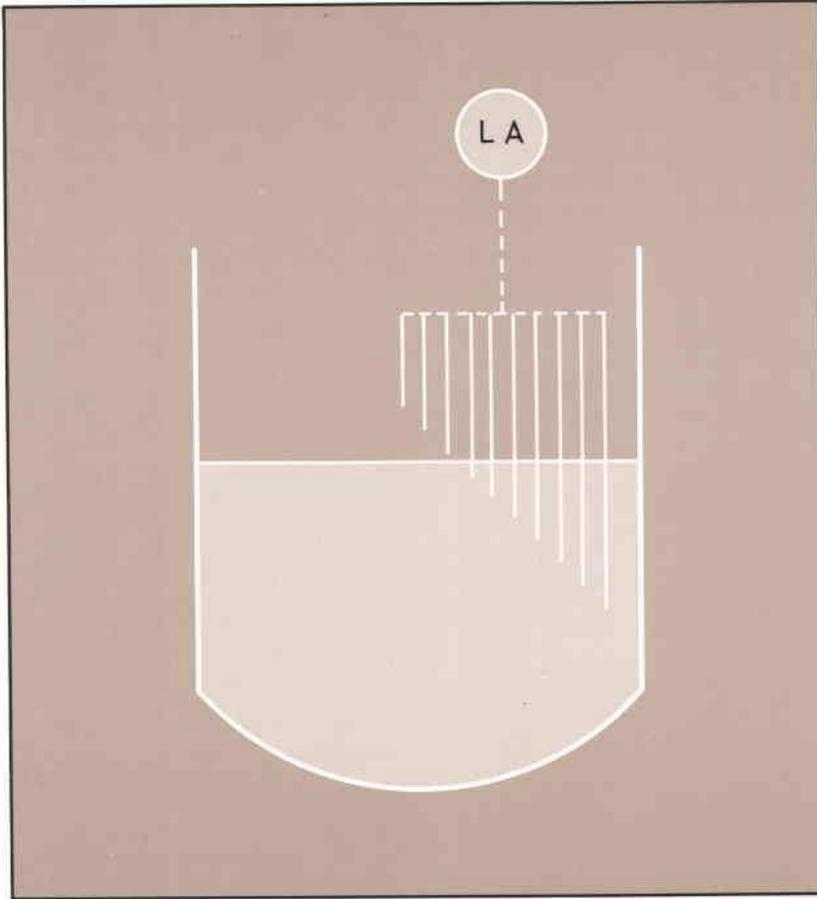


El medidor *conductivo* consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico, o un microprocesador, que son excitados cuando el nivel moja los electrodos. Para que el sistema funcione correctamente el líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico.

Una variante es utilizada en el control del nivel de vidrio en fusión. Está formada por un electrodo móvil que es accionado por un sistema electro-

Sistemas de medida de las variables de proceso

magnético. Al bajar y entrar en contacto con el vidrio fundido, que a estas temperaturas de fusión es conductor, se para, queda marcada la posición en un receptor e inmediatamente invierte su movimiento hasta romper el contacto eléctrico con el vidrio fundido, repitiéndose el ciclo nuevamente.



Instrumento de nivel resistivo aplicable en calderas de vapor.

El medidor de *capacidad* mide la capacidad de un condensador formado por un electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacidad del conjunto depende linealmente del nivel del líquido.

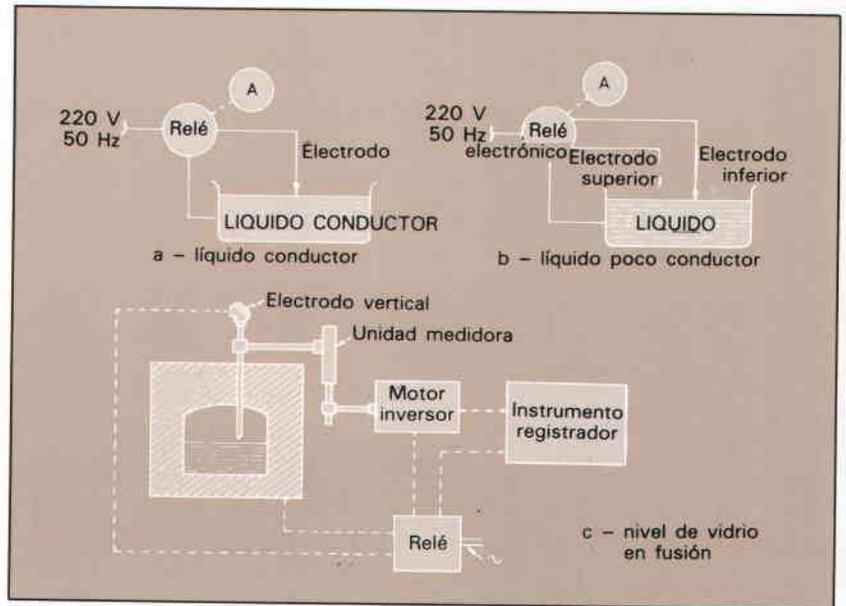
En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal conductor, mientras que en fluidos conductores el conductor está aislado (usualmente con teflón).

Un circuito electrónico formado por un puente de capacidades alimenta el electrodo a una frecuencia elevada, ello disminuye la reactancia capacitiva del conjunto y contribuye a paliar uno de los inconvenientes de este sistema de medida: el efecto perjudicial que presenta el posible recubrimiento del electrodo por el producto, lo que se traduce en una lectura errónea del nivel.

El campo de medida de estos instrumentos es prácticamente ilimitado y pueden emplearse en la medida de interfaces.

El medidor de *ultrasonidos* mide el retardo entre el envío de un impulso ultrasónico a la superficie del líquido y su captación después de reflejarse en la misma. La medida se realiza disponiendo el conjunto emisor-receptor de ultrasonidos acoplado al tanque o situado en su interior enfocado a la superficie del líquido. Pueden ser factores perturbadores los cambios en la densidad del líquido, en su temperatura, que debe ser compensada, y las variaciones en la viscosidad y en la compresibilidad, por lo que la medida queda restringida a una familia de líquidos de características similares. Por otro lado, si la superficie del líquido no es nítida, tal como en el caso de formación de espuma en la superficie, se producen falsos ecos de los ultrasonidos que dan errores importantes en la medida.

Instrumento de nivel conductivo que mide por la conducción de electrodos al mojarse en contacto con el líquido.



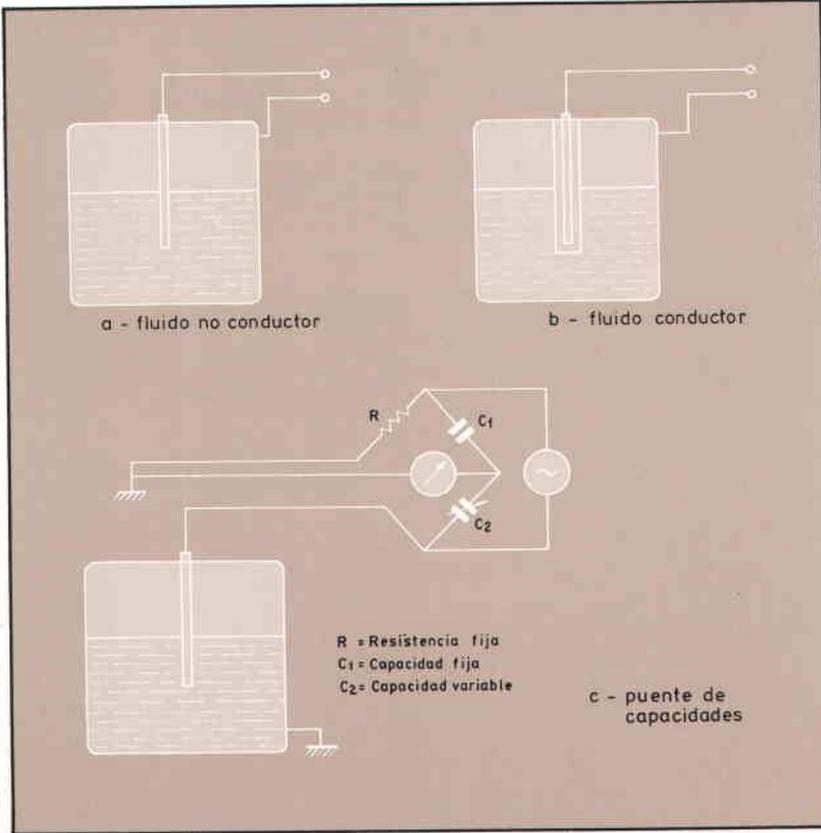
La utilización del ordenador permite, a través de un programa, almacenar el perfil ultrasónico del nivel y así tener en cuenta las características particulares de la superficie del líquido, tal como la espuma, con lo cual se mejora la precisión de la medida. Por otro lado, el ordenador facilita la conversión del nivel a volumen del tanque para usos de inventario.

El método de *radiación* se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. Esta absorción es directamente proporcional al nivel del líquido e inversamente proporcional a su densidad. La radiación residual es medida con un contador de centelleo que suministra pulsos de tensión y cuya frecuencia es inversamente proporcional a la densidad.

La intensidad de la radiación residual captada a través del fluido es:

$$I = I_0^2 \cdot e^{-\mu \rho L}$$

Sistemas de medida de las variables de proceso

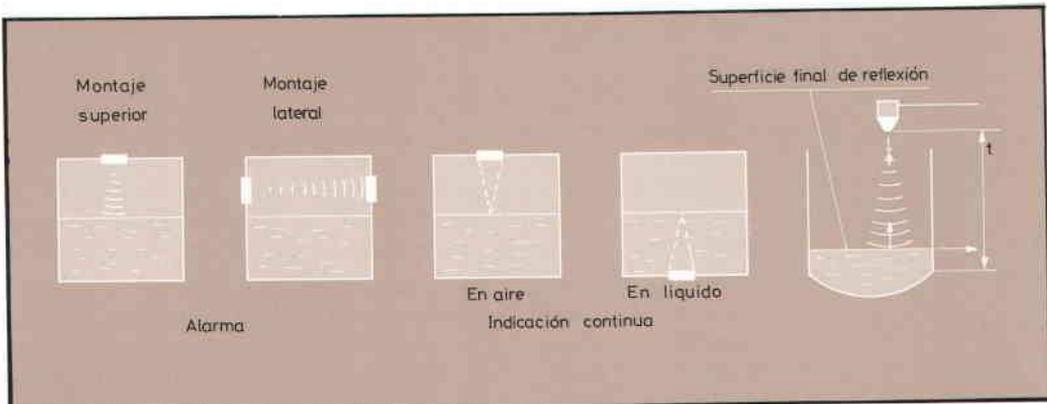


Instrumento de nivel capacitivo que mide por capacidad del condensador formado por un electrodo y el propio tanque al variar el nivel del líquido.

en la que:

- I_0 = Radiación de la fuente.
- u' = Coeficiente de atenuación del fluido.
- p = Densidad del fluido.
- L = Longitud de la radiación.

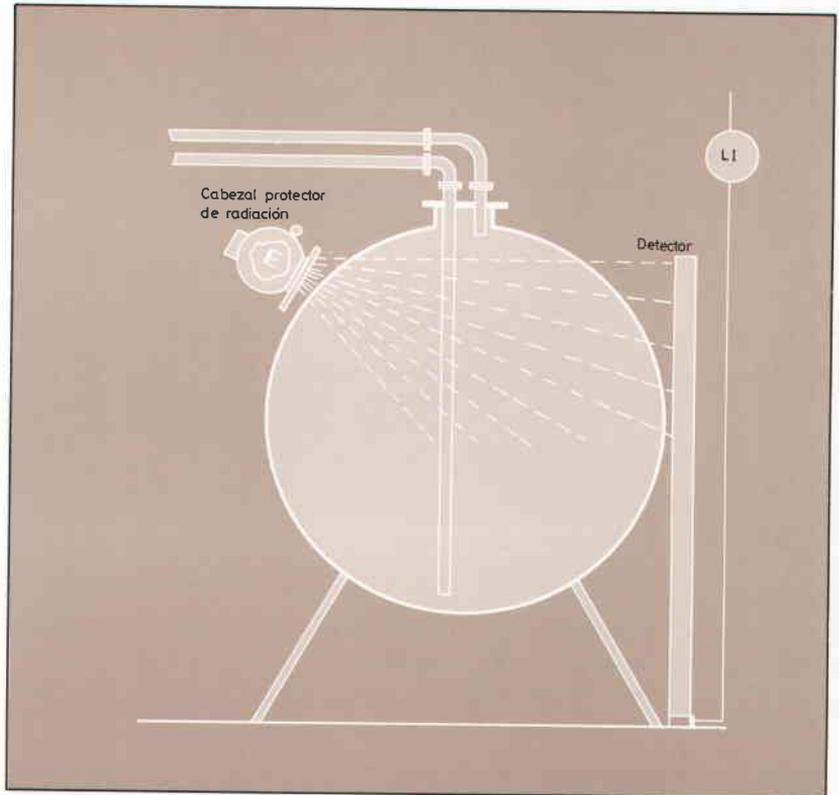
Medidor de nivel de ultrasonidos donde el sonido emitido se refleja en la superficie del líquido.



Físicamente el instrumento consiste en una tubería o en un tanque a cuyo través pasa el líquido, con la fuente blindada dispuesta en la parte exterior de la tubería o del tanque y con el receptor de la radiación instalado en la parte opuesta. Las conexiones eléctricas del receptor van a un registrador o controlador situado en el panel de control.

La fuente de radiación utilizada industrialmente es principalmente el cesio 137 de vida media de 30 años (también se emplea en casos especiales el americio 241 de vida media de 458 años).

Medidor de nivel de radiación dotado de una fuente de rayos gamma que mide por grado de absorción de radiación del líquido.

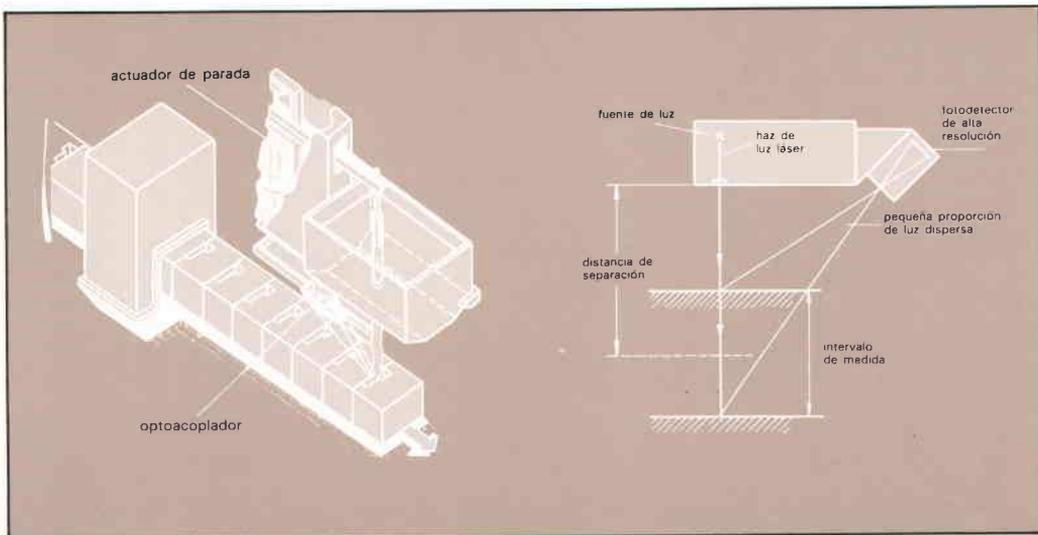


El instrumento dispone de compensación de temperatura, de linealización de la señal de salida y de reajuste de la pérdida de actividad de la fuente de radiación, extremo este último a tener en cuenta para conservar la misma precisión de la puesta en marcha. Como desventajas en su aplicación figuran el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación, que en nuestro país están reglamentadas por la Junta de Energía Nuclear.

La precisión en la medida es de $\pm 0,5$ a $\pm 2\%$, y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido.

En aplicaciones donde las condiciones son muy duras y donde los instrumentos de nivel convencionales fallan encuentra su aplicación el medidor de *láser* (y también el de radiación). Tal es el caso de la medición de metal fundido, donde la medida del nivel debe realizarse sin contacto con el líquido y a la mayor distancia posible por existir unas condiciones de calor extremas. El sistema consiste en un rayo *láser* enviado a través de un tubo de acero y dirigido, por reflexión en un espejo, sobre la superficie del metal fundido. El aparato mide el tiempo que transcurre entre el impulso emitido y el impulso de retorno que es registrado en un fotodetector de alta resolución, y este tiempo es directamente proporcional a la distancia del aparato emisor a la superficie del metal fundido. Un microprocesador convierte este tiempo al valor de la distancia a la superficie del metal en fusión, es decir, da la lectura del nivel.

Medidor de nivel láser adecuado para condiciones de servicio duras (igual que el de radiación) donde los demás instrumentos fallan.



En los procesos continuos la industria ha ido exigiendo el desarrollo de instrumentos capaces de medir el *nivel de sólidos* en puntos fijos o de forma continua, en particular en los tanques o silos destinados a contener materias primas o productos finales. Existen dos tipos de medidores de nivel de sólidos, los discontinuos, que detectan sólo que el sólido está a su mismo nivel en un punto fijo del tanque, y los continuos, capaces de medir el nivel del sólido de forma continua, desde el punto más bajo al más alto del tanque o silo.

Entre los medidores de nivel continuos se encuentran los detectores de *diafragma*, de *cono suspendido* y de *varilla flexible*; consisten en una membrana flexible, en un cono o en una varilla, que están situados dentro del tanque y son accionados cuando el sólido alcanza dichos elementos. De este modo se cierra (o se abre) un microinterruptor, excitándose así el circuito de una alarma o actuando sobre un transportador de materiales asociados al depósito.

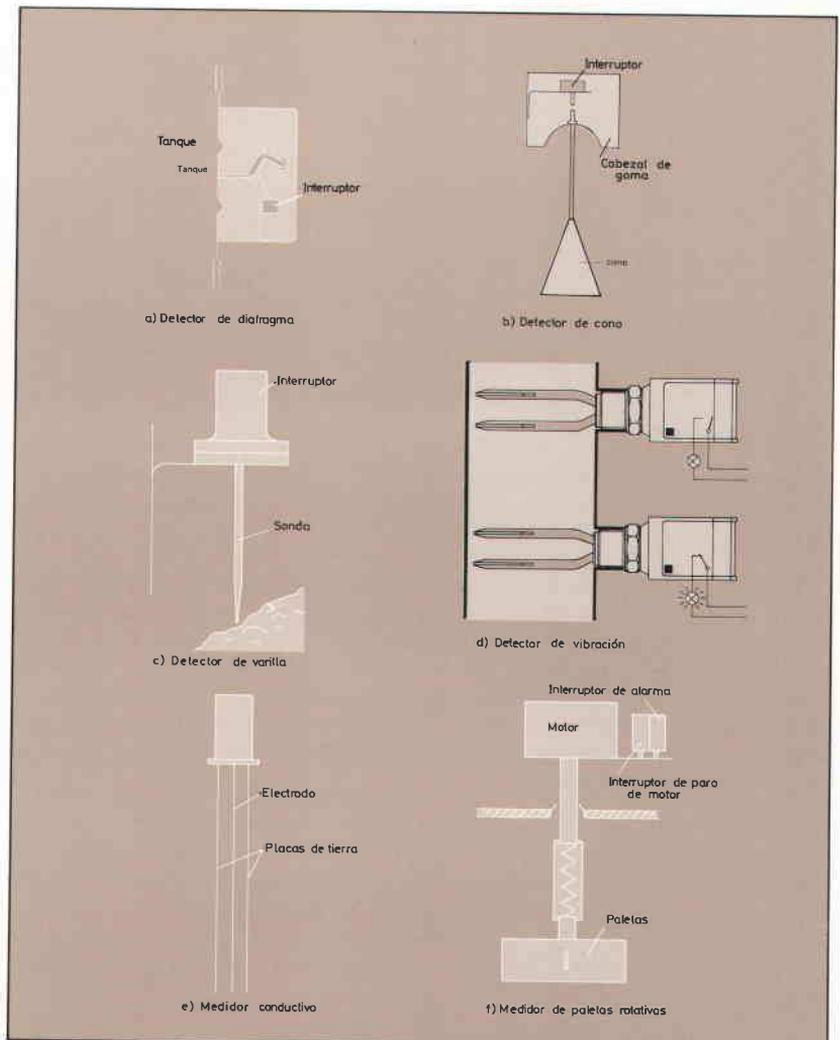
Una variante de estos instrumentos es el medidor de nivel de *vibración*,

que utiliza una varilla excitada piezoeléctricamente cuya oscilación es amortiguada al entrar en contacto con el producto.

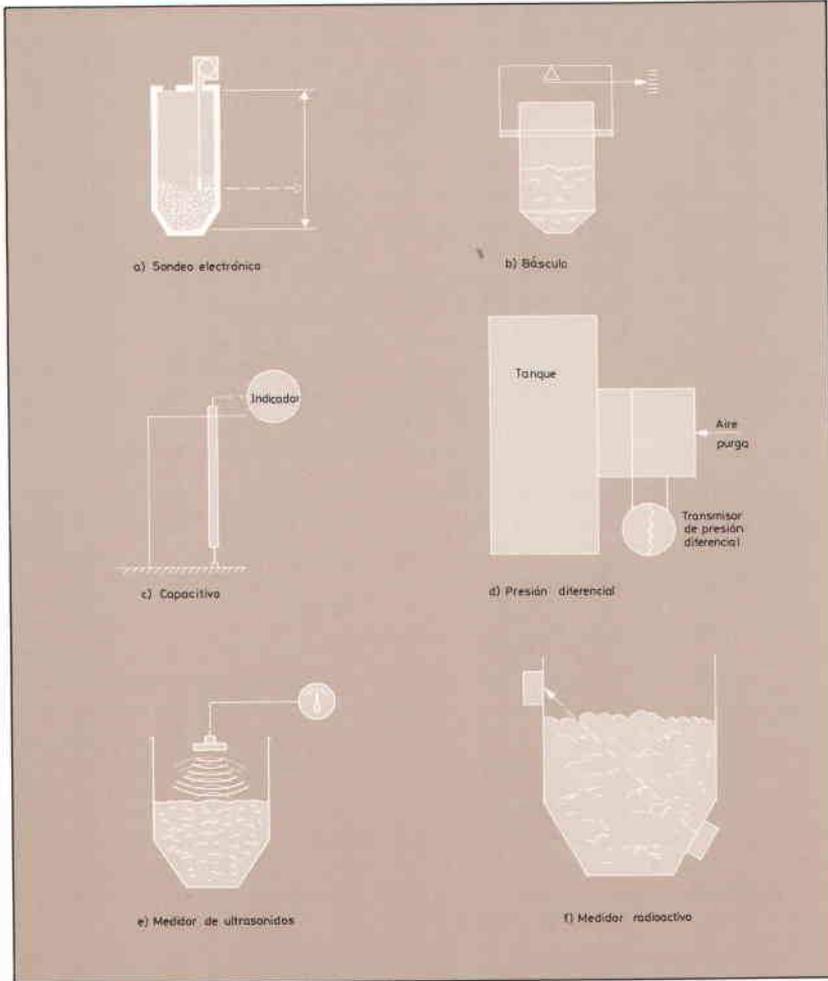
El medidor *conductivo* consiste en unas placas con un electrodo en su interior que establece en contacto eléctrico cuando el sólido alcanza el aparato. La pequeña corriente originada es amplificada y acciona un relé de alarma. Los sólidos deben poseer una apreciable conductividad eléctrica para poder excitar el circuito. Se emplea en la medida de nivel de sólidos como el carbón y el carbón activo.

El medidor *capacitivo* es un detector de proximidad capacitivo, dotado de un circuito oscilante RC que está ajustado en un punto crítico y que entra en oscilación cuando se encuentra próximo al lecho del sólido. El aparato se monta en el tanque en posición vertical o inclinada, y su

Medidores discontinuos de nivel de sólidos que detectan el nivel en puntos fijos del tanque.



Medidores continuos de nivel de sólidos.



sensibilidad se coloca al mínimo para evitar el riesgo de excitación del aparato en el caso de que pueda depositarse en el detector una mínima cantidad del sólido.

Otro tipo de medidor capacitivo consiste en una varilla situada en el interior del tanque que detecta la variación de capacidad del tanque y la representa como nivel, en forma parecida a la del mismo tipo de instrumento empleado en los líquidos.

El medidor de *paletas rotativas* consiste en un motor síncrono que acciona un eje vertical, dotado de paletas, que gira continuamente a baja velocidad. Cuando el producto alcanza las paletas las inmoviliza, con lo cual el soporte del motor y la caja de engranajes empiezan a girar en sentido contrario y en su giro actúan secuencialmente sobre dos interruptores. El primero excita el equipo de protección (por ejemplo, una alarma), o de señalización del nivel (por ejemplo, un indicador en el panel), mien-

tras que el segundo corta la alimentación eléctrica al motor síncrono y éste queda bloqueado por el producto. Cuando el nivel de sólido baja las palas quedan al descubierto, y un resorte retorna el motor a su posición inicial liberando los dos interruptores, con lo que el motor se excita y las palas vuelven a girar de modo continuo.

El medidor de *sondeo electromecánico* consiste en un pequeño peso móvil, sostenido por un cable, que pende de un motor colocado en la parte superior del tanque o silo. El ciclo de trabajo del peso es establecido por el motor y el programador, y es el siguiente: el peso baja suavemente dentro de la tolva hasta que choca contra el lecho del sólido, aflojándose el cable, con lo que un detector de tensión del cable señala en un receptor exterior cuál es la posición del peso en aquel momento, es decir: el nivel. El mismo detector invierte el sentido de movimiento del motor, con lo que éste asciende hasta la parte superior de la tolva, se para y se repite el ciclo nuevamente. El peso puede adoptar varias formas, según el tipo de sólido, para que se asiente sobre el lecho del sólido sin hundirse.

El medidor de *bascula* mide el nivel de sólidos indirectamente a través del peso del conjunto completo, tolva más producto, restando del peso total el de la tolva, que es conocido. La tolva se apoya sobre una plataforma de carga actuando sobre una báscula, o bien carga sobre otros elementos de medida, neumáticos, hidráulicos o eléctricos o electrónicos (galga extensométrica y microprocesador).

El medidor de nivel *capacitivo* es parecido en su funcionamiento al descrito en el nivel de líquidos, con el inconveniente de que tiene más posibilidades de error por la adherencia que puede presentar el sólido en la varilla capacitiva y por las variaciones de densidad del sólido.

El medidor de *presión diferencial* se emplea en la medida y el control continuo de nivel de lechos fluidizados. Consiste en dos orificios de purga de aire situados en el depósito por debajo y por encima del lecho. Un transmisor neumático o electrónico mide la presión diferencial y, por lo tanto, el nivel del lecho fluidizado.

El medidor de nivel de *ultrasonidos* consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un impulso ultrasónico, bien a un receptor colocado al otro lado del tanque, bien a la superficie del sólido. En el primer caso el aparato es utilizado como alarma de nivel alto, mientras que en el segundo mide el nivel de forma continua, al estar el receptor situado en la parte superior del tanque y captar el impulso ultrasónico reflejado por el lecho de sólidos. El aparato mide el tiempo que transcurre desde la emisión del impulso hasta la captación del impulso reflejado en el receptor.

El medidor de nivel *radioactivo* es parecido al estudiado en la medición de líquidos. La fuente de radiación de rayos gamma está dispuesta en el exterior y en la parte inferior del tanque, mientras que el receptor se encuentra situado en la parte superior del tanque. El grado de radiación recibida depende del espesor de sólidos que se encuentre entre la fuente y el receptor.

TEMPERATURA

La medida de la temperatura es una de las más comunes y de las más

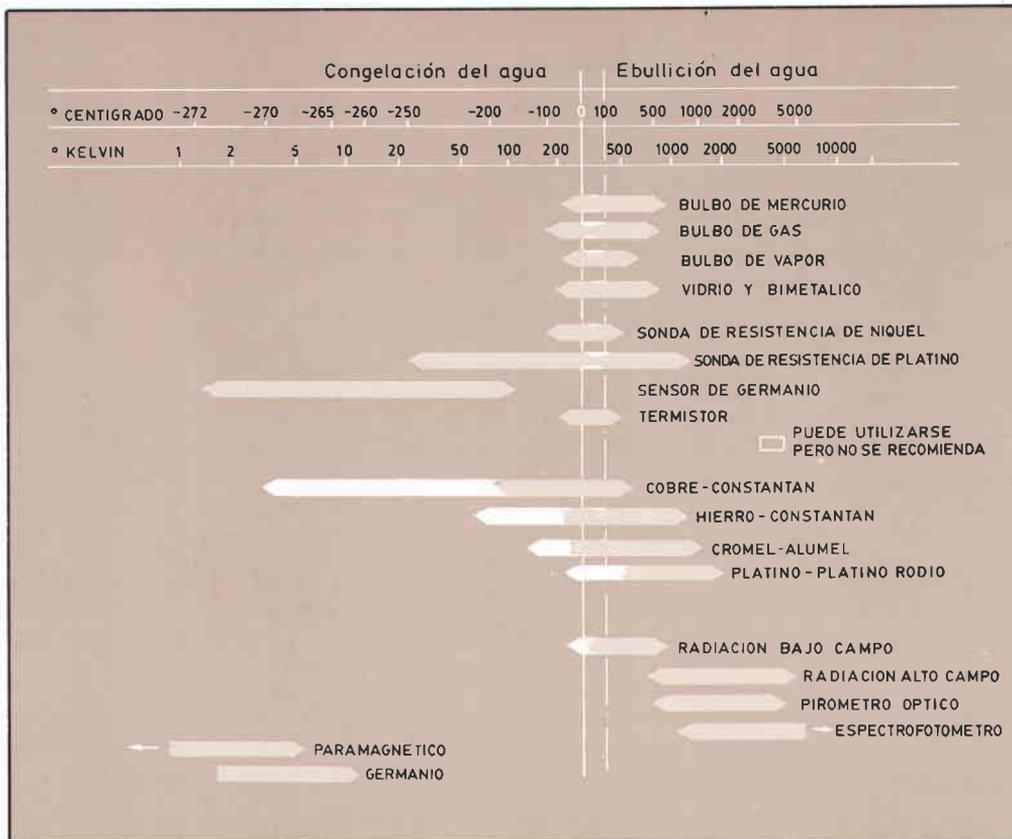
Sistemas de medida de las variables de proceso

importantes que se efectúan en los procesos industriales. Los instrumentos de temperatura empleados comúnmente en los procesos industriales son los termómetros, termopares y pirómetros.

Los termómetros de *mercurio* o *bimetálicos* son adecuados para una indicación local de la temperatura, su precisión es del orden del $\pm 1\%$.

Los termómetros de *bulbo* y *capilar* consisten en un bulbo, un capilar y un sistema térmico rellenos de mercurio, líquido o gas. Se utilizan para medidas locales. Su precisión es del $\pm 1\%$.

Instrumentos de temperatura en general.



Los *termómetros de resistencia* consisten en un hilo muy fino de un conductor, usualmente platino, que presenta una resistencia que depende linealmente de la temperatura. En el caso del platino, su valor es de $100\ \Omega$ a $0\ ^\circ\text{C}$. Esta resistencia se mide con un puente de Wheatstone (formando parte o no de un sensor piezorresistivo) en conjuntos denominados de dos o de tres hilos. Los circuitos de dos hilos unen directamente los dos bornes de la sonda a uno de los dos brazos del puente, por lo que la longitud del cable de conexión entre la sonda y el receptor influye en la precisión de la lectura.

Sondas de resistencia y sus circuitos de medida. (Ver la figura en la página siguiente).

En el montaje de tres hilos esta influencia es compensada, ya que dos de los tres hilos que unen la sonda de resistencia al puente se encuentran en brazos opuestos del puente.

El *termopar* consiste en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a distinta temperatura. Se genera así una f.e.m. que depende del tipo de termopar y de la diferencia de temperaturas entre las dos uniones, la fría o de referencia y la caliente o de medida. Existen diversos tipos de termopares, según sea la composición de los dos hilos que los forman. Por orden de aplicación de temperaturas de menor a mayor se utilizan normalmente los de cobre-constantan (tipo T), los de hierro-constantan (tipo J), los de cromel-alumel (tipo K) y los de platino-platino rodio (tipos R o S). Las temperaturas de aplicación abarcan desde -200°C a $+260^{\circ}\text{C}$ en el tipo T hasta 1.500°C en el tipo S.

La relación f.e.m.-temperatura del termopar no es lineal, por lo que las escalas de los instrumentos de temperatura cuyo elemento es el termopar, dependen de cada tipo de elemento. No obstante, existen instrumentos que linealizan las lecturas con el fin de que en el panel de control puedan utilizarse escalas lineales. Estos instrumentos linealizadores utilizan microprocesadores y, por hardware o por software, consiguen la transformación de las lecturas a señales lineales.

Los instrumentos receptores consisten en circuitos galvanométricos o bien potenciométricos.

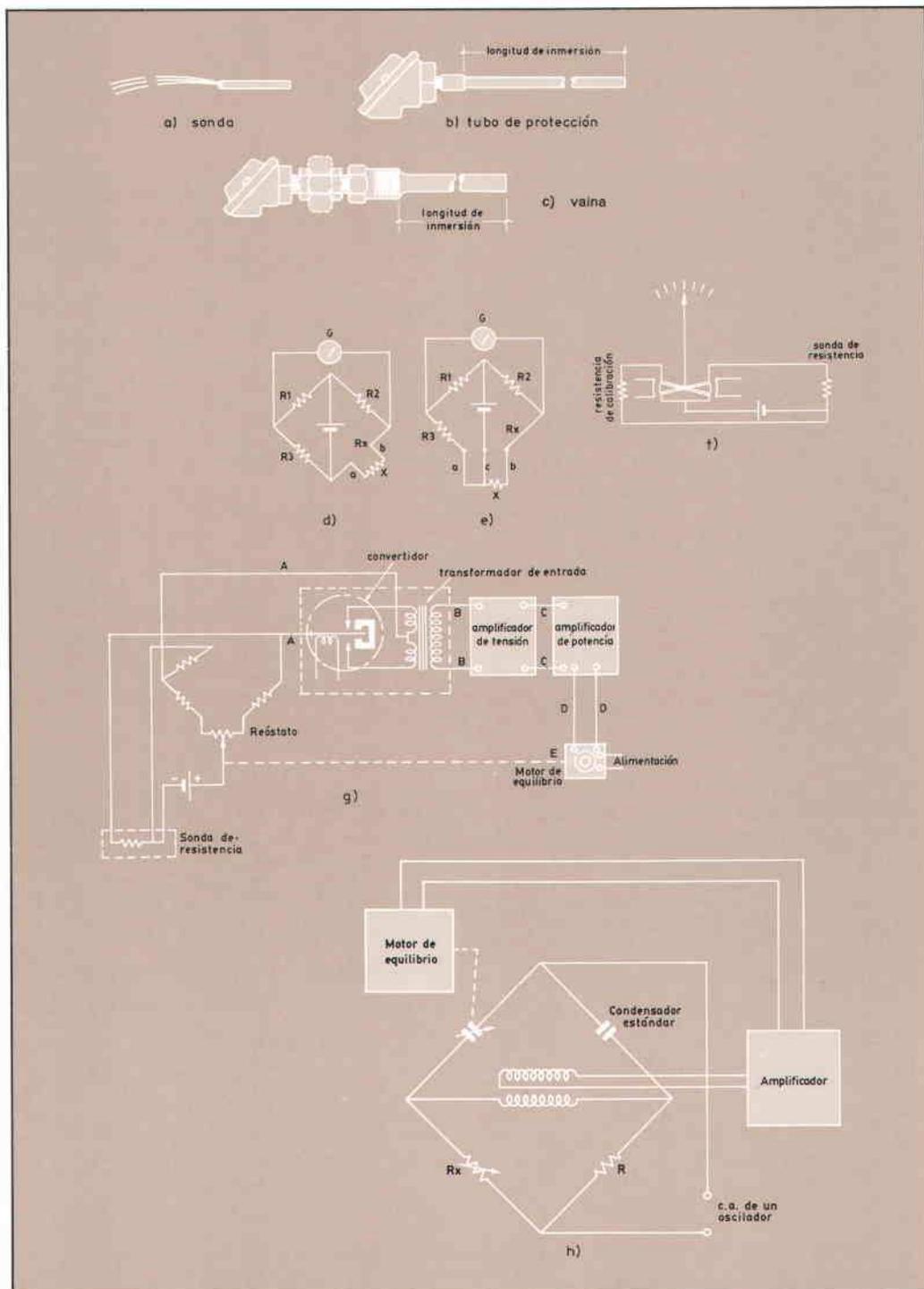
Los circuitos galvanométricos disponen de una bobina móvil situada entre los dos polos de un imán permanente, que es desviada al pasar a su través la corriente producida en el circuito cerrado del termopar. El problema que presenta el circuito galvanométrico, que está bien resuelto por los fabricantes, es la falta de potencia del conjunto bobina móvil-imán permanente.

Los circuitos potenciométricos disponen de una fuente de tensión constante que alimenta un circuito formado por dos brazos, con el termopar conectado a uno de ellos. Las variaciones de temperatura del termopar (que son las del proceso), desequilibran el puente, y el circuito, por su propio diseño, lo mantiene en equilibrio gracias a un motor que se excita ante cualquier señal de error proveniente del desequilibrio. Como el motor está conectado al índice o a la pluma de registro del aparato, el instrumento indicará continuamente la temperatura del proceso.

Deben compensarse algunos fenómenos que alteran la medida, como son las variaciones de temperatura de la caja del aparato, que influye en la diferencia de temperaturas del termopar y por lo tanto en la f.e.m. disponible en el circuito, el riesgo de rotura del termopar o de su circuito, que podrían inutilizar el proceso al quedar, por ejemplo, las resistencias de calefacción o la válvula de combustible en una posición peligrosa que podría aportar al sistema más calorías de las necesarias, y el uso de cables de conexión (llamados de compensación) más baratos que el platino, en instalaciones con termopares tipo R o S.

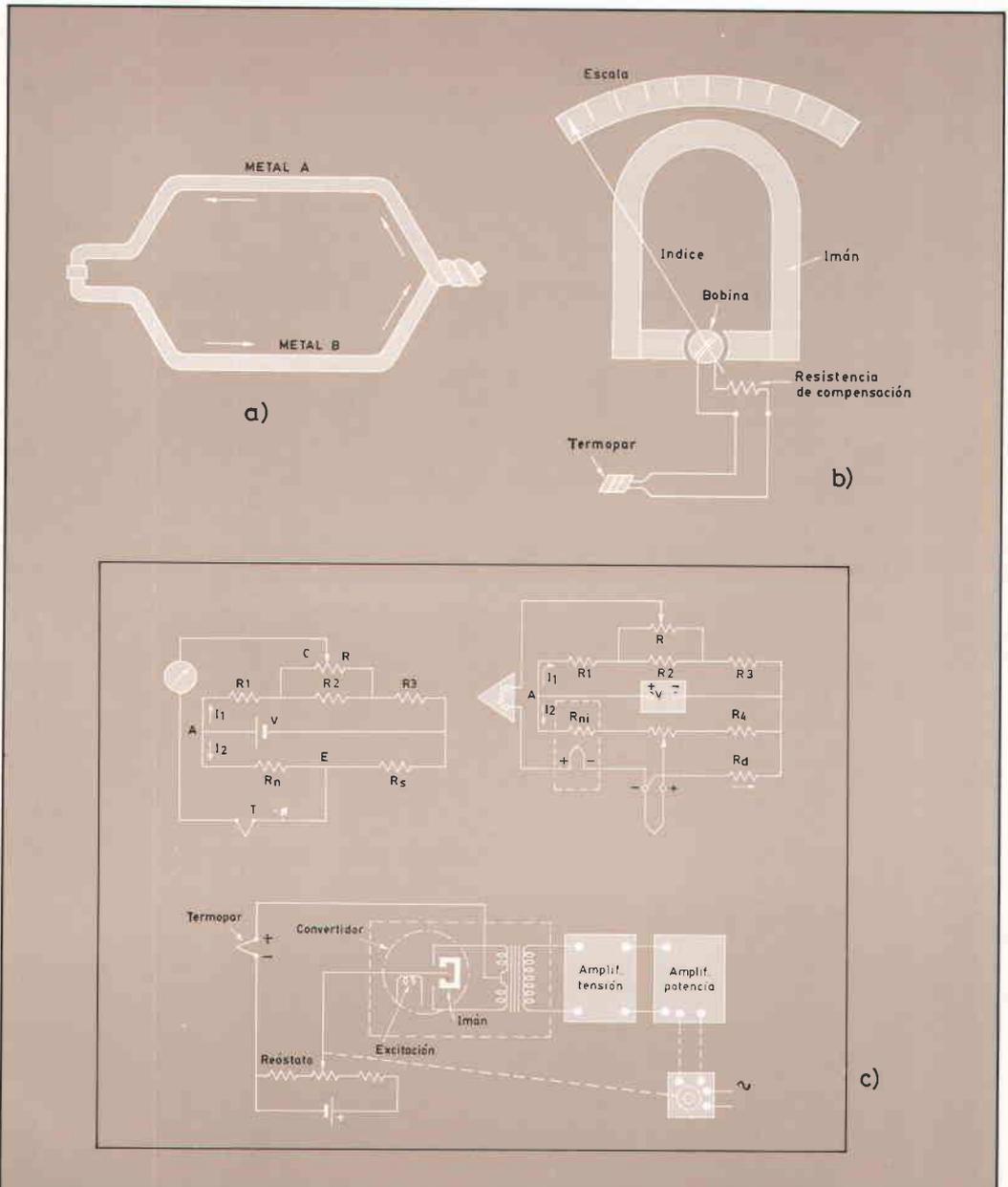
Esta compensación está bien resuelta en los instrumentos clásicos. El uso extensivo del microprocesador ha logrado que estos instrumentos sean más compactos y universales y se presten perfectamente al cambio

Sistemas de medida de las variables de proceso



Termopares y sus circuitos de medida.

del campo de medida o a la conexión a tipos distintos de termopares. Todo ello gracias al software creado por los fabricantes, que permite al usuario configurar el instrumento para cualesquiera condiciones de escalas, tipos de termopares, velocidades de registro, colores de las plumas registradoras, etc.



Los *pirómetros de radiación* captan la energía radiante del cuerpo cuya temperatura desea conocerse, y la enfocan sobre un elemento sensible, por ejemplo, un conjunto de termopares; estos generan una f.e.m. que, de forma análoga a la descrita anteriormente, alimenta un circuito galvanométrico o potenciométrico. Presentan el problema de falta de repetibilidad en las lecturas debido a alteraciones en la energía radiada por el cuerpo o a absorciones o emisiones parásitas de los gases o humos intercalados entre el cuerpo y el pirómetro. Sin embargo, si las condiciones de la medida son estables, el proceso se controla en condiciones idénticas, es decir, a iguales indicaciones del instrumento de temperatura, ya que es más importante este punto que la detección de la temperatura real del proceso. Los pirómetros de radiación tienen la ventaja de realizar la medida a distancia sin entrar en contacto con el cuerpo cuya temperatura se está midiendo.

OTRAS VARIABLES

El peso se mide con células de carga dotadas de elementos piezorresistivos, que están cementadas en el equipo que desea pesarse (por ejemplo, una báscula o un tanque) y que generalmente forman parte de un puente de Wheatstone.

La densidad o *masa específica* de un cuerpo se define como su masa por unidad de volumen, expresándose normalmente en g/cm^3 y se especifica para un valor base de la temperatura, que en líquidos suele ser de $0^\circ C$ o de $15^\circ C$ y en los gases de $0^\circ C$, y para un valor estándar de la presión, que en los gases es de una atmósfera.

La *densidad relativa* es la relación para iguales volúmenes de las masas del cuerpo y del agua a $40^\circ C$ en el caso de líquidos, y en los gases es la relación entre la masa del cuerpo y la del aire en condiciones normales de presión y de temperatura ($0^\circ C$ y 1 atmósfera).

El *peso específico* es el peso del fluido por unidad de volumen. Por lo tanto, entre el peso específico y la densidad existirá la relación:

$$\text{peso específico} = \text{densidad} \cdot g$$

Siendo g la aceleración debida a la gravedad.

Otras unidades de medida de densidad son los grados API, normalizados por el *American Petroleum Institute* para productos petrolíferos, los grados Baumé para ácidos y jarabes, y los grados Brix empleados casi exclusivamente en la industria azucarera.

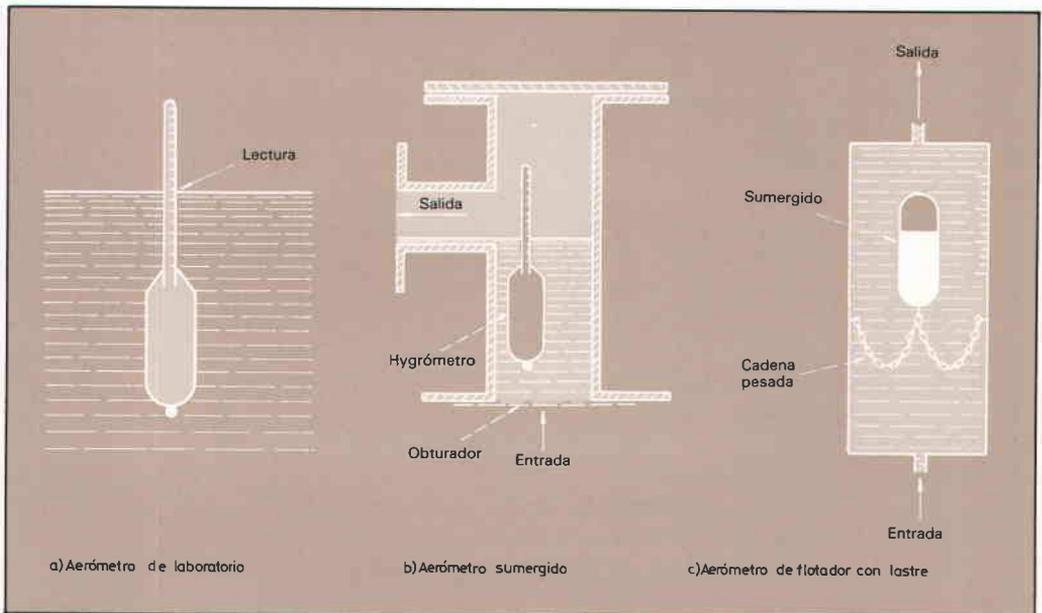
En los procesos industriales la densidad es una variable cuya medida es a veces vital. Tal es el caso de la determinación de la concentración de algunos productos químicos como el ácido sulfúrico, la medida exacta del caudal en gases o vapores (que viene influida por la densidad), la medida de la densidad en un producto final que garantiza las cantidades de los ingredientes que intervienen en la mezcla, etc.

Los diversos métodos de medida de densidad, precisan trabajar con una muestra del fluido, sea obtenida de modo intermitente, sea obtenida en forma de un flujo continuo, o bien proveniente de tanques, como sucede en el caso de medidas en líquidos.

Si el fluido, tal como ocurre en el caso de líquidos, está almacenado en tanques, la densidad medida es el promedio de densidades existentes en las diversas capas como, por ejemplo, en los productos petrolíferos donde los de menor densidad permanecen en la superficie. A veces se acude a pesar el tanque, obteniendo así la masa total que, dividida por el volumen conocido, da directamente la densidad sin necesidad de medir la altura del tanque o su densidad.

En el caso de líquidos comprendidos en tanque, conviene que el líquido esté en agitación para asegurar una densidad lo más uniforme posible, pero sin que este movimiento sea excesivo; en el caso de que el tanque posea un agitador debe disponerse de un rompeolas para que la zona de medición sea tranquila.

Aerómetros que miden la densidad por sumersión de un flotador.

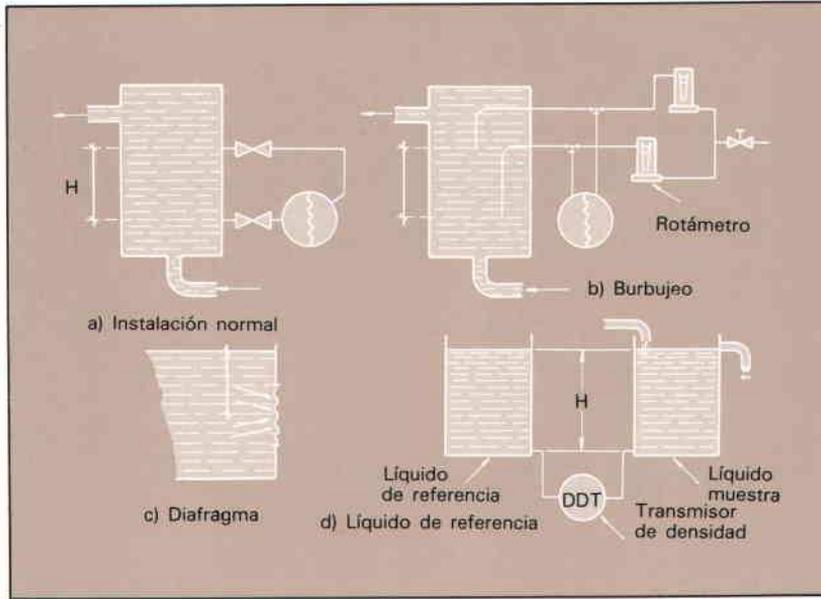


Como aparatos medidores de densidad tenemos los *areómetros*, que consisten en un flotador lastrado en su parte inferior con un vástago superior graduado. El aparato se sumerge hasta que su peso es equilibrado por el líquido que desaloja, hundiéndose tanto más cuanto menor sea la densidad del líquido. Una variante del areómetro consiste en un flotador con un lastre en forma de cadenas sujetas a puntos fijos del recipiente. El flotador está completamente sumergido dentro del líquido, y según cuál sea su densidad se sumerge más o menos, variando proporcionalmente el peso efectivo de la cadena y adoptando cada vez una nueva posición de equilibrio, lo que de la densidad existente. Utilizando un transductor de inductancia variable o bien un transformador diferencial es posible transmitir eléctricamente la densidad.

En los aparatos de *presión diferencial*, semejantes a los utilizados en la medida del nivel (burbujeo y diafragma), se fijan dos puntos en el tanque o

Sistemas de medida de las variables de proceso

en una tubería vertical del proceso, y se les conecta un instrumento de presión hidrostática (caso de tanque abierto a presión atmosférica) o de presión diferencial (caso de tanques cerrados a presión), bien directamente, bien a través de una cámara de medida.



Medidores de presión diferencial que miden la densidad por variación de la presión ejercida sobre un diafragma situado dentro de un depósito de altura de líquido constante.

Como la diferencia de alturas en el líquido es fija, la única variable que altera la presión diferencial es la densidad.

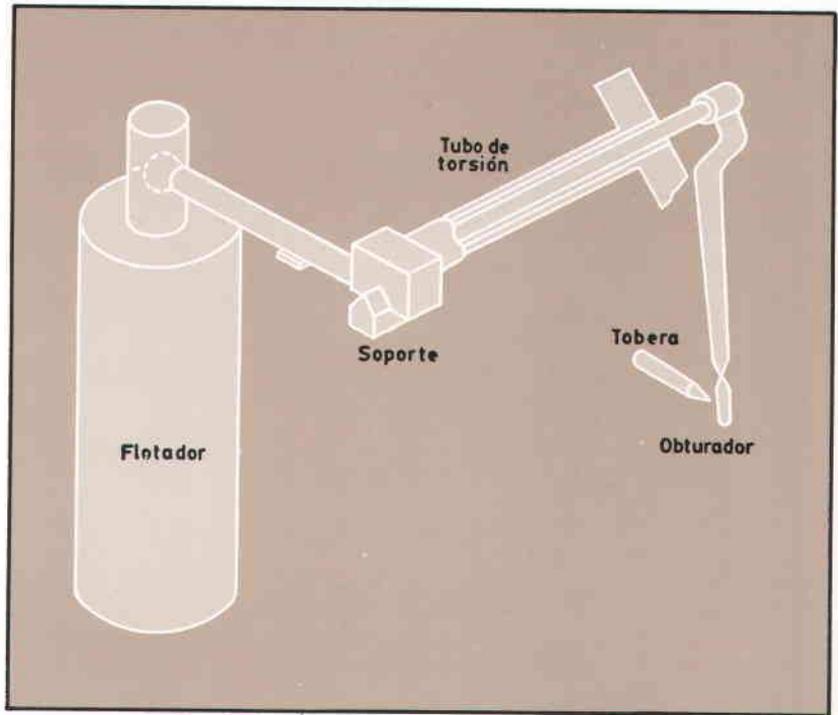
Los sistemas de *desplazamiento* utilizan un instrumento de desplazamiento o barra de torsión parecido al empleado en la medición de nivel de líquidos, con la diferencia de que el flotador está totalmente sumergido en el líquido y está equilibrado exteriormente para que el par de torsión desarrollado represente directamente la densidad del líquido.

Los *refractómetros* son aparatos que miden el índice de refracción del líquido y constituyen una medida inferencial de su densidad. Se utilizan en los fluidos limpios. Consisten en una fuente luminosa que hace incidir un rayo en el líquido con un ángulo tal que la reflexión de la luz pase a refracción. El haz luminoso se enfoca en un prisma rotativo que barre el líquido del proceso. La refracción que se presenta cuando el rayo luminoso incide con el ángulo crítico se detecta con una célula fotoeléctrica y la señal es amplificada para su registro o control correspondiente. El índice de refracción puede relacionarse con la concentración de sólidos del líquido, es decir, inferencialmente con la densidad.

Una variante de este modelo barre el líquido del proceso con un haz luminoso transmitido a través de fibras ópticas sumergidas en el líquido. La luz que sale de la fibra es tanto mayor, y tanto menor la que alcanza el detector, cuanto más próximo sea el índice de refracción del líquido al de la fibra.

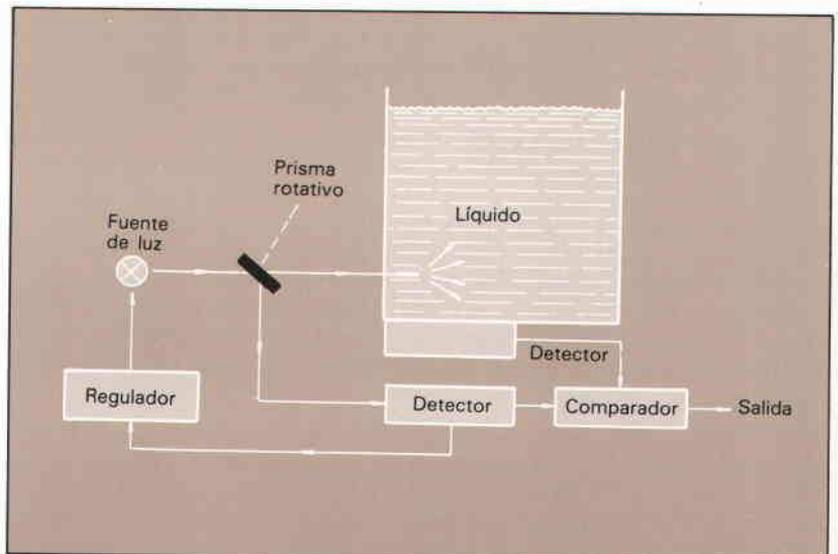
Control de procesos industriales: criterios de implantación

Medidores de desplazamiento que por el mismo principio de funcionamiento en nivel de líquidos, miden la densidad por la fuerza del empuje del flotador.



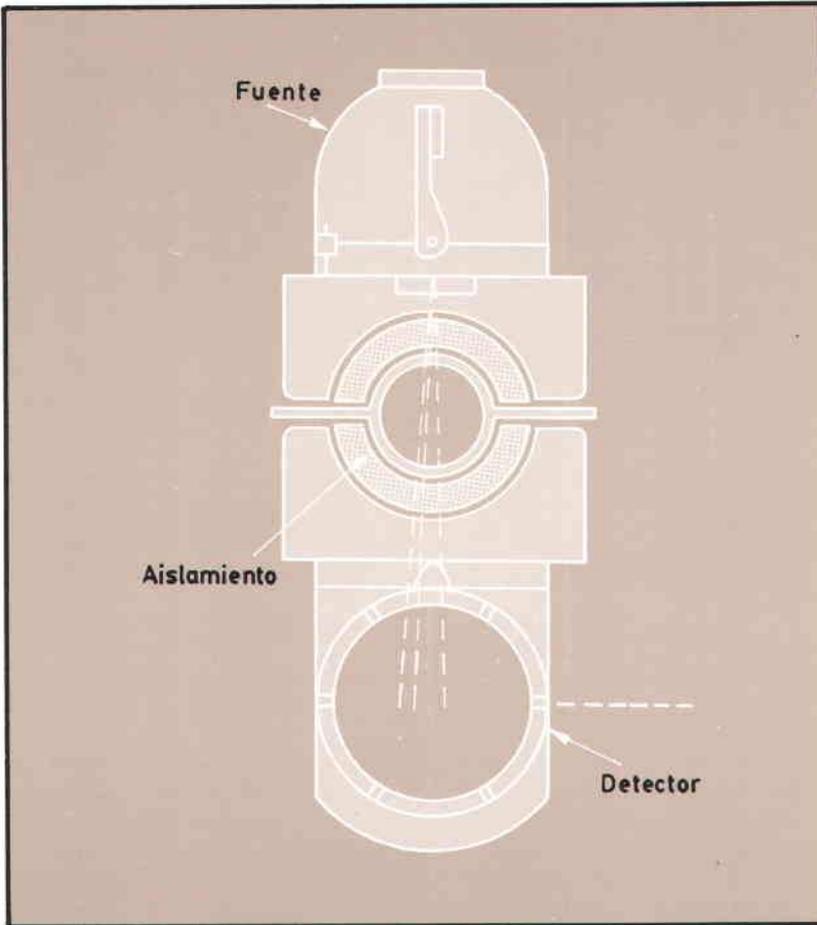
El método de radiación se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. Como el coeficiente de atenuación del fluido permanece constante para todos los elementos de peso atómico comprendido entre 2 y 30, y la

Refractómetro que mide la densidad por medida del índice de refracción del líquido.



Sistemas de medida de las variables de proceso

longitud de la radiación es constante, se sigue que la intensidad de radiación residual captada es directamente proporcional a la densidad del fluido y que, por lo tanto, la absorción es inversamente proporcional a la densidad del líquido. La radiación residual es medida con un contador de centelleo que suministra pulsos de tensión cuya frecuencia es inversamente proporcional a la densidad.



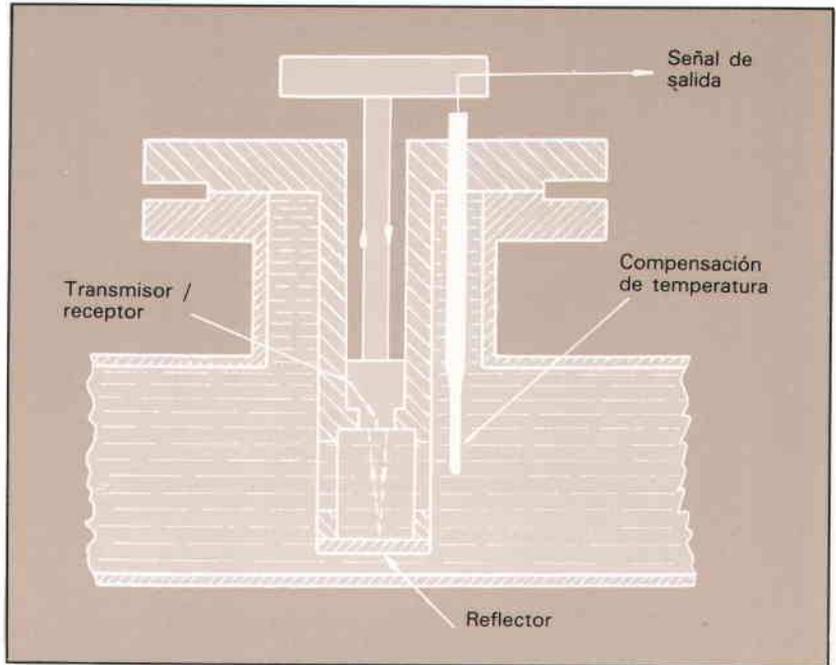
Medidor de radiación, de igual principio de medida que los de niveles de líquidos, instalado en un tanque de altura de líquido constante.

La fuente de radiación utilizada industrialmente es principalmente el cesio 137, de vida media de 30 años (también se emplea en casos especiales el americio 241, de vida media de 458 años).

En el sistema de *punto de ebullición* se mide la diferencia de temperaturas entre el punto de ebullición del líquido que se está concentrando y el punto de ebullición del agua en las mismas condiciones de presión. Esta diferencia de temperaturas es función de la densidad del líquido y se mide mediante sondas de resistencia inmersas una en el líquido y la otra en agua, conectadas a un instrumento diferencial de puente de Wheatstone graduado directamente en densidad.

En el *medidor de ultrasonidos* se mide la velocidad del sonido dentro del fluido e inferencialmente se calcula su densidad. La medida se realiza disponiendo el conjunto emisor-receptor de ultrasonidos inmerso dentro del líquido o exterior al tanque o a la tubería. Las variaciones de la velocidad del sonido son provocadas por cambios en la densidad, que varían el acoplamiento acústico entre los transductores y el fluido.

Medidor de ultrasonidos basado en la variación de velocidad del sonido dentro del fluido al cambiar su densidad.



Los medidores *inerciales* están basados en el aprovechamiento de la variación de la masa inercial de una masa inmersa en el fluido, al entrar la misma en vibración dentro de una cámara de volumen constante. Las variaciones de densidad del fluido contribuyen a una carga inercial de la masa, variando pues su masa efectiva. Como la frecuencia natural de un elemento depende de su masa efectiva, se sigue que midiendo la frecuencia natural o resonancia de la masa inmersa se tendrá una medida correlacionada de la densidad del fluido. La temperatura medida del fluido debe compensarse.

La fórmula de cálculo correspondiente es:

$$p_0 = K_0 + K_1 \cdot T + K_2 \cdot T_2$$

en la que:

- p_0 = Lectura de densidad del aparato.
- K_0, K_1, K_2 = Constantes de calibración de cada aparato.
- T = Período natural (inverso de la frecuencia natural).

El circuito de medida incorpora un cristal piezoeléctrico para detectar la

Sistemas de medida de las variables de proceso

frecuencia natural en el estado de resonancia de la masa, y ésta se mantiene continuamente en dicho estado gracias a un circuito de control.

El sistema sirve tanto para la medición de densidad en líquidos como en gases.

El *medidor de torsión* consiste en dos cilindros huecos dispuestos en una tubería donde circula el fluido. La excitación y la detección de la frecuencia de resonancia son proporcionadas por activadores y sensores piezoeléctricos.



Método de medición de densidad por horquilla oscilante.

En el método de *horquilla* la masa en vibración tiene forma de horquilla y la aspiración del fluido (líquido o gas) tiene lugar mediante una bomba auxiliar a través de un *by-pass*. El sistema debe aislarse perfectamente para que las condiciones de servicio de temperatura correspondan exactamente a las del fluido. La precisión del sistema es del orden del $\pm 0,2\%$.

El método de *tubo en U* consiste en un tubo en forma de U que incorpora una armadura rígida situada dentro del campo de una bobina excitadora alimentada por una corriente pulsante. La vibración que el tubo experimenta es función de la masa del fluido contenida en el tubo y, por lo tanto, de su densidad.

Control de procesos industriales: criterios de implantación

La excitación electromagnética correspondiente hace que el tubo vibre a su frecuencia natural:

$$f = 2 \cdot \left(\frac{C}{M_0 + V_0 \cdot \rho} \right)^{1/2}$$

en la que:

f = Frecuencia de la vibración.

M_0 = Masa del tubo.

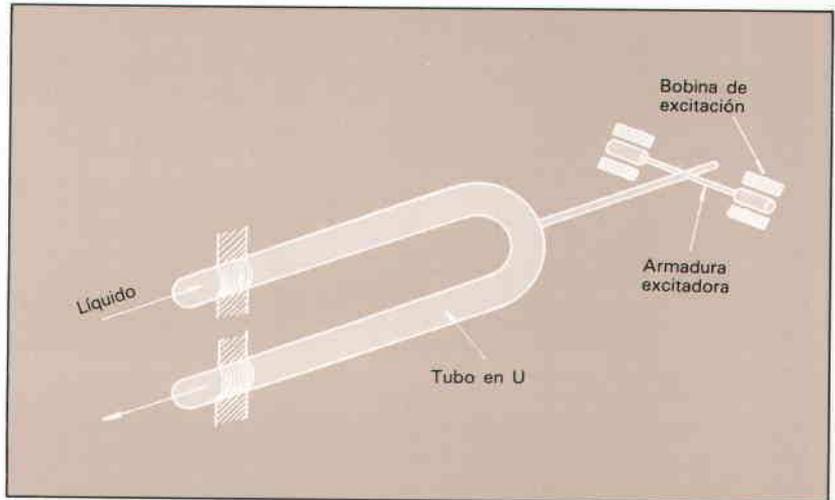
V_0 = Volumen en vibración.

C = Constante de elasticidad.

ρ = Densidad a medir.

La medida es compensada según la temperatura real del fluido a su paso a través del tubo.

Método de tubo en U oscilante cuya frecuencia de vibración depende de la densidad.

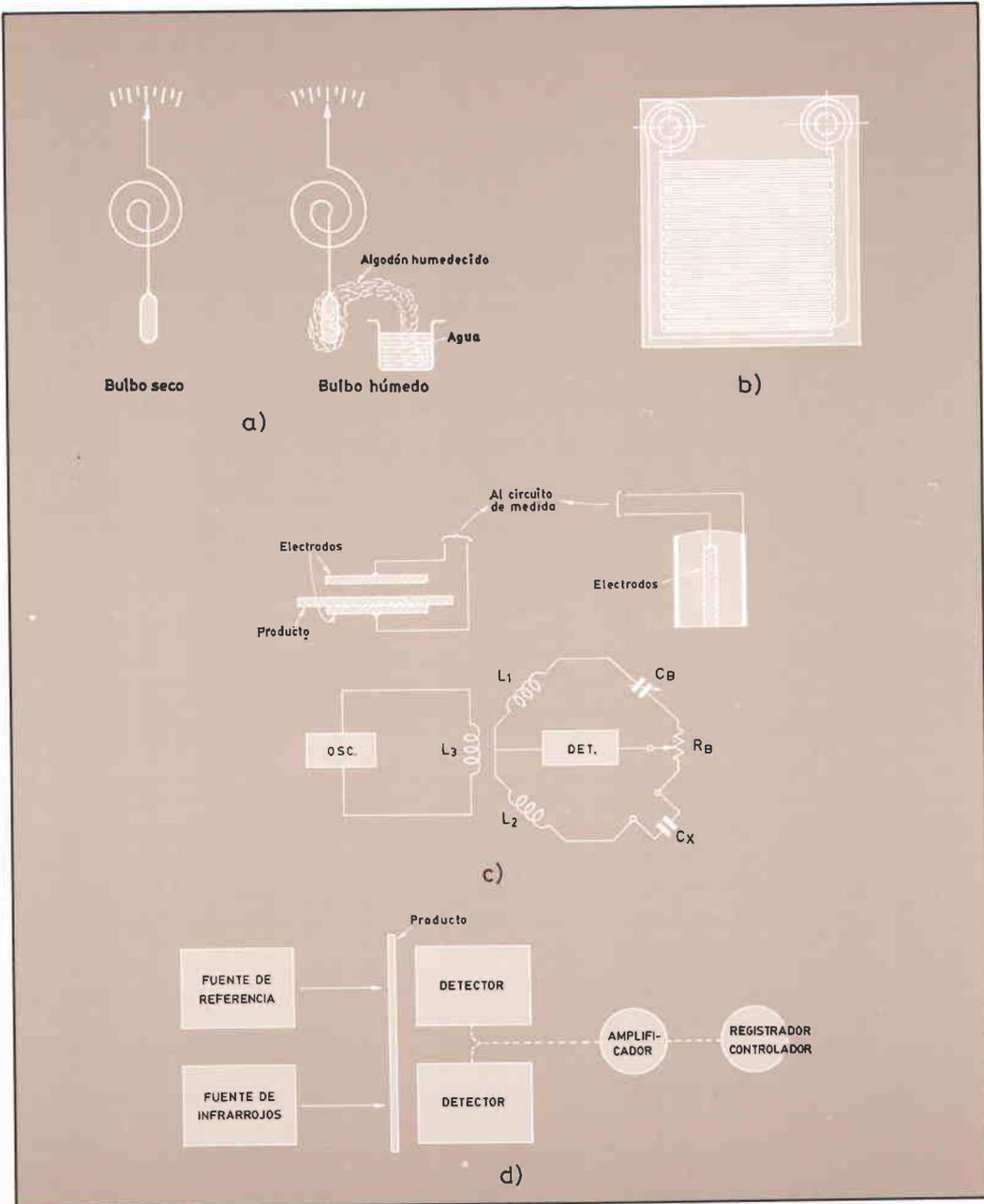


La vibración induce una corriente alterna en una bobina receptora y esta corriente es convertida a una señal de corriente continua y enviada a un controlador o registrador.

La precisión de medida del instrumento alcanza $\pm 0,0001 \text{ g/cm}^3$ y puede trabajar a unas presiones y temperaturas máximas de 50 kg/cm^2 y 150°C con fluidos viscosos y corrosivos gracias al material del tubo en U. Algunos fluidos tienen tendencia a recubrir el tubo a pesar de la vibración a que está sometido y obligan a parar el proceso para limpiar el tubo.

Los medidores de balanza consisten en un tubo en U apoyado con conexiones flexibles en la carcasa del aparato y suspendido de una báscula que opera por el principio de equilibrio de fuerzas. Según cuál sea el tipo de transmisor dará una señal neumática ($3 + 15 \text{ psi}$) o electrónica ($4 + 20 \text{ mA}$).

La humedad (y el punto de rocío) son variables de extraordinaria impor-



tancia en la industria, en particular en los acondicionadores de aire, en los secadores y humidificadores, en la industria textil en la conservación de las fibras, etc. La humedad se mide con:

La célula de cloruro de litio, que consiste en una rejilla embebida de una

Medidores de humedad. a) Bulbo seco y bulbo húmedo. b) Célula de litio. c) Puente de capacidades. d) Medida por infrarrojos.

sal de litio que tiene la propiedad de cambiar de resistencia al variar el contenido de humedad del ambiente. El elemento no puede utilizarse en atmósferas con mucho polvo, con dióxido de azufre... y en atmósferas contaminadas con sal.

Para medir la humedad de los sólidos se utilizan los siguientes principios de funcionamiento: variación de conductividad del producto, cambio de la constante dieléctrica que el material experimenta, método de infrarrojos (aplicado en la industria papelera), en el que la muestra se hace pasar a través de un haz de infrarrojos y se mide la radiación que atraviesa el material, método de radiación en el que la radiación emitida por una fuente de neutrones es reflejada por los átomos de hidrógeno de las moléculas del material.

El *punto de rocío* se mide con la misma célula de cloruro de litio, con un sistema de *condensación en un espejo*, y con un *analizador de infrarrojos*.

La célula de cloruro de litio consiste en una bobina impregnada de la sal de litio, con un conductor bifilar arrollado alimentado por una corriente que se cierra a través de la sal (que es conductora). La bobina se calienta y se llega a un estado de equilibrio de temperatura que es proporcional al punto de rocío del ambiente. Una termoresistencia conectada a un puente de Wheatstone mide esta temperatura, y por lo tanto el punto de rocío.

El sistema de condensación en un espejo consta de una cámara dotada de un sistema calefactor y refrigerador que mantiene la temperatura de la superficie de un espejo, justo la correspondiente al punto de rocío del gas o vapor que se mide.

El analizador de infrarrojos contiene dos cámaras, una de comparación (con un gas de referencia) y la otra de medida. Una fuente de infrarrojos emite a través de las dos células y un detector compara las radiaciones que han atravesado las dos cámaras, dando una presión pulsante que indica el punto de rocío del gas.

La *viscosidad* se mide con viscosímetros de variados principios de funcionamiento:

- Caída de presión en un tubo capilar conectado entre dos puntos de la tubería por donde pasa el fluido.
- Par de torsión de un cilindro acoplado por un resorte al eje de un motor.
- Rotámetro conectado a través de una placa-orificio.
- Ultrasonidos donde se mide la energía necesaria para excitar una probeta que vibra ultrasónicamente en el seno del fluido.

La *consistencia* se mide determinando el esfuerzo cortante en el fluido mediante los siguientes dispositivos:

- Discos rotativos y paletas rotativas que giran longitudinalmente al movimiento del fluido.
- Paleta fija de forma especial que no es influida por las fuerzas de impacto, ni por las de rozamiento, sólo por el esfuerzo cortante.
- Flotador que experimenta una fuerza función del esfuerzo cortante

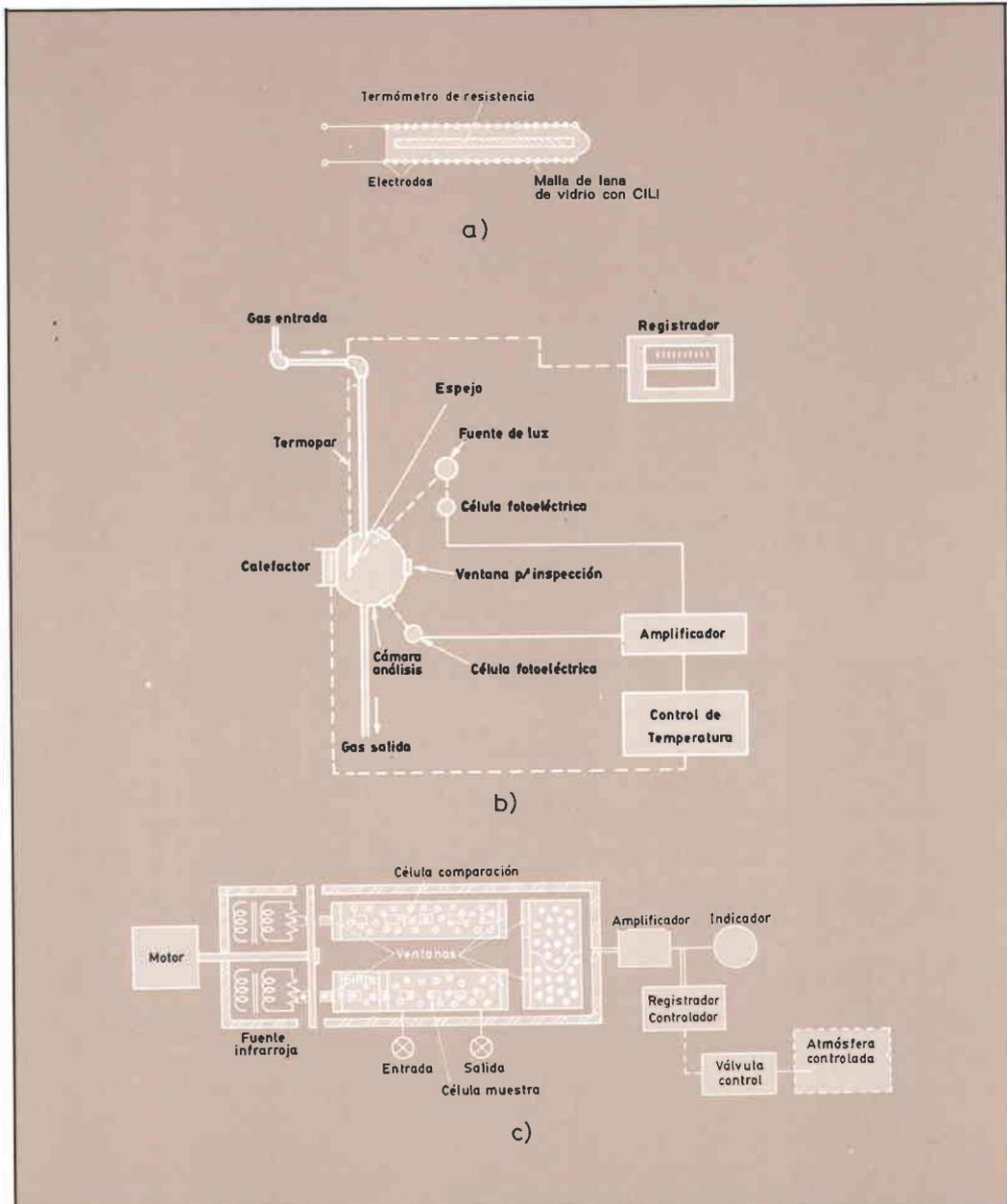
Sistemas de medida de las variables de proceso

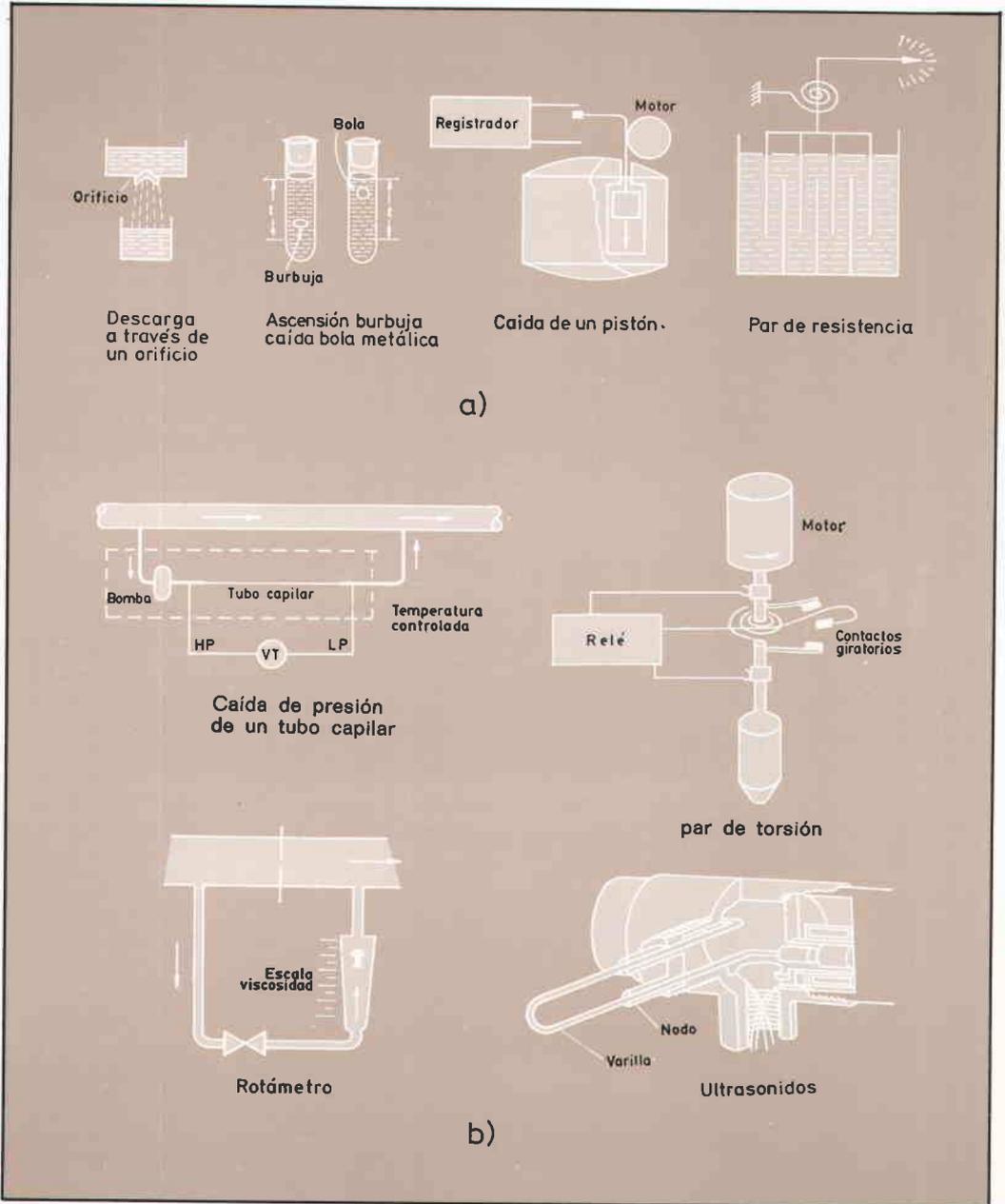
del fluido al pasar éste a través de varias placas transversales incorporadas al eje del flotador.

– Puente hidráulico que crea una presión diferencial entre dos de sus vértices.

Otras variables medidas en los procesos industriales son la *conductivi-*

Medidores de punto de rocío.
 a) Célula de litio. b) Sistema de condensación de un espejo. c) Analizador de infrarrojos.





Medidores de viscosidad y de consistencia.

dad (medida con sensores de placas paralelas conectados a un puente de Wheatstone), el pH (medido con electrodos de vidrio y de referencia), redox (potenciales de oxidación-reducción medidos con sensores dotados de un metal noble y otro de referencia), conductividad térmica de los gases, utilizada típicamente en la determinación del contenido de dióxido

Sistemas de medida de las variables de proceso

de carbono en las calderas de vapor, lo que permite determinar y controlar la combustión correcta del gas o fuel-oil, y la *cromatografía*, utilizada en análisis para determinar los componentes de una muestra de gas en pocos minutos.

SEGURIDAD, FIABILIDAD, DISPONIBILIDAD

La seguridad de funcionamiento de los elementos de medida y transmisión depende de la correcta aplicación y de la instalación adecuada de los aparatos. Por ejemplo, un medidor de turbina que mida caudales de líquidos con partículas en suspensión, y que esté instalado sin filtro, tendrá seguramente una vida útil corta, aparte de indicar caudales erróneos durante todo el tiempo que funcione con las palas de la turbina desgastadas. Y un medidor de caudal de presión diferencial que utilice una placa-orificio en fluidos con sólidos abrasivos en suspensión, dará lugar a una degradación gradual de la medida, ya que el orificio de la placa irá desgastándose con el tiempo y perderá sus dimensiones y su forma.

Aunque la fiabilidad de los instrumentos depende mucho de la aplicación local en cada industria, por las diferentes condiciones de servicio y ambientales a que están sometidos, es útil tener una idea aproximada del llamado *tiempo medio entre fallos* de los aparatos. La tabla que sigue ilustra estos valores para cada tipo de instrumento

Variable	Instrumento	Tiempo medio entre fallos (años)
Presión		0,1 - 5
	Caudal	
	Placa-orificio, tobera	0,2 - 5
	Tubo Venturi....	0,1 - 1
	Turbina	0,1 - 1
	Desplazamiento positivo	0,5 - 1
	Magnético	1 - 2
Nivel	Burbujeo	1 - 5
	Presión diferencial	0,2 - 2
	Flotador	0,1 - 5
Temperatura	Vidrio	0,5 - 2
Densidad		1 - 3
	Nuclear	0,1 - 0,5
Análisis	Mecánico	0,1 - 0,4
	pH y ORP	0,1 - 0,4
	Conductividad	0,1 - 0,4

(Fuente U.S. Environmental Protection Agency citada en la revista *Chemical Engineering* March 31, 1986 en el artículo *On-line instrumentation and process control* de Béla G. Liptak)

Componentes locales del sistema de control

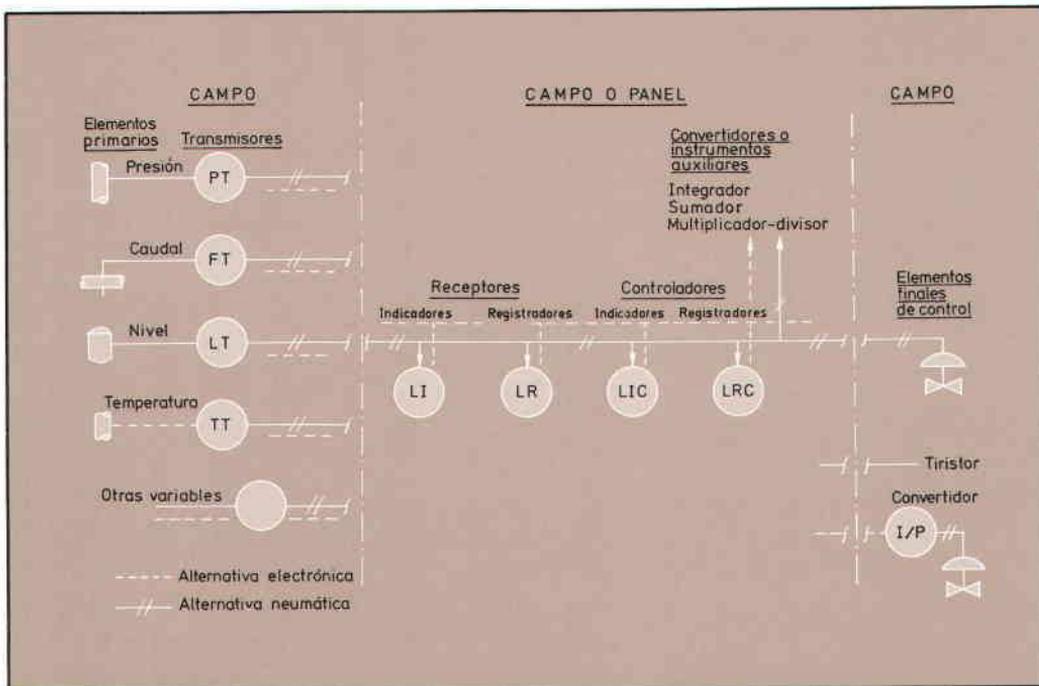
INTRODUCCIÓN

El control se realiza según el lazo de control típico formado por el proceso (por ejemplo, tanque, tuberías y bombas en el caso de nivel, e intercambiador de calor y serpentín en el caso de control de temperatura), el transmisor, el controlador y la válvula de control.

TRANSMISORES

La transmisión de las variables puede realizarse de varias formas como se indica en los párrafos que siguen.

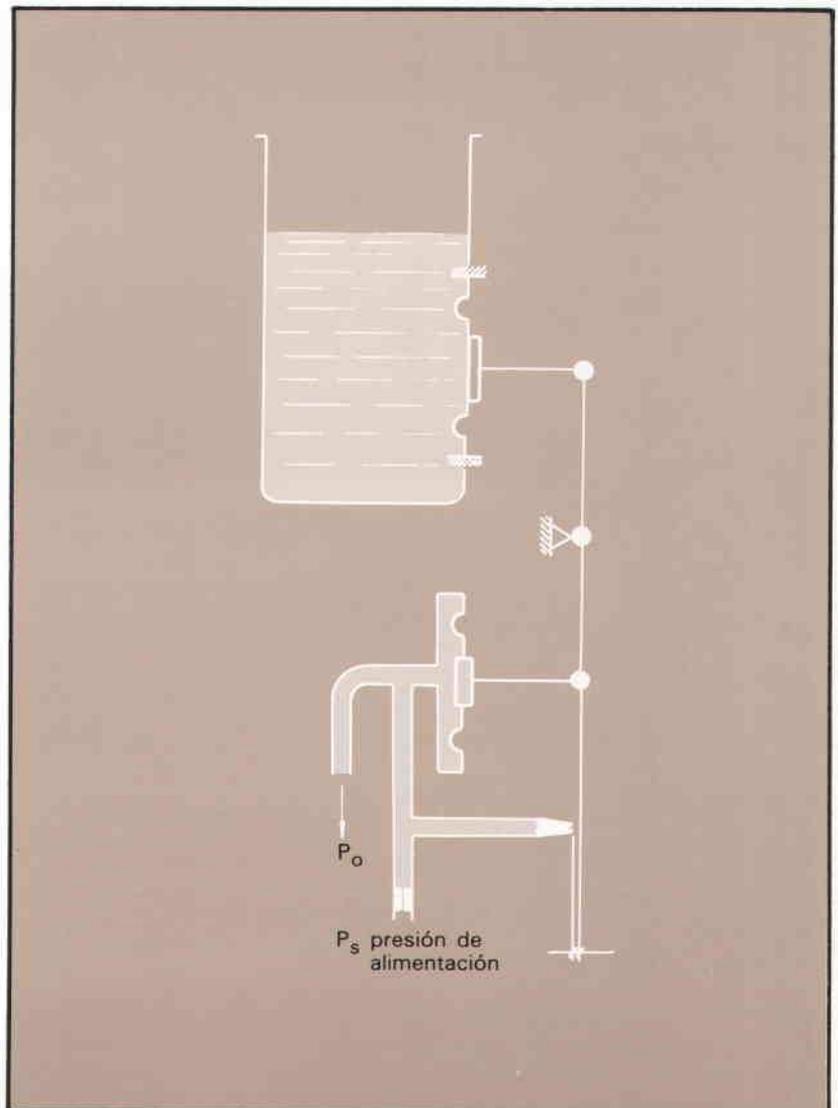
Transmisores. Modos de funcionamiento.



Los modos de transmisión clásicos, neumáticos y electrónicos, se realizan con las dos señales típicas de $3 \pm 15 \text{ psi}$ y $4 \pm 20 \text{ mA c.c.}$ a distancias que en señales neumáticas son en la práctica de 300 m , como máximo, y en electrónicas son de 500 m a 1 km , según sea el tipo de transmisor.

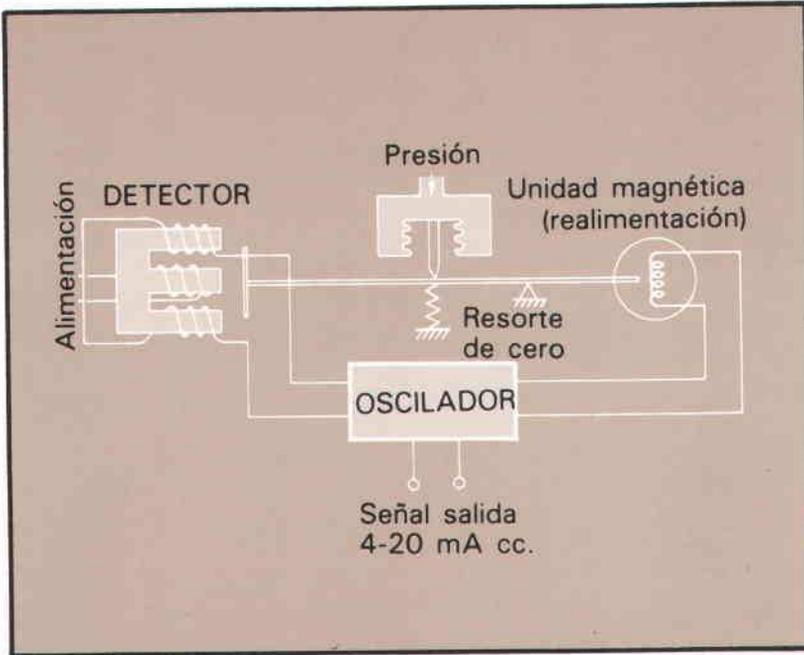
Las fibras ópticas en la transmisión se están utilizando en lugares de la planta donde las condiciones son duras (campos magnéticos intensos que influyen sobre la señal, etc.) y es de esperar que encontrarán nuevas aplicaciones a medida que se abarate su coste y ganen en seguridad de funcionamiento. No hay que olvidar que la industria es muy conservadora y sólo aplica las técnicas que están muy probadas y que funcionan con seguridad, sin apenas fallos. Las fibras ópticas tienen la ventaja de ser inmunes a campos magnéticos y de radiofrecuencia, trabajan con una anchura de banda considerable, son de pequeño tamaño y de poco peso, sus pérdidas de energía son bajas, y las comunicaciones son seguras

*Transmisor neumático.
Conjunto tobera - obturador
que convierte la
variable de proceso a la señal
neumática de 3 ± 15
psi o $0,2 \pm 1$ kg/cm².*



Componentes locales del sistema de control

(inmunes a las tormentas eléctricas). Los módulos de transmisión pueden ser excitados por fuentes de luz de LED (*light emitting diodes*) o diodo láser. Los LED son de mayor fiabilidad y, aunque no sean tan potentes como los diodos láser, pueden enviar la señal hasta distancias de 1,8 km, lo cual es suficiente en la mayoría de las plantas industriales. El tiempo medio entre fallos de los LED (montados con los conjuntos optoelectrónicos) es de 125.000 horas, mientras que el de los diodos láser es de 8.000 horas.



Transmisores electrónicos que convierten la variable del proceso a la señal electrónica de 4 + 20 mA c.c.

El microprocesador se aplica cada vez más en la transmisión por las ventajas de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, fiabilidad, precio cada vez más competitivo y por ser apto para realizar cálculos diversos. Por ejemplo, para la típica compensación del nivel considerando la presión, la temperatura (o densidad) y la forma del tanque, y para la determinación del caudal masa a partir del caudal volumétrico, la presión y la temperatura.

TRANSMISORES NEUMÁTICOS

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que, mediante bloques amplificadores con retroalimentación por equilibrio de movimientos o de fuerzas, convierte el movimiento del elemento de medición (presión, caudal, nivel, temperatura...) a señal neumática de 3 + 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o bien su equivalente en unidades métricas 0,2 + 1 Kg/cm², siendo su precisión del orden del ±0,5%.

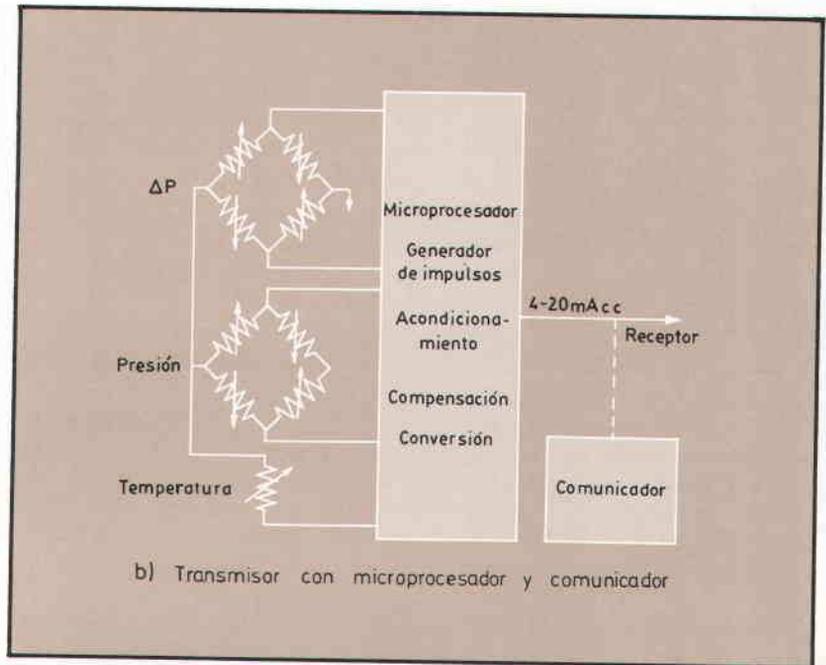
El conjunto de tobera-obturador convierte el movimiento del elemento de medición de la variable a una señal neumática de 3 + 15 psi y compensa la fuerza que el aire que se escapa de la tobera ejerce sobre el obturador, siendo este escape proporcional a la separación entre la tobera y el

obturador, la cual depende del valor de la variable. Como el diámetro de la tobera es muy pequeño, del orden de 0,1 a 0,2 mm, los transmisores neumáticos son susceptibles de mal funcionamiento debido a partículas de aceite o polvo que pueden tapan el pequeño orificio de la tobera, y aunque el uso de compresores sin aceite de lubricación ha eliminado considerablemente este inconveniente, es típico en el arranque de la planta, después de la parada diaria o de fin de semana, que algunos instrumentos no funcionen adecuadamente por haberse depositado partículas en la tobera, lo que obliga al servicio de mantenimiento a su urgente limpieza para que la fábrica o parte del proceso pueda arrancar.

TRANSMISORES ELECTRÓNICOS

Basados en detectores de inductancias, utilizando transformadores diferenciales o circuitos de puente de Wheatstone o empleando una barra de equilibrio de fuerzas, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4 ± 20 mA c.c. Su precisión es del orden del $\pm 0,5\%$.

Transmisor inteligente, dotado de microprocesador, que permite la autocalibración, el cambio de la variación de medida, la compensación en los cambios de presión y temperatura y las correcciones de no linealidades en el transmisor.



TRANSMISORES INTELIGENTES

Hacia 1983 Honeywell presentó en el mercado el primer transmisor denominado "inteligente" (*smart transmitter*); el término "inteligente" indica que el sensor tiene incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la medida exclusiva de la variable. Consistía en un transmisor de diafragma con un circuito dinámico de puente de Wheatstone que incorporaba un microprocesador. De este modo proporcionaba las correcciones precisas a las no linealidades de los elementos o sensores

individuales y aportaba la compensación adecuada de las variaciones de temperatura y de presión hidrostática del fluido de medida que actuaban sobre el transmisor. Si bien inicialmente era de precio más elevado, proporcionó un aumento en la precisión de la señal transmitida y en la precisión del lazo de control del orden del $\pm 0,15\%$ y, lo que es más importante, unas posibilidades de calibración y de cambio del margen de medida no conocidas hasta entonces. Antes de su aparición, la calibración y el cambio del margen de medida debían realizarse normalmente en el taller de instrumentos, lo que equivalía a disponer de aparatos de repuesto para continuar trabajando con el proceso, siendo inevitable la marcha a ciegas durante el tiempo requerido para el cambio mecánico del instrumento (a no ser, naturalmente, que se dispusiera de un instrumento doble). Por ejemplo, la calibración de un instrumento de nivel típico requiere el vaciado del tanque, el desmontaje del aparato y su calibración en el taller de instrumentos. Además, si se precisa que el proceso continúe en funcionamiento, es necesario montar una brida ciega en la brida del transmisor de nivel para poder llenar el tanque y continuar las operaciones de fabricación.

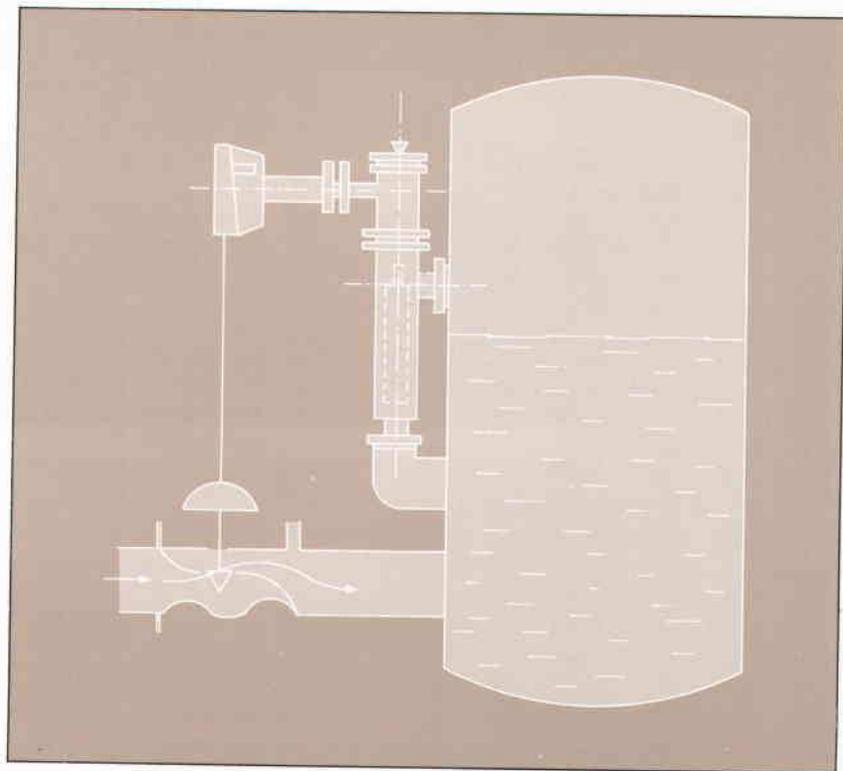
Los transmisores inteligentes disponen también de autocalibración, es decir, suplen las operaciones del ajuste del cero y de fondo de escala de los instrumentos, trabajo desarrollado clásicamente por los instrumentistas. Un ejemplo de las técnicas de autocalibración lo constituyen los transmisores de nivel por ultrasonidos. Disponen de un reflector de las ondas sónicas que está situado en el tanque sobre la superficie del líquido, hacia donde el emisor dirige periódicamente los ultrasonidos, ajustando entonces los parámetros de calibración. De este modo compensa las variaciones de velocidad del sonido, provocadas por cambios en la temperatura del ambiente del tanque. En otros casos la autocalibración es más difícil de conseguir. Tal ocurre en los medidores magnéticos de caudal, en los que durante los intervalos de calibración sería necesario pasar por el elemento un caudal conocido de un fluido determinado.

Los transmisores inteligentes se prestan también al autodiagnóstico de sus partes electrónicas internas, función que proporciona al departamento de mantenimiento en primer lugar el conocimiento de la existencia de un problema en el circuito, en segundo, el diagnóstico y la naturaleza del problema, señalando qué instrumento ha fallado y, finalmente, las líneas a seguir para la reparación o sustitución del instrumento averiado.

Con la entrada del transmisor inteligente, la calibración y el cambio de margen de trabajo se logran simplemente por examen de los datos almacenados en una PROM y por utilización de técnicas digitales. Se consigue de este modo una relación *turndown* (relación entre el nivel mínimo de la variable al máximo que es medible conservándose la precisión de la medida del instrumento) de 400:1, frente a la relación 1 a 6 de un transmisor de presión o nivel convencional, lo que posibilita la reducción drástica del número de transmisores en stock al poder utilizar prácticamente un solo modelo para cubrir los diferentes campos de medida utilizados hasta entonces en la fábrica. La señal de salida continúa siendo de $4 + 20 \text{ mA c.c.}$, pero en el año 1986 Honeywell presenta ya el transmisor con señal de salida enteramente digital, lo que proporciona un aumento de la precisión del lazo de control del orden del $\pm 0,75\%$, al eliminar los

convertidores A/D (análogo-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador). Otras ventajas adicionales de estos transmisores son: el cambio automático del campo de medida en caso de que el valor de la variable salga del campo, las rutinas de autodiagnóstico, la monitorización de temperaturas y tensiones de referencia de los transmisores, la fijación de la variable en el último valor alcanzado caso de detectarse alguna irregularidad en el funcionamiento del aparato, el autoajuste desde el panel de control, etc. Para visualizar la señal de salida, los datos de configuración, el margen de funcionamiento y otros parámetros, así como para cambiar los ajustes del campo de medida, se utiliza un *comunicador portátil*, que se conecta en cualquier punto de la línea de transmisión.

Autocontrolador que incorpora al transmisor y está situado en campo al lado del proceso.



El transmisor o varios transmisores pueden conectarse, a través de una conexión RS-232, a un ordenador personal, que con el software adecuado es capaz de configurar transmisores inteligentes.

El conjunto transmisor y controlador puede estar incorporado en un único aparato (instrumentos *autocontroladores*), o bien el controlador puede estar separado e instalado al lado del proceso, en el panel de control del edificio del proceso o en la sala de control general de la planta es el caso, por ejemplo, del control centralizado o distribuido).

AUTOCONTROLADORES

Los aparatos autocontroladores disponen del elemento de medida o transmisor y del controlador instalados en un único aparato adosado al proceso.

Este es el caso de los controladores de nivel de desplazamiento que están conectados por bridas al tanque y cuyo eje móvil, con su tubo de torsión, forma parte del transmisor neumático o electrónico, cuya señal de salida acciona la válvula de control de nivel del tanque.

En un modelo de instrumento neumático, el propio transmisor de diafragma dispone, en el propio diafragma, de una tobera-obturador cuya señal de salida se lleva directamente al controlador neumático incorporado.

También pueden considerarse como autocontroladores los controladores de presión de vapor que reducen la presión de vapor de salida de la caldera de vapor para alimentar las tuberías de baja presión de la planta. Estos controladores actúan sobre una válvula de control que reduce la presión, y al mismo tiempo inyectan agua en la tubería con el fin de fabricar vapor saturado.

Puede considerarse también como autocontrolador la válvula de flotador de un tanque, en la que un flotador, situado en el interior del tanque, está directamente conectado a la válvula de control que alimenta o descarga el depósito.

VÁLVULAS DE CONTROL Y ELEMENTOS FINALES

Las *válvulas de control* juegan un papel importante en el lazo de control. Realizan la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida.

La válvula de control neumática consiste en un servomotor accionado por la señal neumática de $3 \pm 15 \text{ psi}$ (o $0,2 \pm 1 \text{ Kg/cm}^2$). El servomotor está conectado directamente a un vástago que posiciona el obturador con relación al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo (o casi nulo) hasta el caudal máximo, con una relación entre el caudal y la carrera que viene dada por las curvas características de la válvula.

Existen varios modelos de válvulas: simple asiento, doble asiento, obturador equilibrado, en ángulo, válvula de jaula, mariposa, bola, macho, cuerpo partido, Saunders, Camflex, microflujo, válvula de tres vías diversora y mezcladora, etc.

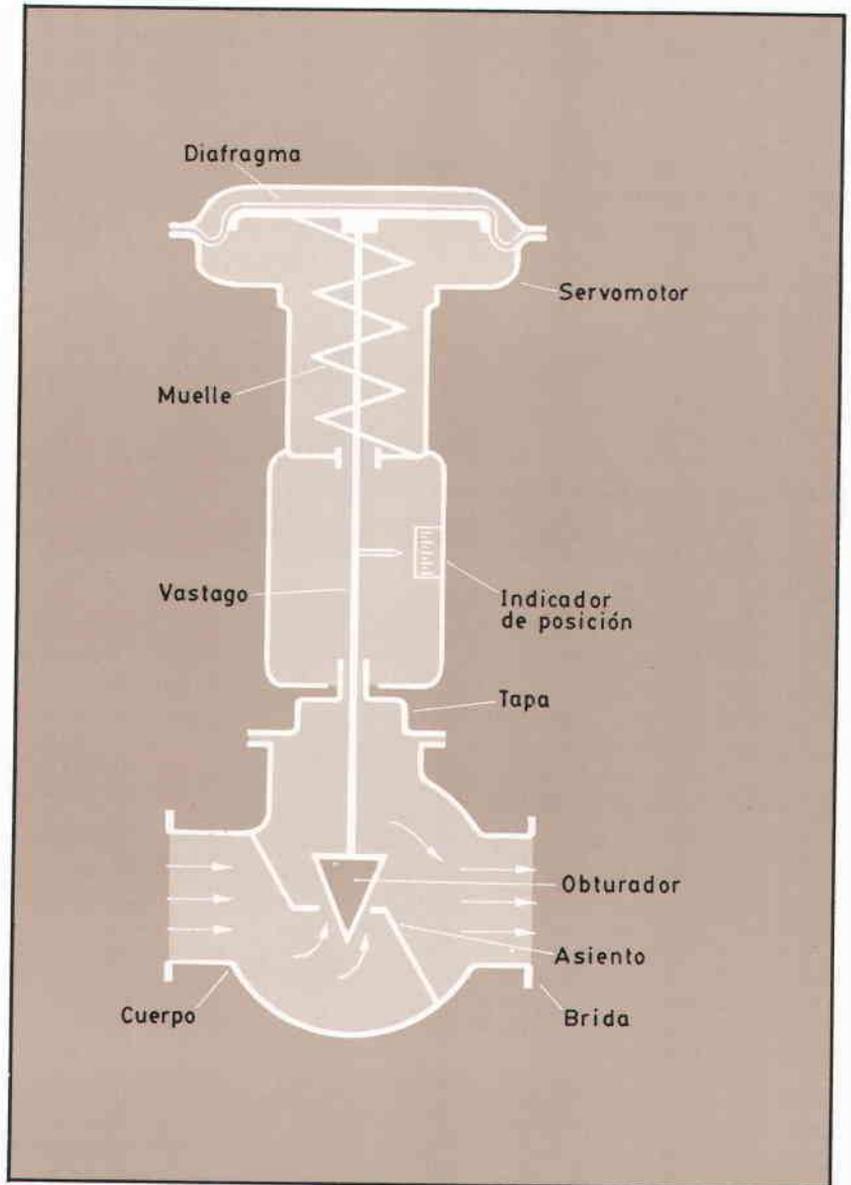
Las partes internas de las válvulas son el obturador y los asientos, y sus curvas características pueden pertenecer a los siguientes tipos: apertura rápida, característica lineal, igual porcentaje, obturador en V, jaula y obturadores microflujo para bajos caudales.

Es importante una adecuada selección del modelo de la válvula, de sus partes internas y de los materiales. También es importante el tamaño, representado por el coeficiente de la válvula o K_v que viene definido por el número de metros cúbicos por hora de agua, entre 5° a 30°C , que pasan a

través de la válvula a una apertura dada y con una pérdida de carga de 1 Kg/cm^2 . El mismo coeficiente utilizado en EE.UU. es el Cv o número de galones por minuto de agua a 15°C que pasan a través de la válvula totalmente abierta con una pérdida de carga de 1 psi .

Existen fórmulas de cálculo del Kv (o Cv) de las válvulas de control para líquidos, gases, vapor de agua y vapores que, a través de datos tales como el caudal máximo, la pérdida de carga, la presión aguas arriba, el peso

Válvula de control típica con servomotor, cuerpo y bridas de conexión, partes internas y tapa.

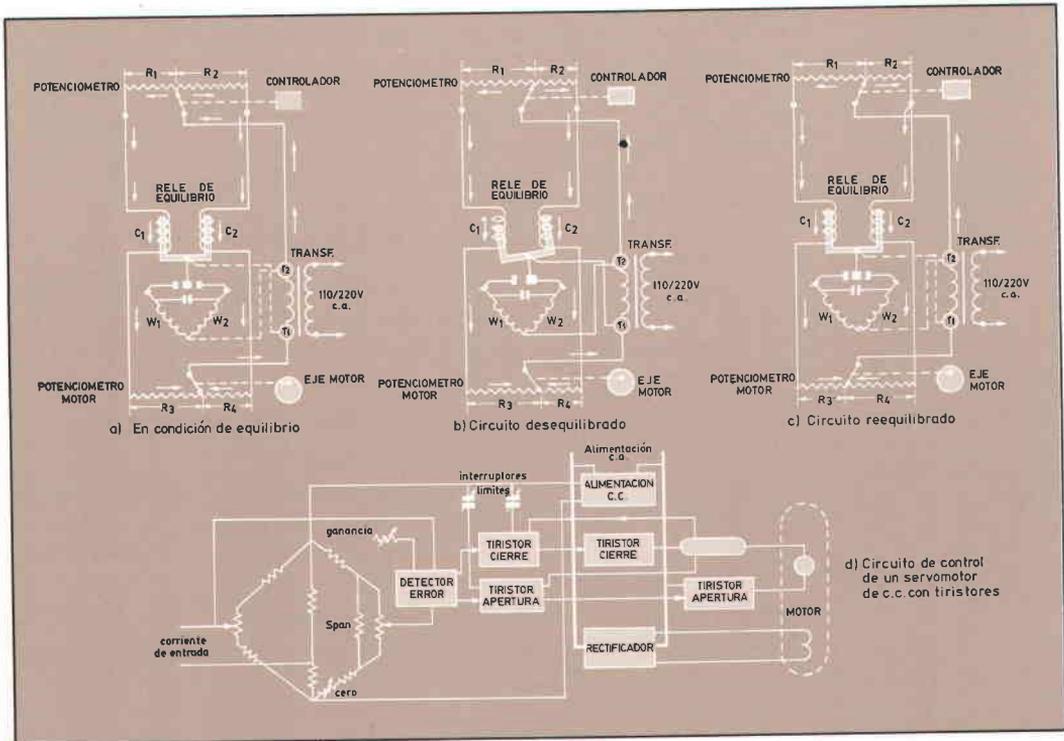


Componentes locales del sistema de control

específico y otros, permiten, una vez realizado el cálculo y consultando las tablas del fabricante seleccionado, determinar el tamaño de la válvula.

Normalmente, los fabricantes tienen dos modelos de válvulas, el de Kv (o Cv) normal y el de Kv (o Cv) reducido, es decir, manteniendo el mismo tamaño del cuerpo, las partes internas (asiento y obturador) son más pequeñas, dando un menor caudal. Esto permite prever anticipadamente los aumentos planificados de los caudales de la planta y así, cuando llega el momento de la ampliación de la fábrica, sólo será necesario cambiar las partes internas de la válvula sin tocar el cuerpo de la misma.

Varios tipos de servomotor eléctrico.



El servomotor de la válvula debe proporcionar la fuerza necesaria no sólo para situar el vástago en la posición señalada por la señal neumática de 3 a 15 psi frente a la presión diferencial del fluido ejercida sobre el obturador, sino que también debe ser capaz de llevar la válvula a la posición de seguridad en caso de avería local en la planta. Por ejemplo, en un intercambiador de calor con fluido de calefacción vapor de agua, puede ser necesario que, en el caso de temperatura excesiva del producto que se calienta, se corte inmediatamente el vapor. Si la presión de entrada del vapor de agua es del orden de los 12 Kg/cm², ello significa que el servomotor de la válvula de control deberá ser capaz de cerrar frente a la presión diferencial de 12 Kg/cm² que, en estas condiciones, actuará sobre el obturador. Los fabricantes disponen de tablas que dan estos valores, lo que permite asegurar este punto, que es importante dadas las consecuen-

cias negativas que pueden derivarse de fallos en el cierre de la válvula cuando se presentan las condiciones de emergencia en la planta.

Las válvulas neumáticas son robustas, baratas y simples, y pueden ser accionadas directamente por la señal neumática procedente del controlador neumático, o bien a través de un *posicionador electroneumático*, por la señal electrónica de 4 ± 20 mA c.c. procedente de un controlador electrónico.

También las válvulas neumáticas pueden ser dotadas de un *posicionador electroneumático digital* para ser accionadas directamente por un ordenador o por el sistema de control distribuido.

Las *válvulas motorizadas eléctricas* disponen de los mismos elementos de la válvula neumática descrita anteriormente pero con el servomotor eléctrico en lugar del neumático. Su ventaja es que no necesitan aire para su accionamiento, pero disponen de poco par, por lo que ante presiones diferenciales elevadas del fluido su servomotor debe ser de un tamaño considerable. Su tiempo normal de accionamiento desde la posición de válvula abierta a la posición de válvula cerrada es del orden del minuto, por lo que son más lentas de actuación que las válvulas neumáticas. Estas características hacen que sólo se empleen en equipos autónomos, en los que interesa prescindir de compresor de aire, y que no puedan utilizarse en procesos donde la rapidez y precisión de actuación es importante, por ejemplo en pequeños intercambiadores donde la temperatura debe ser controlada con precisión.

Otros elementos finales de accionamiento son los que se citan a continuación.

Los *posicionadores neumáticos o electroneumáticos*, que accionan el servomotor neumático de una válvula de control o el pistón adosado a una bomba dosificadora. Esta última controla el caudal del fluido por variación de la carrera del pistón de la bomba.

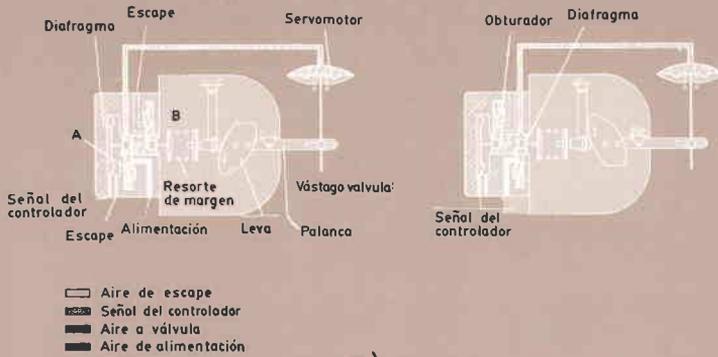
El posicionador también sirve para situar el vástago en la posición exacta dada por la señal del controlador, ya que detecta las desviaciones que pueden producirse por roces mecánicos del vástago con la estopada del cuerpo de la válvula, y compensa las diferentes posiciones que adoptaría el vástago al actuar la presión diferencial ejercida por el fluido sobre el obturador. Su actuación es por aire, es decir, si la posición del obturador no es la adecuada, envía mayor o menor presión de aire hasta que el obturador se sitúa en la posición exacta dada por la señal del controlador.

Otra utilidad del posicionador es la partición de la señal de control, lo que facilita el accionamiento de la válvula de control para una señal distinta de la estándar de 3 ± 15 psi, y es de aplicación en el control llamado de margen partido.

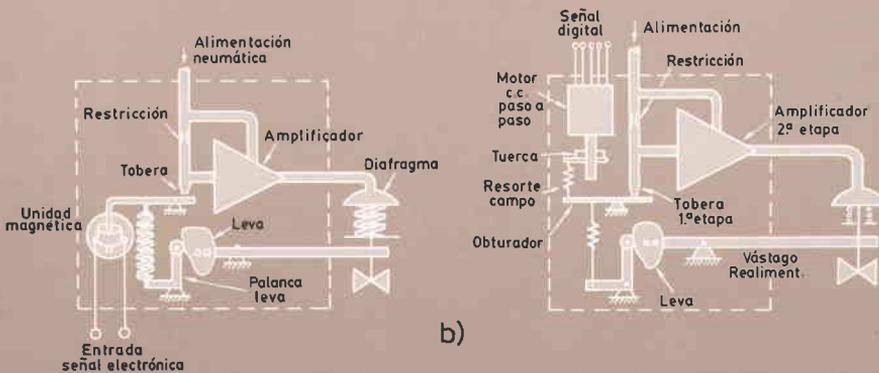
Los *tiristores* constituyen un buen elemento final de control de un horno, ya que varían linealmente la intensidad de alimentación de las resistencias del horno, en forma parecida a la de las señales neumática (3 ± 15 psi) y electrónica (4 ± 20 mA c.c.).

Otros dispositivos finales de control son los contactores, compresores, motores eléctricos, compuertas y autotransformadores ajustables.

Componentes locales del sistema de control



a)



b)

SEGURIDAD, DISPONIBILIDAD

La seguridad de funcionamiento de los aparatos locales depende de la correcta aplicación y de la instalación adecuada de los mismos. Por ejem-

Posicionador que fija el obturador en la posición exacta dada por la señal de salida del controlador.

plo, una válvula funcionando con presiones diferenciales elevadas, no previstas en el proyecto de la planta, tendrá una duración corta (su diseño correcto hubiera consistido bien en disponer el proceso para que la presión diferencial hubiera sido normal, o bien en escoger un material duro para las partes internas, que pudiera soportar esta alta presión diferencial).

Aunque la fiabilidad de los instrumentos depende mucho de la aplicación local en cada planta, por las diferentes condiciones de servicio y ambientales a que están sometidos, es útil tener una idea aproximada del llamado *tiempo medio entre fallos* de los aparatos. La tabla que sigue ilustra estos valores para algunos tipos de instrumentos.

Instrumento	Tiempo medio entre fallos (días)
Transmisor	250
Válvula todo-nada	2 500
Válvula de solenoide	2 500
Microrruptor	250

(Fuente U.S. *Environmental Protection Agency* publicada en la revista *Chemical Engineering* March 31, 1986 por Béla G. Liptak)

Es útil conocer el tiempo medio entre fallos del lazo de control, el cual puede determinarse por la inversa de la suma de inversas de los tiempos medios de cada instrumento. Por ejemplo, un lazo de control constituido por un transmisor de presión, un presostato de alarma, una válvula de solenoide y una válvula todo o nada, tendrá el valor:

$$\text{Tiempo medio} = \frac{1}{(1/250)+(1/250)+(1/4000)+(1/2500)} = 116 \text{ días}$$

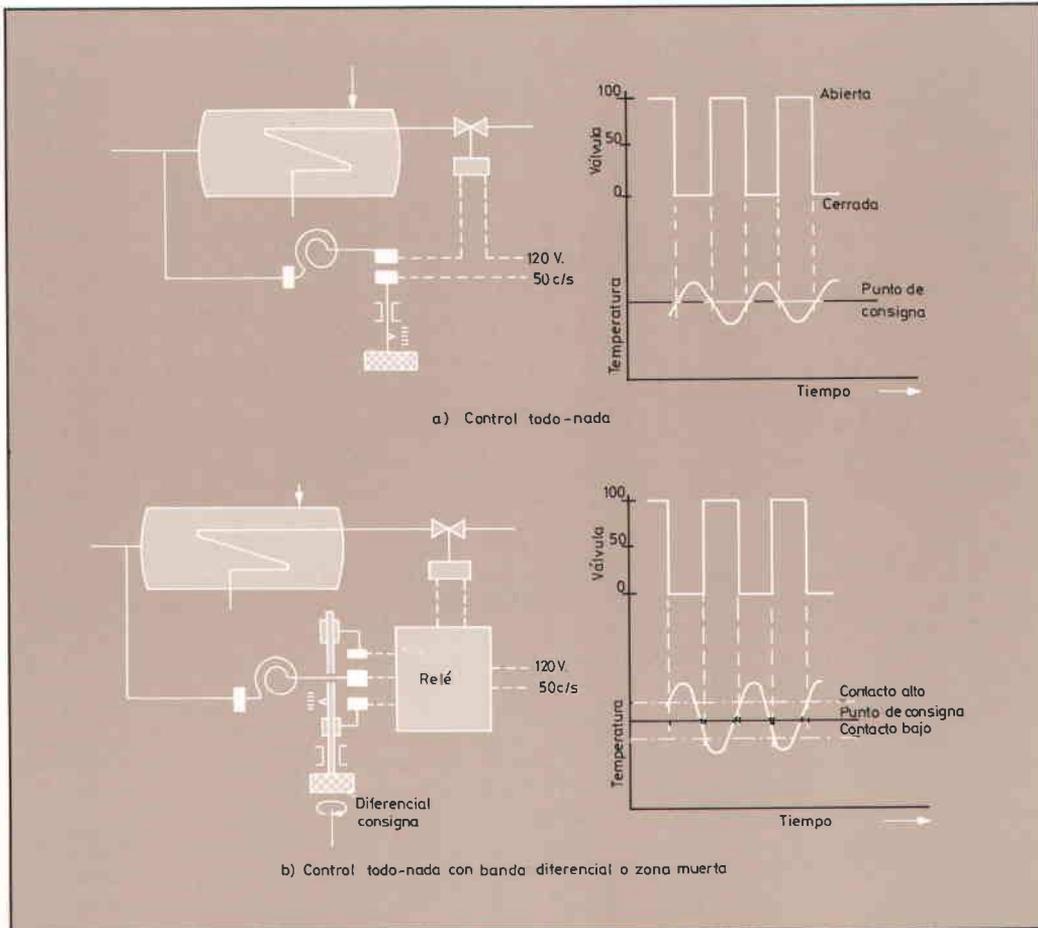
Para aumentar la fiabilidad del sistema, el proyectista puede aumentar la fiabilidad de cada instrumento individual, especialmente en los lazos críticos, especificando instrumentos con autodiagnóstico y controladores con autoajuste y estableciendo programas de mantenimiento preventivo y duplicando los aparatos. Por ejemplo, en el control distribuido el cable de la vía de comunicaciones acostumbra a ser redundante para aumentar la seguridad de funcionamiento del control de la planta.

Componentes de panel del sistema de control

ACCIONES DE CONTROL

Los instrumentos de control o controladores se caracterizan por las llamadas acciones de control, modos de control o algoritmos de control, que representan la forma en que el aparato calcula la señal de salida al elemento final de control (válvula de control, servomotor, resistencias eléctricas...), según cuál sea la evolución de la variable del proceso a

Control todo-nada en el que la válvula de control adopta sólo dos posiciones: abierta o cerrada.



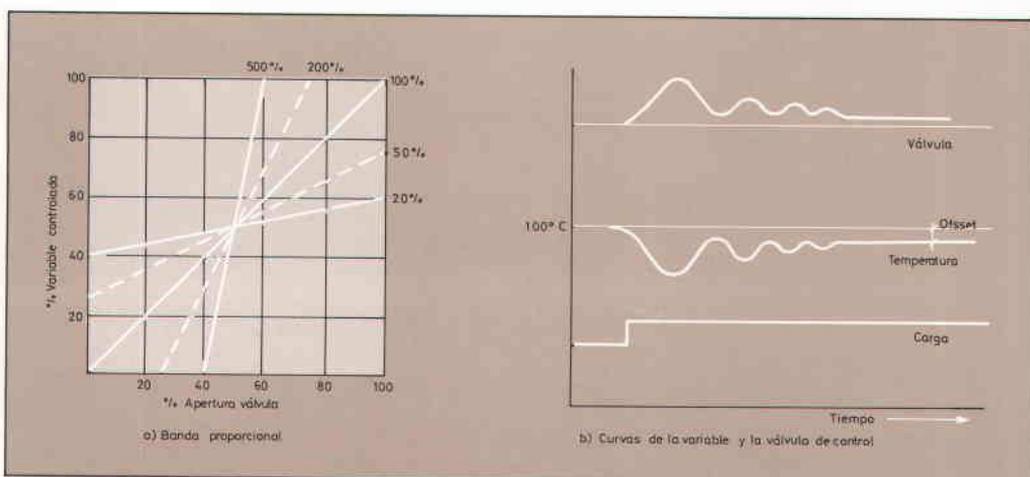
controlar y el valor de control deseado en la variable, o sea, el punto de consigna.

Se entiende que el control manual, aparte de la necesidad de un operador que vigile periódicamente el proceso, puede emplearse en aplicaciones no críticas donde la existencia de pequeños cambios en la variable repercute sólo en variaciones pequeñas y lentas en el proceso, y se dispone del tiempo suficiente para que el operador pueda realizar una corrección antes de que la variable se aparte considerablemente del punto de consigna.

El tipo de control puede ser típicamente de varias formas; a continuación se destacan las más significativas.

Control proporcional donde la válvula de control sigue una apertura o cierre que es una copia a una escala dada por la banda proporcional del valor de la variable de proceso.

— *Todo o nada*, en el que la válvula de control adopta dos posiciones: abierta o cerrada, con lo cual la variable controlada oscila continuamente. El control todo o nada se emplea usualmente con una banda diferencial o zona neutra, dentro de la cual el elemento final de control permanece en su última posición.



— *Proporcional*, en el que la carrera del vástago de la válvula de control sigue proporcionalmente los valores de la variable controlada (presión, caudal, nivel, temperatura, etc.) del proceso, es decir, que para cada valor de la variable corresponde una posición determinada de la válvula de control. Esta proporcionalidad es establecida por medio de la banda proporcional o la ganancia.

La *banda proporcional* es el porcentaje del campo de medida de la variable que la válvula necesita para efectuar una carrera completa, es decir, pasar de completamente abierta a completamente cerrada. Por ejemplo, una banda proporcional del 50% en un control de temperatura de escala 0 ÷ 100 °C, con punto de consigna 50 °C, indica que la temperatura debe variar desde 25 °C hasta 75 °C para que la válvula efectúe una carrera completa.

Componentes de panel del sistema de control

La *ganancia* es la relación entre la señal de salida del controlador a la válvula de control y la señal de entrada del elemento primario o del transmisor. Es la inversa de la banda proporcional. En el ejemplo anterior sería de 2 (es decir, 100/50).

La acción proporcional tiene un inconveniente que es la desviación permanente de la variable con relación al punto de consigna, denominada *offset*. Por ejemplo, en el caso del control de temperatura de un intercambiador de calor, sería una casualidad que el calor necesario para mantener la variable en un punto de consigna igual al 50% de la escala fuera exactamente el 50% de las calorías aportadas por el vapor de calefacción al condensarse a la presión de trabajo. De ahí que la temperatura aumentará o disminuirá con relación al punto de consigna hasta que exista un equilibrio, para el cual existirá una diferencia entre el punto de consigna y la variable controlada (*offset*). El *offset* puede reducirse disminuyendo la banda proporcional, con la salvedad de que esta disminución no debe producir inestabilidad en el proceso.

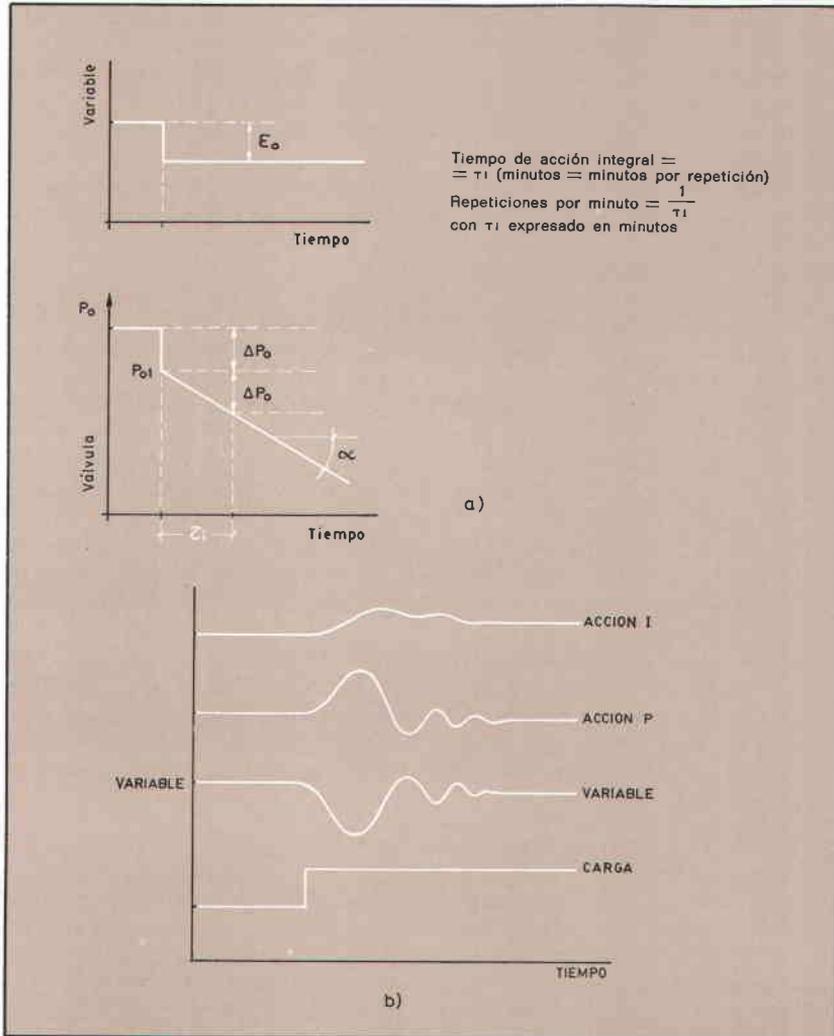
— *Integral*, que actúa cuando existe una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional. Se caracteriza por el llamado *tiempo de acción integral*, en minutos por repetición, (o su inversa, repeticiones por minuto) que es el tiempo en que, ante una señal en escalón, la válvula repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. Como estación de control se emplea para obviar el inconveniente del *offset* (desviación permanente de la variable con respecto al punto de consigna) de la banda proporcional; se utiliza sólo cuando es preciso mantener un valor de la variable que iguale siempre al punto de consigna. En el ejemplo anterior, si el tiempo de acción integral es de 1 minuto/repetición y la temperatura está estabilizada en el punto de consigna de 50 °C, un nuevo punto de consigna de 60 °C (que representa el 10% de variación respecto a la escala del instrumento) dará lugar a un movimiento inmediato del índice de la señal a la válvula de control del 5%, y después este índice se desplazará a una velocidad lenta, tal que al cabo de 1 minuto habrá repetido el 5% del movimiento inicial provocado por la acción proporcional.

Existe un fenómeno denominado *saturación integral* que se presenta cuando la variable queda fuera de los límites de la banda proporcional. La acción continuada del integrador da lugar a que la señal de salida a la válvula de control se sature y tenga su valor máximo (o mínimo). Entonces la variable debe cruzar el punto de consigna para que, al cambiar de signo la desviación, varíe la señal de salida del controlador y la válvula inicie su cierre (o apertura). El resultado es una gran oscilación de la variable, que puede prevenirse eliminando la acción integral (el integrador deja de actuar) cuando la variable cae fuera de la banda proporcional. Esta función se llama *desaturación integral* y, en general, es utilizada en los procesos discontinuos.

Un ejemplo ilustrativo de estos procesos es el reactor. Su operación consiste en la carga de los productos a transformar que se someten a un programa de temperaturas determinado y, cuando la reacción finaliza, el operador descarga el reactor. Durante la fase de descarga y nueva carga

del reactor la temperatura del proceso disminuye apartándose del punto de consigna, con lo cual la desviación subsiguiente hace actuar la acción integral que, al cabo de poco tiempo, lleva la válvula a la posición de completa apertura. Al cargar los productos para el nuevo ciclo la temperatura sube rápidamente, ya que la válvula de vapor está completamente

Control proporcional más integral. El control integral integra las áreas de desviación entre la variable y el punto de consigna. La válvula recibe la suma de las señales proporcional + integral.

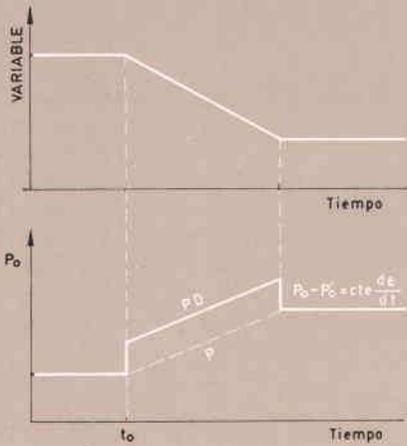


abierta, y sólo empieza a disminuir cuando la temperatura cruza el punto de consigna, ya que entonces y sólo entonces la desviación con relación a la variable pasa a ser de signo contrario. De este modo, la acción integral inicia la resta y disminución de las áreas de desviación que tenía sumadas, con lo que la válvula de control empieza a cerrarse.

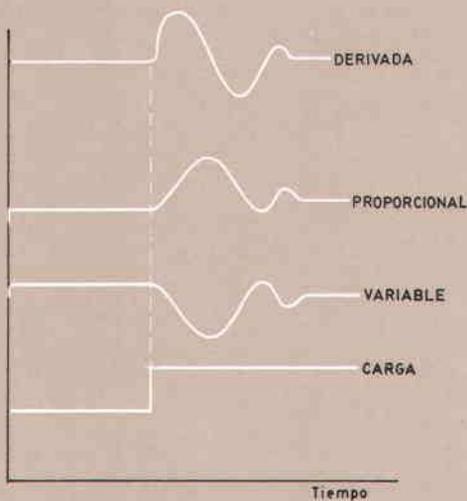
Una característica particular que presentan los controladores de acción

Componentes de panel del sistema de control

Control proporcional + derivado. El control derivativo calcula la pendiente o la derivada en cada punto de la variable. La válvula recibe la suma de las señales proporcional + derivada.



Comportamiento del controlador P + D.

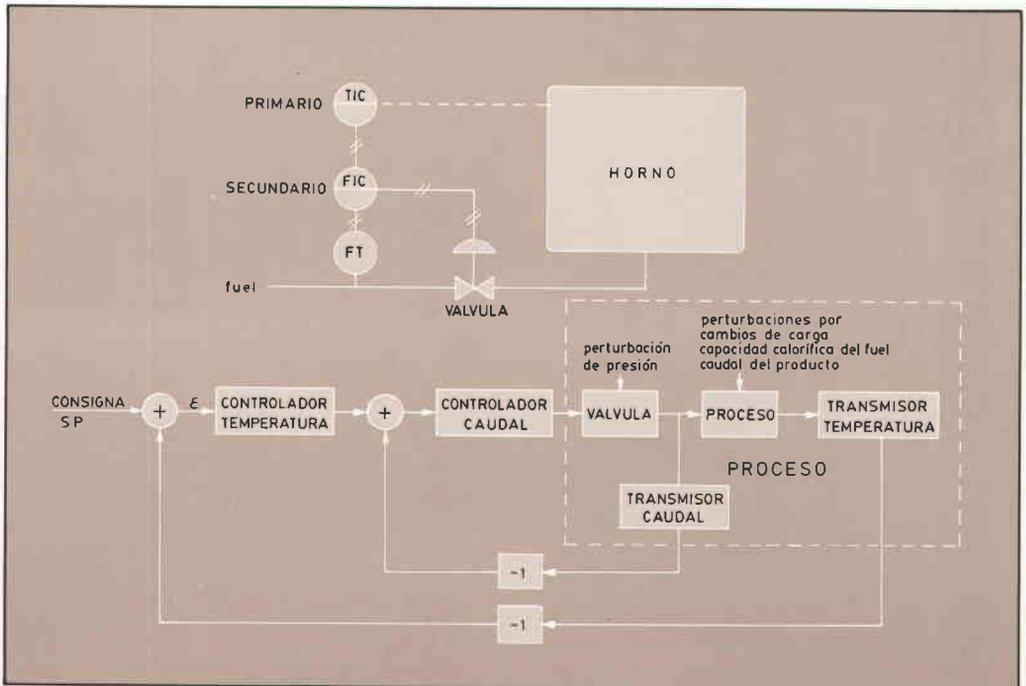


proporcional+integral en la puesta en marcha del proceso, es el rebasamiento del punto de consigna. Sea, por ejemplo, el caso del control de temperatura de un horno. El rebasamiento del punto de consigna se presenta porque la unidad integradora empieza a actuar cuando la temperatura llega al límite inferior de la banda proporcional, y continúa actuando mientras la temperatura no alcance el punto de consigna. Durante todo

este tiempo la acción integral ha elevado ya la señal a la válvula de control, provocando una aportación de calor excesiva. Cuando la temperatura rebasa el punto de consigna se invierte el signo de la señal de desviación y el integrador hace disminuir la señal a la válvula de control en un valor conveniente para eliminar el offset.

– *Derivativa*, que actúa cuando existen cambios en la variable. Esta actuación es proporcional a la pendiente de la variable, es decir, a su derivada. Se caracteriza por el llamado tiempo de acción derivada en minutos de anticipo, que es el intervalo durante el cual la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivativa cuando se aplica al instrumento una señal en rampa. En el ejemplo anterior, si la temperatura cambia en forma de rampa y la acción derivada es de 1 minuto, la posición de la válvula se anticipará en 1 minuto a la que tendría normalmente por la acción proporcional.

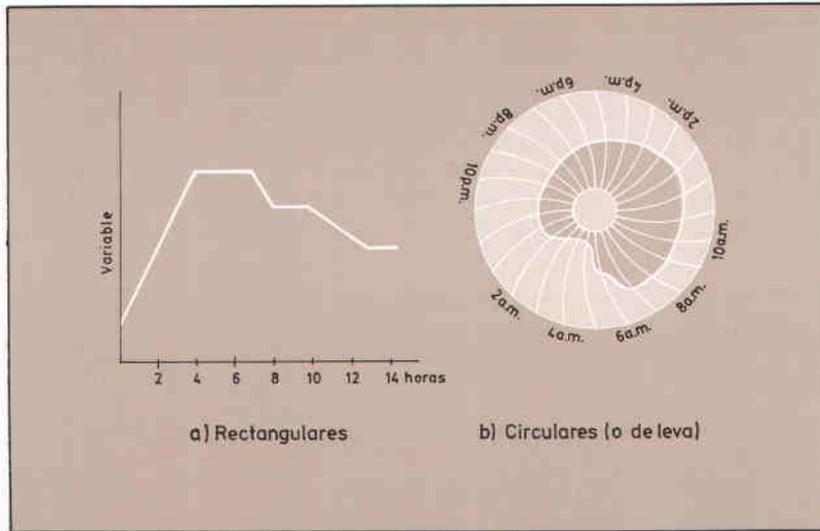
Control en cascada. Un controlador (primario o master) manda el punto de consigna de otro (secundario o esclavo).



La acción derivada es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión en la variable controlada. No obstante, un tiempo de acción derivada demasiado grande da lugar a que la variable cambie demasiado rápidamente y rebasa el punto de consigna una oscilación amortiguada. Un tiempo de acción derivada demasiado pequeño permite que la variable esté separada del punto de consigna un tiempo excesivo. El tiempo óptimo de acción derivativa es aquél que retorna la temperatura al punto de consigna con el mínimo de oscilaciones.

Componentes locales del sistema de control

La acción derivada aumenta la ganancia del controlador durante los cambios de la variable, lo que compensa parte del retardo inherente al proceso y permite el uso de una banda proporcional más pequeña con un menor offset. La acción derivada puede ayudar a disminuir el rebasamiento de la variable durante el arranque del proceso, y puede emplearse en sistemas con tiempos de retardo considerables porque permite una recuperación rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.



Programadores que establecen los valores del punto de consigna a lo largo del tiempo.

Con la utilización del microprocesador, el controlador, aparte de utilizar dichas acciones, también tiene en cuenta, según sea el tipo de medida, las variaciones de otras variables ligadas, como por ejemplo la densidad del líquido en la medida del nivel de un tanque. Estas son compensadas en el propio transmisor "inteligente" o bien en el controlador del panel o de la sala de control. Esta utilización permite, por ejemplo, el cálculo inventariable de un tanque con una precisión del orden del $\pm 0,1\%$.

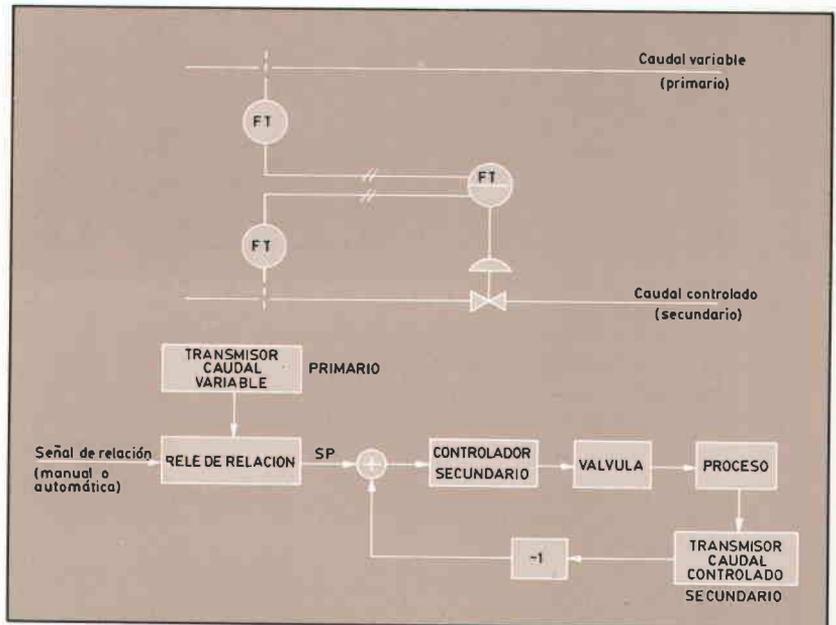
Existen otros tipos de control utilizados en la industria que se resumen en los siguientes párrafos.

El control *en cascada* está formado por dos controladores, uno de ellos es el *master* o primario, que envía su señal de salida al punto de consigna del otro controlador llamado *slave*, esclavo o secundario, es decir, el primero manda el segundo. Una aplicación típica se encuentra en una caldera de vapor que utiliza fuel-oil como combustible, donde existen problemas de cambios en el caudal de combustible por variación de la temperatura o de la viscosidad del fuel-oil. Estos cambios en las características del combustible provocan variaciones de su caudal, con lo que en el horno se quema una cantidad de combustible distinta para una misma posición de la válvula de control, apareciendo perturbaciones en el valor de la temperatura. Con el montaje en cascada de los dos controladores se logra que el controlador primario regule la presión de vapor de la caldera

accionando el punto de consigna del controlador secundario de caudal de fuel-oil, y de este modo los cambios en el caudal de fuel-oil que se producen al modificar sus características son compensados directamente en la tubería, antes de que sus efectos perjudiciales puedan influir en el funcionamiento de la caldera.

En los *programadores* existe un generador del punto de consigna, que es el componente básico del sistema, para fijar los valores deseados de la variable a lo largo del tiempo, actuando sobre el controlador neumático, el electrónico o el microprocesador. Existen los programadores de levas, con una leva cortada sobre la que se apoya el brazo del punto de consigna, los programadores rectangulares, dotados de motores síncronos que mueven el índice, así como interruptores y temporizadores que permiten ajustar las velocidades de subida o bajada de la variable, y los programadores de sensor óptico, que miden la luz reflejada por el gráfico y detectan el perfil de la curva del programa trazada previamente con lápiz. La aplicación del microprocesador ha permitido una gran evolución en estos instrumentos, dando una gran versatilidad a la programación de la variable.

Control de relación en el que el punto de consigna es la relación entre dos variables.



En el *control de relación*, el controlador tiene por punto de consigna la relación entre dos señales, por ejemplo, dos caudales, con lo cual controla la relación entre los mismos. Una aplicación típica la constituye la relación caudal-aire/caudal-fuel en la combustión de una caldera de vapor.

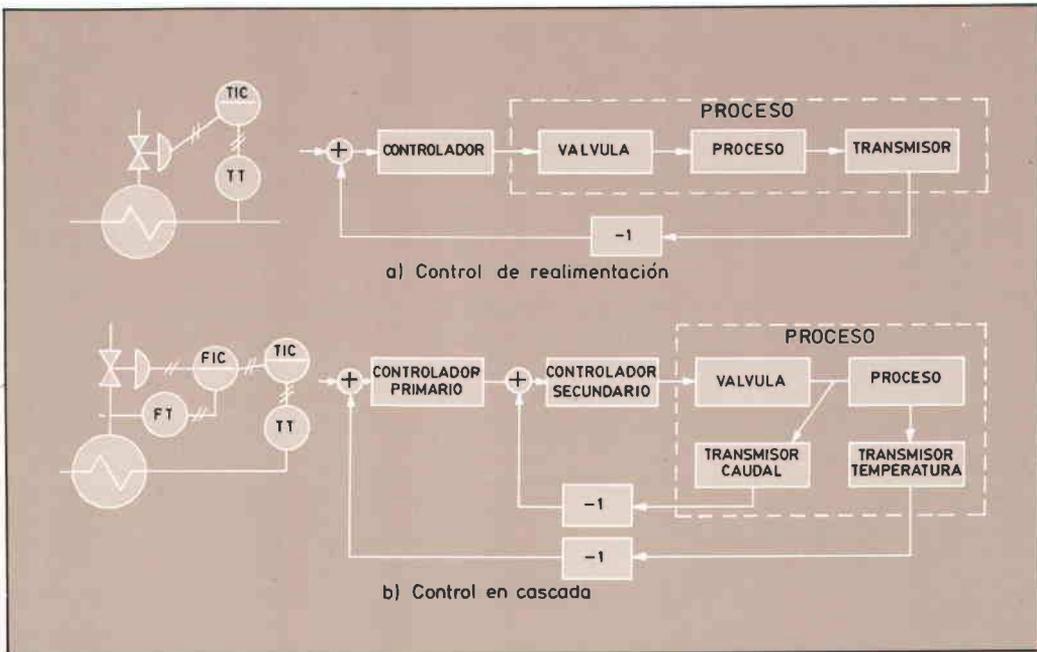
En el control *en adelante* (o *feedforward*), el controlador, que es realmente un microprocesador, calcula la señal de corrección y acciona la válvula de control por lectura de las señales de entrada que influyen en el valor de la variable que interesa estabilizar, sin utilizar el clásico lazo de

Componentes de panel del sistema de control

retroalimentación. Es decir, el accionamiento de la válvula tiene lugar en lazo abierto.

El control en adelante es de aplicación en sistemas que poseen tiempos de retardo importantes con desviaciones de magnitud y duración distintas. En estos sistemas, el clásico control de retroalimentación tiene el inconveniente de necesitar que se produzca una desviación antes de actuar, lo cual imposibilita la rápida actuación de la válvula de control. Como no se tiene un conocimiento exacto de las características estáticas y dinámicas del proceso, ni se dispone de los elementos para medir todas las variables que influyen en variable que se quiere controlar, el control en adelante se completa con un lazo de retroalimentación.

Control en adelante. La controla una variable en lazo abierto mediante un algoritmo que tiene en cuenta las variables que influyen en la que se quiere controlar.



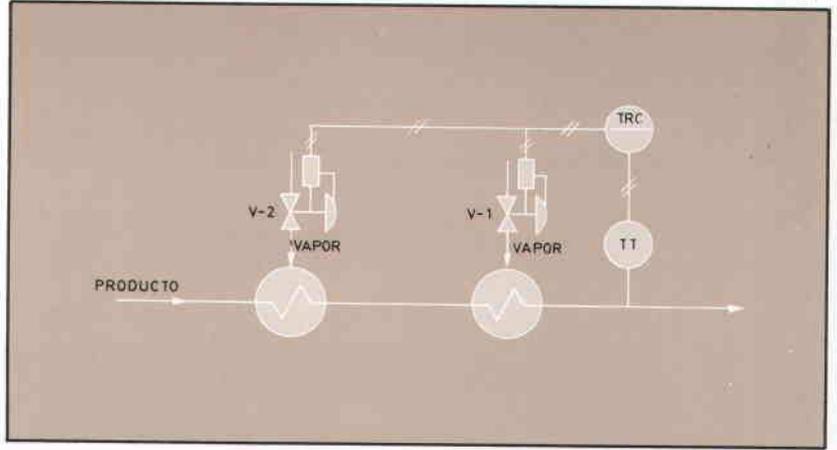
Un ejemplo sencillo lo constituiría el control de temperatura de un intercambiador con un serpentín de gran longitud. La captación del caudal del producto y su procesamiento con un microprocesador se enviaría a la válvula de control de vapor, de modo que, sin disponer de la lectura de la temperatura a controlar, ésta se regularía de acuerdo con el caudal del producto.

En el control de *gama partida*, la señal de salida del controlador se reparte entre dos o más válvulas de control. Una aplicación típica es el control de dos intercambiadores en serie para trabajar con uno o con los dos (accionar una válvula de control o las dos), según sea el volumen de producción. La partición de la señal se logra mediante posicionadores acoplados a la válvula de control que convierten la señal de entrada (0 ÷ 50% y 50 ÷ 100% de salida del controlador) a 3 ÷ 15 psi (0,2 ÷ 1 Kg/cm²) para accionar directamente la válvula de control.

Control de procesos industriales: criterios de implantación

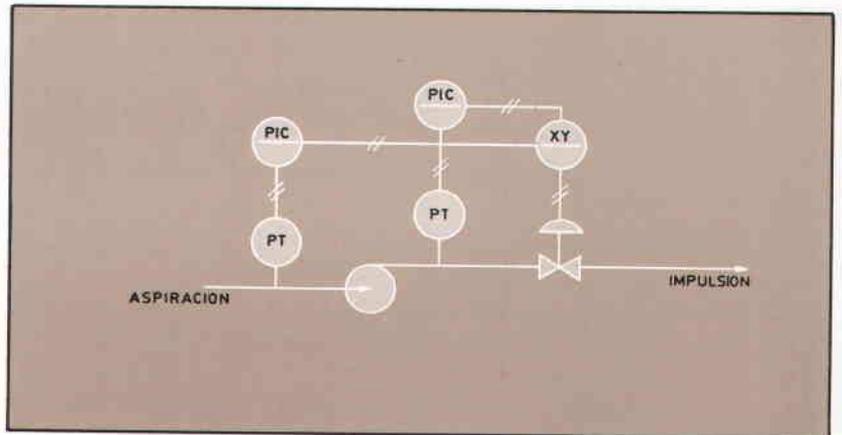
En el control *selectivo* se selecciona una de dos o más variables del proceso, en un valor alto o bajo, con el fin de evitar daños en el proceso o en el producto, o bien repartir la señal de salida del controlador. Para esta función se utiliza un relé de máxima o de mínima que selecciona las

Control de gama partida. La señal de salida de control se reparte entre dos o más válvulas de control.



variables o las señales de salida de los controladores. Por ejemplo, en el control de una caldera de vapor que puede trabajar con varios tipos de combustibles, las respectivas válvulas de control son accionadas una cada vez según las necesidades de la fábrica. Y así, si la planta dispone de un subproducto que debe quemar como combustible, cuando en el tanque

Control selectivo. Un relé selecciona una de dos señales que actúa sobre una válvula de control. Tiene aplicación en calderas de vapor para quemar varios tipos de combustibles.

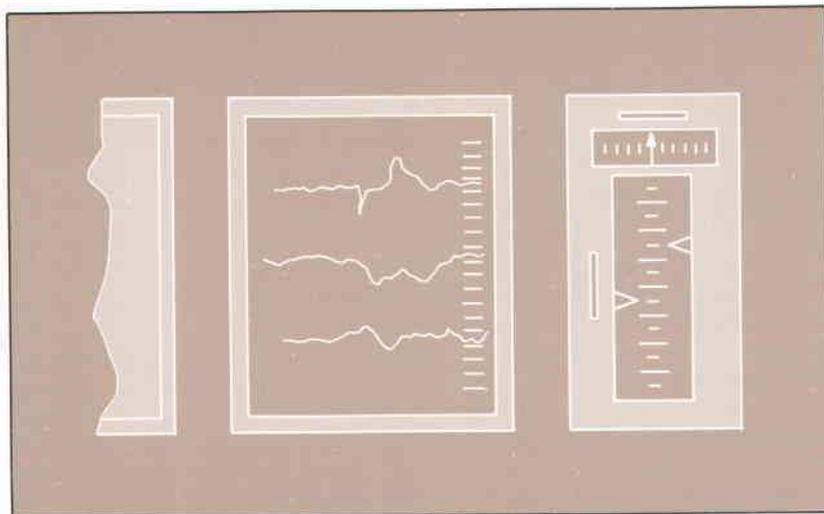


que lo contiene exista una cantidad mínima, un sensor tal como un presostato o un detector de nivel, indicará al sistema de control que existe cantidad suficiente, y un relé de máxima (o mínima) desviará la señal de control desde la válvula que regula el combustible normal a la válvula que controla el subproducto.

CONTROLADORES NEUMÁTICOS

Los instrumentos neumáticos de control de panel pueden ser del tipo convencional o del tipo miniatura. Actualmente estos instrumentos están muy perfeccionados, y puede afirmarse que casi han llegado al límite de su desarrollo. Están dotados de bloques modulares de control de técnica fluidica, disponen de acción PID, control en cascada, alarmas de desviación, relés de relación, interruptor para procesos discontinuos, conmutador automático-manual, etc. Pueden ser extraídos de su caja de alojamiento por lo que, en caso de avería, su sustitución es inmediata.

Existen instrumentos auxiliares, situados generalmente detrás del panel de control, que transforman o relacionan entre sí las variables medidas. Típicamente son los extractores de raíz cuadrada, aparatos linealizadores de la señal, relés sumadores, relés multiplicadores y divisores, relés inversores, relés de alarma, integradores, etc.



Instrumentación de alta densidad. De tamaño miniatura ideado para que en el mínimo tamaño de panel quepan el máximo número de instrumentos.

Aunque los sistemas digitales presentan muchas más ventajas de tratamiento de las señales y de la información, los controladores neumáticos todavía son más baratos en pequeños sistemas, pueden instalarse directamente en áreas peligrosas, y se mantienen funcionando aunque falle la alimentación eléctrica, mientras exista aire en las tuberías de alimentación neumática de la planta. Deben alimentarse a través de un filtro manorreductor y a la presión de $1,4 \text{ Kg/cm}^2$ (o 20 psi). El aire de alimentación debe ser limpio, si es posible sin aceite, suministrado por compresores con aros de grafito que no precisan lubricación.

CONTROLADORES ELECTRÓNICOS

Los instrumentos electrónicos de control de panel son del tipo miniatura. Dotados de las mismas funciones que el controlador neumático anterior, pueden contener un microprocesador, lo que les ha permitido la incorporación de "inteligencia". De este modo, disponen de ajuste del punto de

consigna y de las acciones PID sin extraer el instrumento de su base en el panel, y de autoajuste del instrumento (fijación de los valores de las acciones proporcional, integral y derivada) para acomodarse a las variaciones de régimen del proceso.

Aparte de los instrumentos auxiliares electrónicos que realizan las mismas funciones que los correspondientes instrumentos neumáticos descritos, existen convertidores mV/I (milivoltios a intensidad), convertidores R/I (resistencia a intensidad), convertidor I/P (intensidad a presión), convertidor P/I , convertidor mV/P (milivoltios a presión), convertidor R/P , etc.

CONTROLADORES DIGITALES

Existen controladores digitales individuales, en particular para procesos discontinuos (*batch*), que llevan a cabo un control multifunción, actúan como instrumentos reguladores (para variables como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura...), con control lógico y control secuencial, efectúan operaciones aritméticas, monitorizan entradas y salidas, y tienen capacidad gráfica con representación del balance de materias. Este tipo de controladores permiten incluso la creación de software para definir todos los enclavamientos y secuencias de la operación.

Los controladores digitales, al estar dotados de microprocesador, realizan directamente las funciones de control auxiliar expuestas antes en los instrumentos neumáticos y electrónicos, y no precisan de ningún otro instrumento.

La tendencia general de los controladores digitales (y de todos los instrumentos controladores que disponen de microprocesador) es la adopción de nuevos algoritmos de control que perfeccionen los clásicos PID (*proporcional+integral+derivativo*). De hecho, se aplican en general las funciones de autoajuste de las acciones, control en adelanto, control no lineal, adelanto-retardo, compensación del tiempo de retardo y control mediante dos puntos de consigna con efecto estabilizador sobre la válvula de control, ya que la misma no se mueve cuando la variable se encuentra dentro de la zona comprendida entre los dos puntos de consigna. Una cuestión importante es el fenómeno de interacción entre los lazos de control, lo cual obliga a coordinar sus actuaciones dentro del proceso.

Los controles digitales también forman parte del control distribuido, del cual se habla más adelante, en el que uno o varios microprocesadores controlan las variables que están repartidas por la planta, conectados por un lado a las señales de los transmisores de las variables y por el otro a las válvulas de control.

En este caso, análogamente a las demás variables de la planta, el operador puede cambiar el punto de consigna, modificar los valores de las alarmas de nivel, los valores de las acciones de control PID, visualizar el gráfico del lazo de control, cambiar los márgenes de medida de los transmisores y de las alarmas, examinar la bondad del control, visualizar las curvas de tendencia de las variables, etc. Desde el punto de vista del mantenimiento, puede ser avisado por el sistema si se presenta algún fallo en los instrumentos o en el cable de comunicaciones, o examinar su buen funcionamiento cuando se desee.

CONTROL CON ORDENADOR PERSONAL

La creciente utilización del ordenador personal hace atractiva la solución competitiva y económica de utilizarlo para el control de las variables del proceso. Por contra, esta solución presenta como desventaja la necesidad de programar el control del proceso, si bien existen suministradores en el mercado que proporcionan un apoyo total al usuario con el software y las placas de adquisición y envío de datos.



Control con ordenador personal. El ordenador dispone de placas de entrada y salida de datos y del software para realizar los cálculos de las acciones proporcional+ integral + derivada.

La adquisición de un IBM-PC XT, AT o PS/2 u otro modelo compatible es el primer paso al que debe seguir la compra del hardware y el software, lo que conlleva un empleo importante de tiempo en la configuración del sistema completo de control. Por este motivo, muchos usuarios prefieren, aunque el costo sea mayor, dirigirse a un proveedor que aporte la solución completa.

Sin embargo, señalemos que en la decisión intervienen el tipo de ordenador personal, las placas de I/O (entrada y salida) y el software. Entre los paquetes de software que pueden emplearse figuran el DAAC de IBM-PC para los lenguajes BASIC, FORTRAN y C, y el *Labtech Notebook* de *Laboratory Technologies Corp.* (Wilmington MA) que, creado inicialmente

para adquisición de datos de laboratorios, fue mejorado para aplicaciones de control de procesos industriales (permite las acciones P+I+D) entre otras. Este programa permite el control en tiempo real del proceso y, además, el uso compartido del ordenador personal para otros menesteres, por ejemplo, trabajar con un procesador de textos o con una hoja electrónica.

La aparición del procesador 80386 de Intel posibilita todavía más la mejora de la rapidez en el control, así como la reciente aparición en el mercado del PS/2 de IBM.

También el uso del ordenador personal IBM PC o compatible está extendiendo su empleo en la industria. Por ejemplo, en lo referente a la medición de nivel existe un sistema de valoración hidrostática de la capacidad del tanque, mediante el cual se mide la presión diferencial en dos puntos fijos del tanque y se compensa con relación a la temperatura. Los datos de la medida de la densidad efectuada por la diferencia de presiones captada, conjuntamente con la temperatura y las características tabuladas del tanque, son introducidos en un ordenador personal con placas de adquisición de datos. La precisión conseguida en el cálculo inventariable del volumen del tanque es del $\pm 0,1\%$, frente al típico $\pm 0,3\%$ conseguido con un medidor de nivel hidrostático clásico.

CONTROLADOR UNIVERSAL

La tendencia general por parte de los fabricantes de instrumentos y del mercado, es el uso de controladores capaces de gobernar individualmente una unidad de operación de la planta. Por ejemplo, el control de un reactor, de un horno o de un compresor.

En este sentido, el controlador debe manipular una serie de entradas y de salidas y debe efectuar varias operaciones y cálculos de control para los lazos de la unidad de proceso, aparte de proporcionar las secuencias de enclavamientos de bombas y de válvulas todo-nada del proceso. Como estas operaciones deben poder realizarse para diferentes tipos de unidades de proceso, se sigue que el controlador universal puede estar formado por ordenadores personales o bien ordenadores especiales con el adecuado hardware, bien estudiado por el suministrador, para que el usuario no tenga especiales dificultades al programar el software necesario en su proceso. Esto conlleva bastantes horas de dedicación, horas que el suministrador puede reducir proporcionando al usuario librerías de subrutinas de funciones de control PID y lógico. No obstante, en la mayor parte de los casos, el usuario debe elaborar la mayor parte de software para "construir" la unidad controladora.

Los sistemas expertos prometen ser el futuro de los controladores universales al tener la posibilidad de incorporar gradualmente la experiencia ganada por el usuario en cada unidad de proceso.

Control distribuido

APARICIÓN DEL CONTROL DISTRIBUIDO

En los años 70, dentro de los esfuerzos de investigación dedicados a la resolución del problema del control de fábricas con gran número de lazos, y teniendo en cuenta el estado de la técnica de los microprocesadores y la característica "conservadora" de la industria, se llegó a las siguientes conclusiones generales:

1) Descartar el empleo de un único ordenador (control D.D.C.) por el serio inconveniente de la seguridad y sustituirlo por varios controladores digitales capaces de controlar individualmente un cierto número de variables, para así "distribuir" el riesgo del control único.

2) Cada controlador digital debía ser "universal", es decir, disponer de algoritmos de control, seleccionables por software, que permitieran resolver todas las situaciones de control y dieran así versatilidad al sistema; de este modo un solo controlador digital podía efectuar un control P, PI, PID, de relación, en cascada, etc.).

3) La velocidad en la adquisición de los datos y su salida hacia las válvulas de control debía ser en *tiempo real*, lo que obligaba a utilizar microprocesadores de 16 bit, que en los años 70 eran comercialmente una novedad.

4) Para comunicar entre sí los transmisores electrónicos de campo, los controladores y las interfases para la comunicación con el operador de la planta, se adoptó el empleo de una vía de comunicaciones en forma de cable coaxial instalado en la planta, con un recorrido paralelo a los edificios y a la sala de control.

5) Para eliminar el espacio de panel requerido por el control clásico, se adoptó el uso de uno o varios monitores CRT, en los cuales el operador, a través del teclado, debía examinar las variables de proceso, las características de control, las alarmas, etc. sin perturbar el control de la planta, y con la opción de cambiar cualesquiera características de control de las variables del proceso.

Como resultado de estos esfuerzos el primer *control distribuido* aportado por Honeywell para la industria apareció en noviembre de 1975.

En esencia, la diferencia entre el control distribuido y el control clásico puede compararse a la existente entre el primer ordenador, el ENIAC, que se configuraba cambiando cables, y el actual ordenador personal en el cual los cables existen "electrónicamente" configurados por el programa escrito (software) que se ejecuta.

Coincidiendo con la aparición del control distribuido surge el transmi-

sor "inteligente" que, gracias a un microprocesador incorporado, consigue de forma automática su autocalibración, la compensación de cambios en otras variables (caudales de gases con compensación de presión y temperatura, compensación de la unión fría en termopares, compensación de temperatura en la medición de densidad y de pH), la linealización de señales de caudales y de termopares, el diagnóstico interno de averías, y el ajuste externo de los parámetros de la variable medida (*rango y span*) mediante un comunicador portátil, lo que simplifica extraordinariamente la calibración y el mantenimiento.

El ordenador personal también se ha incorporado al control distribuido. Permite la visualización de las señales de múltiples transmisores, el diagnóstico de cada lazo de transmisión, el acceso a los datos básicos de calibración y a los datos de configuración de los transmisores.

TIPOS DE CONTROLADORES

El *controlador básico* del sistema es un microprocesador que proporciona los clásicos controles PID y otros algoritmos de control. Es apto para el manejo de 8 lazos que proporciona, entre otros, los siguientes algoritmos de control:

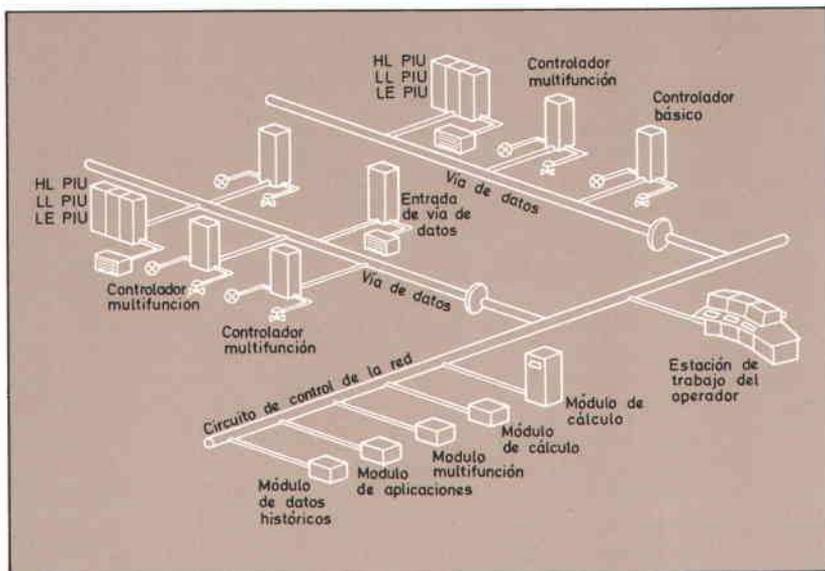
- Salida manual.
- PID normal.
- PID con ajuste externo del punto de consigna.
- PID con control en adelanto (*feedforward*).
- Adelanto-retardo.
- Sumador.
- Multiplicador-divisor.
- Relación.
- Extracción de raíz cuadrada.
- Rampas programadas (temperatura en procesos discontinuos).
- Contador.

Estos algoritmos pueden configurarse definiéndose de esta manera el último modo de control a retener en caso de avería, las unidades de ingeniería (tipo de termopar, termorresistencia, etc.), la acción de control (directa, inversa), el tipo de señal de entrada (lineal, raíz cuadrada, etc.), las alarmas, etc.

El *controlador multifunción* que, al utilizar en su programación un lenguaje de alto nivel se asemeja a un ordenador personal, proporciona las funciones de control lógico que permiten regular un proceso discontinuo (*batch control*) y el manejo de procesos complejos en los que el controlador básico está limitado. Tal es el caso del control de una columna de destilación, donde el control es dinámico y es necesario realizar cálculos en "tiempo real" sobre las ecuaciones de equilibrios entre el reflujo interno y el reflujo externo en cabeza de la columna. Otros casos típicos son la manipulación de reactores en condiciones anormales, el precalentamiento de líquidos de alimentación de procesos mediante la creación matemática de modelos, etc.

El *control secuencial* enlaza el control analógico (modulante con posiciones que varían continuamente en la válvula de control) con el control

lógico. Por ejemplo, el arranque y el paro de una caldera de vapor deben hacerse de modo secuencial para eliminar totalmente el riesgo de una explosión que ocurriría si, en el peor de los casos, entrara agua en la caldera con el nivel muy bajo y con los tubos del serpentín al rojo. El control secuencial se realiza con un conjunto de instrucciones o sentencias, parecidas a programas de ordenador, que establecen en el tiempo los puntos de ajuste de cada elemento para que tenga lugar la secuencia deseada. El lenguaje empleado es de alto nivel, parecido al BASIC, y orientado al usuario del ordenador personal, por lo que es fácil de escribir y de interpretar.



Componentes del control distribuido. Transmisores, controladores, vía de comunicaciones y consola de control. (Cortesía: Honeywell).

En el *control discontinuo* (*batch control*) es usual automatizar la entrada de ingredientes, en particular en la industria farmacéutica, definiendo su naturaleza y cantidades en lo que se llama la fórmula (*recipe*). Debido a que se fabrican muchos productos diferentes en la misma unidad de fabricación, es necesario que el equipo de control sea versátil para satisfacer la gran variedad de fórmulas (*recipes*) que pueden presentarse. La práctica usual es disponer de un programa de la fórmula principal grabado en diskette, y modificar ésta dinámicamente de acuerdo con los datos de la fórmula, las fases del proceso discontinuo y el tiempo estimado de ejecución de la operación.

Los *controladores programables* sustituyen a los relés convencionales utilizados en la industria. En lugar de disponer de pulsadores y relés para los circuitos de enclavamiento y para el accionamiento de los motores de la planta, con el correspondiente panel o cuadro de mandos y con los consiguientes cables de conexión, voluminosos y caros, el controlador programable aporta la solución versátil, práctica y elegante del software en un lenguaje especial, basado en la lógica de relés.

El teclado del controlador dispone de símbolos que representan la

lógica de los contactos: NA (normalmente abierto), NC (normalmente cerrado), temporización ON y OFF, contador, constante, etc.

De este modo pueden desarrollarse programas que representen cualquier circuito de enclavamiento, y comprobarlos con un simulador de contactos, antes de acoplar el controlador programable a la planta.

VÍA DE COMUNICACIONES

Los mensajes que circulan por la vía de comunicaciones entre los transmisores o las unidades de control situadas en los edificios de la fábrica, son controlados mediante varios mecanismos de comprobación de errores: una comprobación bit por bit que asegura que cada bit contiene un impulso positivo y otro negativo, una comprobación del código y un conocimiento por parte del aparato emisor del mensaje recibidos por el aparato receptor.

Por otro lado, la vía de comunicaciones es redundante (dos cables coaxiales) para que, de este modo, una avería en un cable por cualquier motivo (por ejemplo, una excavadora que por error abra una zanja en el punto donde está el cable, lo destroce interrumpa las comunicaciones) transfiera automáticamente las comunicaciones al otro cable sin que el control se interrumpa. Esta función de conmutación la realiza el sistema (director de tráfico) al definir cuál de los cables redundantes es el activo, y además, desde el punto de vista de la seguridad intrínseca, el sistema limita asimismo la energía en las líneas de acceso. La comunicación puede realizarse de dos formas: palabras de mando y palabras de datos. Las palabras de mando contienen información sobre la operación a llevar a cabo e identifican el aparato que tiene que realizarla y la dirección de la memoria dentro del aparato. Las palabras de datos siguen a las palabras de mando y contienen información básica que es transferida como resultado de la palabra de mando precedente.

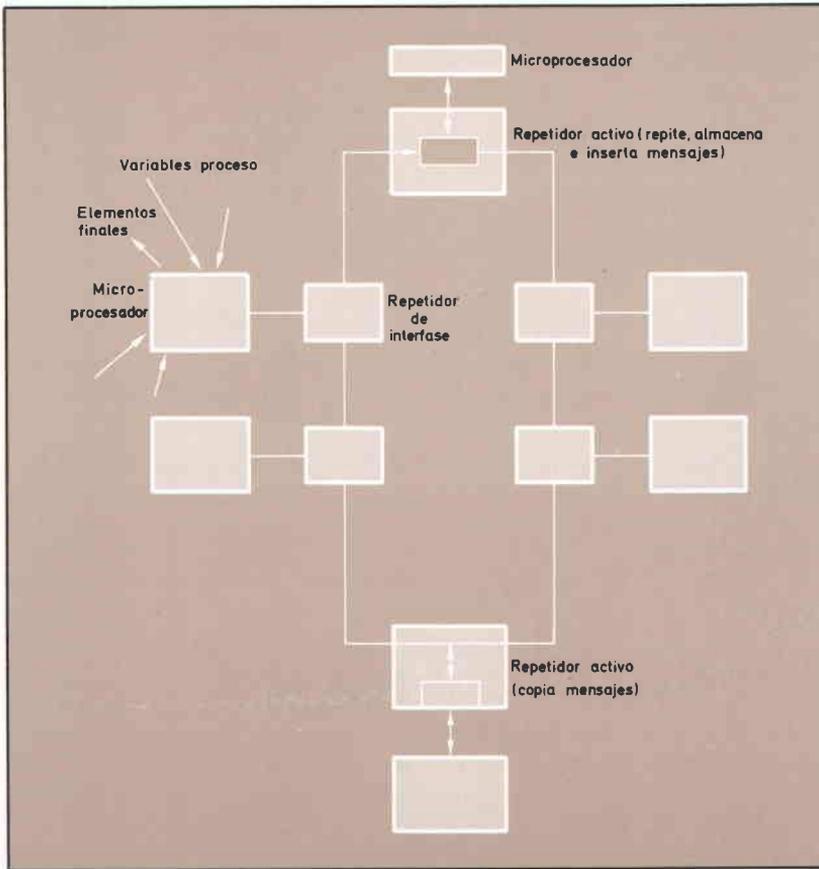
La comunicación, a través de la vía de comunicaciones, entre los microprocesadores y el centro supervisor puede realizarse según varios esquemas arquitectónicos: anillo, vía bidireccional y vía interrumpida.

El sistema en anillo consiste en un lazo cerrado al cual están conectados los microprocesadores locales a través de elementos de interfase que insertan mensajes y repiten los emitidos que pasan a su través; otras interfases se limitan a copiar los mensajes a medida que éstos circulan por el anillo. Los métodos de emisión de mensajes consiguen que dentro de un período dado se transmitan mensajes libres de interferencias. La ventaja principal que ofrece el sistema en anillo es su sencillez, lo cual da lugar a una buena fiabilidad.

La vía interrumpida incorpora un "interrupción" (de aquí le viene el nombre) que intercepta los mensajes y los envía al lugar adecuado. Es usual enviar los mensajes con la técnica de multiplexión por división de frecuencia, es decir, a frecuencias únicas distintas y propias de cada microprocesador, siendo así posible transmitir muchos canales de datos.

La vía bidireccional se diferencia del sistema en anillo en que no es una vía cerrada; de aquí que en comparación permite transmitir los mensajes en dos direcciones, ganando así rapidez de respuesta. Los microprocesa-

dores y las interfases están conectados en forma parecida al anillo. La emisión de mensajes puede tener lugar mediante varios esquemas, utilizando interfases pasivas que aguardan a que la vía esté libre antes de radiar su mensaje, utilizando un "árbitro de acceso" que determina cuál de los elementos de interfase puede utilizar prioritariamente la vía, o bien empleando el llamado "controlador de tráfico", que vigila cada elemento de interfase para ver si tiene algún mensaje que transmitir. Examinaremos con mayor detalle este último tipo de control distribuido.



Sistema en anillo. Lazo cerrado con microprocesadores conectados a interfases que emiten, copian y repiten los mensajes.

ESTACIÓN DEL OPERADOR

La estación universal proporciona la comunicación con todas las señales de la planta para el operador de proceso, el ingeniero de proceso y el técnico de mantenimiento. La presentación de la información a cada uno de ellos se realiza mediante programas de operación. De este modo:

1) El operador de proceso ve en la pantalla (o pantallas) y puede manipular las variables deseadas, las alarmas, las curvas de tendencia, etc. Puede archivar datos históricos de la planta que crea interesantes, obtener copias en impresora de las tendencias, el estado de las alarmas, etc.

2) El ingeniero de proceso puede editar programas del proceso, construir las representaciones en la pantalla de partes del proceso, etc.

3) El técnico de mantenimiento puede, fundamentalmente, diagnosticar y resolver problemas en los elementos de control distribuido de la planta.

El *computador* permite implementar los programas de aplicaciones de los usuarios, destinados a obtener información determinada de la planta y procesarla con objeto de analizarla más adelante. El sistema se presta a optimizar variables, a hacer cálculos especiales o complejos sobre balance de energía o de consumo de materias primas de la planta, y a confeccionar *rappports* especiales.

Por otro lado, el computador puede comunicarse con otros ordenadores de mayor capacidad para obtener información sobre el consumo de materias primas, sobre los factores que influyen en la producción y en su rendimiento, y sobre los datos analíticos que se utilicen en la optimización de la planta. Y, como es lógico, esta información actual obtenida del proceso es accesible a la dirección, que puede utilizarla para el control de costos de la planta.

El lenguaje utilizado suele ser de alto nivel, Fortran 77 y Pascal.

La tendencia del computador es a generar cada vez más información, la cual debe ser transmitida rápidamente dentro de la planta y a veces en tiempo real.

Esta información es manejada por los llamados periféricos del ordenador. Estos periféricos deben operar a la misma velocidad que los sistemas basados en los procesadores 286 y 386. Entre ellos se encuentran memorias magnéticas de 40, 80, 240 Mbytes, memorias láser de 1 Gbyte, memorias ópticas de 40 Gbytes, impresoras rápidas con escritura de alta calidad, etc.

Las *alarmas* son importantes en el control de procesos. Existen alarmas de alto y bajo valor de la variable, alarmas de desviación entre el punto de consigna y la variable controlada, alarmas de tendencia que actúan si la variación de la variable excede de un valor prefijado, alarmas de estado de la señal de entrada o de salida, etc. Conviene evitar la instalación de un número excesivo de alarmas, ya que el operador se ve obligado a silenciarlas apretando el pulsador correspondiente, y además le predisponen a no prestarles atención. Los casos en que la alarma actúa demasiadas veces durante el día son debidos a un mal diseño o a una condición del proceso que hay que corregir. Por ejemplo, una alarma de nivel de flotador situada en un tanque con agitador en el cual no existan dispositivos de barrera contra las olas formadas en la superficie, estará actuando intermitentemente cuando el nivel alcance justamente al flotador. La solución a este caso y a otros parecidos es la llamada alarma "inteligente", que actúa siguiendo la lógica del circuito. En el ejemplo anterior, el sistema dispondría de un circuito lógico que después de la primera alarma comprobaría si el nivel bajaba y se separaba en un valor mínimo de la posición del flotador, y si éste no fuese el caso no actuaría por considerar que la situación no es condición anormal.

SEGURIDAD, FIABILIDAD, DISPONIBILIDAD

El control distribuido tiene una *seguridad mejorada* con relación a los sistemas convencionales de control. Tal como se ha indicado, los transmisores disponen de un sistema de autocalibración y diagnóstico de averías que permite al personal de mantenimiento localizarlas y resolverlas rápidamente en caso de que se produzcan. El sistema es redundante y puede considerarse como una "inteligencia distribuida" que, en forma parecida a la humana, limita las consecuencias de un fallo, manteniendo el control del sistema.

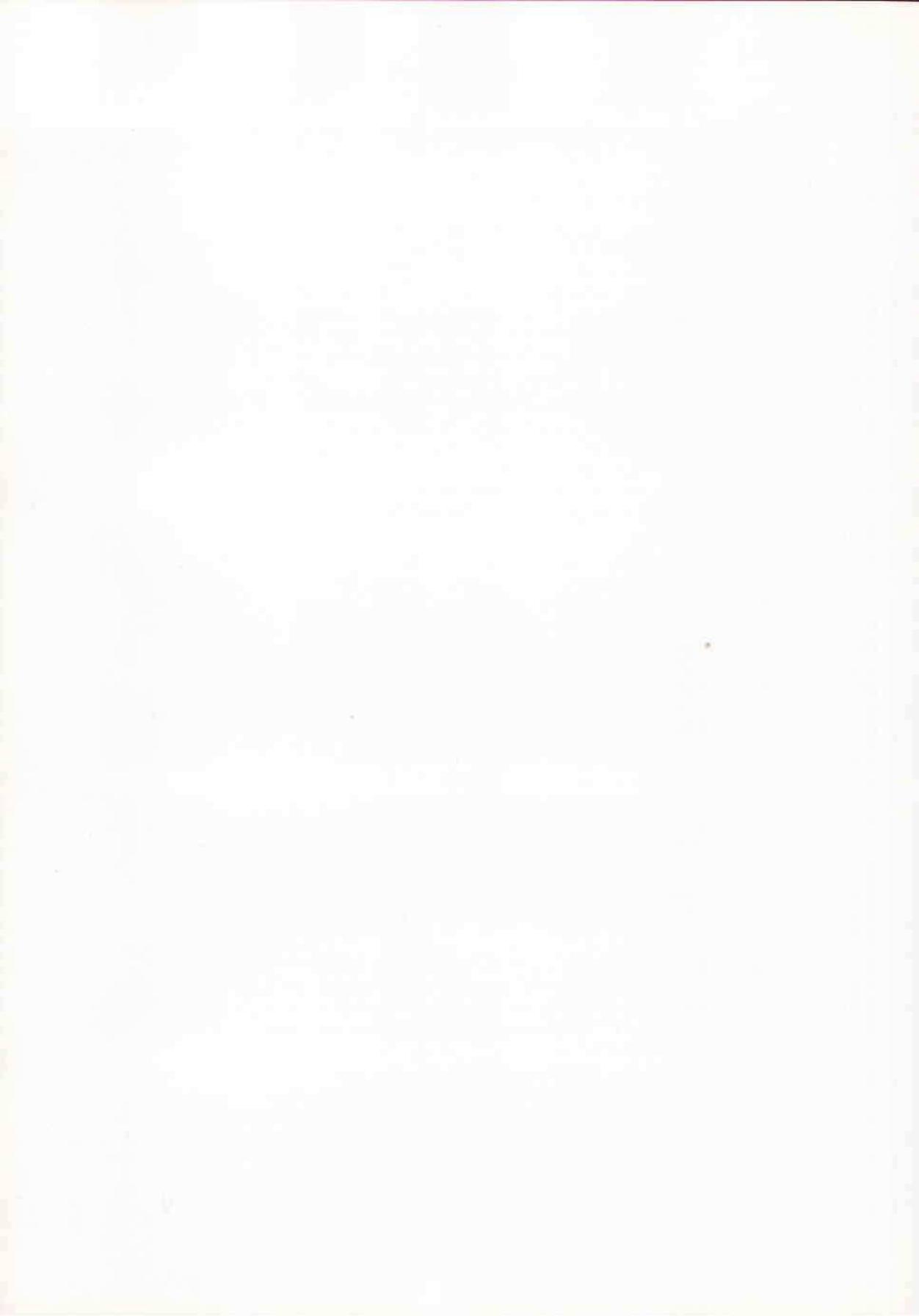
Desde el punto de vista de la *fiabilidad* del equipo, el número de horas/fallo de los elementos de un sistema de control distribuido es considerable y varía en régimen permanente y a la temperatura de 25 °C desde 10.000 horas/fallo en los controladores básicos hasta 220.000 horas/fallo en la vía de comunicaciones (cable coaxial), y este tiempo sigue creciendo con las nuevas técnicas de fabricación que se van incorporando a la industria.

Otro parámetro interesante es la llamada *disponibilidad*, es decir, la fracción de tiempo en que el sistema es operable. Por ejemplo, una disponibilidad del 90 % significa que el sistema trabaja el 90 % del tiempo, mientras que el 10 % restante está en reparación. Pues bien, en los sistemas de control distribuido la disponibilidad típica varía desde el 99,2 % hasta el 99,9 %, dependiendo de la bondad del equipo, de la existencia de piezas de recambio críticas y del mantenimiento. Por lo tanto, si el usuario dispone en la planta de dichas piezas y ha contratado un buen mantenimiento, la seguridad de funcionamiento es clara.

Cabe pues afirmar que los sistemas de control distribuido se han consolidado en el mercado industrial como los sistemas ideales de control y, hoy en día, sus ventajas son tan claras que, al estudiar la instrumentación y el control de una nueva fábrica o la reforma de una antigua, es inimaginable no considerarlos como posibles opciones de elección.

Los sistemas electrónicos, al usar la lógica binaria presentan la ventaja de poder ser aplicados y compatibles tanto para producción a gran escala como en la fabricación de un número pequeño de unidades (procesos de fabricación batch o por lotes).

El coste del equipo electrónico disminuye de forma continua, el software continúa su creciente desarrollo y la presión económica que induce a la automatización se mantiene, por lo cual es de esperar que se ampliará la difusión de la automatización en los próximos años, pero de alguna manera surgirán barreras que la limitarán.



Sistemas de control avanzado

GENERALIDADES

Los sistemas de control avanzado se aplican a procesos determinados y su objeto es obtener el mejor control del proceso particular que se estudie en la planta.

La aplicación de los sistemas de control avanzado crece de día en día por los beneficios que permite conseguir en la automatización de la planta. Las ventajas que presenta la aplicación de los sistemas de control avanzado abarcan: el ahorro de energía conseguido en la operación de la planta, el aumento de capacidad de fabricación, la disminución del costo de operación y la disminución del porcentaje de recuperación de los productos que salen fuera de especificaciones durante el proceso de fabricación.

Los rendimientos típicos que ofrecen los sistemas de control avanzado son los siguientes:

- Ahorro de energía con el 5 % de aumento en la producción.
- La capacidad de fabricación de la planta aumenta desde el 3 % al 5 %.
- El costo de operación de la planta se ve reducido del 3 % al 5 %.
- Los porcentajes de recuperación de los productos mejoran del 3 % al 5 %.
- El retorno de la inversión se produce en un tiempo de 1 a 5 años.
- El rendimiento global es del 5 % al 35 %.

Las aplicaciones de los sistemas de control avanzado aumentan de día en día y se aplican a procesos tales como fabricación del amoníaco, procesos discontinuos, hornos, calderas vapor, plantas de cogeneración, plantas petroquímicas, sistemas de ahorro de energía, reactores químicos, plantas de gas natural, compresores, servicios generales, control estadístico del proceso, etc.

CALDERAS DE VAPOR

En las calderas de vapor el sistema compensa en circuito cerrado las perturbaciones que se presentan en la operación de la caldera para reducir el consumo de combustible. El sistema dispone de un elemento de simulación y optimización de la caldera que recibe todos los datos de operación y los datos económicos de funcionamiento, y determina la forma óptima para operar la caldera, calculando los puntos de consigna de los controladores; por otra parte, permite la operación *on-line*, es decir, el funcionamiento en tiempo real de la caldera, y *off-line*, es decir, un estudio del comportamiento del sistema ante ensayos de funcionamiento sin peligro para el control de la caldera. En este último caso pueden probarse

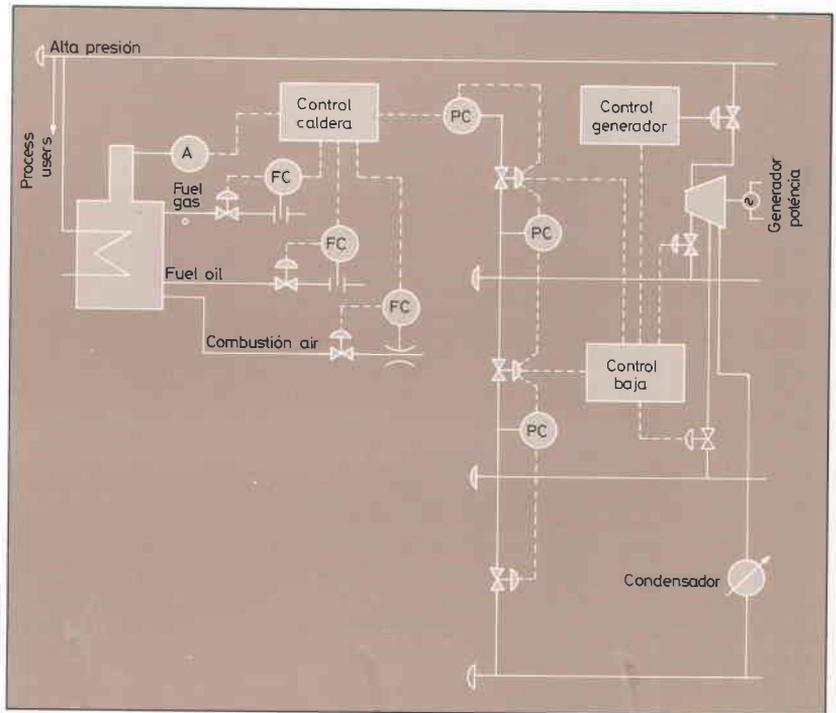
diversas hipótesis y sus consecuencias en el control de la caldera de vapor. En otras palabras, el control avanzado contesta a la pregunta. ¿Qué pasaría si...?

El sistema permite la optimización en el uso de diversos combustibles y el cálculo del coste de la energía eléctrica suministrada por las turbinas asociadas a la caldera. Estas se utilizan en el aprovechamiento de la energía suministrada por el vapor y no utilizada en la planta, la cual se envía y factura a la compañía eléctrica.

REACTORES

Los reactores se utilizan típicamente en plantas de polietileno y en procesos de polimerización.

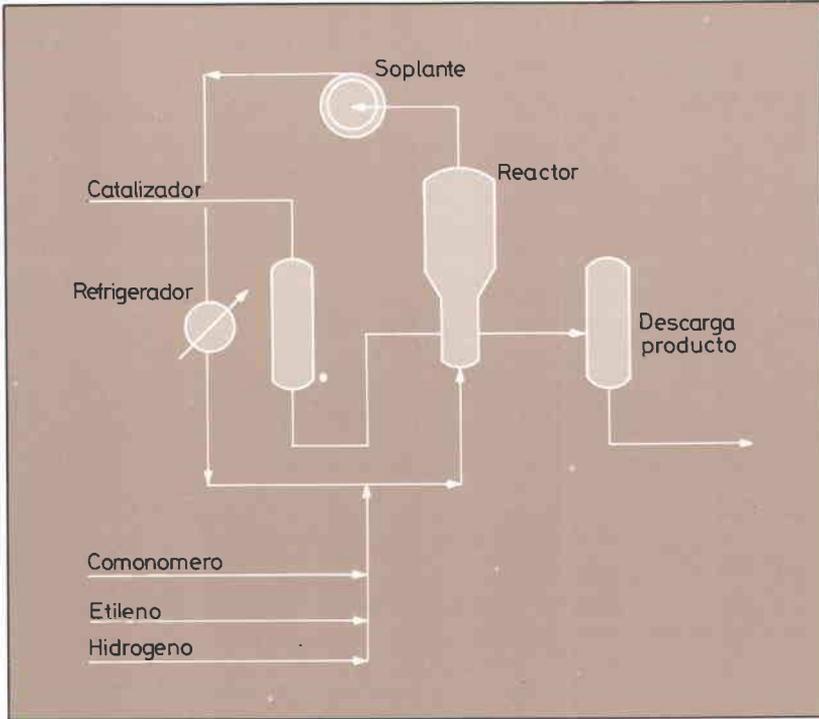
Control avanzado en una caldera de vapor que compensa las perturbaciones en la operación de la caldera.



En las plantas de polietileno se utilizan modelos matemáticos multivariables. Los sistemas de control avanzado predicen los productos que se fabrican y los controlan mediante la variación de los productos entrantes, permitiendo una transición suave de fabricación entre dichos productos.

El sistema controla las propiedades del polietileno tales como el índice MI (*melt index*) o índice de caudal FI (*flow index*) y la densidad. Estas propiedades son una función de la concentración de hidrógeno, de etileno, de comonomero (propileno, etc.), de la reactividad del catalizador, de la temperatura, de las impurezas y de otros factores. Existe una diversidad de modelos, según el proceso, que engloban todas las variables anteriores.

El modelo adoptado del proceso y las condiciones de operación predicen las propiedades del producto final que va a fabricarse, lo que permite al sistema el cálculo de las condiciones requeridas para mantener las propiedades deseadas en el producto final.



Control avanzado que controla los índices MI y FI en la fabricación de polietileno en un reactor.

Mientras que en los procesos basta controlar las variables en lazo cerrado, en los reactores dicho procedimiento comportaría un tiempo excesivo por la necesidad de analizar el producto para comprobar si está o no dentro de las especificaciones. Por este motivo es necesario trabajar con un modelo del proceso que facilite la predicción rápida de la evolución de la reacción, en el sentido de conocer la marcha de la fabricación de los productos.

Algunas variables, tales como las desviaciones en el rendimiento del catalizador, las variaciones en el intercambio calorífico, etc. que no pueden modelizarse, se tienen en cuenta cada vez que el modelo se actualiza.

CONTROL ESTADÍSTICO DEL PROCESO

El objetivo del control estadístico del proceso (SPC) es monitorizar el comportamiento de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a variaciones de la calidad de los productos fabricados. La tendencia del control distribuido es la de incorporar este tipo de control, extrayendo la información de la base de datos de los históricos del sistema. Los cálculos que realiza el control estadístico abarcan la determi-

nación de la media, la desviación estándar, los valores periódicos máximos y mínimos, etc.

El sistema permite averiguar si un instrumento está averiado en el sentido de que ha quedado bloqueada su señal de salida, si una válvula de control está con el obturador agarrotado por deformación del vástago o por otra causa, si es posible trabajar al límite de las especificaciones del producto, si los puntos de indicación de algunas variables han variado significativamente para que puedan representar algún problema de desviación, etc.

El sistema trabaja en tiempo real con leyes de probabilidad de las variables para los valores no aleatorios, y presenta los resultados en forma de gráficos de tendencia, de tablas y de gráficos en general. Este tipo de control, mediante visualizaciones especiales, alerta al operador para que pueda actuar sobre el proceso.

Los beneficios que proporciona este sistema son: evitar paros de la planta, impedir dentro de lo posible que las variables salgan fuera de control, asistir al departamento de mantenimiento en los programas de mantenimiento preventivo y proporcionar al cliente registros o certificados de la bondad de los productos que adquiere.

SISTEMAS EXPERTOS

Los sistemas expertos se integran en el sistema de control de la planta para asistir al operador en la detección y solución de los casos en que el proceso sale fuera de control.

Los sistemas expertos han sido posibles gracias al microprocesador. El sistema experto detecta y diagnostica los problemas potenciales que pueden presentarse en el control de procesos de una planta industrial. La elaboración del *paquete experto* es laboriosa. Es necesario adquirir el conocimiento del proceso que poseen los operadores de la planta y los ingenieros proyectistas para incorporarlo al sistema experto. Este conocimiento se basa fundamentalmente en las señales de alarma que el operador humano capta antes de presentarse las situaciones anómalas en el proceso, situaciones que dan lugar a toda clase de fenómenos perjudiciales como son: paro de la planta, destrucción del producto, explosiones, desprendimientos de productos peligrosos, etc. Para la elaboración de las bases del conocimiento se hace un amplio uso de pantallas y menús que permiten al usuario, sin tener experiencia en sistemas expertos y con la ayuda del programa, construir los modelos del proceso, entrar los parámetros del sistema, especificar las variables críticas y otros datos del conocimiento.

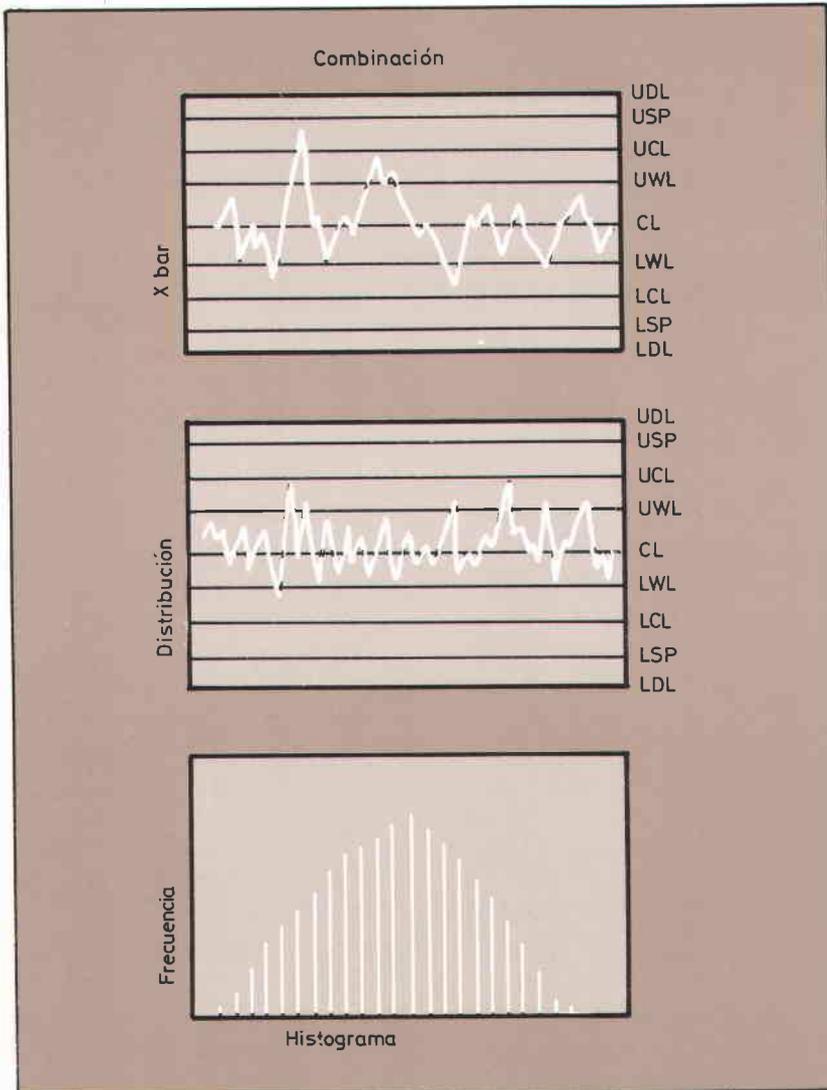
El sistema experto también debe incorporar las operaciones necesarias para solucionar correctamente las situaciones anómalas del proceso.

El diseño de los diagramas de flujo y las configuraciones del control de la planta (presentaciones visuales, procesos simulados) requieren trabajar con un lenguaje de programación que permita al proyectista una gran versatilidad. Si bien en la industria se había trabajado inicialmente con FORTRAN por sus características generales de cálculo científico, la versatilidad y la potencia que pide el sistema experto excluye el empleo único de

este lenguaje. El uso de cajas negras de sistemas expertos versátiles, que se encuentran disponibles en ordenadores personales, tampoco es la solución por la falta de potencia que requiere la elaboración del sistema experto, siendo lo adecuado las estaciones de trabajo en LISP (o en PROLOG) complementadas por herramientas de cálculo numérico que utilicen FORTRAN, PASCAL o C. De este modo, estas estaciones permiten la obtención del conocimiento cualitativo y cuantitativo que exige el sistema experto.

En general, un sistema experto dispone de:

- a) Un motor inferencial que controla y usa las bases del conocimiento del proceso (que contienen las reglas) para deducir conclusiones. Las



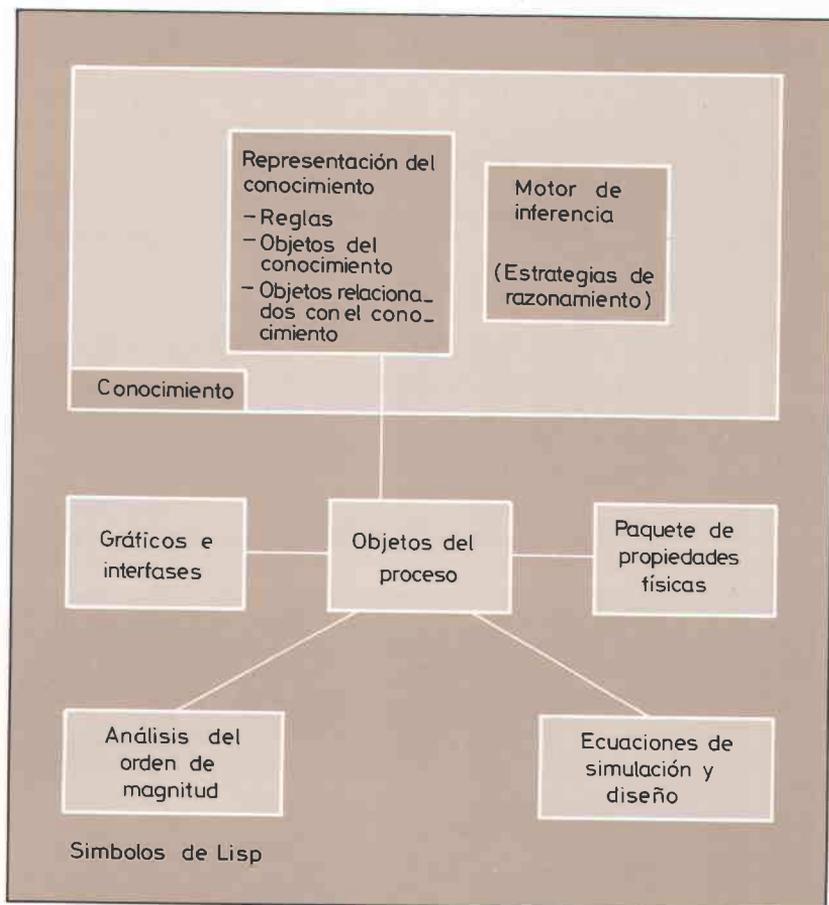
Control estadístico del proceso (SPC) de utilidad en la monitorización de las variables que pueden conducir a problemas de control o a cambios de calidad en los productos fabricados.

Control de procesos industriales: criterios de implantación

reglas utilizan profusamente la sentencia IF-THEN. Por ejemplo, en un reactor exotérmico se utilizaría: IF —la reacción es exotérmica— AND —el próximo paso de la reacción es bajar la temperatura— THEN —actúa (cerrando) la válvula de vapor de control de temperatura del intercambiador de calor del proceso.

b) Un sistema para manejar en tiempo real grandes cantidades de datos del proceso y a diferentes niveles de prioridad.

Componentes del sistema experto. El sistema experto reconoce las situaciones anómalas, las diagnóstica y asiste al operador en la corrección del problema en la planta.



c) El encadenamiento hacia adelante y hacia atrás de los diferentes árboles de decisión, proporcionando por diagnóstico y predicción una o varias conclusiones con un determinado nivel de certeza.

d) La simulación y el ensayo de la base de conocimiento antes de su uso real en el proceso.

e) Explicaciones del razonamiento empleado para información y uso por parte del usuario en la comprobación o ampliación del sistema.

Las etapas típicas en las que actúa un sistema experto en la planta son:

a) *Reconocimiento de las situaciones anómalas.* Se realiza mediante la monitorización de todos los sistemas de control analógicos y digitales, tales como los controladores, alarmas, indicadores y registradores, y su comparación con los datos provenientes del conocimiento del sistema experto.

c) *Diagnóstico.* Se efectúa a partir de la fase anterior de comparación si en la misma se han detectado situaciones problemáticas. Se visualiza el diagnóstico de la planta en el estado actual de control.

d) *Corrección del problema.* El operador es asistido por el sistema inteligente de visualización, que le muestra gráficamente los diagramas de flujo de interés, el resumen de alarmas, el estado de los indicadores y controladores afectados, y la secuencia de operaciones a realizar para atajar y solucionar el problema. Se dispone de ayudas en la visualización que provocan el centelleo de las áreas problemáticas dentro del diagrama de flujo.

En base a la información recibida, el operador actúa sobre el proceso, o bien puede hacerse que eventualmente esta actuación sea realizada automáticamente por el sistema de control, informando al operador de las acciones realizadas.

Entre las aplicaciones típicas que estos sistemas expertos pueden realizar se incluyen el control de nivel del fondo y la optimización del rendimiento en destilado de las columnas de destilación.

El beneficio que el sistema experto aporta a la planta es la reducción de los tiempos de paro y, lo que es más importante, la disminución de la probabilidad de que el funcionamiento anómalo de la planta conduzca a situaciones catastróficas.

Si bien es difícil predecir el futuro, los sistemas expertos se desarrollarán todavía más, conduciendo a nuevas herramientas y técnicas que permitirán la simulación amplia de los procesos industriales y la detección inicial de problemas en la calidad de fabricación de los productos, para así corregir en su inicio estas situaciones, disminuyendo los rechazos y proporcionando una ayuda muy útil al operador durante los paros de la planta o en las situaciones transitorias de pérdida de control. Para este desarrollo será necesaria la colaboración multidisciplinaria de técnicos y, con especial énfasis, la experiencia en el campo de la ingeniería química y la formación en la ingeniería del conocimiento.

Plantas antiguas

CRITERIOS DE IMPLANTACIÓN

Varios casos pueden presentarse en la industria desde el punto de vista de la implantación del control de procesos. Estudiaremos la modernización de las plantas antiguas y la implantación del control en las nuevas plantas. Si bien los dos son casos distintos y cada uno tiene sus peculiaridades, hay partes comunes, como son el ajuste de los instrumentos y la puesta en marcha. Estos se exponen en el estudio de las nuevas plantas, que se verá en el capítulo siguiente.

ASPECTOS A CONSIDERAR. NORMALIZACIÓN

La modernización (*revamping*) de las plantas de proceso constituye un capítulo importante en el crecimiento global de las empresas. La necesidad de sustitución y modificación de los procesos industriales viene forzada por varios factores, entre los cuales figuran como los más importantes el crecimiento de los costes de la energía, la demanda de productos con especificaciones cada vez más restrictivas y la producción barata y repetitiva de grandes cantidades de materias finales. Cada empresa debe satisfacer estas necesidades para mantenerse al día en el mercado y ser competitiva. Una planta que no se haya puesto al día pierde terreno rápidamente en cuanto a la producción repetitiva, barata y masiva de bienes que estén dentro de especificaciones, con lo cual, se arriesga a perder clientes, con las implicaciones de pérdida del mercado que ello conlleva.

Para que la modernización de la planta tenga éxito deben resolverse muchos problemas, que a pesar de ser parecidos a los que se encuentran en el proyecto de una nueva planta, presentan algunas diferencias sustanciales. La más importante es el hecho de que la operación de modernización debe realizarse dentro de un período de tiempo determinado (usualmente aprovechando los períodos de paro anuales de la fábrica) y con una planta que ya está actualmente en funcionamiento.

La palabra modernización sugiere de inmediato, mejora, fabricación rentable, mejores condiciones de fabricación, etc., y predispone a su realización. Sin embargo, viene inmediatamente la pregunta: ¿Es justificable la modernización de la planta? La respuesta a esta pregunta no es clara. Oscilando entre la «obligación» de modernizarse (renovarse o morir) y la «conveniencia», es útil plantearse inicialmente pequeños cambios en la planta que pueden convertirse en grandes mejoras. Por ejemplo, varios de estos puntos pueden ser:

a) Instalación de un panel de control que sustituya a los otros paneles locales. Esto permite a los operadores utilizar eficazmente su experiencia y mejorar el proceso sin aplicar técnicas avanzadas de control, y además

mejorar su ambiente de trabajo, captando mejor el estado y los cambios que se presentan en el proceso.

b) Cambiar las características del proceso, modernizando la forma de fabricación del producto.

c) Realizar cambios locales de algunos instrumentos de lazos críticos, con el fin de mejorar la velocidad de transmisión y la controlabilidad de estas variables.

El beneficio aportado por algunos de estos cambios es intangible. En general, el cambio de los instrumentos de la planta por otros actuales, sean electrónicos o pertenezcan al sistema de control distribuido, redundan en una mejor precisión, fiabilidad y flexibilidad, así como en una mejora de las comunicaciones y las capacidades gráficas de representación de la marcha del proceso en panel de control, alarga la duración del equipo, repercute en un menor gasto de energía en el control (las válvulas neumáticas reducirán sus movimientos y gastarán menos aire, por estar la variable en línea o con sólo con pequeñas desviaciones con relación al punto de consigna). La magnitud de los beneficios conseguidos depende de varios factores, como son la calidad de fabricación obtenida con la nueva instrumentación en comparación con la antigua y los cambios realizados en los esquemas de control merced a la nueva instrumentación.

Otro factor importante es la reducción aparente del personal, que a veces sirve para justificar la modernización de la planta. Es evidente que los instrumentos digitales eliminan las tareas repetitivas de la anotación periódica de las alarmas, de la redacción de los informes, y del registro y almacenamiento de datos históricos, ya que las mismas son preprogramadas y ejecutadas automáticamente por dichos instrumentos. De este modo, el número de operadores de la sala de control se reduce considerablemente, lo que repercute en costos de operación más bajos. Sin embargo, lo lógico es utilizar al máximo las posibilidades de los sistemas modernos de control (que se traducen en rendimientos mayores que la relación 20 a 1 con respecto a los controles convencionales), y emplear en estas nuevas tareas a personal adicional, ya que se supone que la moderna tecnología se adquiere para realizar otros trabajos, aparte de las propias tareas repetitivas. De este modo, la implantación del control moderno, en lugar de reducir el personal, lo que hará será conservar el nivel de empleo en la fábrica, pero reconvirtiendo al personal para realizar otras tareas de más alta cualificación.

Las plantas que desean modernizarse empiezan por preguntarse cómo pueden aumentar la productividad, cómo rebajar los costes de los productos que fabrican, cómo obtener más flexibilidad en la fabricación, cómo mejorar la seguridad de la planta y las condiciones de trabajo y cómo incorporar las nuevas tecnologías a su planta. Si bien existen múltiples respuestas a estas preguntas, la respuesta más inmediata y más clara es realizar la modernización de la planta por vía de la instrumentación de proceso, es decir, modernizar la planta a través de la sustitución puntual o global, incluso de la transformación o sustitución total del tipo de instrumentación que posee la planta.

Es evidente que esta transformación debe efectuarse con tres objetivos claros en mente:

1) Realizar la transformación en el mínimo de tiempo posible, pero sin imponer límites severos a la calidad del equipo que hay que adquirir. Por ejemplo, la fijación de un término de seis meses para la puesta en marcha de la planta o la parte de la planta que va a transformarse, impone de hecho la condición de descartar el control distribuido, ya que el suministrador dará probablemente un plazo de entrega de 9 + 12 meses para entregar el control llave en mano y a punto para el arranque. Debe fabricar los instrumentos, las consolas y las unidades de control, el cable de comunicaciones, prefijar de acuerdo con el cliente las opciones y los valores de las acciones de control, realizar pruebas en su fábrica y en la planta, poner en marcha el control, etc.

2) Que el número de interrupciones o de alteraciones de la fabricación sea el mínimo posible. Ello obligará a instalar el nuevo equipo en una zona próxima al antiguo y en cierto modo a duplicar momentáneamente las tuberías y parte del equipo.

3) Gastar el mínimo dinero posible. La fijación del capital disponible para el proyecto es esencial para definir los cambios que pueden realizarse en la instalación. Aproximadamente, el coste de la instrumentación y de su instalación puede oscilar entre el 2 y el 10% del coste total de la modernización de la planta.

Dentro de este capítulo económico es importante que el tiempo de paro de la planta sea el mínimo posible. De lo contrario, el coste consiguiente puede llegar a ser tan alto como el coste del proyecto completo de modernización, e incluso superarlo. Para conseguir este objetivo es necesario minimizar los trabajos a realizar durante el paro de la planta.

Es importante definir los objetivos del proyecto de modernización durante la fase de planificación. Algunos de los objetivos referentes a la instrumentación de la planta son los siguientes:

- Normalización de los instrumentos, reduciendo el número de proveedores y de modelos.
- Sustitución de los instrumentos que ya han dejado de fabricarse.
- Incorporación de los sistemas de control avanzado.
- Mejora de la seguridad de operación de la planta.

Deben tenerse en cuenta las restricciones que se presentarán en el proyecto en lo referente al tipo de equipo a modificar o a cambiar (tanques, compresores, intercambiadores de calor, hornos, bombas, tuberías e instrumentos).

En los instrumentos, es importante considerar los siguientes puntos:

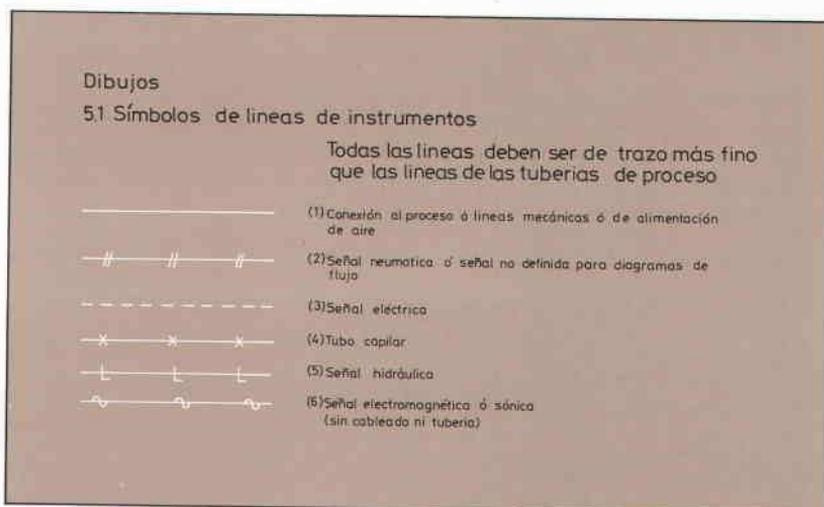
a) *La normalización de los instrumentos*

Es posible que durante la vida de la planta se hayan ido instalando instrumentos de diferentes fabricantes en cada ampliación o modificación de parte del proceso. De este modo, la planta se ha ido dotando poco a poco de una serie de aparatos heterogéneos, lo que constituye un serio problema desde el punto de vista del mantenimiento de los aparatos, del entrenamiento de los instrumentistas, del aprovisionamiento de las piezas de recambio, y de la captación e integración de la información necesaria para usos inventariables y de información que la dirección de la fábrica

necesita (por ejemplo, el gasto de energía y la valoración del costo y del beneficio del producto, y todo ello en tiempo real).

Así pues, cualquiera que sea el tamaño de la planta, conviene considerar dentro de la modernización la anulación de algunos instrumentos y su sustitución por otros nuevos de otros fabricantes, con el fin de reducir el número de los proveedores más importantes de los instrumentos a dos o tres, disminuyendo así el costo de los stocks de piezas de recambio y facilitando el entrenamiento de los operarios. Es también una buena práctica la evaluación periódica de los suministradores y el establecimiento de listas restringidas de proveedores. Esto permite disminuir el número de consultas y disponer de toda la información que sobre los instrumentos y su instalación facilita el fabricante así como contar con su total colaboración (el fabricante, al saber que no tiene competencia, tiene la garantía de que la información que facilita no llega a conocimiento de sus competidores y no tiene ningún reparo en ayudar a su cliente). Se recomienda también la confección de normas de instrumentos que faciliten la selección, la instalación y la operación de los aparatos.

Normas de instrumentos que facilitan la selección, instalación y operación de los aparatos.



b) El examen del estado actual de los instrumentos de la planta.

Debe comprobarse cuál es el estado de las tuberías neumáticas, de los sistemas de alimentación de aire a los instrumentos y a las válvulas de control, el estado del cableado y el de los instrumentos en general. Téngase en cuenta que si los compresores de aire de instrumentos son del tipo de aire con aceite (pistones lubricados con aceite) convendrá estudiar su sustitución por compresores con aros de grafito de lubricación sin aceite, con lo que mejorará el servicio de los instrumentos neumáticos.

Será necesario estudiar el emplazamiento de los nuevos instrumentos, sus soportes y los elementos necesarios para su funcionamiento. Convendrá disponer del espacio necesario para las nuevas instalaciones, sin dedicar a ello los espacios existentes del equipo que después va a elimi-

narse. Por ejemplo, la instalación de un nuevo intercambiador de calor en una estructura existente, requerirá ciertos trabajos de infraestructura (entre ellos, la instalación de los instrumentos), que será mejor realizar sin contar con el espacio que ocupa el intercambiador actual, que después quedará sustituido por el nuevo. De este modo será posible realizar los trabajos de instalación y de puesta en marcha del nuevo intercambiador, interfiriendo lo mínimo posible en la marcha general de la fábrica.

Lo mismo puede decirse del edificio que alberga la sala de control. Con el fin de unificar los diversos paneles de control repartidos por la planta, o bien convertir el panel general que exista en la sala central de control, probablemente será necesario ampliar o suprimir la sala de control para permitir la instalación, en paralelo al funcionamiento de la fábrica, de la nueva línea de instrumentación seleccionada.

En el caso del control distribuido, deberá modificarse el cableado entre los instrumentos de campo y la sala de control, sustituyendo los cables individuales por un cable de comunicaciones único (redundante).

Este análisis de los aparatos y de su instalación costará probablemente del orden de dos a seis veces el coste que supondría la compra aislada de los nuevos instrumentos de medición y control.

c) El cambio o la modificación del Cv de las válvulas de control.

Debe estudiarse la decisión más económica: o modificar el Cv de la válvula, o bien cambiarla.

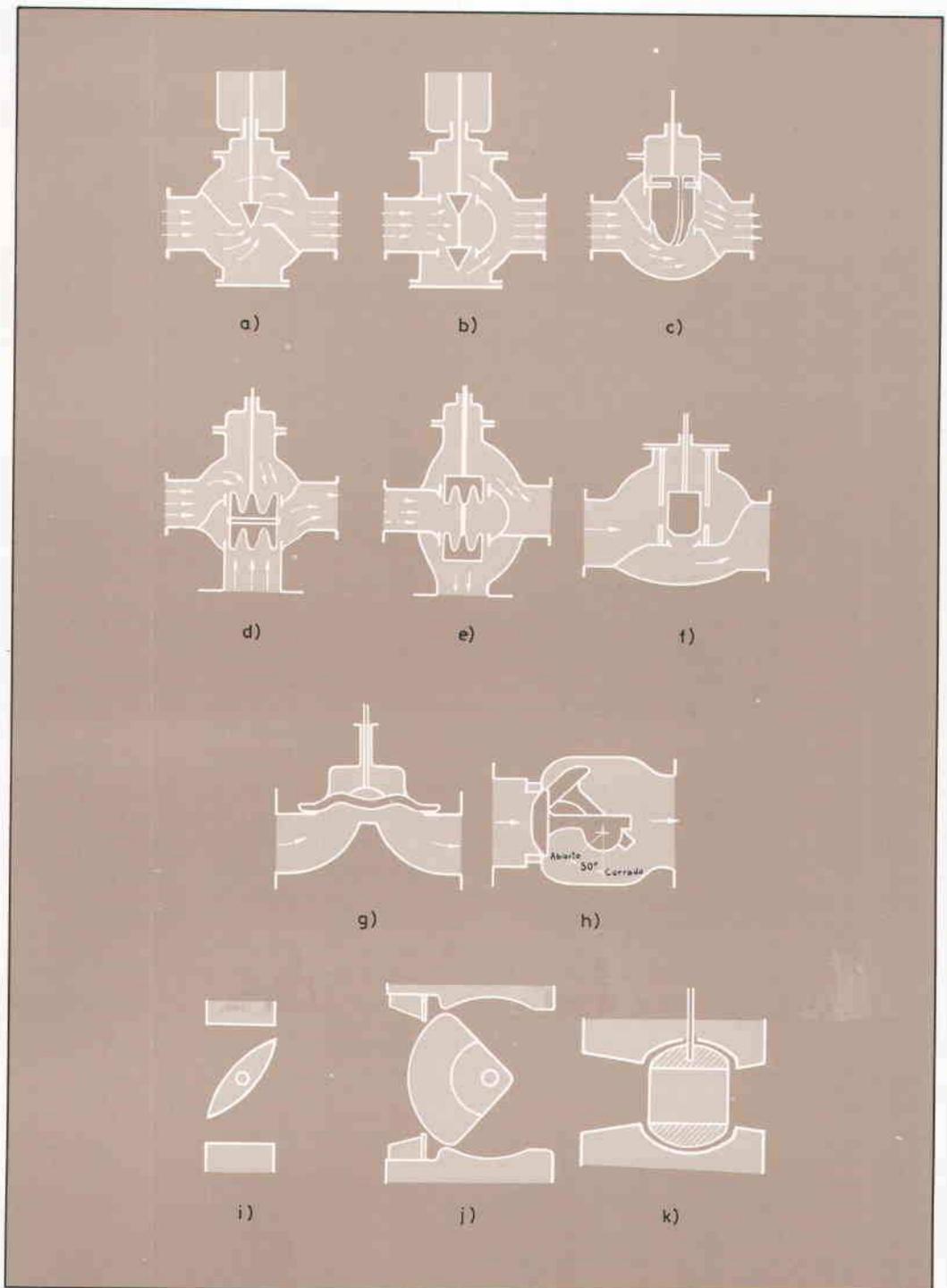
La modificación del Cv consiste en desmontar la válvula y cambiar sus partes internas (obturador y asiento), lo cual no siempre es posible, dependiendo de las condiciones particulares de servicio a que haya estado sometida. En particular, en el caso de trabajar con vapor de agua el asiento de la válvula queda tan adherido al cuerpo que sólo puede desmontarse si se mecaniza en el torno, eliminando material hasta llegar al perfil de la rosca del cuerpo de la válvula.

Entre ambas soluciones también puede decidirse conservar la válvula en el proceso y no efectuar el cambio. Al adoptar esta decisión, es necesario estudiar la influencia que tendrá en el control del proceso el trabajo de una válvula, según sea de pequeña capacidad o sobredimensionada, al haber aumentado o bien disminuido respectivamente la producción de la planta. En el primer caso, aumentará la pérdida de carga de la válvula, lo cual podrá o no ser soportado por la instalación (bomba, altura del líquido o presión del fluido en la tubería aguas arriba), mientras que en el segundo, la válvula trabajará en una zona de mala regulación (relación caudal-carrera no óptima) que sólo podrá admitirse en el caso de control de variables no críticas (en general nivel y presión).

Mencionemos que un modelo de válvula de pequeño tamaño dispone de un posicionador que permite un fácil cambio del Cv.

d) La incorporación de analizadores en línea.

Esto sucede en el caso de que la modernización incluya una mejora en la calidad de los productos para mantenerlos dentro de especificaciones más rigurosas.



Si bien, tradicionalmente, los analizadores (especialmente los cromatógrafos) han sido considerados instrumentos de poca fiabilidad (eran delicados, demasiado complejos y de mantenimiento casi continuo), con sistemas de muestreo que han introducido retardos, han interferido en la integridad de la muestra y se han obturado periódicamente, la nueva generación de analizadores es diferente, son instrumentos robustos, aptos para operación continua, no utilizan sistemas de muestreo ya que, instalados dentro del propio proceso, disponen de autodiagnóstico, de autocalibración y son de construcción modular. Estos aparatos, aunque no son perfectos, han aumentado su utilización en la industria, lo cual sugiere que su uso por parte de los operadores de la planta presenta un balance positivo entre la seguridad de funcionamiento y la productividad. Aproximadamente, los beneficios que pueden obtenerse instalando un control por analizador en una columna de destilación son del orden del 10% en ahorro de energía y ofrecen un aumento del 5% en la producción. Los sistemas de muestreo actuales utilizan filtros rotativos, programadores de automuestreo, electrodos con dispositivos automáticos de limpieza (ultrasónicos, hidrodinámicos, térmicos, mecánicos). Los analizadores típicos en la industria incluyen cromatógrafos, phmetros, analizadores de O_2 , de infrarrojos, de humedad, espectrómetros de masa, etc.

Partes internas de una válvula de control. (Ver figura en la página anterior):

e) La valoración del paso del control clásico al control distribuido.

Si del examen de esta posibilidad se decide adoptar el control distribuido, será el momento de estudiar la conveniencia de cambiar las configuraciones de control de la planta y adoptar sistemas de control avanzado, es decir, puestos en la decisión de realizar un cambio radical en la planta, por qué no considerar su total modernización, en particular si la planta es muy antigua y se ha decidido modernizarla totalmente sin límites de costo, valorándose positivamente el aumento global de rendimiento que tendrá la planta.

Aunque la inversión a realizar en la transformación de la planta es elevada, los resultados esperados, tanto desde el punto de vista del mantenimiento como desde el punto de vista de mejora de la fabricación, compensarán con creces los esfuerzos de todo tipo que se hayan dedicado a esta modernización. Por ejemplo, la sola aplicación de los controladores programables, permitirá sustituir los armarios clásicos de relés por armarios y pantallas que ocuparán un menor espacio y serán mucho más versátiles, es decir, cuando se quiera se podrá cambiar la secuencia de operaciones de enclavamiento de los equipos, sin más que cambiar los programas correspondientes, operación que en el caso del accionamiento por relés era imposible o cara y engorrosa.

PLANIFICACIÓN

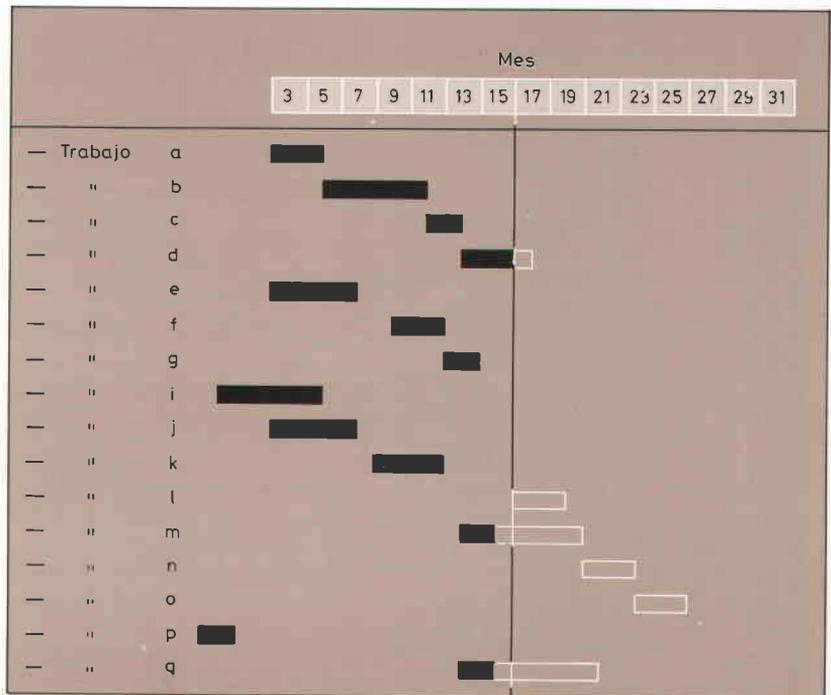
Es importante realizar una planificación correcta de la modernización de la planta. En este sentido, son útiles los programas de ordenadores que permiten planificar un gran número de actividades (tareas en que se divide el proyecto) y asignar los recursos necesarios (medios humanos, técnicos materiales y económicos) a cada actividad. Dichos programas permiten detectar el camino crítico (actividad o conjunto de actividades tales que, si es cambiada su duración, modificarán la fecha del final del proyecto), y

controlar las desviaciones económicas entre los plazos planificados y los realizadores, lo que se denomina progreso del proyecto. De este modo se controlan correctamente los datos reales, pudiendo así actuar en el momento adecuado sobre cada uno de los aspectos del proyecto.

La planificación puede realizarse por nudos o uniones de dos o más actividades, y por CPM o por precedencias, camino crítico o actividades predecesoras de cada actividad.

La comparación entre la planificación CPM más temprana y la planificación de recursos más temprana, nos permitirá comprobar si existen suficientes recursos para realizar o no el proyecto. Los programas permiten nivelar automáticamente estos datos, y proporcionan el nombre de las actividades y las fechas que deben retrasarse para que en el proyecto existan los suficientes recursos humanos y materiales que permitan realizarlo.

Diagrama de barras aplicable a la planificación del proyecto de modernización de la planta.



Como ejemplo, uno de estos programas es capaz de planificar 5.000 actividades, asignar 100 recursos a cada actividad, y programar en horas, días y meses. Estos programas son muy útiles, debido a la complicación e interrelación entre los múltiples factores que intervienen en el proyecto de modernización.

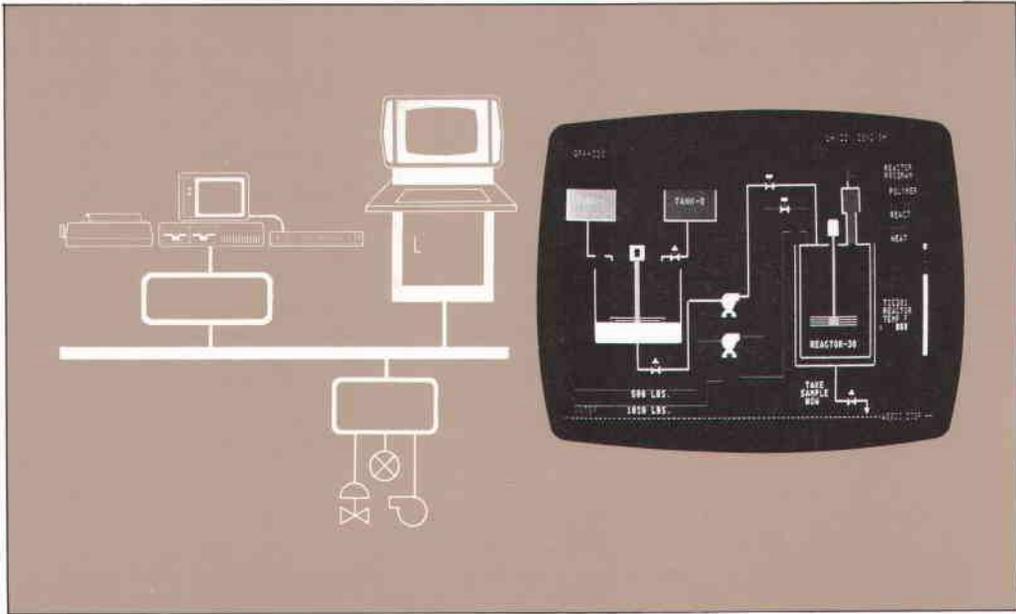
Durante la planificación conviene definir los siguientes elementos:

- *Objetivo* de la modernización. Es decir, hay que definir exactamente

de forma clara y concreta lo que hay que realizar en el proyecto. Deben fijarse los límites de costo y de tiempo de que se dispondrá para la realización del proyecto y asignar los recursos técnicos, humanos y materiales necesarios.

— *Equipo* que va a ser afectado por la modernización y el nuevo equipo necesario.

Sala de control.



Siendo uno de los objetivos de la modernización de la planta la reducción del tiempo de paro de la instalación, por el alto coste que representa, habrá que preparar la operación de modo que puedan realizarse la mayor cantidad posible de trabajos sin afectar al ritmo normal de producción de la fábrica. De este modo se conseguirá reducir al mínimo los trabajos a realizar durante el paro de la planta.

Por otro lado, es evidente que para reducir al mínimo el tiempo de paro de la planta convendrá estudiar la posibilidad de instalar el nuevo equipo en paralelo con el existente, lo cual presenta un mayor coste de instalación y unas complicaciones adicionales. Por ejemplo, el control de compresores en paralelo puede ser complejo, y por otro lado, la instalación en serie de maquinaria puede dar lugar a problemas complicados de paro y de puesta en marcha por la propia naturaleza del equipo.

Sin embargo, esta marcha en paralelo es muy conveniente cuando se ha tomado la decisión de cambiar los paneles de control por otros de control digital o se ha decidido modernizar totalmente la planta adoptando el control distribuido. Si es necesario, debe ampliarse la sala de control para permitir la instalación de las consolas, armarios y todo el material auxiliar necesario, incluyendo los cables. Una vez terminada y probada esta nueva

instalación en poco tiempo, y aprovechando un paro programado de la planta, se hace el cambio anulando la instrumentación antigua.

Será necesario estudiar la conveniencia de sustituir enteramente o de instalar en paralelo la instrumentación de campo. En este último caso, no es siempre conveniente, por ejemplo, instalar una válvula de control en paralelo con otra ya existente; debe descartarse ya que, aparte de los problemas de regulación que van a presentarse, siempre será más barato sustituir la válvula de la tubería existente.

– *Disponibilidad* del personal necesario para implementar el proyecto. Convendrá que venga definido su número, sus calificaciones y para los períodos de tiempo que va a ser necesario.

– *Beneficios* y repercusiones de la modernización.

La modernización, aparte de los beneficios que va a proporcionar, conducirá probablemente a requerimientos diferentes de personal sin afectar posiblemente a su número, por lo que será necesario *reconvertir* al personal existente. Convendrá preparar con tiempo esta reconversión, y convencer al personal afectado de la necesidad de esta preparación para que la modernización tenga un completo éxito. Será necesario establecer cursillos de preparación y disponer de equipos reales o simuladores para que el personal de fabricación y de mantenimiento pueda practicar con el proceso en el manejo de las consolas, en el software, y en el seguimiento de averías. De este modo, no existirán problemas a la hora del cambio.

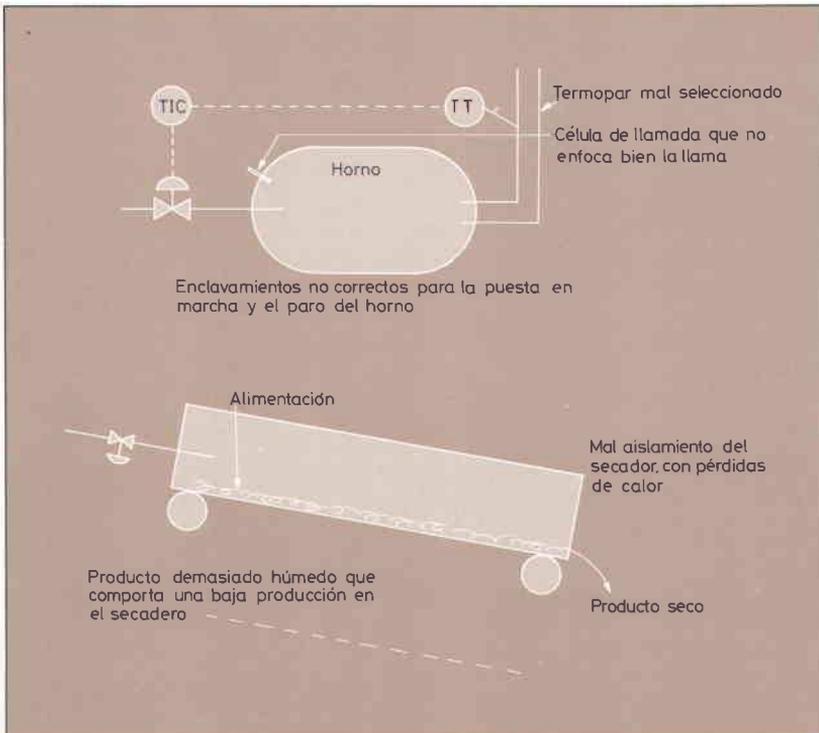
– *Sistemas de control*. Deben fijarse los instrumentos que deben sustituirse o modificarse. En este estudio deberá valorarse la decisión de cambiar todo el tipo de control, pasando de la instrumentación clásica convencional al control distribuido, y adoptar sistemas de control avanzado y técnicas de optimización. Por su interés analicemos más este punto.

Es un fenómeno general que, al evolucionar tan rápidamente la técnica de instrumentación, las plantas de proceso se están quedando rápidamente anticuadas. Puede afirmarse que los instrumentos neumáticos, con la excepción de las plantas de pequeño tamaño, han dejado de emplearse masivamente (excepto la válvula de control que es todavía neumática), y que la necesidad de obtener información procesable de la planta, conjuntamente con la necesidad de fabricar productos con especificaciones de fabricación cada vez más restrictivas, ha reducido su demanda en el mercado.

En plantas antiguas es posible que el fabricante de los instrumentos haya dejado de fabricar el modelo o la serie instalada en la fábrica. Sin embargo, esto no reviste una especial gravedad, ya que los fabricantes garantizan el suministro de piezas de recambio para su sistema durante un tiempo de 5 a 10 años. De este modo, si bien en principio el problema que se presenta no es de urgente solución, obliga a pensar en la sustitución gradual de los instrumentos a medida que los mismos se vayan averiando. En la mayoría de los casos siempre será más barato utilizar instrumentos nuevos que reparar los antiguos (a no ser que dichos instrumentos estén instalados en lugares poco importantes de la planta), puesto que si el instrumento, por el lugar del proceso donde está instalado, da lugar a paros del proceso o a la fabricación bajo condiciones de servicio que incumplen las normas de

calidad o las especificaciones del producto, el coste correspondiente será importante y superará con creces el valor del nuevo instrumento. Por otro lado, debe considerarse también el mayor coste y la mayor dedicación que el departamento de mantenimiento debe destinar al servicio del instrumento.

Ejemplos de algunas instalaciones incorrectas del proceso en plantas industriales.



Estos aspectos vienen agravados por las condiciones de servicio de presión y de temperatura de la planta; éstas realizan una selección natural del instrumento, y sólo queda en funcionamiento aquél que, o bien es de excelente calidad, o bien fue escogido correctamente por la ingeniería que proyectó la planta, o bien fue instalado correctamente por la empresa instaladora. Así pues, el servicio de mantenimiento es el que se encarga inicialmente de la modernización de la planta, después de su puesta en marcha, detectando los instrumentos que no funcionan correctamente y reparándolos o sustituyéndolos por otros más idóneos. Es muy conveniente que la información de estos cambios llegue a todos los organismos, departamentos o ingenierías que proyectaron y realizaron el proyecto inicial de la fábrica. De este modo, los errores que se cometieron en la selección e instalación de los equipos e instrumentos serán tenidos en cuenta en el proyecto posterior de plantas similares. Esta continua información es la que permite que el arranque y la operación de las nuevas plantas que se van construyendo tenga lugar cada vez con mayor rapidez, seguridad y economía, y es el motor continuo que acelera el progreso técnico de las plantas de proceso en todo el mundo.

En las plantas con instrumentación neumática, será necesario plantearse parcial o totalmente objetivos concretos en cada uno de los diferentes tipos de instrumentos.

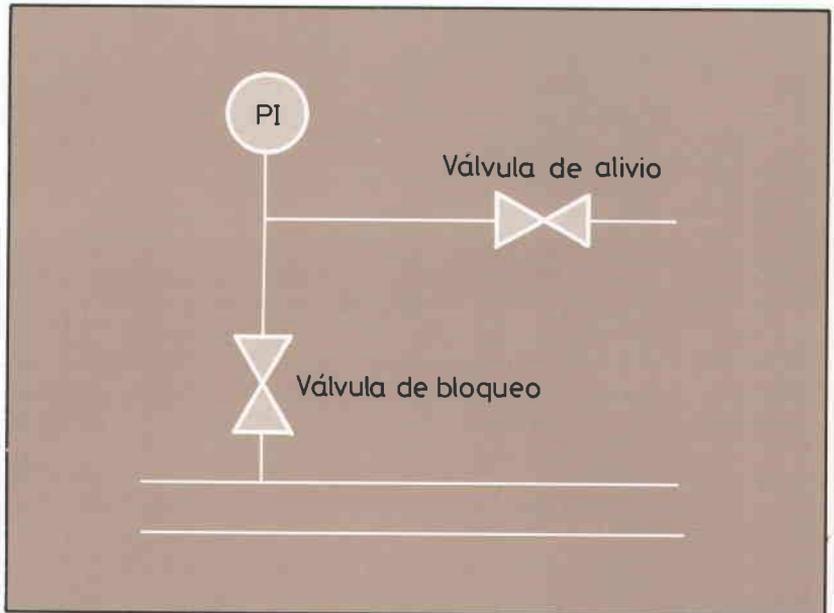
Instrumentos de campo

a) Sustitución de los transmisores neumáticos de la planta por otros neumáticos de la última generación, más precisos, más resistentes y con mayor duración.

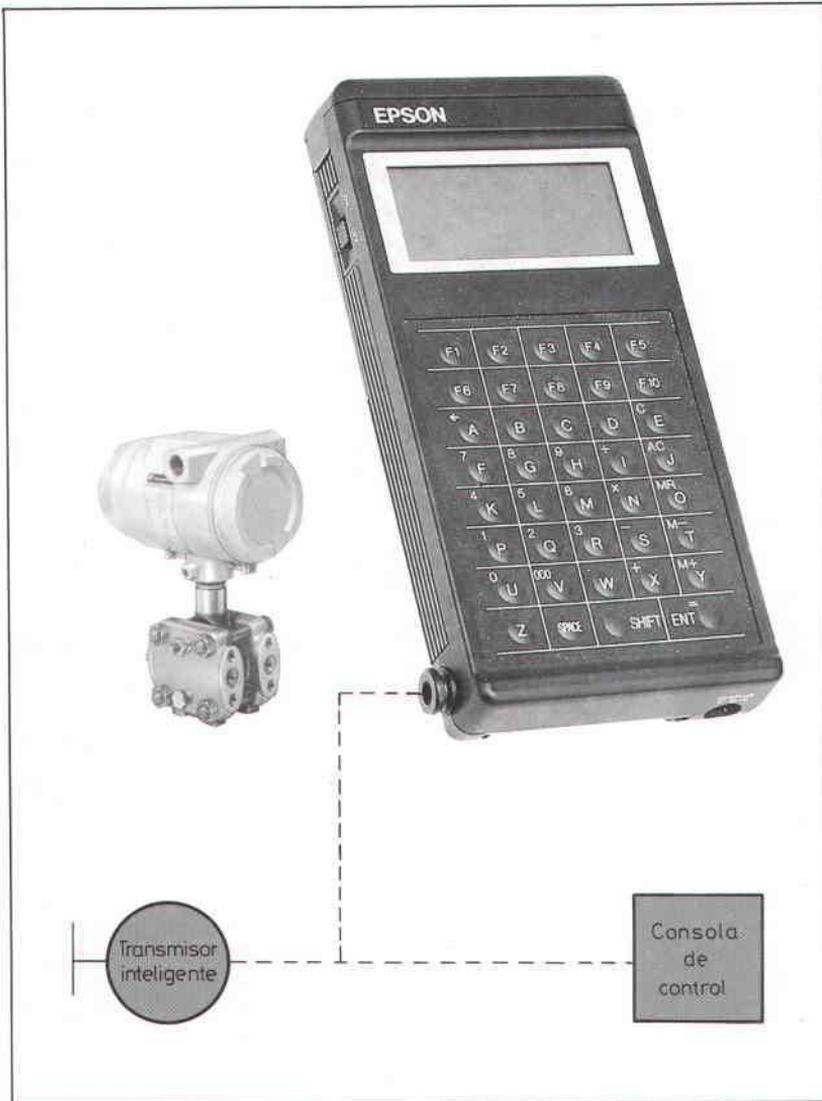
b) Sustitución de los transmisores neumáticos por otros electrónicos o digitales considerando:

1) Los transmisores electrónicos convencionales tienen un mantenimiento similar al de los instrumentos clásicos, es decir, en caso de avería el instrumento se repara en el taller de instrumentos de la fábrica, debiendo desmontarse del proceso, lo cual obliga generalmente a parar la parte de la planta donde está situado el instrumento. Por ejemplo, un transmisor de nivel de diafragma sólo puede desmontarse si el tanque está vacío o si está parcialmente lleno pero a una altura inferior a la brida de instalación del instrumento.

Manómetro y su instalación.



También podría optarse por no parar el proceso, con la consiguiente marcha a ciegas en el control, lo cual no es aceptable a no ser que se disponga de un instrumento igual en stock para su rápida sustitución. Sin embargo, en algunos instrumentos, por ejemplo en un manómetro, está prevista esta circunstancia al existir una válvula de bloqueo entre el manómetro y la tubería o el tanque del proceso, bastará cerrar esta válvula, y desenroscar el manómetro para llevarlo al taller y calibrarlo o repararlo.



Transmisor inteligente que permite su recalibración en planta sin desmontarlo del proceso, excepto si se presenta una avería en la parte primaria de la medición.

Mencionemos que si la presión de trabajo del manómetro es alta existirá una segunda válvula que permitirá aliviar la presión antes de desenroscar el manómetro, no hacerlo así podría dar lugar a un escape del fluido a alta presión que descargaría probablemente en la cara del instrumentista.

2) Los transmisores "inteligentes" presentan una mayor facilidad de mantenimiento y pueden calibrarse directamente en campo, sin más que conectarles un comunicador que permite la lectura de la señal del proceso, la calibración del transmisor e incluso su reconfiguración, pulsando sólo unas pocas teclas. De este modo desaparece la necesidad de desmontar el transmisor del procesor y llevarlo al taller para su calibración, a no ser, naturalmente, que el aparato presente una avería relacionada con

el elemento primario de medición, en cuyo caso no hay otra solución que repararlo en el taller de instrumentos o sustituirlo.

Válvulas de control

En el caso de pasar a control electrónico, habrá que sustituir los actuadores neumáticos originales montados en las válvulas de control, por actuadores con posicionador electroneumático que permitan el accionamiento de la válvula por la señal electrónica de 4 ± 20 mA c.c., o bien acoplar directamente el posicionador electroneumático a la válvula. En el caso de control digital se sustituirá el servomotor por otro con actuador digital. No siempre el fabricante de las válvulas de control ha previsto estos montajes en las válvulas que fabricó unos años antes de la aparición del control digital en la industria, por lo que es posible que sea necesario sustituir enteramente la válvula neumática por otra de la última línea de fabricación del proveedor. Si la instalación es bastante antigua, es casi seguro que haya que sustituir enteramente la válvula de control.

Instrumentos de panel

— Sustitución de los instrumentos de panel por otros neumáticos, electrónicos o digitales.

1) Los controladores neumáticos de la última generación son más precisos, más resistentes y de mayor duración, y presentan una mayor facilidad de mantenimiento al ser de construcción modular.

2) Los instrumentos electrónicos de panel, presentan una mayor facilidad de mantenimiento, que se reduce al simple cambio de tarjetas, una vez detectada la avería, cuya marcha vienen indicada en el manual de mantenimiento que proporciona el fabricante.

3) Los instrumentos digitales están preparados para su conexión a ordenador, por lo que son muy convenientes si entre los criterios de modernización de la planta figura la necesidad de captar e integrar la información de toda la planta para realizar balances de consumo de materias primas, de energía, etc. Con relación a los instrumentos electrónicos presentan la ventaja de disponer de circuitos de diagnóstico que avisan e informan de las averías del instrumento y de su localización, lo cual facilita extraordinariamente la labor del servicio de mantenimiento.

Habrà que estudiar la conveniencia del empleo del control avanzado, entendiendo que este tipo de control se aparta del clásico PID y de los controles en cascada y de relación. Por ejemplo, pertenecen al control avanzado de procesos, la compensación dinámica de los retardos del proceso (hay transmisores con este tipo de compensación que anticipan la respuesta ante cambios en la variable, por lo que la unidad controladora recibe al instante los valores dinámicos de la variable, y el control pasa a ser mucho más rápido), las técnicas de control de multivariables, que acoplan o desacoplan las interacciones entre lazos de control (es típica la disminución de presión en una línea de vapor por consumo punta de un equipo, lo que repercute en los otros usuarios de la línea de alimentación de vapor), la ganancia relativa (aplicable al análisis de la interacción entre los lazos de control, es típica en las columnas de destilación) y en general los

cálculos especiales que relacionen entre sí las variables de proceso. También puede examinarse la aplicación de la optimización para maximizar el rendimiento de la planta (se combinan un modelo del proceso y la función de optimización deseada).

Modernización total

Representará la sustitución masiva de toda la instrumentación de la planta adoptando el control distribuido.

Cuando la planta tiene muchos años de funcionamiento, se plantea la sustitución puntual de los instrumentos o bien la modernización a gran escala.

La sustitución puntual de los instrumentos se realiza durante toda la vida de la planta, anotando en los registros de mantenimiento las incidencias que hayan tenido lugar en cada instrumento. No obstante, no siempre el mal funcionamiento del aparato es atribuible al mismo, a veces el causante de los problemas es su mala instalación.

Así ocurre en los siguientes casos:

a) Un medidor de caudal magnético que haya sido instalado en posición horizontal dará problemas de lectura, es decir, la lectura será falsa, no correspondiendo a la realidad si el líquido que pasa a su través contiene gases en disolución que en cualquier momento pueden desprender burbujas, las cuales pueden solaparse con la medición propia del caudal del fluido.

b) La medición de nivel en un tanque, realizada con el propósito de valorar cuantitativamente el contenido en peso del fluido, no dará resultados correctos si el fluido varía de densidad, a no ser que se compensen las lecturas con relación a la densidad, o se midan la presión y la temperatura.

c) La medición del nivel en un tanque con espuma en su superficie y utilizando un aparato de ultrasonidos ocasionará problemas, ya que el instrumento no discriminará entre la espuma y el nivel real en el tanque. Igual ocurrirá en un medidor de nivel de tipo capacitivo si el líquido se adhiere al electrodo de capacidad fijado verticalmente en el tanque el sistema medirá una capacidad errónea y dará una lectura falsa.

En otro ejemplo en el que se mide el caudal de un gas que deba facturarse a otra compañía, las discusiones entre la fábrica que factura y la fábrica cliente del producto son eternas. Nadie se pone de acuerdo, ya que por un lado el cliente considera que el fluido que ha consumido es el integrado por la unidad medidora pero con el valor negativo de la precisión (*caudal integrado-precisión en % · caudal integrado*), mientras que la fábrica proveedora piensa que debe facturar con el valor positivo de la precisión (*caudal integrado+precisión en % · caudal integrado*). En general, las discusiones terminan cuando se acuerda que una compañía neutral se encargue del mantenimiento de las dos unidades medidoras (la del proveedor y la del cliente).

La instalación de un medidor de turbina sin el filtro adecuado en una tubería con líquido y sólidos en suspensión comporta a la larga un desgaste de las palas, con lo cual la precisión de la medida se va degradando.

Control de procesos industriales: criterios de implantación

Un transmisor neumático, con una distancia excesiva al receptor y midiendo una variable que cambie rápidamente de valor, dará lugar a una lectura amortiguada del valor de la variable en el controlador y, si bien a veces esto es deseable, siempre se tendrá un error dinámico en la medición.

Un medidor de caudal por placa-orificio que no guarde las distancias rectas de tubería, recomendadas por la norma de cálculo de la placa, dará errores en la lectura.

El intervalo excesivo entre calibraciones de un instrumento dará lugar a una degradación progresiva de la lectura, con lo cual, el operador de la planta pensará, cada vez que el instrumento se calibre, que el departamento de mantenimiento ha cambiado el funcionamiento del aparato, ya que él estaba acostumbrado a trabajar con el instrumento descalibrado.

Y podrían citarse muchos otros ejemplos ilustrativos de las repercusiones que tienen en el funcionamiento de la planta la mala instalación o la incorrecta calibración de los aparatos. Llevadas las cosas al límite, llega un momento en que nadie tiene confianza en lo que marcan los instrumentos.

A medida que transcurre la vida de la planta habrán quedado en evidencia estos puntos, con lo que poco a poco se habrán modificado las instalaciones o, en caso de que se cambien los instrumentos, se habrá hecho con el criterio de instalar el instrumento más adecuado y con la precisión requerida. Por ejemplo, no tiene la misma precisión un instrumento de termopar que uno de termoresistencia, siendo este último el más preciso; sin embargo, también es el más frágil, por lo que su selección será a veces una solución de compromiso entre varias alternativas.

La modernización a gran escala de toda la planta puede asimilarse realmente al estudio de una sola planta completa, considerando lógicamente que muchos de los equipos se conservarán, y que el cambio radical se experimentará en los instrumentos de medición y control. Los aspectos referentes a la modernización total de la planta se estudian en el tema que sigue a continuación. El lector encontrará allí las etapas de creación de una nueva planta y podrá aplicarlas de forma puntual al caso particular de una ampliación o bien a la modernización particular de un proceso.

Nuevas plantas

GENERALIDADES

En la misma forma con que se procede a la modernización de una planta ya existente es importante realizar una planificación correcta del proyecto de la nueva planta. Como ventaja citemos que, exceptuando el cumplimiento de las fechas acordadas de entrega de los productos de fabricación a los clientes, no existe un límite de tiempo para llevar a cabo la instalación, y que la planta puede proyectarse en todas sus fases de ingeniería, petición de ofertas, compra de material e instrumentos, instalación y puesta en marcha, sin depender para nada del funcionamiento de una planta existente en el mismo emplazamiento. Tal como se indicó anteriormente, son útiles los programas de ordenador que permiten planificar un gran número de actividades (tareas en que se divide el proyecto) y asignar los recursos necesarios (medios humanos, técnicos, materiales y económicos) a cada actividad. Dichos programas establecen el camino crítico, con lo que permiten dirigir correctamente los esfuerzos para evitar retrasos en el proyecto. Por otro lado, también permiten controlar las desviaciones económicas entre los plazos planificados y los realizados, y actuar de este modo sobre cada uno de los aspectos del proyecto.

Se considera que el coste aproximado de los instrumentos y de su instalación, en una planta con pocos instrumentos de medida y regulación, alcanza una cifra del orden de $2 + 3\%$ del valor total de la inversión de la nueva fábrica, mientras que si la planta está muy automatizada, la inversión está comprendida entre el $5 + 10\%$ de dicho valor total. Con los microprocesadores en continua evolución en capacidad, tamaño, velocidad, y disminución de los precios, la barrera económica que separa la decisión de adoptar el control distribuido en lugar del clásico va disminuyendo de año en año, estando actualmente en el orden de los $20 + 30$ lazos de control.

Una parte importante en el proyecto de una nueva planta es la formación del personal. En lo referente al control de procesos, dicha formación puede realizarse de las formas siguientes, que pueden ser o no complementarias:

- Cursos de formación en control de procesos enfocados a operadores de proceso.

Se sobreentiende que el personal de instrumentación recibirá una formación intensiva y exclusiva en los instrumentos y en el proceso, que intervendrá directa o indirectamente en todas las fases de especificación, compra, instalación y mantenimiento de los instrumentos y que, probablemente, recibirá entrenamiento por parte de la empresa suministradora de los aparatos.

– Uso de simuladores de la planta que permiten trabajar en las condiciones lo más próximas posible a la realidad. Existen firmas en el mercado que bajo demanda estudian y suministran este tipo de simuladores de entrenamiento.

– Entrenamiento en fábricas asociadas con estancias variables de 1 semana a 3 + 6 meses o 1 año, según sea la importancia de la fábrica. Es el sistema que se sigue en las empresas químicas líder, y el tiempo de entrenamiento se comparte con diversos cursos de formación.

Las diferentes fases del proyecto de la planta en la parte referente a los instrumentos son la ingeniería, la instalación, la calibración, la puesta en marcha y el mantenimiento.

INGENIERÍA

Si la planta es pequeña, la ingeniería se realiza en la propia oficina del usuario con personal eventual utilizable durante un tiempo determinado (de 6 meses a un año). Es costumbre que parte del personal eventual pase a formar parte de la plantilla de la empresa, una vez finalizado el proyecto.

Si la planta es grande, la ingeniería es contratada a una firma exterior que destina el personal necesario un tiempo suficiente para la realización del proyecto.

Esta ingeniería redacta las especificaciones que deben cumplir los instrumentos de medición y control, las válvulas, que después servirán como base para la correspondiente petición de ofertas. Estas especificaciones deben ser claras, puesto que en caso contrario, el suministrador tendrá muchas dificultades para redactar una oferta con los instrumentos y los precios adecuados. Más tarde será difícil que el propio usuario haga una valoración justa y correcta de las ofertas recibidas, con el riesgo de compra de los instrumentos incorrectos (o demasiado caros o que no cumplan con las condiciones de servicio de la planta). La redacción clara de las especificaciones anteriores conducirá a cada proveedor a una sola cotización de materiales y, como máximo, a una o dos variantes.

Las especificaciones se enviarán a una lista de proveedores cuya preparación debe realizarse con el criterio de limitar el número de proveedores a menos de cinco, e incluso a dos si la idea es instalar el control distribuido en toda la planta. Lo contrario puede hacer perder mucho tiempo, ya que existe un número importante de suministradores de sistemas de control. Cada planta tiene ya un experiencia en el trato con los proveedores de instrumentos, y a lo largo de los años ha ido seleccionando las firmas suministradoras. Junto con las especificaciones se envían instrucciones sobre los plazos de entrega deseados y las condiciones de compra: formalización del pedido, garantías, inspecciones, penalizaciones y franquicia, entregas parciales y, finalmente, los tribunales a acudir en caso de litigio, extremo este último al que hay que procurar no llegar por las nefastas consecuencias que tendría sobre la marcha del proyecto y las relaciones futuras entre las dos partes, el proveedor y el cliente.

Las ofertas recibidas son estudiadas por el departamento de instrumentos de la ingeniería, que prepara una comparación de las mismas que permita tomar una decisión justa y conveniente en la compra de la

instrumentación. Hoy en día los fabricantes suministran instrumentos de similares características y con idéntica calidad, lo que hace difícil la selección adecuada de los aparatos.

Por un lado conviene que los instrumentos elegidos sean suministrados por el mismo fabricante, ya que ello redundará en ventajas económicas para la planta: el stock de piezas de recambio y de instrumentos completos es el mínimo posible, con lo que su costo financiero es bajo, se simplifica notablemente la formación de los instrumentistas que después deberán mantener los instrumentos, etc. Por otro lado, si la elección se hace de tal forma que se busca de forma puntual la máxima calidad técnica de la medida y la óptima selección del instrumento, se corre el riesgo de

Ejemplo de especificaciones de los instrumentos.

Factores de gráficos y escalas. Placas de designación y manuales de operación y mantenimiento

Los factores para gráficos y escalas serán como sigue:

Presión-kilos por cm ²	kg/cm ²
Temperatura-grados centígrados	°C
Caudal de líquidos-metros cúbicos hora	m ³ /h
Caudal de gases-metros cúbicos normales por hora, a 0 °C y 760 mmHg	Nm ³ /h
Caudal de vapor-kilos por hora	kg/h

Vacío:

Manómetros y señales transmitidas

Milímetros de mercurio absolutos	mmHg Abs
Indicación local (instrumentos distintos de manómetros)	
Milímetros de mercurio de vacío	mmHg vac
Presiones bajas o medidores de tiro nivel 0 a 100 uniforme	

Los gráficos y escalas serán los de fabricación normal del vendedor. Gráficos y escalas con graduación de 0 a 10 raíz cuadrada (0 a 10 V) se utilizarán como medida de caudal.

comprar muchos tipos de aparatos de diferentes fabricantes, ya que cada uno de ellos es especialista en la medida de variables determinadas, así habría uno o varios suministradores para instrumentos de caudal, otros para la medida de temperatura, etc.

Ello repercute paralelamente en la compra de una gran cantidad de piezas de recambio y de instrumentos completos para tenerlos en stock, y en la necesidad de una formación mucho más amplia de los instrumentistas.

Según cual sea la filosofía de la instrumentación que se elija para la planta, neumática, electrónica, digital, o se adopte el control distribuido, la

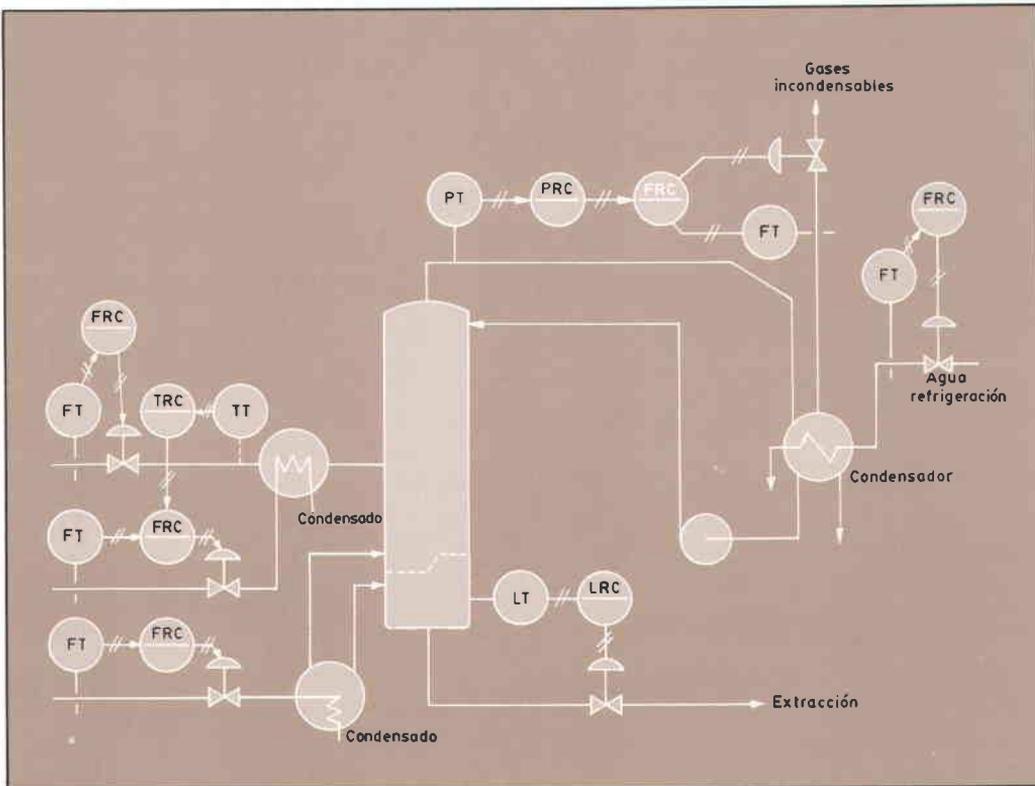
selección de los instrumentos se hará más fácil o más crítica. Por ejemplo, en el caso de una planta pequeña con instrumentación neumática, errores en la selección de los instrumentos controladores (escoger erróneamente un controlador de acción proporcional en lugar de *proporcional+integral*, etc.) conducirán únicamente a un pequeño dispendio adicional en el aparato controlador determinado, lo cual tiene relativamente poca importancia. Sin embargo, la selección equivocada del suministrador del control distribuido conducirá a una situación francamente delicada, ya que el usuario tendrá que tomar, en el peor de los casos, la decisión drástica de cambiar toda la línea de instrumentos, exceptuando probablemente los instrumentos de campo (transmisores de $4 \div 20$ mA c.c., pero no los transmisores digitales). No obstante, para tranquilidad del lector señalemos que es muy difícil que se produzca este caso, principalmente porque los fabricantes de control distribuido disponen de una lista de referencias de sus sistemas instalados en todo el mundo, que el futuro cliente puede consultar y visitar cuando desee antes de tomar la decisión de compra. Por otro lado, la industria es muy conservadora en sus decisiones y sólo compra el material que está probado y del que tiene buenas referencias, descartando los sistemas que no están suficientemente ensayados.

Aunque se prevé que los sistemas de control distribuido sean intercambiables en un futuro próximo, todavía no lo son (únicamente los transmisores que proporcionan la señal de $4 \div 20$ mA c.c.), por lo que la decisión de compra del sistema completo representa "casarse" con la firma suministradora sin posibilidad de cambio, a no ser a un costo muy elevado. Señalemos que en el mercado existe el propósito de conseguir la normalización de los sistemas distribuidos, propósito que es muy firme en los grandes usuarios (refinerías y empresas químicas líderes en el mundo) y menos fuerte en los suministradores, ya que dicha normalización les va a representar la cesión parcial del software de los sistemas que crearon. Actualmente, el uso de los sistemas de control distribuido proporciona a veces, para sorpresa de los usuarios, una gran cantidad de información, la que desean pasar gradualmente a sus ordenadores periféricos con el fin de optimizar la planta y detectar variaciones en su rentabilidad para así actuar inmediatamente y corregir las desviaciones. Además, está reconocido que el éxito de las decisiones a todos los niveles de dirección de la planta se basa en la información fidedigna de que se dispone (de aquí la gran difusión del control distribuido). Surge entonces el importante problema de la comunicación entre el sistema de control distribuido y los ordenadores que acoplan a la red para beneficiarse de toda la información de la planta que proporciona el control distribuido. Se prevé que en el futuro esta necesidad será muy importante, lo que forzará todavía más la normalización de las comunicaciones entre ordenadores dentro de la planta.

Los suministradores de los sistemas de control distribuido han llegado a ser expertos en la tecnología de comunicaciones entre los instrumentos de campo y la sala de control, y realmente satisfacen todas las demandas de los usuarios. Y ahora los usuarios exigen a los suministradores que abran su sistema (que tantos esfuerzos y tantas horas les costó desarrollar) para que ellos puedan interconectar instrumentos de otros suministradores. Siendo pues la dificultad la comunicación, se está actualmente en una fase parecida a la que se experimentó con la señal de $4 \div 20$ mA c.c. de los

instrumentos electrónicos, antes de su normalización. Varias firmas de instrumentos (Honeywell, Rosemount, Bailey, Foxboro y otros), líderes en el campo mundial de los instrumentos de medición y control, tienen conversaciones en este sentido y estudian la aplicación de un lenguaje o protocolo de comunicaciones, el MAP (*manufacturing automation protocol*) desarrollado inicialmente en 1970 para la automatización de una fábrica de coches de General Motors.

Ejemplo de diagrama de flujo de proceso.



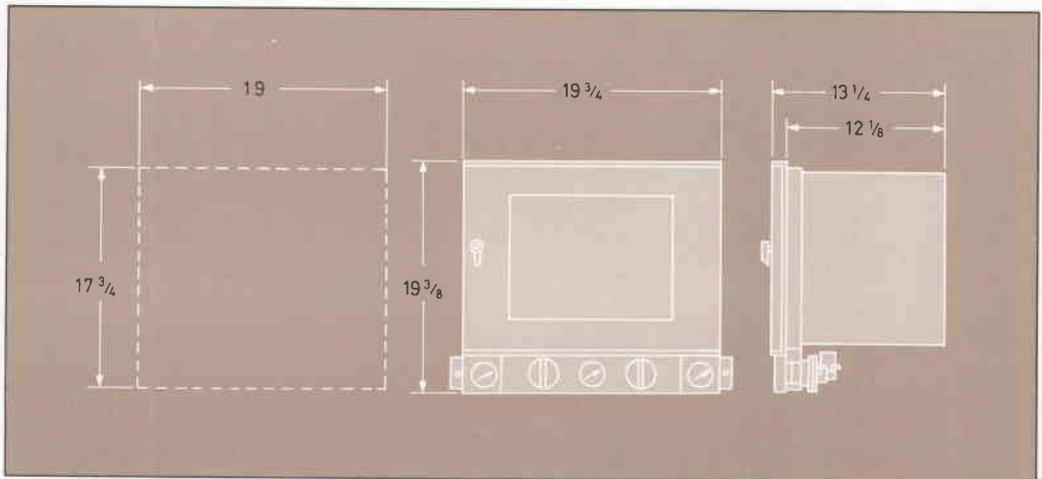
Simultánea o posteriormente a la creación de las especificaciones de los instrumentos y a la petición de ofertas a los suministradores, tiene lugar la incorporación de los instrumentos a los diagramas de flujo. Ello permite el examen crítico del sistema de control del proceso y el estudio de todos los detalles por parte de los técnicos de instrumentación, los técnicos en electricidad y los técnicos del proceso para la incorporación de sistemas de control avanzado, caso de que se crean necesarios. En esta fase ayuda bastante la colaboración del suministrador o suministradores de los instrumentos, por el conocimiento que tienen de sus características.

Normalmente, antes de pedir los instrumentos, el usuario procura que el suministrador aporte algunos equipos y realice algunos trabajos auxiliares, con el fin de reducir el número de proveedores, o bien por haber

introducido cambios en los instrumentos durante la fase de petición, comparación y selección de ofertas. Para ello negocia de nuevo la oferta en **plazo de entrega y precios**, y es costumbre que el proveedor le pida entonces lo que se llama una "carta de intención", documento que **compromete al cliente a pasar el pedido** y en el que se detalla el grueso de la instrumentación objeto del pedido que seguirá más adelante. Aunque la carta de intención es de hecho un pedido en firme, se conocen casos en los cuales se ha vulnerado el acuerdo, cambiando de proveedor cuando el suministrador ya tenía encargados a su fábrica los instrumentos y éstos ya estaban en fase de fabricación. Aparte de las naturales protestas y de la petición de indemnización correspondiente, el proveedor no acostumbra a llevar al cliente a los tribunales, con el fin de no romper definitivamente sus tratos comerciales.

Ejemplo de plano certificado de dimensiones de un instrumento.

Dependiendo de la importancia del pedido, el mismo puede fragmentarse en instrumentos de campo, instrumentos de panel, analizadores, válvulas de control y elementos finales de control, paneles y consolas, instalación y construcción, puesta en marcha y mantenimiento posterior.

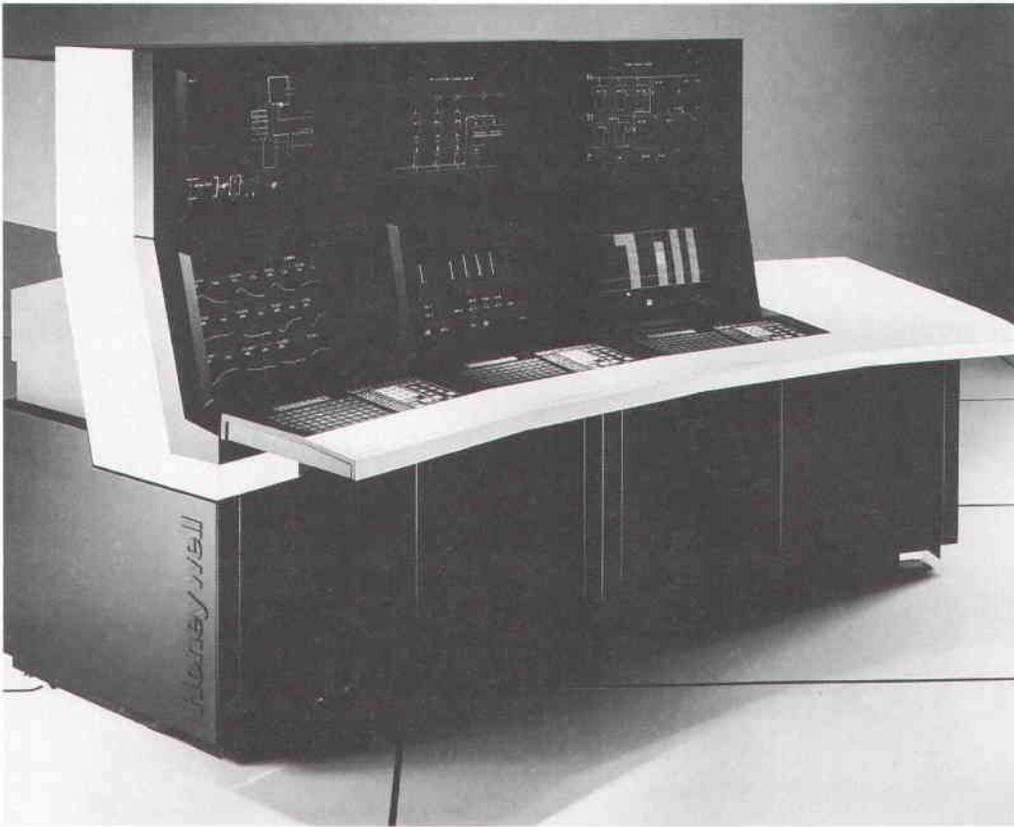


Una vez seleccionados los suministradores de los aparatos, se confeccionan las hojas y los planos de especificaciones de instalación de los instrumentos que contienen los detalles de las tuberías o de las señales de alimentación, los soportes de instalación, las dimensiones del corte a realizar en el panel de control en el caso de instrumentos neumáticos o electrónicos, etc. y una relación detallada de los materiales que hay que comprar para instalar correctamente los aparatos (tes, records, tubo de cobre o plástico, cables eléctricos, etc.). Es costumbre que los suministradores envíen un plano certificado de las dimensiones de los instrumentos que permite a la ingeniería confirmar las dimensiones ya que, normalmente, los suministradores se reservan siempre el derecho a modificar sus instrumentos. De este modo, los planos certificados que entregan garantizan al usuario que el trabajo que ya ha realizado no ha sido en vano y que no debe hacer correcciones en los planos.

En la instalación de los sistemas de control distribuido, el suministrador tiene un papel mucho más importante que en los sistemas clásicos de control neumático o electrónico. El suministrador proporciona al usuario la relación detallada de todos los bornes y cables de conexión de su sistema, incluyendo el cable redundante que conecta todos los transmisores y elementos finales instalados en los edificios de la planta a la sala de control.

A continuación se especifican los paneles de control con sus dimensiones, los cortes a realizar en el panel, tipo de panel según sea montaje

Aspecto del panel de control.



normal, a intemperie o en atmósferas corrosivas, cableado interior entre todos los instrumentos así como los pulsadores y relés, etc. Se dibuja el gráfico del proceso para su instalación usual en la parte superior del panel. En el caso del control distribuido, el proveedor suministra las consolas de control, de modo que aquí es innecesario el proyecto y realización de panel de control. Conviene que el cliente indique los tipos de presentación visual que le interesen, prestando su ayuda en el diseño de las pantallas para la representación del proceso, incluyendo la participación de los futuros operadores de la planta para que ellos, aparte de verse implicados y reconocido su papel en la planta, puedan influir en la cons-

Control de procesos industriales: criterios de implantación

trucción o fabricación de los diagramas de proceso con los que después van a controlar el mismo.

Detalle de la consola del panel de control.

Deben confeccionarse los formatos de informes sobre producción, alarmas, volúmenes de tanque, etc., que después van a utilizarse en la planta para el personal de producción y para la gerencia.



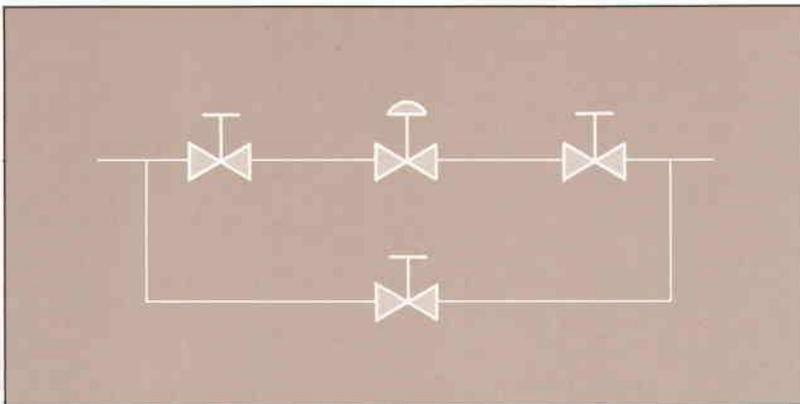
Una vez pedidos los instrumentos, deben seguirse todas las fases de fabricación del suministrador y comprobar "in situ" que sus características corresponden a las definidas en el documento de compra correspondiente. Por un lado el departamento de compras del cliente "persigue" periódicamente el estado de la entrega de los instrumentos para que no existan retrasos que perjudicarían la marcha del proyecto. Y por otro lado, los inspectores del usuario comprueban que las características de los aparatos corresponden a las definidas en el pedido. Estas inspecciones suelen hacerse por bloques de instrumentos con el fin de no incurrir en costes adicionales si las mismas se realizaran a nivel de cada instrumento particular. Si la compra es importante suele realizarse una inspección final con los instrumentos ya instalados en la planta.

Una parte importante de la ingeniería la constituyen los diagramas de

tuberías de la planta. Las tuberías neumáticas y los cables de instrumentos se colocan en general dentro del resto de las tuberías de la planta, exceptuando algunos casos especiales, tales como los cables de termopares, cuyo tendido debe protegerse de los campos magnéticos que puedan existir en la fábrica generados por motores de potencia, por los contactores de alimentación de resistencias calefactoras en hornos, o simplemente por las tormentas que puedan producir gran aparato eléctrico influyan en las instalaciones que se encuentran a la intemperie. El proyecto del trazado de las tuberías de la planta es muy complejo, ya que las tuberías deben seguir el camino recto más corto posible entre los dos puntos de conexión y al mismo tiempo no cruzarse ni perturbar el movimiento de materias dentro de la fábrica. Actualmente existen programas de ordenador que facilitan el trazado óptimo de las tuberías, debiendo señalar que a los mismos se están incorporando sistemas expertos, fruto de la colaboración entre la universidad y la industria.

INSTALACIÓN

Las compañías instaladoras seleccionadas instalan los instrumentos en el proceso y los cables o los tubos de conexión los sitúan en los puentes de tuberías, en las galerías subterráneas o en zanjas adecuadamente señalizadas. La instalación es supervisada por el cliente y los cambios que puedan haberse introducido con relación a los planos originales creados en la oficina de ingeniería deben pasarse a dichos planos, creando así nuevas versiones. De no hacerlo así, se corre el riesgo de que una vez en funcionamiento la fábrica, el departamento de mantenimiento deba perder mucho tiempo para descubrir los cambios realizados y pasarlos a sus planos. De este modo, asegura la solución rápida de futuras averías y se facilita su labor de mantenimiento.



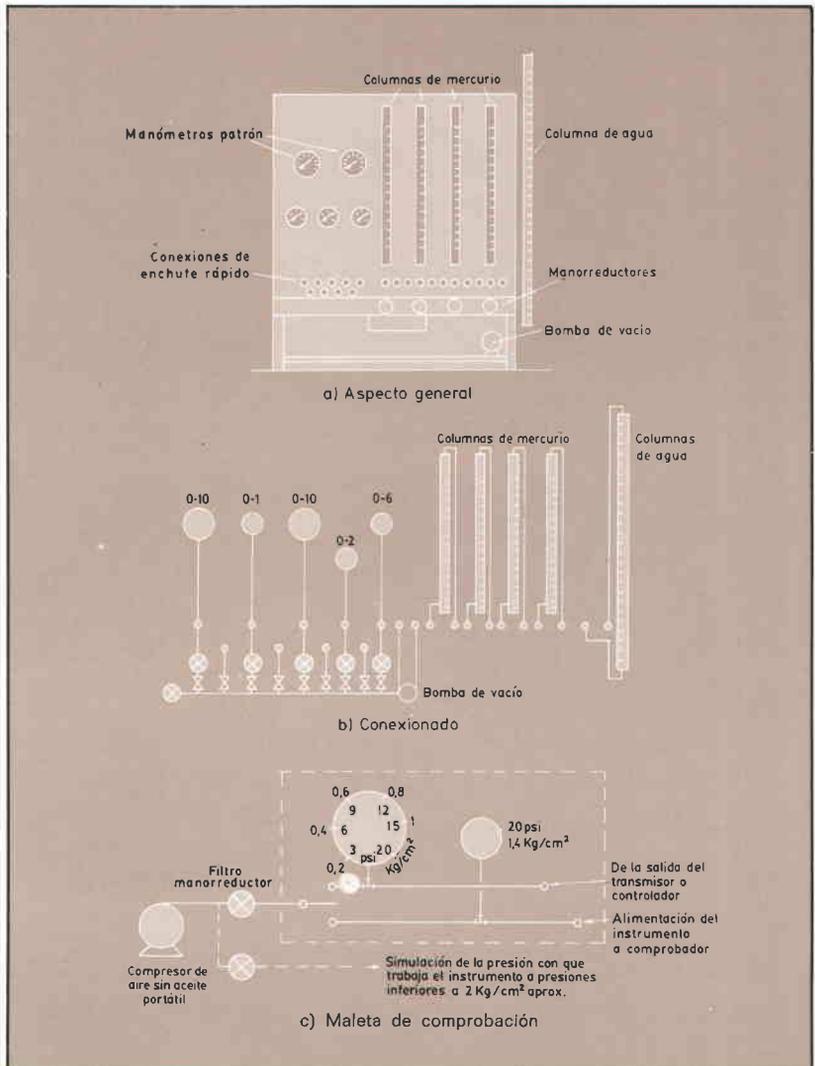
Montaje en by-pass de una válvula para su fácil desmontaje sin parar el proceso.

Citemos algunos detalles de la instalación referentes a varios aspectos de las válvulas de control.

Desde el punto de vista del mantenimiento, acostumbran a disponer en los lugares críticos de un *by-pass*, es decir, la válvula de control está montada entre dos válvulas manuales con dos ramales aguas arriba y aguas

abajo, que están unidos a través de otra válvula manual con obturador especial que puede actuar como válvula de control. De este modo, en caso de avería se cierran las dos válvulas manuales y se puede desmontar la válvula de control intercalada para su reparación, regulando mientras tanto con la válvula manual del *by-pass*. En otras instalaciones más económicas se utilizan sólo dos válvulas manuales instaladas aguas arriba y aguas abajo de la válvula de control, y se tiene preparado un tubo con bridas (carrete) con idéntica longitud que la válvula de control. Cuando se produce una avería se cierran las dos válvulas manuales, se extrae la válvula de control de la tubería y se coloca en su lugar el carrete, pudiendo controlarse momentáneamente el proceso con una de las dos válvulas manuales.

Calibración de instrumentos
en el taller de
instrumentos y en campo.



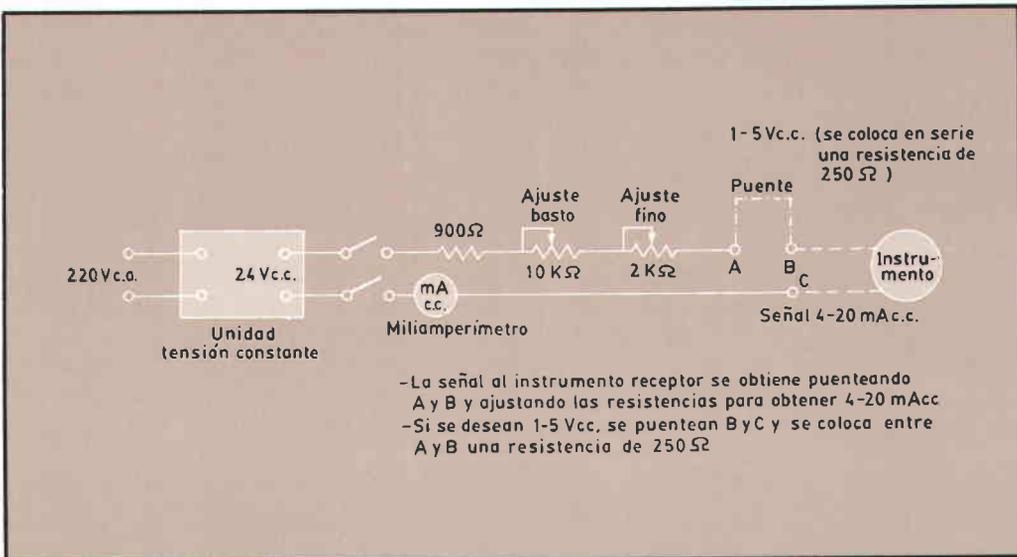
CALIBRACIÓN

A pesar de que los fabricantes suministran los instrumentos ya calibrados, siempre es conveniente que los instrumentistas comprueben su estado de calibración y si es necesario los recalibren, ya que es posible que en el transporte o en la instalación reciban un golpe que modifique sus características. La calibración se realiza siempre que es posible con el instrumento ya instalado, y después se comprueba cada lazo de control para detectar posibles problemas entre el transmisor, el controlador y la válvula de control.

En la calibración se utilizan maletas de calibración neumáticas y electrónicas.

Las maletas de calibración neumáticas consisten en un pequeño compresor de aire sin aceite (aros de grafito) apto para alimentar dos o tres instrumentos a la presión mínima de 2 Kg/cm^2 , a fin de acoplarle un manorreductor que proporcione la presión de alimentación de $1,4 \text{ Kg/cm}^2$. Téngase en cuenta que un instrumento regulador miniatura gasta un caudal de aire del orden de 10 NI/minuto , mientras que un transmisor neumático consume un caudal de aire de 8 NI/minuto y un posicionador de una válvula de control gasta 28 NI/minuto . Esta maleta de comprobación permite calibrar los instrumentos neumáticos de campo o de panel. Si no se dispone de ella, puede utilizarse como fuente de aire la propia de la planta y emplear para la calibración manómetros patrón o columnas de mercurio.

Calibración de instrumentos electrónicos.



Las maletas de calibración de los instrumentos electrónicos son suministradas generalmente por los fabricantes de los aparatos y destinadas a sus propios instrumentos. Generan y reciben señales de $4 \pm 20 \text{ mA c.c.}$ y $1 \pm 5 \text{ V c.c.}$ y simulan las impedancias externas del circuito asociado al instrumento.

En el caso del control distribuido, la mayor parte de la comprobación es realizada por el suministrador con la supervisión del usuario.

Téngase en cuenta que ésta es una fase importante antes de la puesta en marcha de la planta, ya que si no se lleva a cabo, los problemas que se hubieran detectado antes con tranquilidad (por ejemplo, una fuga en la tubería neumática que va a la válvula de control o la rotura de un hilo del cable que transporta la señal electrónica de $4 \div 20 \text{ mA c.c.}$) pasan después a ser de urgente necesidad con las consiguientes pérdidas de tiempo, valorables en miles de pesetas, y los consiguientes nervios en la dirección, que ya tiene compromisos adquiridos de fabricación y entrega del producto a sus clientes, y que no puede admitir retrasos. Hay que señalar que estos problemas deben solucionarse antes de la fase final de la puesta en marcha de la planta. Siempre es más barato hacerlo así, que no esperar que en la propia planta se solucionen las incidencias que se presenten (materiales que faltan, mala instalación, etc.), teniendo en cuenta el alto valor de la hora de retraso.

PUESTA EN MARCHA

Terminadas las etapas preliminares anteriores llega la hora de la verdad: la puesta en marcha de la planta. Se suele realizar un primer arranque de la fábrica alimentando los tanques y tuberías con agua y trabajando durante un tiempo determinado de 24 horas a una semana. Aunque parezca que este es un tiempo perdido no es así, ya que de este modo se detectan y solucionan problemas que de otra manera, al arrancar con las materias primas reales, repercutirían en la pérdida de toneladas de producto con un gasto económico considerable. Se limpian así las tuberías de objetos tales como restos de varillas de soldar, trapos, trozos de madera... que han caído en los tanques durante la fase de construcción. Algunos objetos quedan retenidos en recodos de las tuberías y dentro de las válvulas de control, lo que obliga a veces a desmontar los aparatos, limpiarlos y volverlos a montar.

En esta fase tiene lugar un primer ajuste de los instrumentos de control, es decir, la fijación de los valores de las acciones *proporcional+integral+derivada* de los instrumentos. Esta labor es realizada por los instrumentistas del propio usuario o por los proporcionados por la compañía instaladora. En pedidos importantes, el proveedor de instrumentos acostumbra a destacar a sus instrumentistas un tiempo determinado, previamente acordado en el pedido. Los instrumentistas, de acuerdo con su experiencia, prefijan dichos valores. Como guía figura la siguiente tabla:

Valores de las acciones de control			
	Banda proporcional %	Tiempo integral min./rep.	Tiempo derivativo minutos
Presión	20	—	—
Caudal	$80 \div 250$	$0,5 \div 15$	—
Nivel	$50 \div 100$	—	—
Temperatura	$20 \div 50$	$0,5 \div 15$	$0,5 \div 3$

En el caso de los instrumentos clásicos esta labor de ajuste se realiza en los controladores, extrayéndolos de sus cajas, fijando el valor correspondiente de la acción escogida e introduciéndolos de nuevo en sus alojamientos.

En cuanto al control distribuido, el ajuste se realiza simplemente llamando, a través del teclado, el lazo correspondiente, tecleando el valor de cada acción y pulsando la tecla de entrada.

Una vez terminada la fase de limpieza, tiene lugar ya la puesta en marcha real, trabajando con materias primas y productos reales. En esta fase pueden presentarse problemas de arranque de equipos por fallo del sistema de enclavamiento o protección. Por ejemplo, una caldera de vapor en la que falle el sistema de detección de la llama por mala colocación o suciedad (el detector puede no apuntar a la llama, con lo que no la detecta, o bien la célula está sucia y no capta una radiación suficiente de la llama) no podrá ponerse en marcha. Deberá solucionarse el problema, pero esta solución no siempre es evidente, es decir, el operador sólo ve que no puede poner en marcha la caldera por existir problemas en alguna parte del circuito de enclavamiento, y aunque los modernos sistemas de protección con microprocesador diagnostican y presentan el tipo de avería y su localización, no siempre se instalan, en particular en las plantas pequeñas. De aquí que, debido a los nervios naturales de la puesta en marcha, se corre el riesgo de anular parte del sistema de protección sin solucionar el problema de base, con lo que la instalación arranca, pero funcionando en condiciones que de no corregirse pueden dar lugar a catástrofes o a paros completos de la planta, en ocasiones con la pérdida de vidas humanas.

Los instrumentistas ajustan definitivamente los instrumentos de control utilizando en general el *método de tanteo* (prueba y error). Este método se basa en el ensayo repetitivo de cada acción (empezando por la proporcional) ante perturbaciones introducidas en el proceso por cambios en el punto de consigna y retornos a su valor inicial. Un método de tanteo perfeccionado, basado en el método de ganancia límite que se explica más adelante, es el siguiente:

Inicialmente se ajusta el tiempo de acción integral al máximo, la acción derivada a cero, y la banda proporcional al mínimo o a la ganancia máxima.

Se lleva el punto de consigna al valor deseado y si el proceso no oscila se va bajando la banda proporcional a la mitad de su valor. Si el proceso oscila, se aumenta lentamente el ajuste de la banda proporcional en pequeños incrementos (bajando la ganancia) hasta obtener una oscilación mantenida. A continuación se fija la banda proporcional en el doble de su valor último (o se fija la mitad de la ganancia del lazo).

Se aumenta la acción derivada en un pequeño incremento y se cambia el punto de consigna, observando la respuesta del proceso. La respuesta deseada es un compromiso entre el rebasamiento del punto de consigna y la velocidad a la cual el proceso lo alcanza, y la misma se reconoce porque disminuye el número de oscilaciones con respecto al control proporcional anterior.

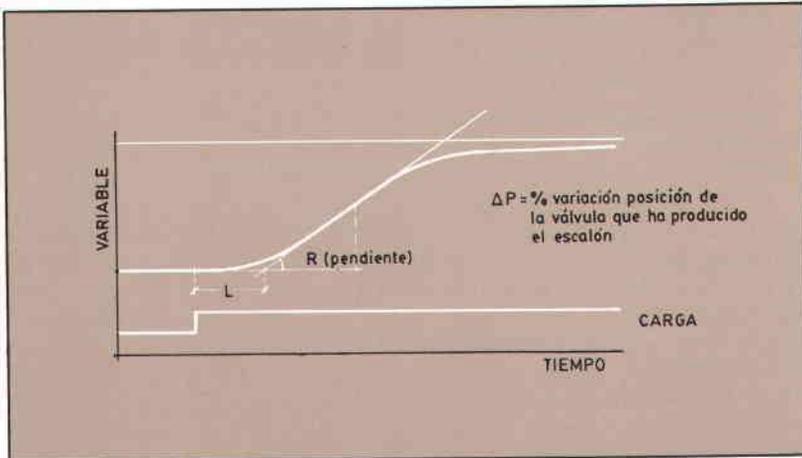
Se disminuye lentamente el tiempo de la acción integral en pequeños

oscilación automantenida, anotando el período en minutos de la misma. A continuación se aumenta el valor de la banda proporcional en 125 %. El tiempo de la acción integral en minutos/repetición es 0,6 veces el período de la oscilación mantenida en minutos (y en repeticiones/minuto es 1,6 veces el período de la oscilación). El ajuste de la acción derivada en minutos es 0,19 veces el período en minutos de la oscilación.

Los procedimientos de ajuste anteriores son aproximados y constituyen un buen punto de partida para ajustar finamente el proceso y conseguir una respuesta satisfactoria frente a las perturbaciones del mismo.

Se considera que un controlador está bien ajustado cuando, después de presentarse una perturbación, la curva de recuperación de la variable es tal que cada onda es la cuarta parte de la precedente. Sin embargo, esta relación variará según la aplicación de que se trate. Asimismo, los valores de ajuste de las acciones de control que producen la respuesta 1/4 no son únicos.

En algunas aplicaciones son importantes las desviaciones del punto de consigna y el tiempo que se mantienen. Ello conduce a adoptar uno de los criterios de la *integral del error*.



Curva de reacción obtenida provocando un cambio de posición de la válvula de control. Permite calcular los ajustes PID del controlador.

Si la planta dispone de instrumentos autocontroladores en los lazos críticos, el propio controlador indica los valores idóneos de ajuste o bien él mismo se ajusta a dichos valores.

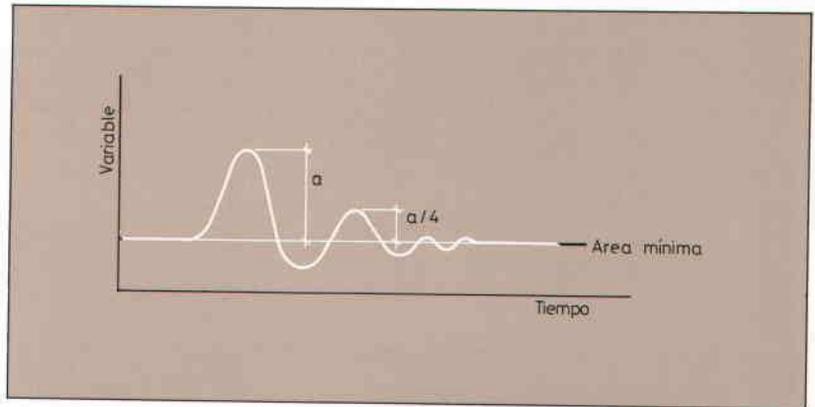
Los sistemas expertos han permitido un ajuste automático o autoajuste a las características del proceso, lo cual es más evidente en procesos de características particulares, como por ejemplo, los procesos con tiempo de retardo considerable donde la aplicación de las técnicas de tanteo conduciría a oscilaciones excesivas del lazo de control.

El sistema experto contiene, por un lado, los sistemas de tanteo (prueba y error) para el ensayo de los ajustes de las acciones de control y la comprobación de sus efectos en el comportamiento del lazo, y por el otro el desarrollo y el mantenimiento de alguna propiedad del proceso que

permita la crítica y el cambio de los ajustes realizados con el método de tanteo.

En el caso del control distribuido, el fabricante tiene disponibles varios algoritmos de control que complementan la clásica *regulación proporcional+integral+derivativa*, y que permiten también el autoajuste de las unidades de control, con la tendencia actual a utilizar sistemas expertos para el ajuste de los controladores en los procesos complejos y críticos.

Curva de recuperación que indica la bondad de ajuste del controlador. Su aparición después de una perturbación señala que el proceso es estable.



En los controladores programables y en los controladores multifunción, es posible que las secuencias de enclavamiento y las funciones lógicas definidas antes de la puesta en marcha y dadas al suministrador para su configuración no sean las más idóneas, por lo que deba ser necesario efectuar algún cambio. En los controladores programables, bastará cambiar alguna de las instrucciones de programación de contactos, de temporización o de secuencia, o bien cambiar alguna de las instrucciones aritméticas, etc., pudiendo efectuarse muchos de estos cambios mientras el programa está ejecutándose (programación *on-line*). En los controladores multifunción, que utilizan un lenguaje de programación de alto nivel en el enlace de las funciones de control lógico, control secuencial y control analógico, bastará cambiar alguna o algunas de las sentencias utilizadas en la programación.

MANTENIMIENTO

En los meses que siguen a la puesta en marcha de la planta, surgen problemas que cada vez son menos importantes, unos van solucionándose poco a poco y otros son resueltos directamente por el servicio de mantenimiento de la fábrica.

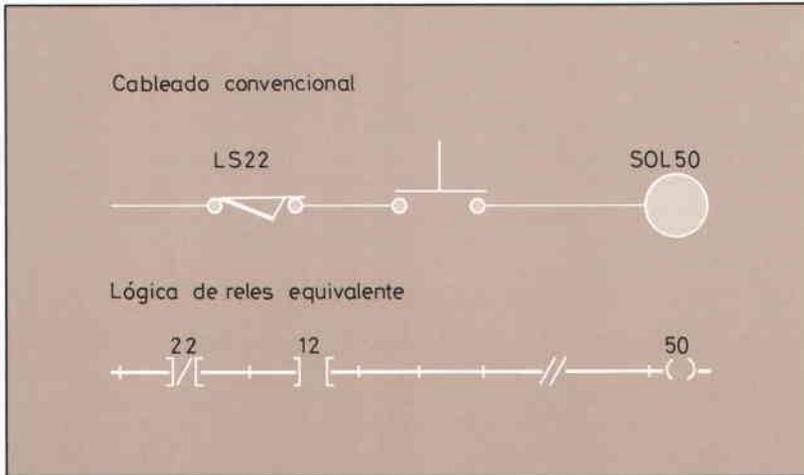
Existen programas de mantenimiento, usualmente compatibles para IBM-PC, que facilitan el aprovisionamiento de piezas de recambio, el mantenimiento del stock mínimo, los trabajos correctivos, los trabajos preventivos, los trabajos extraordinarios y todo lo relacionado con las órdenes de trabajo y los históricos de averías de los instrumentos. Por ejemplo, uno de los programas que existen en el mercado puede manejar, empleando un ordenador IBM PC o compatible dotado de disco duro de

20 Mb, 10.000 piezas de recambio, 10.000 unidades de equipo, 5.000 órdenes de trabajo y 1.000 planes de trabajo.

El personal de mantenimiento en la industria química suele ser de una persona por cada cinco de producción (con el 10 + 20% como personal de mantenimiento de instrumentos) y en la industria petroquímica de una persona por cada una o dos de producción (correspondiendo a mantenimiento de los instrumentos el 30 + 50%).

Si bien las relaciones entre el departamento de fabricación y el departamento de mantenimiento constituyen un tema polémico, de hecho, el mantenimiento tiene un único cliente que es el departamento de fabricación.

Estructura de circuitos en programación lógica para los enclavamientos del proceso.



La coordinación entre ambos departamentos, para evitar malos entendidos y las consiguientes repercusiones en el rendimiento de la fábrica, es muy importante. Uno de los métodos que permite la consecución de dicha coordinación son los cursos de formación general en instrumentos y servicios generales, así como en electricidad, del personal de fabricación. No se trata de cursos de especialización sino más bien de cursos sobre conceptos generales, orientados a conseguir una comprensión general del funcionamiento de la fábrica que facilite al departamento de mantenimiento el diagnóstico y la orientación en la localización de las averías del proceso, haciendo así más fácil y más rápida la vuelta a las condiciones normales de la fabricación. Otro sistema que puede ser complementario es la permanencia de parte del personal de mantenimiento en los propios edificios de la fábrica, dependiendo del jefe de fabricación, para de este modo detectar inicialmente las averías y repararlas directamente "in situ", sin necesidad de perder tiempo avisando al taller. En cualquier caso, una comprensión mutua entre el personal de ambos departamentos es esencial para la buena marcha de la fábrica.

En la gestión del mantenimiento intervienen conceptos tales como:

– *Fiabilidad*: Probabilidad de que un instrumento funcione sin averías al cabo de un tiempo t

– *Mantenibilidad*: Probabilidad de que un fallo sea reparado antes de un tiempo t transcurrido desde que se detectó el fallo.

– *Índice de fallo*: Relación entre el número de fallos que se dan en un intervalo de tiempo, dividido por el número de instrumentos que estaba funcionando correctamente antes de iniciarse el intervalo establecido.

– *Tiempo medio entre fallos*: Número total de horas trabajadas por los instrumentos, dividido por el número de averías que se han presentado durante este período.

– *Disponibilidad*: Probabilidad de que un instrumento o equipo esté disponible dentro de un intervalo de tiempo determinado.

En la industria química el gasto total de mantenimiento por unidad de ventas del producto es del orden del 5 %.

El mantenimiento puede ser contratado o propio. El primero se utiliza en las puntas de trabajo de la fábrica (paros anuales), en los trabajos de mantenimiento programados, y también en las reparaciones de envergadura y en obras nuevas. En el caso del control distribuido, el proveedor puede aportar un contrato de mantenimiento, permanente y revisable cada año, en el cual se fijan las piezas de recambio (tarjetas controladoras, transmisores, piezas de recambio de instrumentos de campo...) a disponer en stock en la planta, y se destaca uno o varios instrumentistas para proporcionar así servicio de 24 horas al usuario.

Si la planta dispone de control avanzado, es necesario contemplar la posibilidad de cambios periódicos en los programas para así manejar nuevos problemas de control que no se habían presentado en la puesta en marcha. Conviene señalar que las aplicaciones del control distribuido y de control avanzado no son estáticas y es necesario hacer frente a nuevos problemas, evolucionando así el control de la planta. El departamento de mantenimiento de la fábrica sorprende a menudo con la petición de más personal o de más medios y equipos de mantenimiento, ya que, después de la puesta en marcha, constata la necesidad de aprovechamiento del control avanzado y de la optimización de las variables de la planta. La gran cantidad de información que facilita el control distribuido aporta nuevas ideas a la gerencia, y su aplicación depende en gran manera del personal disponible. Este personal puede formar parte del departamento de mantenimiento o bien pertenecer al área de ingeniería, y en ambos casos es necesario entrenarlo en las áreas de estas nuevas tecnologías. Aun cuando no se contrate personal adicional, el personal de la planta será afectado por el proyecto, con lo cual las formas previas de trabajo dentro de la fábrica se verán directamente afectadas por los nuevos sistemas de control. En conclusión, el personal de la planta debe adaptarse a estas nuevas tecnologías.

Bibliografía

- Antonio Creus (1985) 3.^a edición –Instrumentación Industrial. Marcombo– Boixareu Editores.
- TDC 3000 Control Total Distribuido – Honeywell.
- Control Distribuido, versatilidad, seguridad y fiabilidad del sistema – A. Creus – Mundo Electrónico, número 100 (1980).
- Smart Instrumentation – Cecil L. Smith – Chemical Engineering, May 27, 1985.
- Conrad H. Hoepfner (1984) – Online measurement of liquid density – Chemical Engineering, October 1, 1984.
- Jonathan T.Y. Yeh (1986) – Online composition analyzers – Chemical Engineering, January 20, 1986 – The Development of TDC 2000.
- Renzo Dallimonti – Scientific Honeyweller, December 1985.
- Hierarchical Distributed Control: Progress and Needs – Theodore J. Williams – Purdue University – Intech, March 1983.
- Reliability of distributed measurement and control systems – Frank J. Romeo – Instrumentation Technology – Mayo 1979.
- Automation – Raphael Kaplinsky (1984) – Longman.
- Flexible manufacturing systems – H.J. Warnecke (1985) – IFS (UK).
- Human Factors – T. Lupton (1986) – IFS (UK).
- Reliability of distributed measurement and control systems – Frank J. Romeo – Instrumentation Technology – Mayo 1979.
- On-Line Instrumentation and Process Control – Béla G. Liptak – Revista Chemical Engineering – 31 Marzo 1986.
- Advanced control methods – Richard A. Rys, Foxboro – Chemical Engineering – 20 Agosto 1984.
- Plant revamps – Robert Atkinson, Fluor Engineers – Chemical Engineering – 2 Marzo 1987.
- Modernization projects – David J. Wick and Hugh W. Oburn, Honeywell Inc. – Chemical Engineering – 19 Enero 1987.
- Problemática general del mantenimiento industrial – Carlos Fournaud Coll – Regulación y Mando Automático – Marzo 1985.
- The future of expert systems in chemical engineering – George Stephanopoulos, MIT – Cemical Engineering Progress – Septiembre 1987.

COLECCIÓN "PRODUCTICA"

Volúmenes aparecidos y en preparación

- 1 Cómo mejorar la productividad en el taller
- 2 Diseño industrial por computador
- 3 Autómatas programables
- 4 Fabricación asistida por computador-CAM
- 5 Círculos de calidad
- 6 Cómo y cuándo aplicar un robot industrial
- 7 Control de métodos y tiempos
- 8 Redes locales en la industria
- 9 La fábrica flexible
- 10 Aplicación de la estadística al control de la calidad
- 11 Introducción a la neumática
- 12 La formación permanente en la empresa
- 13 Aplicaciones industriales de la neumática
- 14 Cómo programar un control numérico
- 15 Seguridad e higiene en el trabajo
- 16 Control de procesos industriales; criterios de implantación
- 17 Planificación y rentabilidad de proyectos industriales
- 18 Gestión de la calidad
- 19 Aplicaciones industriales del láser
- 20 Simulación de procesos con PC

