



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

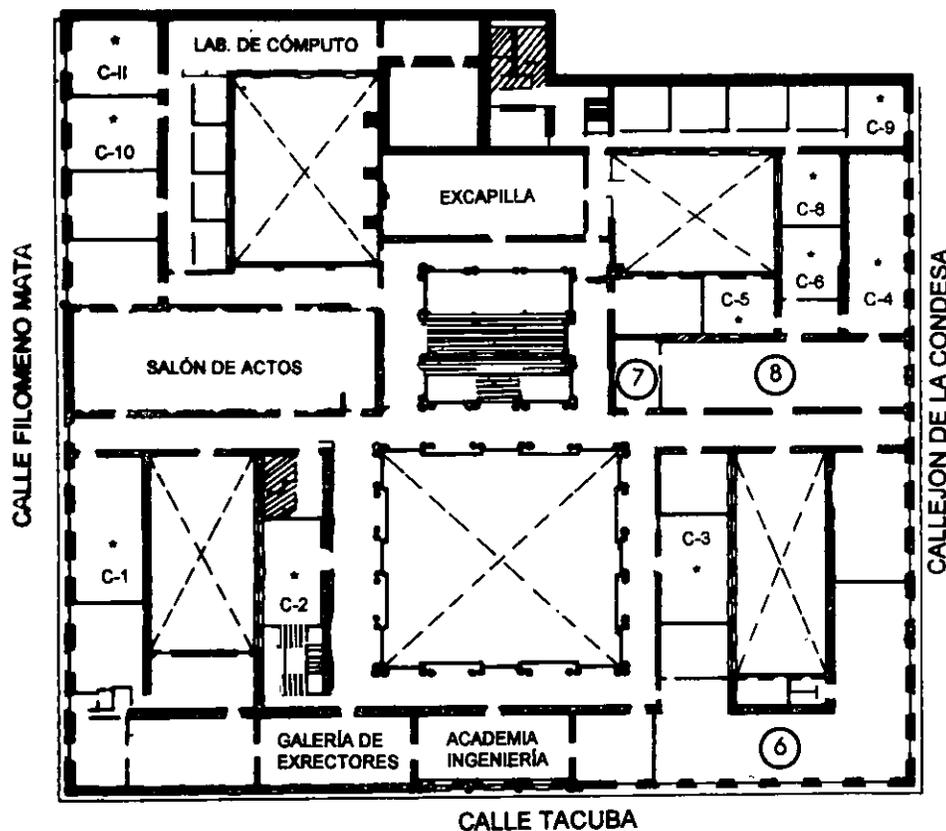
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERÍA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
 2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
 3. LIBRERÍA UNAM
 4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN "ING. BRUNO MASCANZONI"
 5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
 6. OFICINAS GENERALES
 7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
 8. SALA DE DESCANSO
- SANITARIOS
- * AULAS

1er. PISO

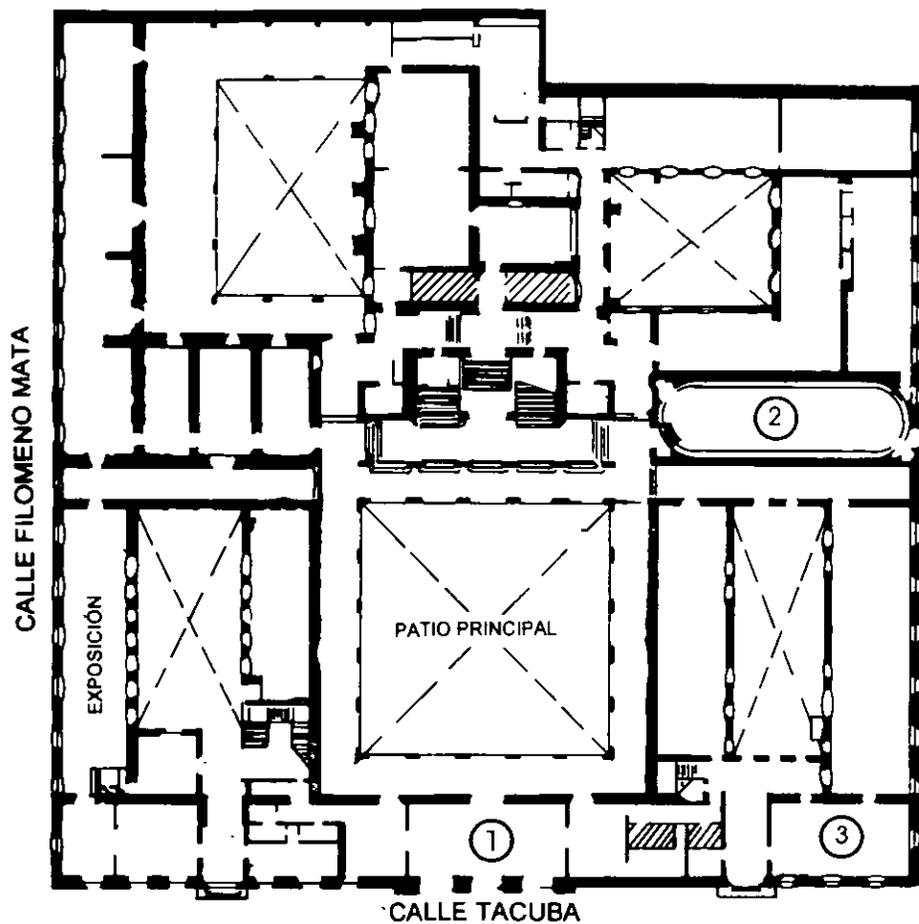


DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS

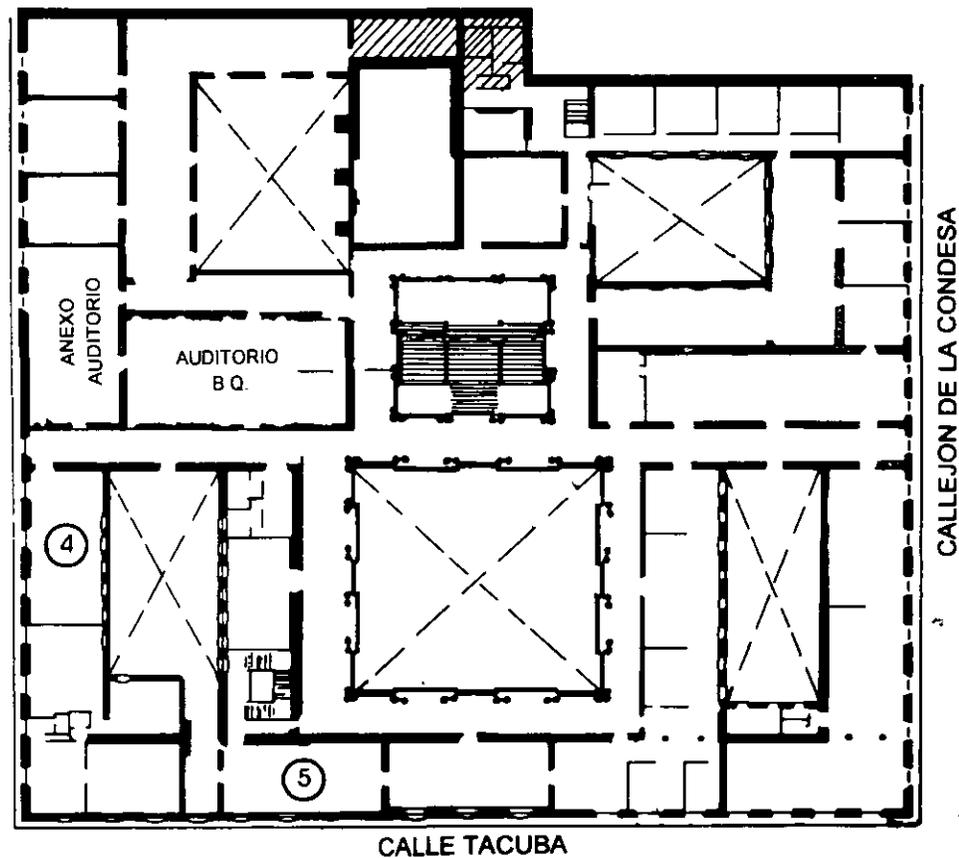
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



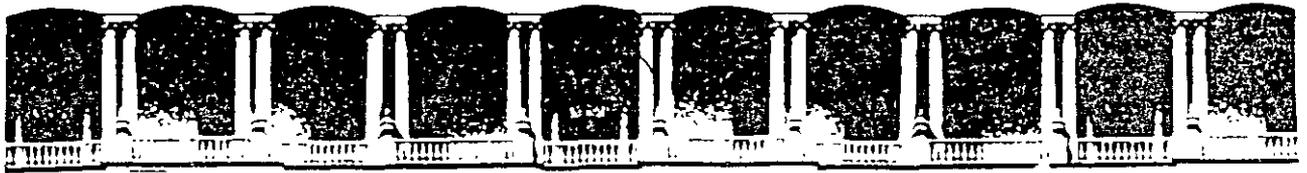
PALACIO DE MINERIA



PLANTA BAJA



MEZZANINNE



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

CURSO INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

TEMAS:

- 1. FUNCIONES DE LA DE INSTRUMENTACIÓN**
- 2. CLASES DE INSTRUMENTOS**

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
DICIEMBRE 1999**

control. Es esencial que se conozca la teoría adecuada, la operación funcional y las interacciones entre los componentes en el proceso que se va a medir o controlar.

La utilidad de un instrumento en cualquier sistema de medición y control depende de la medida en que se pueda poner en marcha con éxito un dispositivo de control y del grado de seguridad con que se logre reproducir la iniciación del control. Tanto la exactitud como la seguridad de un instrumento dependen de su construcción y de la manera en que conserve su calibración. Un instrumento más calibrado produce un riesgo de medición y no sirve al utilizarlo para medir. Para que un instrumento industrial pueda ser útil para usarlo en procesos, un instrumento se debe calibrar de acuerdo con una norma ya aceptada.

La instrumentación hace posible la producción en masa y permite establecer y mantener límites superiores (positivo) e inferiores (negativo). El uso de las normas de calibración fija las mediciones y controles en la fabricación y permite que un productor se especialice en un artículo y actúe como abastecedor de otros fabricantes o grupos de ensambladores.

La medición y el control industrial, junto con su instrumentación, representan una inversión multimillonaria que ha demostrado puede alcanzar una gran plusvalía.

II.- Funciones de la instrumentación

Las funciones de la instrumentación son disponer de elementos o dispositivos de control en todas las aplicaciones de la industria que requieran un medio de control a través de Instrumentos, sobre todo en aquellos que producen materias esenciales para el bienestar, la comodidad y la seguridad del hombre.

De aquí que la función primordial de un Instrumento, es controlar las diferentes etapas de un proceso de forma que el producto final de dicho proceso se logra de acuerdo a especificaciones previamente establecidas.

Los instrumentos son herramientas indispensables que sirven para conseguir y conservar la calidad con que se identifica el producto que se está manufacturando. Se utilizan para controlar las variables de un proceso o sistema en forma tan exacta como se necesite para satisfacer las especificaciones del producto en lo que respecta a composición, forma color o acabado.

El instrumento o el sistema de instrumentos puede ser mecánico, neumático, hidráulico, eléctrico, electrónico o una combinación de dos o más de estas formas básicas, por ejemplo, electromecánicos. Cada instrumento o sistema de instrumentos tiene tres funciones básicas que son :

1. Detector
2. Dispositivo intermedio de transferencia
3. Dispositivo final

Estos tres elementos se ilustran en el diagrama de bloques de la figura 2.1. El dispositivo de entrada debe captar la señal y transferirla a algún sistema de salida. El tipo de instrumento o sistema depende de las variables que se van a controlar o medir y de la rapidez y la precisión con que se debe efectuar la medición o el control.

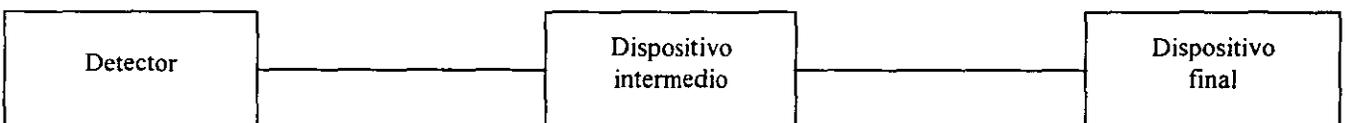


Fig. 2.1 Las tres funciones básicas del instrumento o sistema de instrumentos

La automatización, que requiere del control y la recopilación de datos por computadora, ha fomentado el uso de instrumentos para mediciones y control, tanto de una sola estación como de sistemas completos en todas las industrias modernas. Estos van desde una simple estación de control manual hasta un complejo centro de actividad y control utilizando computadoras. Para cada aplicación debe existir una comprensión clara y concisa del funcionamiento de cada instrumento y de sus limitaciones en el sistema de medición y

ANÁLISIS DE MEDICIONES

El propósito de cada medida es describir de manera cuantitativa alguna propiedad física de un objeto: longitud, temperatura, presión, etc. Toda medición de una cantidad de este tipo tiene alguna incertidumbre. Se puede explicar esto considerando los experimentos que siguen al medir el diámetro de un disco:

- Primero, se eligen tres instrumentos diferentes: un calibrador, un tornillo micrométrico y un abbetoscopio. Con cada uno de estos instrumentos se puede obtener una medida diferente para el diámetro del mismo disco.
- En seguida, se usan tres instrumentos del mismo tipo para medir el diámetro del disco, por ejemplo, tres metros copios. Una vez más, se pueden obtener tres valores diferentes del diámetro, correspondientes a los tres instrumentos.
- Por último, sólo se usa un instrumento para medir el diámetro del disco tres veces. Aquí también es posible que se obtengan tres valores diferentes.

Por tanto, se encuentra que incluso las mediciones repetidas con el mismo instrumento pueden dar valores diferentes de la misma cantidad física. Por consiguiente, puede concluirse que, en cierto grado, todos los valores medidos son inexactos. De hecho, es imposible hallar el valor verdadero, aunque se puede suponer con seguridad que ese valor existe. Por tanto, el objetivo es hallar el valor más probable y asignarle la incertidumbre. En otras palabras, el propósito del experimentador no es hacer a la incertidumbre de la medición tan pequeña como sea posible, ya que

describir el instrumento en términos de sus elementos funcionales, pero se puede decir que el que se analiza a continuación es adecuado y sencillo.

a) ELEMENTO SENSOR PRIMARIO

Es el elemento que recibe primero la energía del medio que se va a medir y produce una salida proporcional. La señal de salida del elemento sensor primario es una variable física, por ejemplo, un desplazamiento o un voltaje. Por tanto, el elemento sensor primario es un transductor que convierte (transduce) una variable o efecto físico en otro. Para que la medición sea veraz, se debe diseñar el transductor de tal modo que extraiga una cantidad muy pequeña de energía del medio. Es decir, no se debe perturbar el medio de manera apreciable al introducir el elemento sensor.

b) ELEMENTO DE CONVERSIÓN DE LA VARIABLE

Es posible que la señal de salida del elemento sensor primario requiera ser convertida a una variable más apropiada, en tanto conserve su contenido de información. Esta función se lleva a cabo por medio del elemento de conversión de la variable y se puede considerar como la segunda etapa del transductor.

c) ELEMENTO DE MANIPULACIÓN DE LA VARIABLE

Este elemento es una etapa intermedia de un sistema de medición, que modifica la señal directa por amplificación, filtrado u otro medio, de modo que se produce la salida deseada. En esta etapa no se altera la naturaleza física de la variable.

d) ELEMENTO DE TRANSMISIÓN DE LOS DATOS

Cuando los elementos funcionales de un instrumento están separados en el espacio, se hace necesario transmitir la señal de un elemento a otro. Esta función la lleva a cabo el elemento de transmisión de los datos.

e) ELEMENTO DE PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

Por lo común, la información acerca de la cantidad que va a medirse se debe comunicar a otra persona para comprobar un funcionamiento, o para fines de control o análisis. Como consecuencia, se debe presentar en forma reconocible por los sentidos humanos. Si la información se va a presentar a una computadora, se puede hacer en la forma de escala binaria en cinta o tarjetas perforadas. Un elemento que lleva a cabo esta función de traducción recibe el nombre de elemento de presentación de los datos.

Hay dos métodos básicos para medir:

- Comparación directa con el estándar primario o secundario, y
- Comparación indirecta con un estándar, a través de un sistema calibrado.

Estos dos métodos se emplean de acuerdo con la necesidad; pero, para librar el estándar primario de un manejo frecuente y directo, en general se usan estándares secundarios para comparación o calibración directa.

La calibración de todos los instrumentos es importante, porque proporciona la oportunidad de comprobar el instrumento contra un estándar conocido y, posteriormente, reducir el error en la medición. Los procedimientos de calibración comprenden una comparación de un instrumento en particular con:

- a) un estándar primario
- b) un estándar con una exactitud superior a la del instrumento que va a calibrarse, o bien
- c) una fuente conocida de entrada.

Una función básica de todas las ramas de la ingeniería es el diseño de sistemas que constan de varios elementos, los cuales se espera funcionen en una forma particular. Se requiere medir para probar el funcionamiento de las componentes que constituyen en el sistema y, finalmente, la función del propio instrumento.

Además, en las ciencias básicas, se estudian con gran detalle los principios fundamentales o los fenómenos derivados, para confirmar la validez de ciertos postulados o, a veces se requiere una instrumentación complicada para anticiparse al descubrimiento de algún comportamiento extraño de la naturaleza. El análisis se lleva a cabo sobre los resultados numéricos que se obtienen del acto de medir.

Para proponer una ley estadística, se efectúan mediciones sobre cierto número de sistemas.

Por tanto, las mediciones son esenciales para evaluar el comportamiento de un sistema, estudiar su respuesta a una función de entrada particular, estudiar alguna ley básica de la naturaleza, etc. El instrumento de medición es un componente esencial de un sistema de control automático.

Concepto de un sistema generalizado de medición

Un instrumento se diseña para llevar a cabo una tarea y, por consiguiente, siempre es posible describirlo en términos de sus elementos físicos. Sin embargo, este enfoque tiene sus desventajas; por ejemplo, requiere una descripción de cada instrumento. Se puede generalizar el enfoque si se describe el instrumento en términos de sus elementos funcionales. Puede haber diversos esquemas para

- **Inductancia.** Es la propiedad de un circuito eléctrico o de dos circuitos vecinos que determinan la fuerza electromotriz inducida en uno de los circuitos por una variación de corriente en alguno de ellos.
- **Capacitancia.** Es la propiedad de un sistema eléctrico que incluye conductancia eléctrica que determina el desplazamiento de corrientes en el sistema para un régimen de tiempo dado de cambio de potencial.
- **Impedancia.** Es la relación numérica de potencial aplicado dividido entre el flujo de corriente resultante, en un circuito eléctrico sujeto a un potencial de CA.

LA MEDICIÓN

Fundamentalmente, medir es el acto o el resultado de una comparación cuantitativa entre un estándar predefinido y una magnitud desconocida. Para que el resultado tenga significado, se deben satisfacer dos requisitos en el acto de medir:

- El estándar debe ser conocido con exactitud y aceptado internacionalmente y
- Tanto el aparato como el procedimiento empleado para obtener la comparación deben ser comprobables.

A fin de poder comparar cuantitativamente con coherencia, se han establecido ciertos estándares de longitud, masa, tiempo, temperatura y cantidades eléctricas. Estos estándares tienen aceptación internacional y se les conserva en condiciones controladas del medio ambiente.

El estándar de longitud es el metro estándar que se define como una longitud entre dos líneas muy delgadas grabadas sobre una barra de platino e iridio que se mantiene y se mide en condiciones muy controladas.

La Conferencia General sobre Pesos y Medidas definió al metro estándar en términos de la longitud de onda de la luz rojo anaranjada de la lámpara de Kr. Por tanto, el metro estándar equivale a 1 650 763.73 longitudes de onda de la luz rojo anaranjada del Kr.

El kilogramo se define en términos de una masa de platino e iridio. Estos dos estándares se conservan en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas en Sevres, Francia. Se ha aceptado el reloj de Cesio con el estándar de la medida del tiempo.

En 1854, Lord Kelvin diseñó una escala de temperatura absoluta, con base en la segunda ley de la termodinámica. La escala internacional de 1984 constituye una base experimental para una escala de temperatura, la cual se aproxima tanto como es posible a la escala termodinámica absoluta.

- **Velocidad.** Es el régimen de movimiento medido por la distancia recorrida por un cuerpo en una unidad de tiempo y puede ser lineal o angular; por lo general se refiere al movimiento de sólidos.
- **Aceleración.** Es el régimen de tiempo de cambio de la velocidad; puede ser angular o lineal.
- **Masa.** Es la cantidad total de materia dentro de unas fronteras especificadas.
- **Peso.** Es una medida de la masa, basada en la atracción gravitacional.
- **Lapso de tiempo.**
- **Frecuencia.** Es el número de periodos que ocurren en la unidad de tiempo de una cantidad periódica.
- **Posición.** Es la medida de la localización de un cuerpo con respecto a un sistema de coordenadas fijas.
- **Dimensión.** Es la distancia entre dos puntos fijos.
- **Forma o contorno.** Es la localización relativa de un grupo de puntos representativos de la superficie que esta siendo medida.
- **Nivel de líquido o sólido.** Es la altura o distancia de la superficie de un material referido a un nivel de referencia base.
- **Densidad.** Es la concentración de materia, es decir, la cantidad de materia en un volumen dado.
- **Gravedad específica.** Es la relación de la densidad de un material a la densidad del agua a condiciones especificadas, o bien menos comúnmente, la relación de la densidad de un gas a la densidad del aire a condiciones especificadas.
- **Humedad.** Es la cantidad de vapor de agua en la atmósfera; la absoluta es el peso de humedad en una unidad de volumen o referida a una masa de unidad total del gas. Ocasionalmente se expresa en términos de presión de vapor de agua. La humedad relativa es la relación entre la presión de vapor existente en una atmósfera y la presión de vapor de agua saturado a la misma temperatura.
- **Contenido de agua (moisture).** Es la cantidad de agua libre contenida en una sustancia.
- **Viscosidad.** Es la resistencia de un fluido a deformación bajo una fuerza cortante.
- **Características estructurales.** Son las propiedades de cristales, mecánicas o metalúrgicas de sustancias como dureza, ductilidad, estructura de rejillas, etc.
- **Composición química.** Son muy numerosas.
- **Voltaje o fuerza electromotriz.** Es la propiedad de un sistema eléctrico que tiende a producir una corriente eléctrica en un circuito. El voltaje se expresa como la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito.
- **Corriente eléctrica.** Es el régimen de transferencia de electricidad.
- **Resistencia.** Es la propiedad que está determinada por una corriente dada, el régimen al cual la energía eléctrica se convierte en calor. En circuitos de C-D, la resistencia es la relación numérica de la fuerza electromotriz dividida entre la corriente.
- **Conductancia.** La conductividad es la recíproca de la resistencia eléctrica.

- La respuesta de los dispositivos de salida a las señales de medición para producir indicaciones, registros, control y entradas a computadoras, etc.).
- Transductores disponibles para convertir una señal de medición a otra señal de medición.

En esencia, la mayoría de las ventajas atribuidas a la instrumentación de procesos pueden resumirse en términos económicos. La instrumentación y control aplicada inteligentemente ayuda a:

- Obtener un mejor producto a un costo mas bajo y en menos tiempo
- Mejorar la seguridad del personal y de la planta

Las definiciones de variables incluyen las siguientes principalmente:

- Temperatura. La condición de un cuerpo que determina la transferencia de calor o energía térmica o desde otros cuerpos.
- Calor específico. La propiedad de un cuerpo que define la relación entre el cambio de temperatura y el cambio de nivel de energía térmica.
- Variables de la energía térmica. Entalpia y entropia relacionadas al total y disponible energía térmica de un cuerpo.
- Valor calorífico. La característica de un material que determina la cantidad de calor o energía térmica que es producida o absorbida por el cuerpo bajo condiciones específicas.
- Radiación nuclear. Es la radiación asociada con la alteración del núcleo de un átomo.
- Radiación electromagnética. El espectro de la radiación electromagnética incluye la energía radiante de la emisión a la frecuencia de potencia a través de bandas de radio transmisión, calor radiante y luz infrarrojo visible y ultravioleta; rayos X y cósmicos. Radiación gamma de fuentes nucleares es una forma de radiación electromagnética.
- Variables fotométricas. Son variables como color, brillo, reflexión, etc., relacionadas con la luz visible.
- Variables acústicas. Incluyen sonidos audibles y ondas similares inaudibles en gases, líquidos y sólidos, especialmente las de frecuencia ultrasonica.
- Fuerza total. Es cualquier causa física que tiende a modificar el movimiento de un cuerpo.
- Momento o par (fuerza rotacional). Es la distancia a lo largo de la línea mas corta entre el punto de aplicación de una fuerza y un eje de referencia multiplicada por el componente de la fuerza actuando a un ángulo recto de ésta línea mas corta.
- Presión y vacío, esfuerzo unitario. Son las fuerzas por unidad de área en un fluido o sólido.
- Flujo. Es el número de unidades de volumen de material pasando por un punto dado dentro de un tiempo fijo.

- Composición química

Las variables pueden ser clasificadas en diferentes formas, dos de las cuales son las siguientes:

a) Por el carácter de la propia variable, que incluye variables:

- Térmicas (temperatura, calor específico, energía térmica, valor calorífico)
- Radiación (nuclear, electromagnética, fotoeléctrica, acústica)
- Fuerza (total, momento o par, presión, vacío)
- Régimen (flujo, velocidad, aceleración)
- Cantidad (masa, peso)
- Tiempo (lapso, frecuencia)
- Geométrica (posición, dimensión, forma o contorno, nivel)
- Propiedades físicas (densidad y gravedad específica, humedad, mezcla, viscosidad, características estructurales)
- Composición química (lista muy grande)
- Eléctricas (voltaje o fuerza electromotriz, corriente eléctrica o régimen de transferencia de electricidad, resistencia y conductancia, inductancia, capacitancia, impedancia)

b) Por las señales de medición. Es un grupo de variables empleadas en los sistemas de medición empleadas en los sistemas de medición para conversión, transmisión y utilización de las respuestas de sensores operando directamente de las variables medidas. Para la mayoría de las mediciones, un cambio en las variables medidas se convierte a un cambio en alguna otra variable (una señal de medición), que a su vez opera el despliegue (display), inicia una acción de control o puede ser convertida en otra señal de medición. Las señales de medición, incluyen las siguientes:

- Movimiento (movimiento mecánico, desplazamiento de líquido, movimiento de una luz o rayo (destello) de electrón).
- Fuerza (fuerza mecánica total, presión o fuerza por unidad de área)
- Eléctricas (voltaje o corriente, relación voltaje y corriente)
- Tiempo modulado (duración de pulso, frecuencia, pulso-modulación de cifra que es básicamente una técnica digital)

Las señales de medición están tan estrechamente relacionadas a los sistemas de medición que son prácticamente inseparables; en las consideraciones de señales de medición y sistemas, los siguientes cuatro factores son de la mayor importancia:

- Tipos y características de transductores disponibles para convertir las variables a las señales de medición.
- Las características de transmisión de las señales de medición.

INSTRUMENTACION Y CONTROL INDUSTRIAL

1. INTRODUCCION

- Puede definirse a la instrumentación como el arte o la ciencia de la aplicación de dispositivos de medición o dispositivos de medición y control a un objeto o combinación de objetos (un sistema) con el propósito de determinar la identidad y/o magnitud de ciertas características o variaciones físicas o cantidades químicas, con frecuencia para controlar estas cantidades dentro de limitaciones especificadas.

El diccionario define al control en las siguientes formas: ***“Dominio, mando, autoridad. Limitación. Comprobación, fiscalización, intervención”***. ***Control remoto: “Dispositivo que regula o distancia el funcionamiento de un aparato, mecanismo o sistema”***.

El sujeto o combinación de sujetos (sistema) a los cuales se puede aplicar la instrumentación incluyen:

- Industrias de procesos
- Area militar
- Transporte
- Campo médico

Los sistemas de medición y control existen y son importantes debido a que los procesos, máquinas, equipos y sistemas de que están compuestos las industrias, servicios, comercios, etc., involucran fenómenos que no son de estado estable, sino que comprenden condiciones que están continuamente cambiando.

Las cantidades o características físicas o químicas que son objeto de medición y con frecuencia sujetas a control automático por lo general se conocen como variables e incluyen:

- Temperatura
- Presión
- Flujo
- Nivel
- Dimensión
- Densidad (gravedad específica)
- Velocidad
- Viscosidad
- Humedad

INSTRUMENTACION Y CONTROL INDUSTRIAL

TEMARIO

1. INTRODUCCION

- Definiciones y objetivos de la instrumentación.
- Conceptos básicos de control.

2. FUNCIONES DE LA INSTRUMENTACION

3. CLASES DE INSTRUMENTOS

- Analógicos.
- Binarios

4. VARIABLES Y PRINCIPIOS DE MEDICION

5. SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

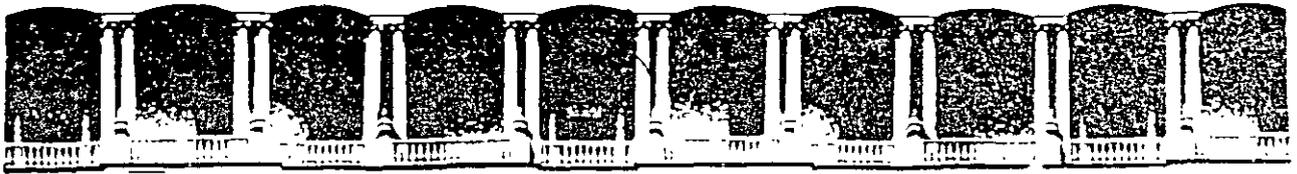
6. CONTROLADORES AUTOMATICOS

7. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

8. CONTROL DE COMBUSTION EN CALDERAS

9. INSTRUMENTACION PARA DIAGNOSTICOS ENERGETICOS

10. INSTRUMENTACION PARA EL CONTROL DE CONTAMINACION



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
INDUSTRIAL**

TEMA:

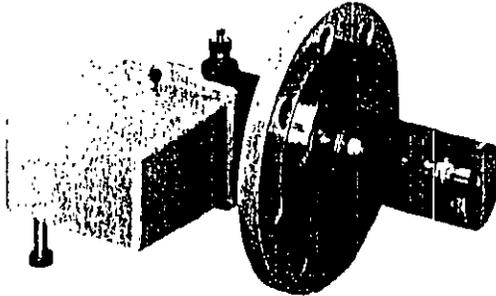
CLASES DE INSTRUMENTOS

**ING. ALFONSO RODRIGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERIA
DICIEMBRE DE 1999.**

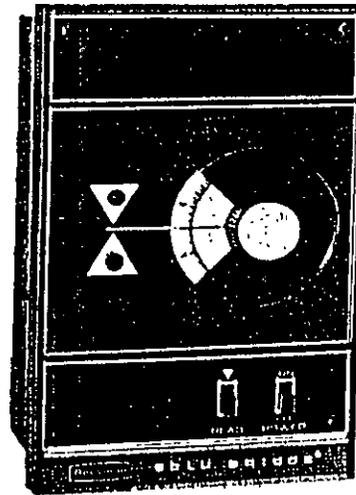
III.- Clases de instrumentos

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones. Se considerarán dos clasificaciones básicas :

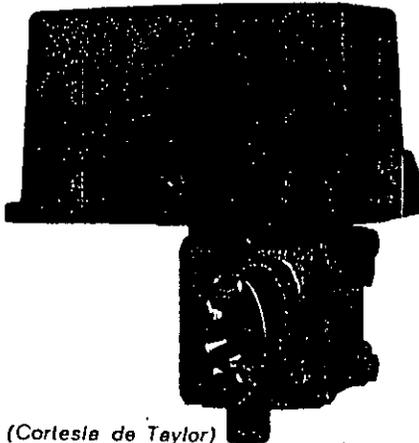
- La primera relacionada con la función del instrumento.
- La segunda con la variable del proceso.



(Cortesía de Siemens)



(Cortesía de Beckman)



(Cortesía de Taylor)

Fig. III.1 Instrumentos ciegos

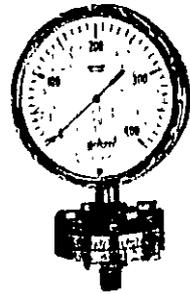
1.- En función del instrumento

De acuerdo con la función del instrumento, se obtienen las formas siguientes :

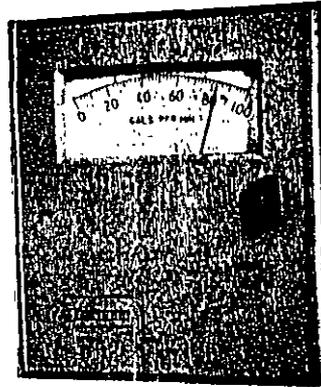
Instrumentos ciegos (fig. III.1), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de flujo, presión, nivel y temperatura sin indicación.

Los *instrumentos indicadores* (fig. III.2) disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en

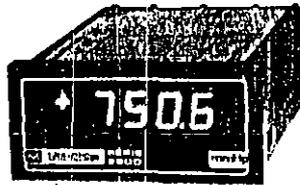
indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.



(Cortesía de Bourdon)



(Cortesía de Foxboro)

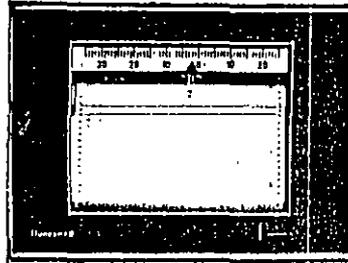


(Cortesía de Desin)

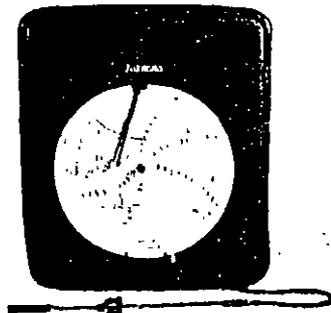
Fig. III.2 Instrumentos indicadores

Los *instrumentos registradores* (fig. III.3) registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfica rectangular o alargado según sea la forma de la gráfica.

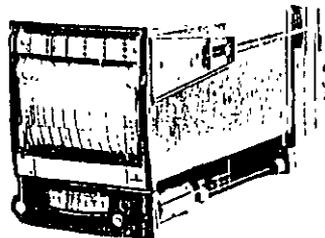
Los registradores de gráfica circular suelen tener la gráfica de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfica rectangular la velocidad normal de la gráfica es de unos 20 mm/hora.



(Cortesía de Leeds & Northrup)



(Cortesía de Foxboro)



(Cortesía de Siemens)

Fig. III.3 Instrumentos registradores

Los *instrumentos primarios* (fig. III.4) están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc. Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

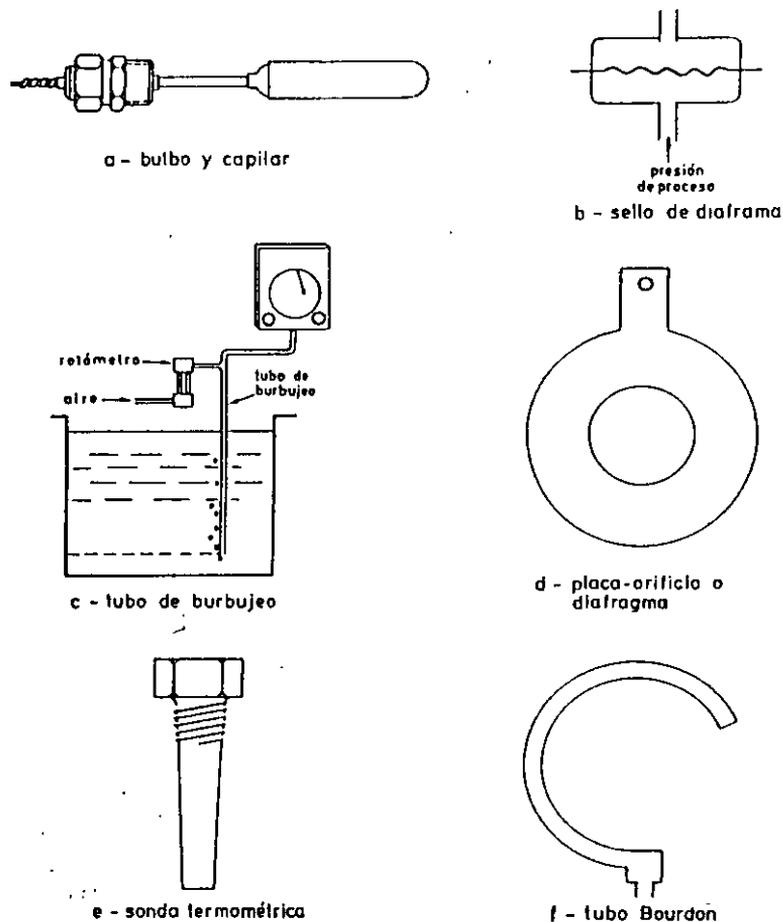


Fig. III.4 Elementos primarios

Los *transmisores* (fig. III.5) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal neumática de 3 a 15 psi equivale a 0,206 - 1,033 bar (0,21-1,05 kg/cm²) por lo cual, también se emplea la señal en unidades métricas 0,2 a 1 bar (0,2 a 1 kg/cm²). Asimismo, se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c., si bien la señal normalizada es de 4-20 mA c.c. La señal utilizada en algunos transmisores inteligentes es pta directamente para computadora.

El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor ; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar y el segundo un transmisor de flujo con la placa orificio como elemento primario.

Los *transductores* reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP/I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP/P (presión de proceso a señal neumática), etc.

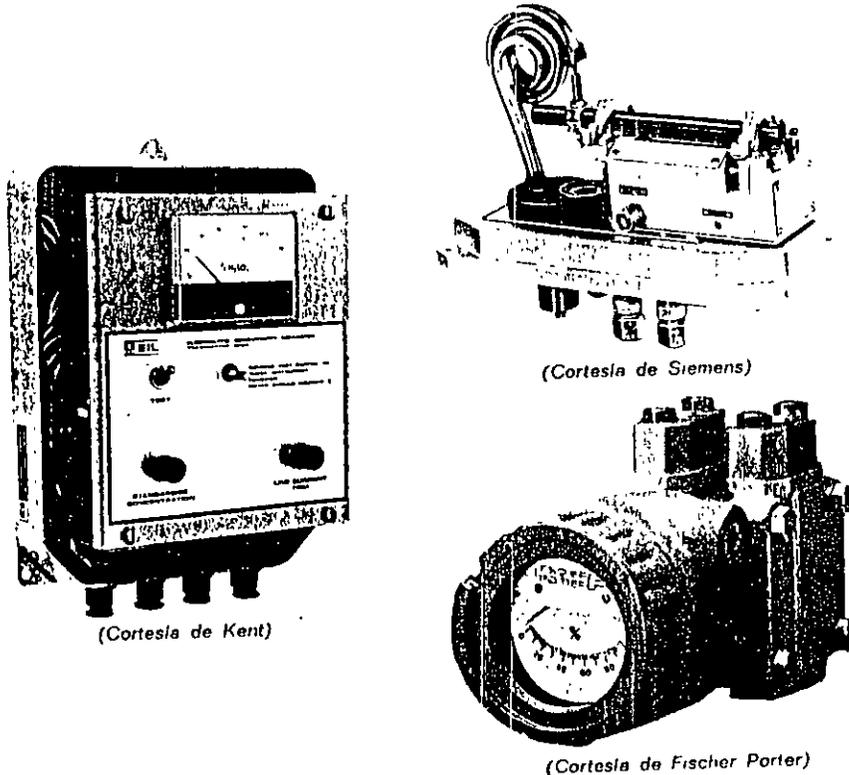
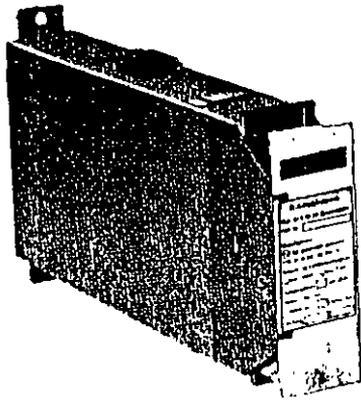


Fig. III.5 Transmisores

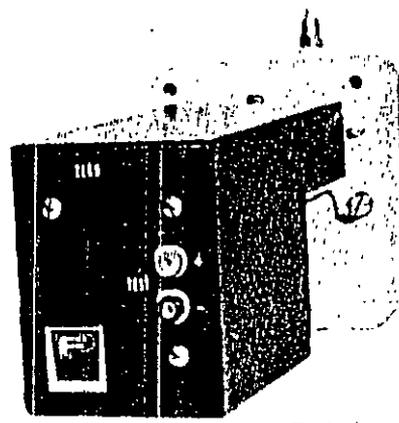
Los *convertidores* (fig. III.6) son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Ejemplo : un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica), un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

A veces se confunde convertidor con transductor. Éste último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.

Los *receptores* reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3-15 psi en señal neumática, o 4-20 mA c.c. en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.



(Cortesía de Eckardt)

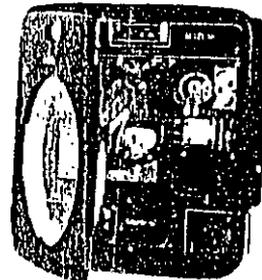
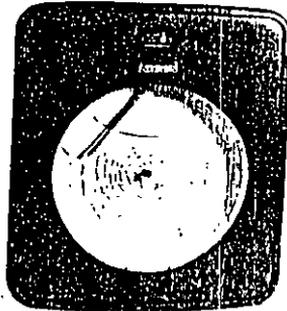


(Cortesía de Fischer Porter)

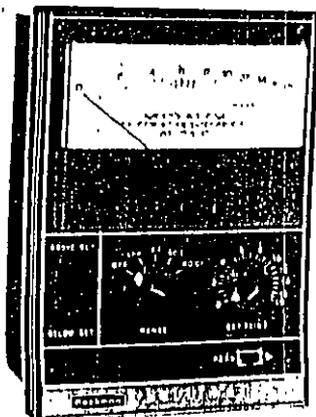
Fig. III-6 Convertidores

Los *controladores* (fig. III-7) compararan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con una valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

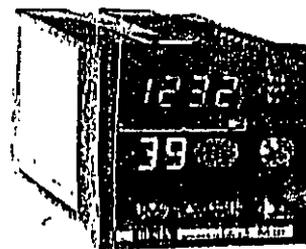
La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor.



(Cortesía de Foxboro)



(Cortesía de Beckman)



(Cortesía de Deshi)

Fig. III.7 Controladores

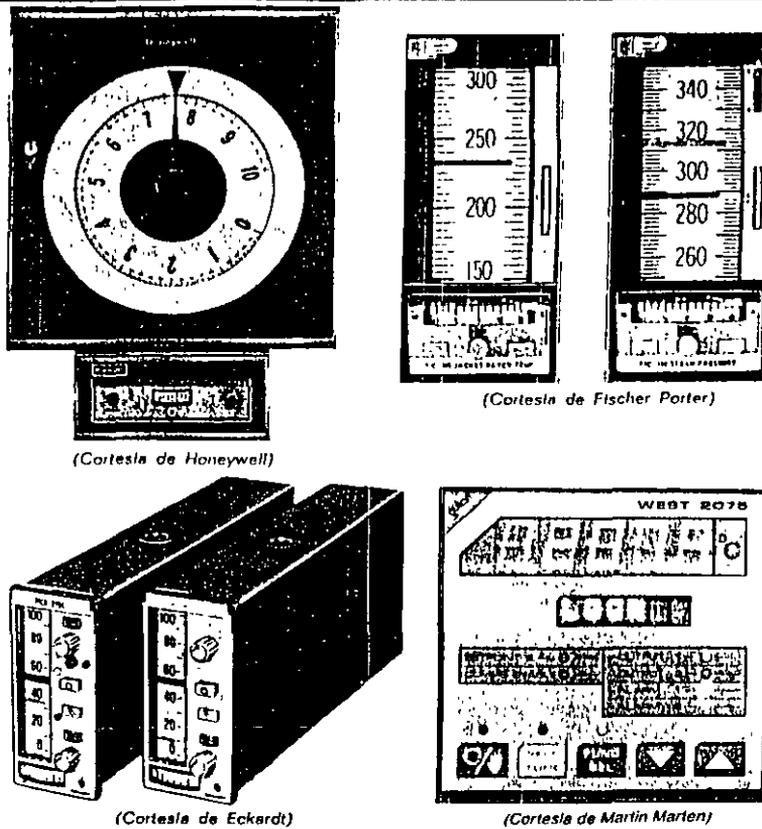


Fig. III.7 Controladores (continuación)

El *elemento final de control* (fig. III.8) recibe la señal del controlador y modifica el flujo del fluido o agente de control. En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 15 psi (0,2-1 bar). En el control electrónico la válvula o el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. o digital a neumática 3-15 psi. En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.

En el control electrónico y en particular en regulación de temperatura de hornos pueden utilizarse rectificadores de silicio (tiristores). Éstos se comportan esencialmente como bobinas de impedancia variable y varían la corriente de alimentación de las resistencias del horno, en la misma forma en que una válvula de control cambia el flujo del fluido en una tubería.

Las señales neumáticas (3-15 psi o 0,2-1 bar o 0,2-1 kg/cm²) y electrónica (4-20 mA c.c.) permiten el intercambio entre instrumentos de la planta. No ocurre así en los instrumentos de señal de salida digital (transmisores, controladores) donde las señales son propias de cada suministrador. No obstante, existe el propósito de normalización, en particular en los sistemas de control distribuido, por parte de firmas de instrumentos de control (Bailey, Foxboro, Honeywell, Rosemount y otros) que 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 automóviles de General Motors, y que permitirá el intercambio de equipos digitales de distintos fabricantes. El

protocolo MAP aplicado al control de procesos debe cumplir con las características de señal de 4-20 mA c.c. y alimentación a los instrumentos a través del mismo para de hilos. Existe un comité internacional de normas IEC-65C que recibe la colaboración de comités ISA SP50, ISA SP72 y EUREKA, y que trabajan también en el campo de normalización de las comunicaciones digitales entre los instrumentos de campo y los sistemas de control.

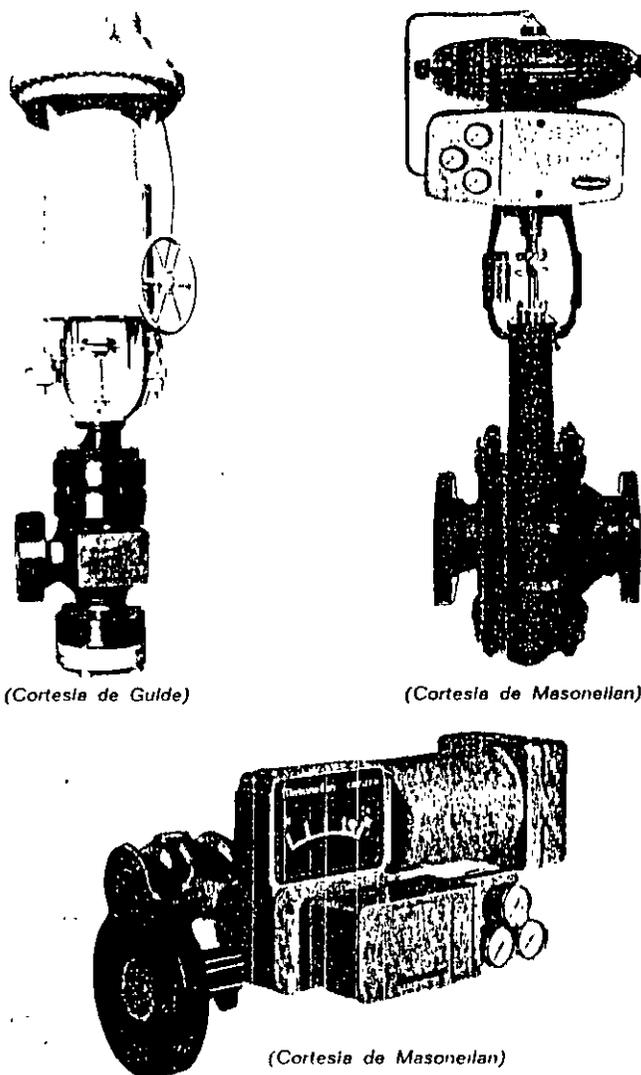


Fig. III.8 Elemento final de control

2.- En función de la variable de proceso

De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de flujo, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este

modo, un transmisor neumático de temperatura del tipo de bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; el aparato receptor de la señal neumática del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser receptor neumático se puede considerar instrumento de presión, flujo, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dinamo.

Asimismo, esta clasificación es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final. Así ocurre en el caso de un transmisor electrónico de nivel de 4 a 20 mA c.c., un receptor controlador con salida de 4-20 mA c.c., un convertidor intensidad-presión (I/P) que transforma la señal de 4-20 mA c.c. a neumática de 3-15 psi y la válvula neumática de control; todos estos instrumentos se consideran de nivel.

En la designación del instrumento se utiliza en el lenguaje común las dos clasificaciones expuestas anteriormente. Y de este modo, se consideran instrumentos tales como transmisores ciegos de presión, controladores registradores de temperatura, receptores indicadores de nivel, receptores controladores registradores de caudal, etc.

En la figura III.9 pueden verse los diversos instrumentos descritos.

Se consideran instrumentos de campo y de panel; la primera designación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, secadores, etc.) mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, armarios o consolas situados en salas aisladas o en zonas del proceso.

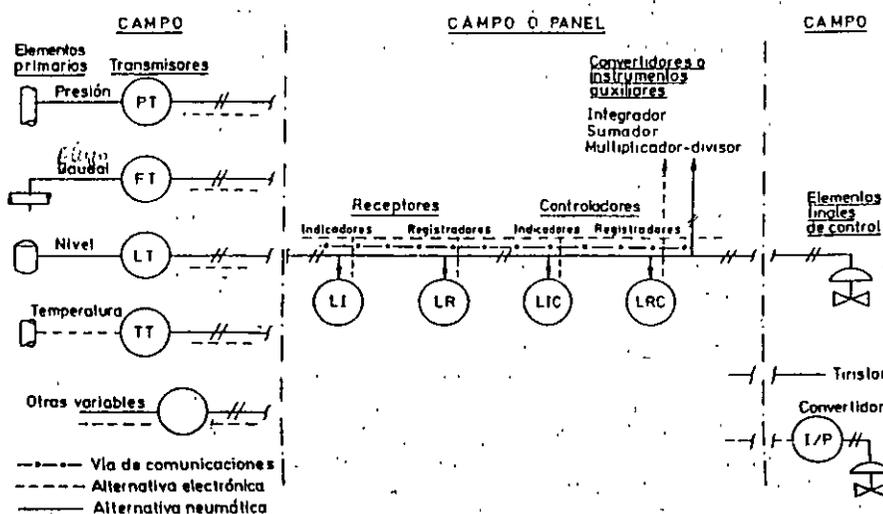


Fig. III.9 Clases de instrumentos

3.- Código de identificación de instrumentos

Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy variadas que a veces varían de industria en industria. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una normalización en este campo. Varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido, y entre ellas se encuentra como una de las importantes la Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos, ISA (Instrument Society of America) cuyas normas tienen por objeto establecer sistemas de designación (código y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímicas, aire acondicionado, etc.

Figura a continuación un resumen de las normas ISA-S5.1 de ANSI/ISA 1984, anteriormente ANSI Y32.20, sobre instrumentación de medición y control, de ISA-S5.2 Binary Logic Diagrams for Process Operations 1973 sobre símbolos de operaciones binarias de procesos, y de ISA-S5.3 Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems 1982, sobre símbolos de sistemas de microprocesadores con control compartido. Estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria.

Resumen Norma ISA-S5.1

Generalidades

A) Cada instrumento debe identificarse con sistema de letras que lo clasifique funcionalmente. Una identificación representativa es la siguiente :

TRC		2 A	
Primera letra	Letras sucesivas	Número de anillo	Sufijo (no se usa normalmente)
Identificación funcional		Identificación del anillo	

B) El número de letras funcionales para un instrumento debe ser mínimo, no excediendo de cuatro. Para ello conviene :

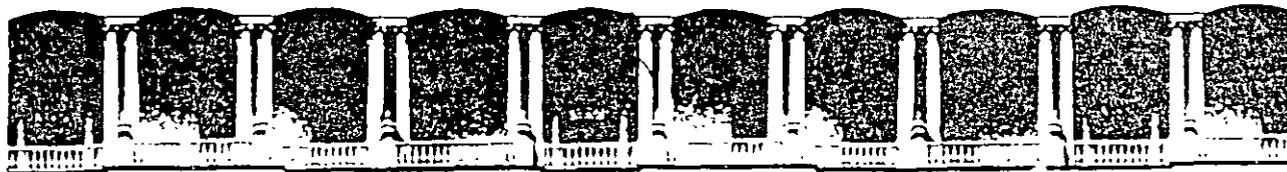
- a) Disponer las letras en subgrupos. Por ejemplo, un transmisor registrador de relación de flujo con un interruptor de alarma de relación de flujo puede identificarse con dos círculos uno con FFRT-3 y el otro FFS-3.
- b) En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra I (indicación).
- c) Los anillos de instrumentos de un proyecto o secciones de un proyecto deben identificarse con una secuencia única de números.

Ésta puede empezar con el número 1 o cualquier otro número conveniente, tal como 301 o 1201 que puede incorporar información codificada como área de planta.

d) Si un anillo dado tiene más de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo, ejemplo FV-2A, FV-2B, FV-2C, etc., o TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etc. Estos sufijos pueden añadirse obedeciendo a las siguientes reglas :

- Deben emplearse letras mayúsculas, A, B, C, etc.
- En un instrumento tal como un registrador de temperatura multipunto que imprime números para identificación de los puntos, los elementos primarios numerarse TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etc.
- Las subdivisiones interiores de un anillo pueden designarse por sufijos formados por letras y números.
- Un instrumento que realiza dos o más funciones puede designarse por todas sus funciones. Por ejemplo, un registrador de flujo FR-2 con pluma de presión PR-4 se designa preferentemente FR-2/PR-4 o bien UR-7 ; un registrador de presión de dos plumas como PR-7/8 ; y una ventana de alarma para temperatura alta y baja como TAH/L-9.
- Los accesorios para instrumentos tales como rotámetros de purga, explícitamente en un diagrama de flujo, pero que necesitan una identificación para otros usos deben tenerla de acuerdo con su función y deben emplear el mismo número de identificación que el de sus instrumentos asociados, pero con palabras aclaratorias si ello es necesario.

Por consiguiente, una brida para una placa-orificio FE-7 debe designarse como FX-7 o bien como FE-7 brida. Un rotámetro regulador de purga asociado con un manómetro PI-8 debe identificarse como FICV-8, pero puede también marcarse PI-8 purga. Una sonda empleada con un termómetro TI-9 será TW-9, o bien, TI-9 sonda.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

TEMA:

VARIABLES Y PRINCIPIOS DE LA MEDICIÓN

ING. ALFONSO RODRIGUEZ NAVIDAD

PALACIO DE MINERIA

DICIEMBRE DE 1999.

IV.- Variables y principios de medición

1. Medidas de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como kg/cm^2 , psi (libras por pulgada cuadrada), bar, atmósferas y pascal (newton por metro cuadrado = N/m^2). En la tabla 4.1 figuran las equivalencias entre estas unidades.

TABLA 4.1 Unidades de presión

	Psi	Pulgada c. de agua	Pulgada c. en Hg	Atmósfera	kg/cm^2	cm c. de a.	mm c. de Hg	Bar	Pa
Psi	1	27,68	2,036	0,0680	0,0703	70,31	51,72	0,0689	7142
Pulgada c. de a.	0,0361	1	0,0735	0,0024	0,0025	2,540	1,868	0,0024	256,4
Pulgada c. de Hg	4,4912	13,6	1	0,0334	0,0345	34,53	25,4	0,0333	3448
Atmósfera	14,7	406,79	29,92	1	1,033	1033	760	1,0131	$1,01 \times 10^5$
kg/cm^2	14,22	393,7	28,96	0,9678	1	1000	735,6	0,98	98100
cm c. de a.	0,0142	0,3937	0,0289	0,00096	0,0010	1	0,7355	0,0009	100
mm c. de Hg	0,0193	0,5353	0,0393	0,0013	0,0013	0,0013	1	0,00133	133
Bar	14,5	408	29,99	0,987	1,02	1024	750	1	10^5
Pa	0,00014	0,0039	0,00029	$0,987 \times 10^{-5}$	$0,102 \times 10^{-4}$	0,01	0,0075	10^{-5}	1

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la figura IV.1 se indican las clases de presión que los instrumentos miden comúnmente en la industria.

Los términos empleados son los siguientes :

Presión absoluta medida con relación al cero absoluto (puntos A y A' de la figura).

Instrumentos industriales. Su ajuste y calibración.

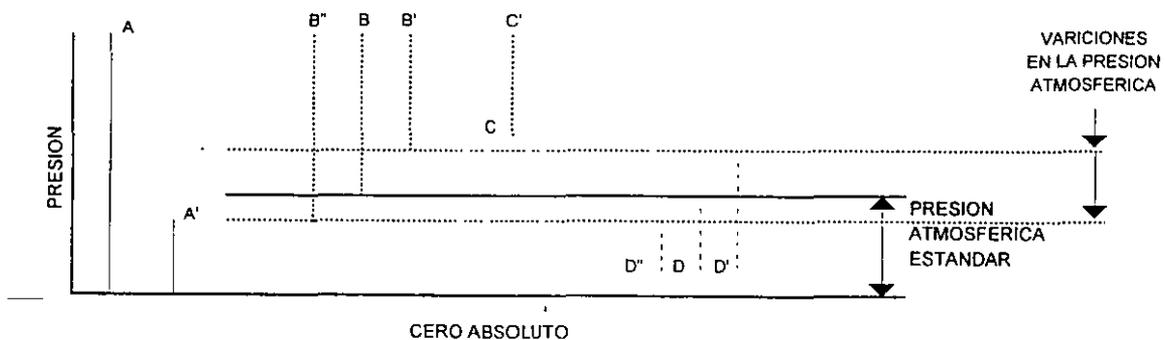


Fig. IV.1 Clases de presión

Presión atmosférica que es la ejercida por la atmósfera terrestre. A nivel del mar equivale a 760 mm (29,9 pulgadas) de mercurio absolutos o 14,7 psia (libras por pulgada cuadrada absolutas), valores que definen la denominada atmósfera estándar.

Presión relativa, que es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición (puntos B de la figura).

Presión diferencial, que es la diferencia entre dos presiones, puntos C y C'.

Vacío, que es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica (punto D).

TABLA IV.2 Elementos mecánicos

		Campo de medida	Presión en % de toda la escala	Temperatura máxima de servicio	Presión estática máxima	
Medida directa	Barómetro cubeta 	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar	
	Tubo en U 	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %	↓ 90°C ↓	10 bar	
	Tubo inclinado 	0,01-1,2 m cda	↓		↓	100-600 bar
	Toro pendular 	0,5-10 m cda			Atmosférica	
	Manómetro campana 	0,005-1 m cda			6000 bar	
Tubo Bourdon 	0,5-6000 bar	2500 bar				
Elásticos	Espiral 	0,5-2500 bar		↓	↓	500 bar
	Helicoidal 	0,5-5000 bar	2 bar			
	Diafragma 	50 mm cda-2 bar	↓			
	Fuelle 	100 mm cda-2 bar	Atmosférica			
	Presión absoluta 	6-760 mm Hg abs	1%			Ambiente
Sello volumétrico 	3-600 bar	0,5-1 %	400°C	600 bar		

TABLA IV.3 Transductores electromecánicos

	Margen en bar	Presión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobrecarga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150%	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0,300	1	Mala	150%	80	Variac res	0 Res. total	0,7-3 %	0,25 %	Alta
Magnéticos		0,5	Media	150%	150	0-5 V	2 $\kappa\Omega$	0,9-2,3 %	Continua	
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media	150%		150	0-5 V	2 $\kappa\Omega$	0,6-2,4 %	Alta
		1	Media a buena	150%	5 $\kappa\Omega$		0,5-1,9 %	Media		
Galgas extensométricas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	200%	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta	
		1	Mala		107	2-10 V	350 Ω	0,4-1%		
	0-2 a 0-600	0,1-0,3	Muy buena	200%	107		600 Ω		0,4-1%	Despreciable
Piezoeléctricos	0 1-600	1	Mala	200%	90	600 mV/kg/cm ²	1000 M Ω	1-4,8 %	1/5000	Baja

Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: mecánicos, neumáticos (ya estudiados), electromecánicos y electrónicos. En la figura IV.2 y en las tablas IV.2, IV.3 y IV.4 pueden verse las características resumidas de estos tipos de instrumentos.

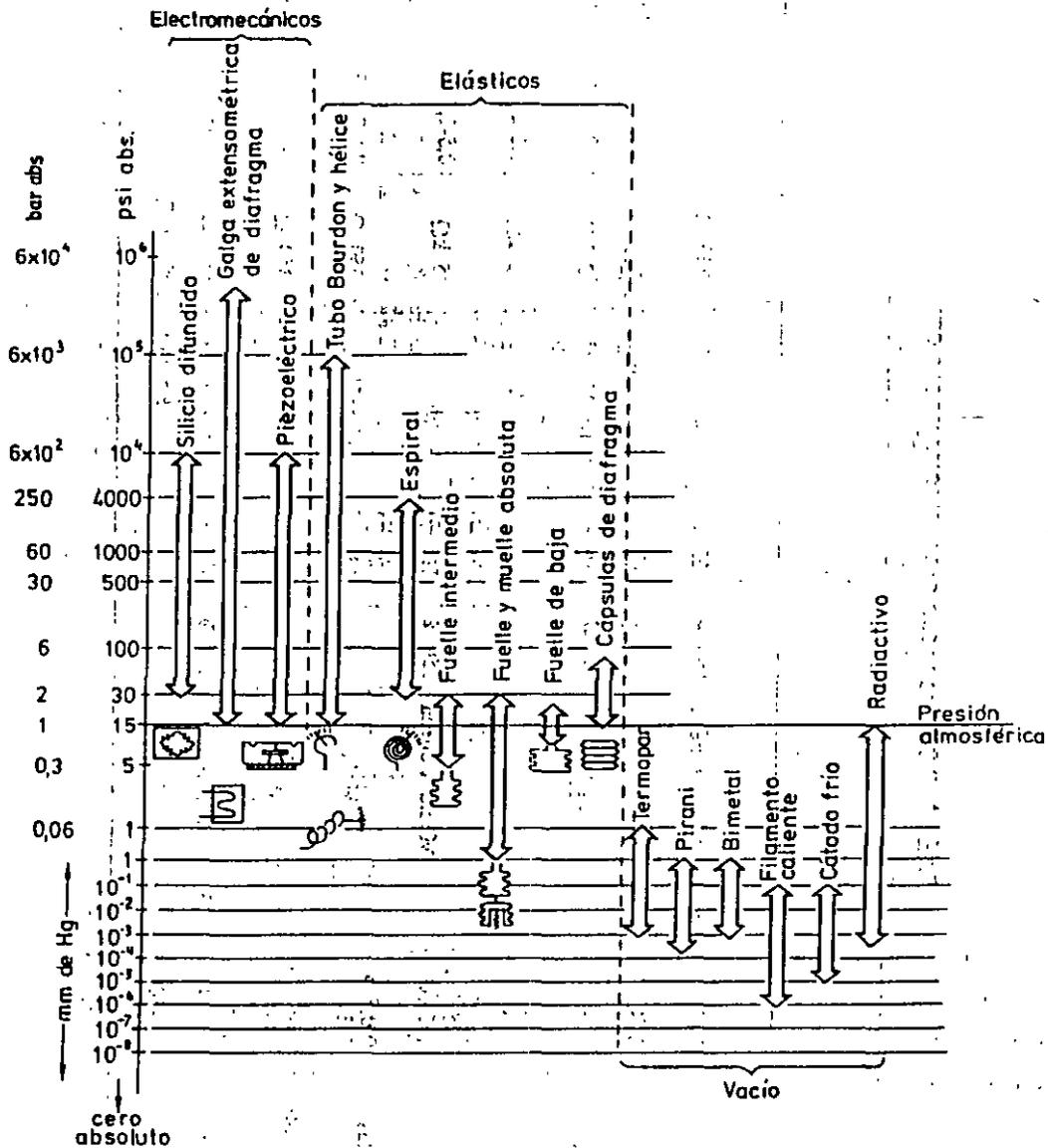


Fig. IV.2 Instrumentos de presión y su campo de aplicación.

2. Medidas de flujo

Existen varios métodos para medir el flujo según se adopte el modo volumétrico o másico. Entre los más importantes figuran los siguientes :

TABLA IV.4 Transductores electrónicos de vacío

	Margen (torrs)	Escala	Precisión
Mecánicos (Fuelle y diafragma)	760-5	Lineal	1%
McLeod (comprime una muestra del gas y por la ley de Boyle-Mariotte deduce el vacío)	5-10 ⁻⁵	↓ Logarítmica	1-10% lectura
Térmicos { Termopar Pirani Bimetal	0,5-10 ⁻³ 2-10 ⁻³ 1-10 ⁻³		Alta
(Proporcionalidad entre la energía disipada por un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente)		↓ Lineal	
Ionización { Filamento caliente Cátodo frío Radiación	10 ⁻³ - 10 ⁻¹¹ 10 ⁻² - 10 ⁻⁷ 760-10 ⁴		
(Formación de iones cuya velocidad [corriente iónica] varía directamente con la presión)			

IV.2.1 Medidores volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el flujo en volumen del fluido, bien sea indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida y torbellino), bien sea directamente (desplazamiento).

IV.2.1.1 Presión diferencial

La fórmula simplificada del flujo obtenido con estos elementos (fig. IV.3) es :

$$Q_v = k \sqrt{H}$$

en la H es la diferencia de alturas de presión del fluido o presión diferencial y k es una constante que depende de los diámetros de la placa y de la tubería, de las rugosidades de la tubería, etc.

En la fórmula anterior puede verse que los valores del flujo son proporcionales a la raíz cuadrada de la presión diferencial. La correspondencia entre estas unidades es útil desde el punto de vista de calibración y puede verse en la tabla IV.5.

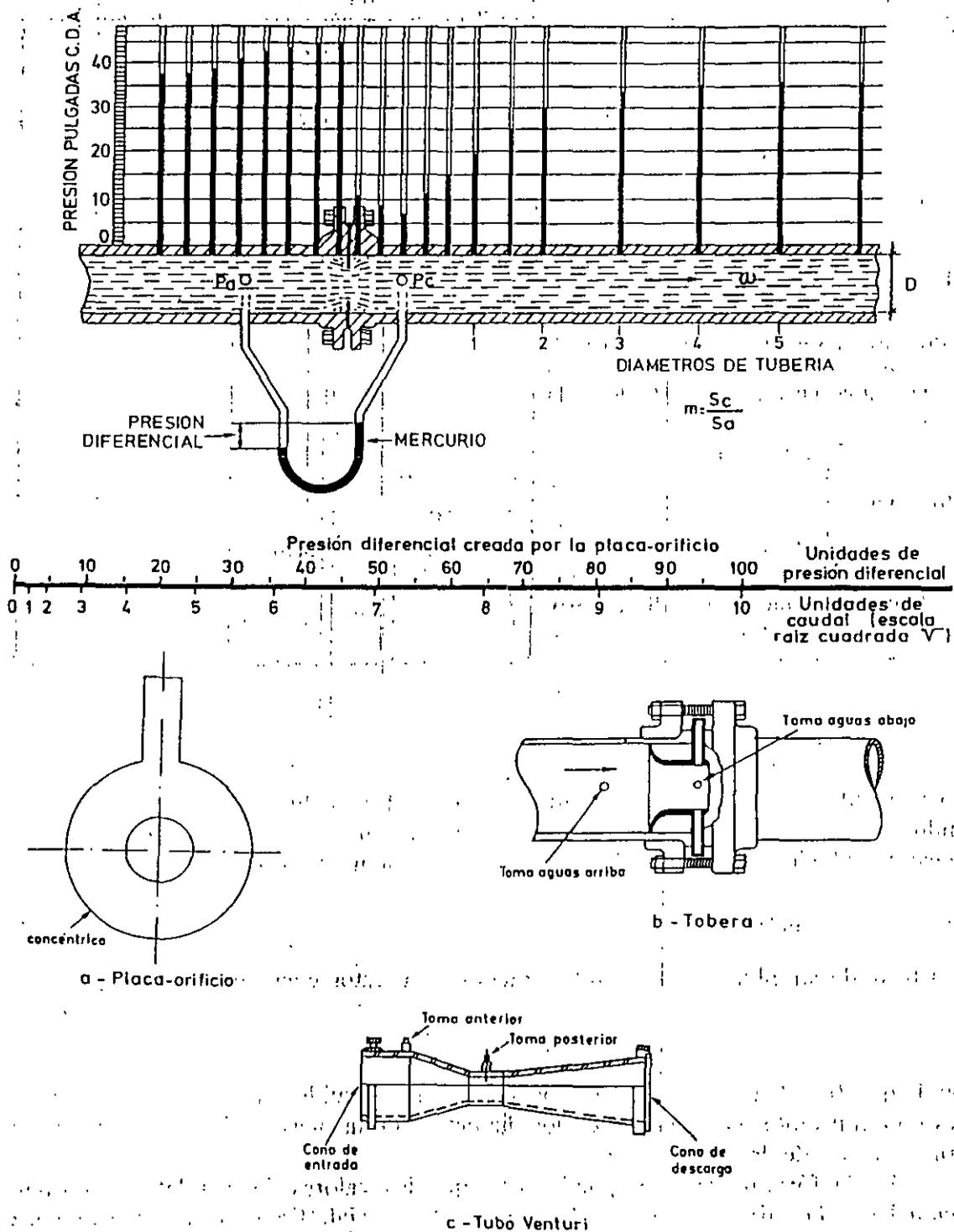


Fig. IV.3 Elementos de presión diferencial

TABLA IV.5 Relaciones entre la presión diferencial y el flujo

Presión diferencial (lineal)	Caudal (escala)		Señales de presión diferencial			Lectura en escala	
			0,2-1 bar	3-15 psi	4-20 mA	0-100	0-10
0	0	0	0,2	3	4	0	0
1	1	10					
4	2	20					
9	3	30					
10	3,2	32	0,208	3,12	4,16	10	1
16	4	40					
20	4,5	45	0,232	3,48	4,64	20	2
25	5	50	0,25	3,75	5	25	2,5
30	5,5	55	0,272	4,08	5,44	30	3
36	6	60					
40	6,3	63	0,328	4,92	6,56	40	4
49	7	70					
50	7,1	71	0,4	6	8	50	5
60	7,7	77	0,488	7,32	9,76	60	6
64	8	80					
70	8,4	84	5,592	8,88	11,84	70	7
75	8,7	87	0,65	9,75	13	75	7,5
80	8,9	89	0,712	10,68	14,24	80	8
81	9	90					
90	9,5	95	0,848	12,72	16,96	90	9
100	10	100	1	15	20	100	10

Los valores en cursiva son los más utilizados en calibración

Para el cálculo de los diafragmas, toberas y tubos Venturi se utilizan las normas ISO, AFNOR, ASME, AGA, DIN, BS, UNI que indican las pérdidas de carga de los elementos y las condiciones de instalación en tramos rectos de las tuberías con distancias mínimas a codos, etc.

El tubo Pitot y el tubo Annubar miden la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad (fig. IV.4).

La presión diferencial puede medirse con un tubo en U de mercurio o de agua o transmitirse con los instrumentos llamados convertidores o transmisores diferenciales. Pueden verse en la figura IV.5.

Las maniobras que se realizan en la puesta en marcha de estos transmisores de fuelle (fig. IV.5 a) y de diafragma (fig. IV.5 b) son las siguientes : (fig. IV.5 c).

1. Válvulas A, B y C cerradas.
2. Se abre la válvula C (de este modo en la fase siguiente, aunque se abra una válvula antes que otra, el instrumento tendrá presiones iguales en las dos cámaras).

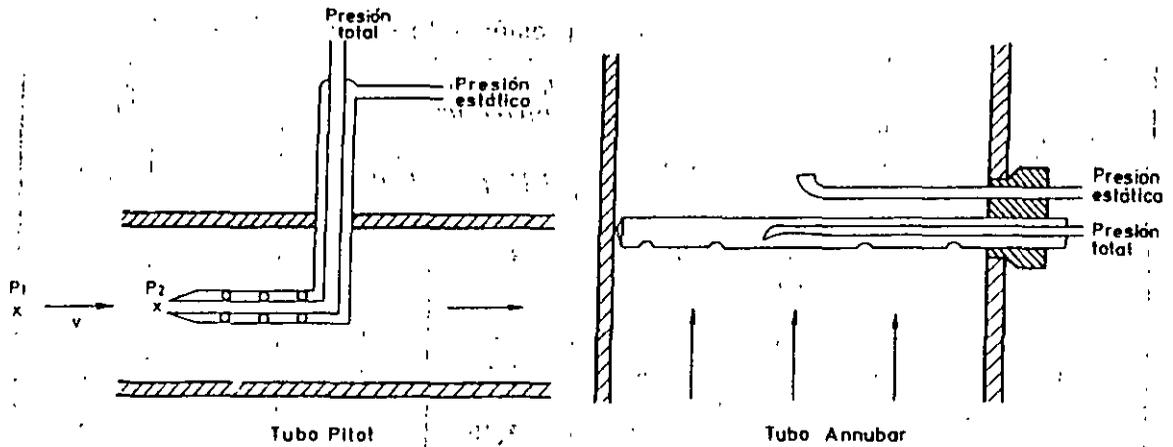


Fig. 3.4 Tubos Pitot y Annubar.

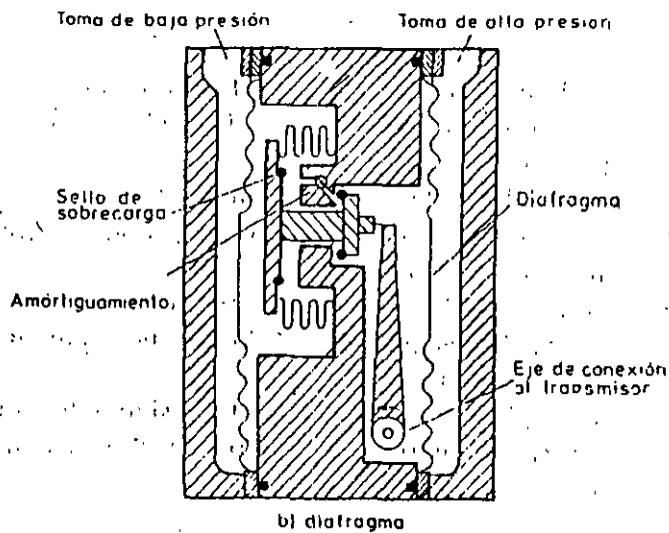
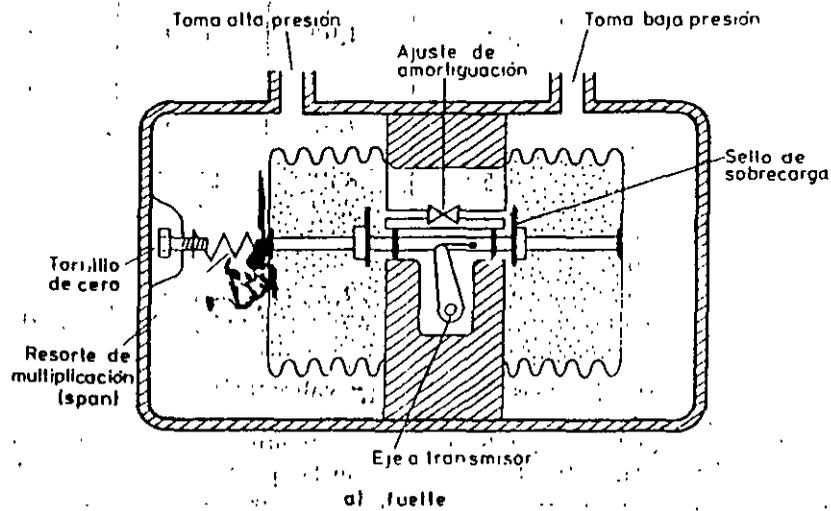


Fig. IV.5 b Transmisores de presión diferencial

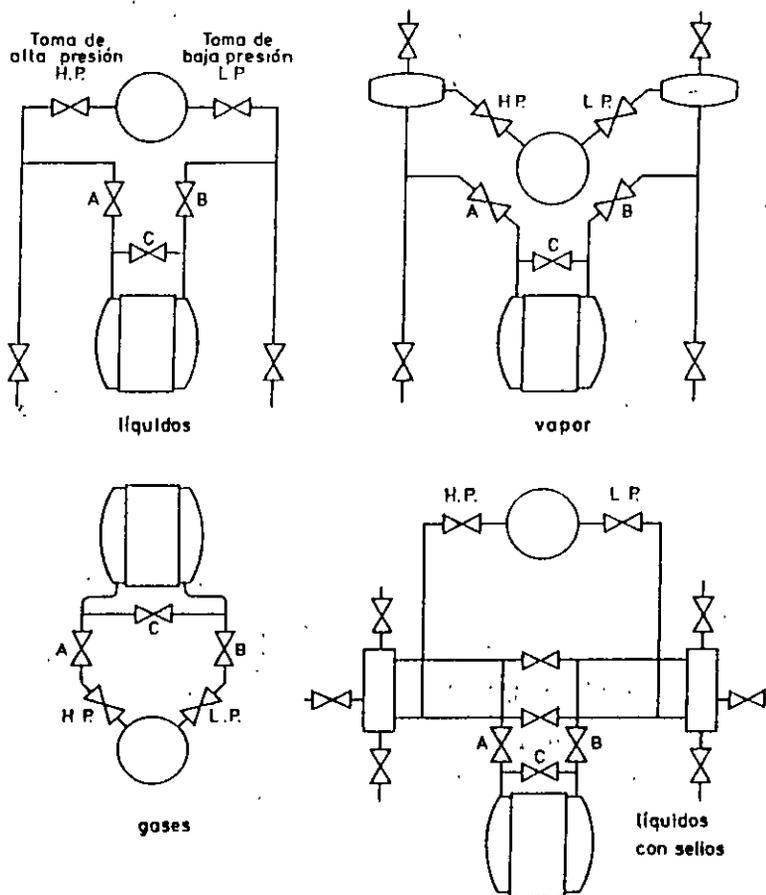


Fig. IV.5 c Conexiones entre el elemento y el transmisor de presión diferencial.

3. Se abren simultáneamente las válvulas A y B.
4. Se cierra la válvula C.

En caso de medición de caudal de vapor se habrán llenado primero con agua las cámaras de condensación.

Las maniobras requeridas para aislar el instrumento del proceso son las siguientes :

1. Se abre la válvula
2. Se cierran las válvulas A y B

IV.2.1.2 Area variable

Los *rotámetros* medidores de caudal de área variable en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo proporcionalmente al flujo del fluido.

IV.2.1.3 Velocidad

Es la medición del flujo en canales abiertos se utilizan *vertederos* que provocan una diferencia de alturas del líquido en el canal entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo (fig. IV.7).

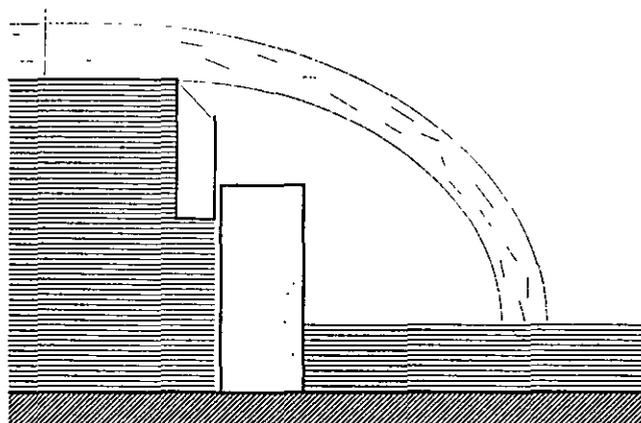


Fig. IV.7 Vertedero

Esta diferencia de alturas H se mide mediante un instrumento de flotador o de burbujeo.

El caudal es proporcional a esta diferencia de alturas según la fórmula.

$$Q = K l H^n$$

en la que

- Q = caudal en m^3/s ;
- K = constante que depende del tipo de vertedero ;
- l = anchura de la garganta del vertedero en m ;
- H = diferencia de alturas en m ;
- n = exponente que depende del tipo de vertedero

Los medidores de *turbina* consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. Esta velocidad se transmite a un captor de reluctancia o inductivo que genera una frecuencia proporcional al caudal la que se transmite a un convertidor indicador o totalizador.

Los transductores de *ultrasonidos* miden el flujo por diferencia de velocidades del sonido al propagarse éste en el sentido del flujo del fluido y en el sentido contrario (fig. IV.9). Se utilizan transductores piezoeléctricos tanto para la emisión como para la recepción de ondas ultrasónicas.

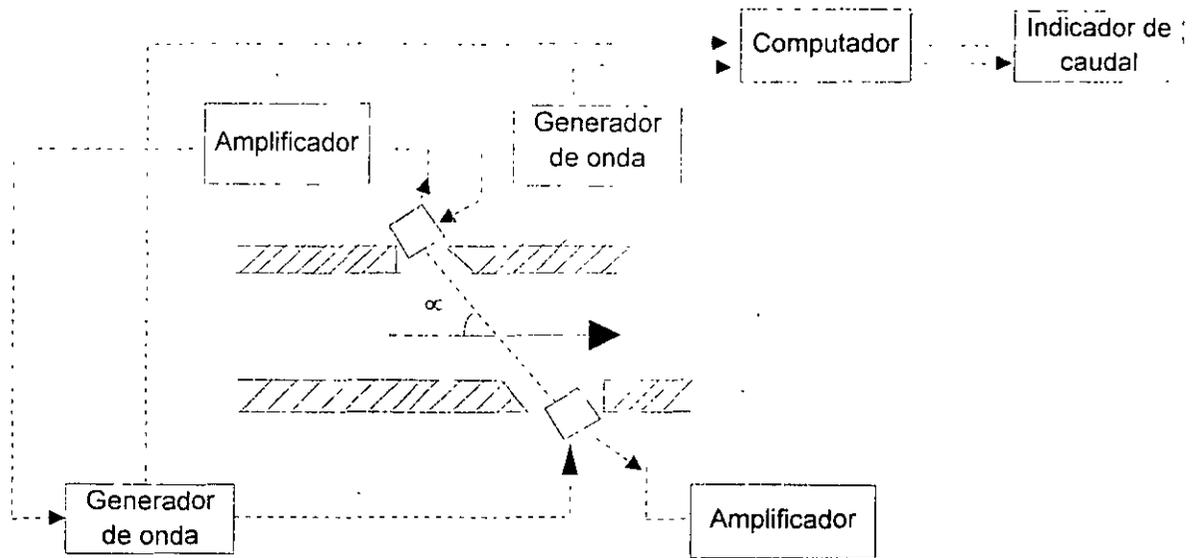


Fig. IV.9 Medidor de ultrasonidos

IV.2.1.4 Fuerza

El medidor de placa (fig. IV.10) consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje del fluido. La fuerza originada es proporcional a la energía cinética del fluido (que es proporcional al cuadrado de la velocidad) y es transmitida por un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas o por un transductor eléctrico de galgas extensométricas (puente de Wheatstone).

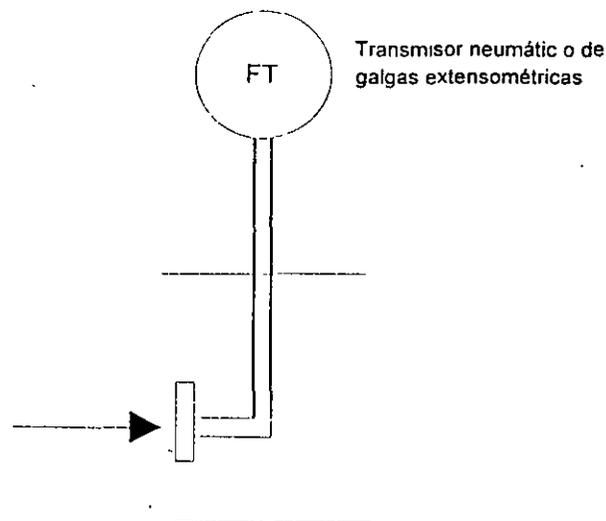


Fig. IV.10 Medidor de placa

IV.2.1.5 Tensión inducida

El medidor *magnético* de caudal (fig. 3.11 funciona según la ley de Faraday que establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor, el moverse éste perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor. La fórmula correspondiente es :

$$E_s = K B l v \text{ y el caudal } Q = K \frac{E_s}{B} \cdot D$$

siendo :

E_s	=	tensión generada en el conductor
K	=	constante
B	=	densidad del campo magnético
l	=	longitud del conductor (diámetro de la tubería)
v	=	velocidad del movimiento (la del fluido)

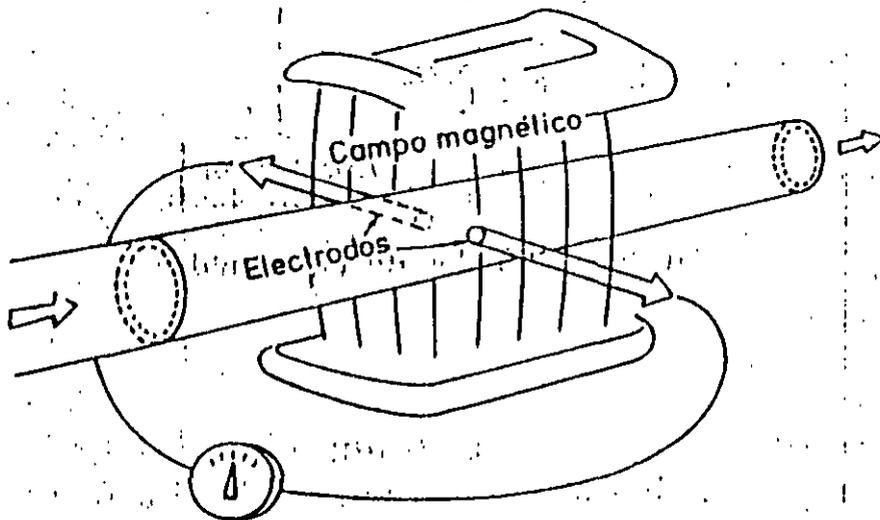


Fig. IV.11 Medidor magnético de caudal

El sistema es independiente de la conductividad del líquido, pero debe tener un valor mínimo de unos 5 micromhos por cm (con circuitos especiales se llega a 0,1 micromhos/cm). De aquí que no puede emplearse en gases ya que su conductividad es muy baja.

IV.3 Medidas de nivel

IV.3.1. Medidores de nivel de líquidos

Los medidores de nivel de líquidos se clasifican en :

Instrumentos de *medida directa* : sonda, cinta y plomada, nivel de cristal y de flotador (fig. IV.23)

Instrumentos basados en la presión hidrostática, que miden la presión hidrostática ejercida por el líquido de altura h comprendida entre el nivel del tanque y el eje del instrumento (fig. IV. 24). Esta presión equivale a :

$$\frac{h \cdot \gamma}{10} \text{ kg/cm}^2$$

siendo h la altura del líquido en m.

y el peso específico del líquido en g/cm³.

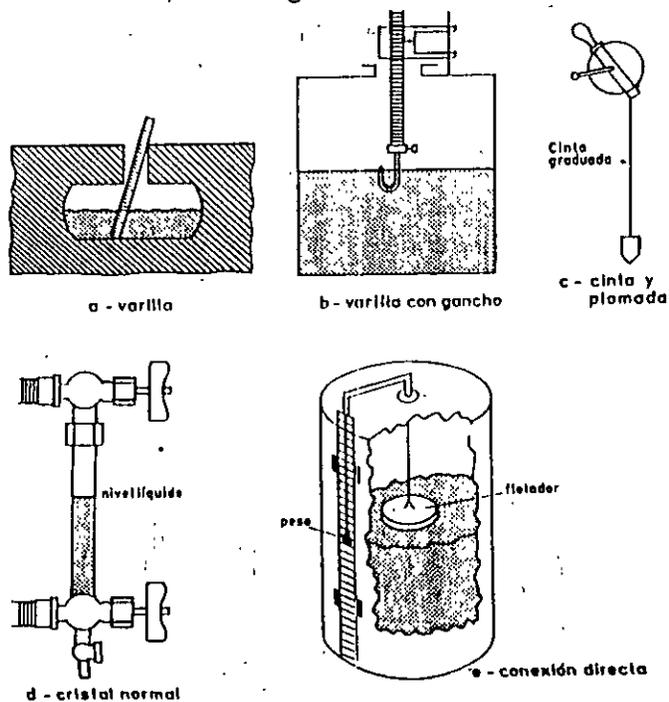


Fig. IV.23 Instrumentos de medida directa de nivel

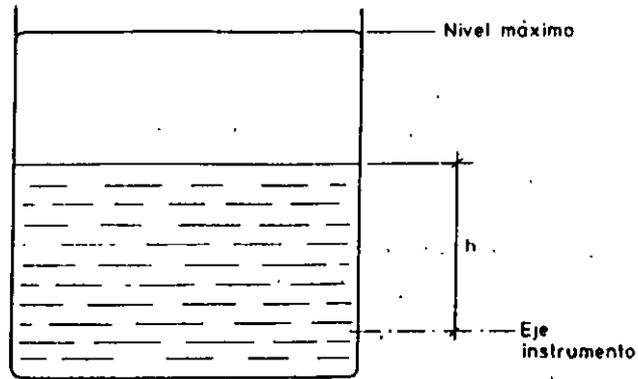


Fig. IV.24 Presión hidrostática

Entre estos instrumentos se encuentran el medidor manométrico, el medidor de membrana, el medidor de tipo burbujeo, y el medidor de presión diferencial (en el que se incluye el de diafragma) que pueden verse en la figura IV.25

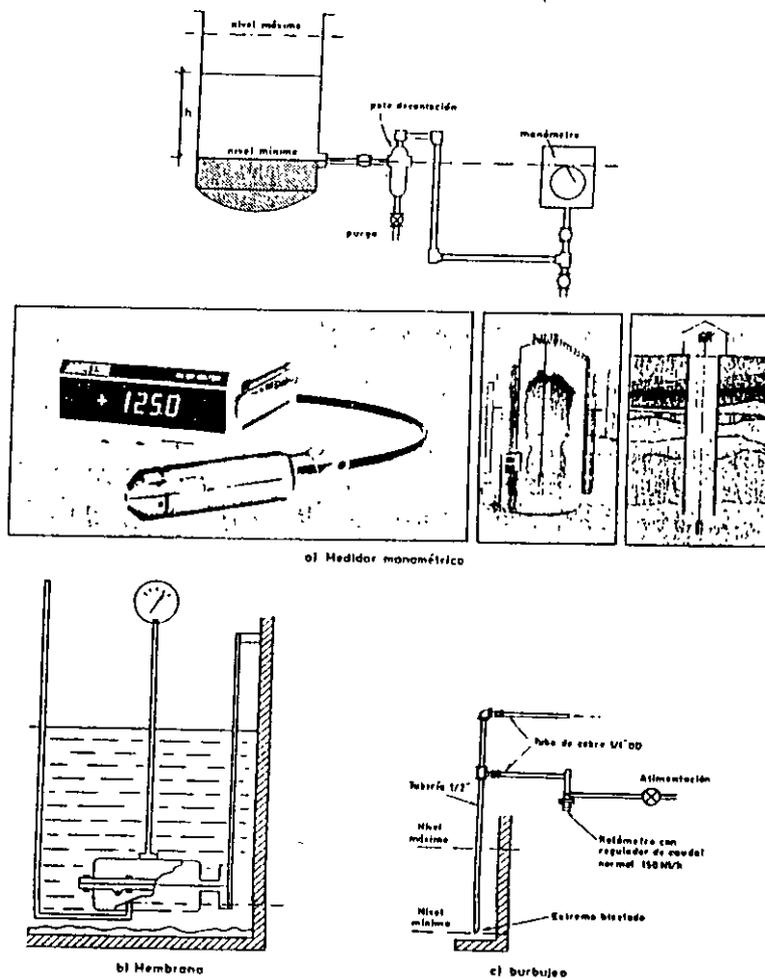


Fig. IV.25 Instrumentos de nivel de presión hidrostática

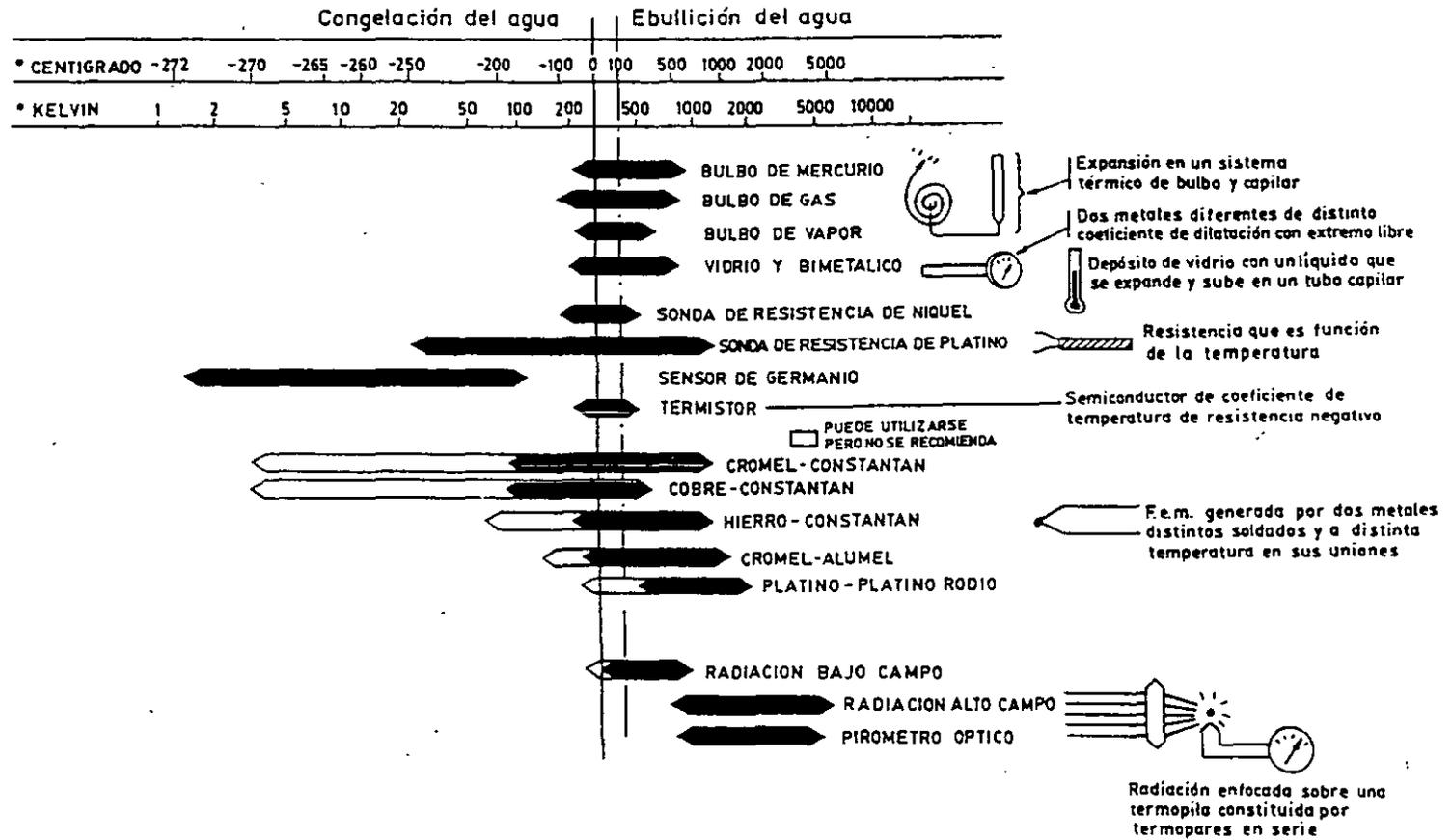


Fig. IV.31 Instrumentos de temperatura

IV.4 Medida de temperatura

IV.4.1 Generalidades

La medida de temperatura constituye una de las más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales.

Los instrumentos de temperatura empleados más comúnmente son los siguientes: termómetro de vidrio, termómetros bimetalicos, elementos primarios de bulbo y capilar rellenos de líquido, gas o vapor, termopares, termómetros de resistencia y pirómetros de radiación.

En la figura IV.31 pueden verse los instrumentos de temperatura con una breve descripción de su funcionamiento y su intervalo de medida.

IV.4.2 Termómetros de resistencia

Los termómetros de resistencia contienen un arrollamiento de un hilo muy fino del conductor adecuado protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado «coeficiente de temperatura de resistencia» que expresa, a una temperatura especificada, la variación de resistencia en ohmios del conductos por cada grado que cambia su temperatura.

Los materiales que pueden emplearse son platino, níquel y cobre, siendo el primero el más adecuado por su precisión y su estabilidad.

La variación de resistencia de las sondas se mide con un puente de Wheatstone dispuesto en montajes denominados de dos hilos y de tres hilos según sea el número de hilos de conexión a la resistencia (fig. IV.32)

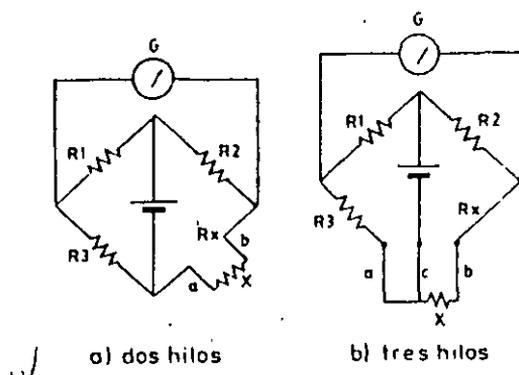
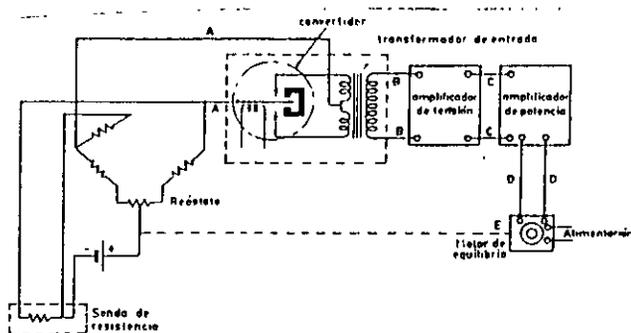


Fig. IV.32 Tipos de circuitos de puente de Wheatstone a sondas de resistencia.

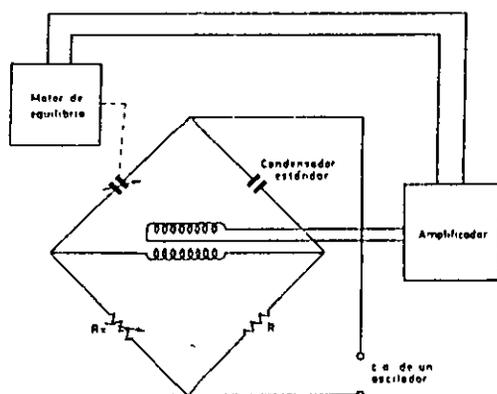
En el montaje de dos hilos la resistencia de los hilos a y b de conexión de la sonda al puente varía cuando cambia la temperatura y esta variación falsea, por tanto, la indicación ; de aquí que su utilización está limitada a resistencias moderadas del hilo de conexión y cuando no es necesario que la lectura sea muy exacta.

En el montaje de tres hilos, que es el más utilizado en la práctica, la medida no es afectada ni por la longitud de los conductores ni por la temperatura, ya que ésta influye a la vez en dos brazos adyacentes del puente, siendo la única condición que la resistencia de los hilos a y b sea exactamente la misma.

La medición automática de la resistencia y por lo tanto de la temperatura se lleva a cabo mediante instrumentos autoequilibrados que utilizan un circuito de puente de Wheatstone (fig. IV.33 a). Si el puente está desequilibrado, la señal de error en AA es convertida a una tensión alterna BB que es amplificada en tensión CC y potencia DD para excitar el motor de equilibrio E. Éste mueve el brazo móvil del reóstato para equilibrar el puente actuando simultáneamente sobre los mecanismos asociados de indicación, registro y control. Otros instrumentos utilizan un puente de capacidades, de funcionamiento análogo al del puente de Wheatstone (fig. IV.33 b). La edición de un microprocesador a la sonda de resistencia permite obtener un transmisor inteligente con la posibilidad del cambio automático del sensor o del campo de medida, la obtención por hardware o software de puentes de Wheatstone o de capacidades de diferentes características, etc.



a) Puente de Wheatstone para sonda de resistencia



b) Puente de capacidades para sonda de resistencia

Fig. IV.33 Circuitos autoequilibrados de medida de temperatura por sonda de resistencia

Para determinar otros valores de la f.e.m. cuando la temperatura de la unión de referencia es distinta de 0°C se hace uso de la llamada «ley de las temperaturas sucesivas» que indica que la f.e.m. generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas T_1 y T_3 es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a T_1 y T_2 y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas T_2 y T_3 . Es decir, a temperaturas superiores e inferiores a 0°C la f.e.m. será inferior y superior respectivamente a la f.e.m. de las tablas referida a 0°C.

Cuando el termopar está instalado a gran distancia del instrumento, se le conecta por medio de un cable de extensión. Éste es un conductor más económico y sus propiedades eléctricas son similares a las del termopar hasta ciertos límites de temperatura (0-200°C), utilizándose los siguientes :

- Conductores tipo J para termopares tipo J
- Conductores tipo K o tipo T para termopares tipo K
- Conductores tipo T para termopares tipo T
- Conductores cobre-cobre níquel para termopares tipo R o S.

Para medir la f.e.m. del termopar pueden emplearse el circuito galvanométrico y el circuito potenciométrico.

IV.4.4 Pirómetros de radiación

Los pirómetros de radiación se fundan en la ley de Stefan-Boltzman que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, es decir, $W=KT^4$.

Los Pirómetros de radiación pueden medir la temperatura de un cuerpo a distancia en función de la radiación luminosa (0,45 micras para el violeta hasta 0,70 micras para el rojo) que éste emite, y se denominan pirómetros ópticos, o bien pueden medir la temperatura capando toda la radiación (0,1 micras para la radiación ultravioleta hasta 12 micras para las radiaciones infrarrojas) emitida por el cuerpo o una gran parte, en cuyo caso se denominan pirómetros de radiación total.

Los pirómetros ópticos se basan en la desaparición del filamento de una lámpara al compararlo visualmente con la imagen del objeto enfocado. La adición de un microprocesador permite alcanzar una precisión de $\pm 0,5\%$ y trabajar en modo continuo.

El coeficiente de emisión o emisividad es la característica relativa del cuerpo para emitir energía radiante comparada con el denominado «cuerpo negro» que absorbe todas las radiaciones y no emite ninguna (ejemplo, una pequeña abertura en un horno) y cuyo coeficiente de emisión es la unidad. En los casos generales de medición de temperatura es preciso hacer una corrección de la temperatura leída para tener en cuenta la emisividad.

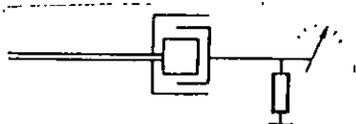
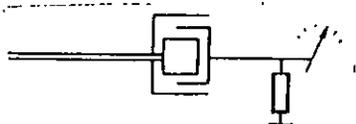
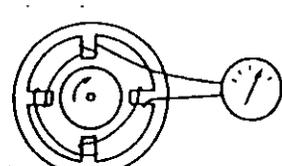
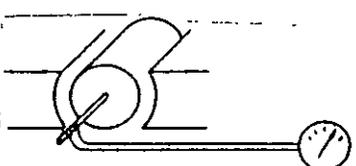
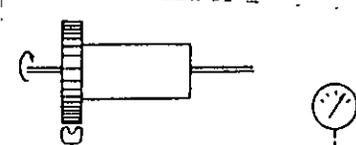
IV.5 Otras variables

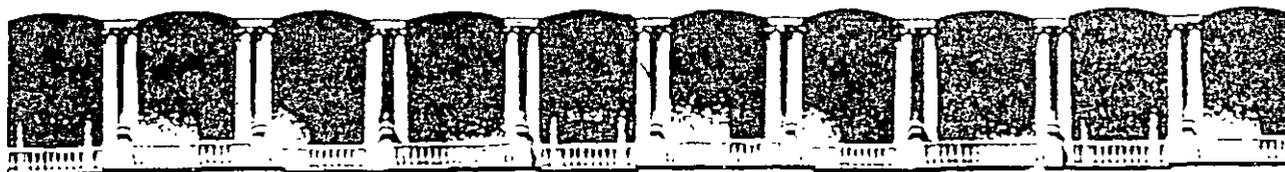
Existen otras muchas variables que son de interés industrial y que pueden clasificarse como físicas y químicas.

Las variables físicas son aquellas relacionadas con las causas físicas que actúan sobre un cuerpo, con su movimiento o bien con las propiedades físicas de las sustancias. Entre ellas se encuentran el peso, la velocidad, la densidad y el peso específico, la humedad y el punto de rocío, la viscosidad y la consistencia.

Las variables químicas están relacionadas con las propiedades químicas de los cuerpos o con su composición. Entre ellas se encuentran la conductividad, el pH, redox y la composición de los gases en una mezcla.

TABLA IV.17 Sistemas de medida de velocidad

Sistema	Funcionamiento	Esquema
Tacómetro mecánico	Se apoya sobre el eje de la máquina	
Tacómetro de corrientes parásitas	Un imán al girar induce corrientes parásitas en una copa de aluminio que crea un par resistente proporcional a la velocidad.	
Tacómetro de corriente alterna	Un rotor de imán permanente induce una c.a. en un estator	
Dínamo tacométrica	Estator de imán permanente y rotor con escobillas	
Frecuencímetro	Un transductor electromagnético capacitivo u óptico capta una frecuencia en c.a.	



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

TEMAS:

CONTROL DE COMBUSTIÓN DE CALDERAS

**ING. ISIDRO BECERRIL SALINAS
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

VIII.- Control de combustión en calderas

1.- FUNDAMENTOS PARA CONTROLAR LA COMBUSTION

En una instalación de combustión es necesario que se efectúe un control del proceso de combustión, tomando en cuenta dos dimensiones importantes:

- medida en que la combustión está completa
- exceso de aire

Según se ha visto, una combustión esta caracterizada por la existencia en los gases de combustión de las sustancias finales de la reacción:

- CO₂
- SO₂
- H₂O

Si el proceso de combustión no se ha terminado, aparecen los siguientes productos de combustión incompleta:

- CO
- H₂
- CH₄, etc.

La presencia de estos productos en los gases de combustión constituyen una pérdida debido a que no se ha desarrollado y no se ha utilizado el calor de oxidación; en consecuencia, la primera etapa en el control de combustión consiste en determinar la existencia en los gases de combustión de los componentes CO y H₂.

El análisis de gases de combustión se hace con la ayuda de analizadores químicos que se efectúa sobre gases de combustión secos. En la extracción de gases hasta el-analizador, el agua (vapor) se condensa y se separa de los gases de combustión. La cantidad de gases secos es la siguiente:

$$V_g \text{ sec} = V_g - V_{H_2O}$$

En consecuencia, los gases de combustión analizados en una combustión completa se componen de:

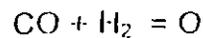
- CO₂
- SO₂
- N₂
- O₂

y en una combustión incompleta se producen:

- CO₂
- CO
- SO₂
- H₂
- CH₄
- N₂
- O₂

En todos los casos la suma de los componentes es 100%; la participación de cada componente representa la presión parcial del gas con respecto a la mezcla.

La condición de una combustión completa es:



Condición que constituye la primera verificación en el control de combustión.

Si los componentes de combustión incompleta no son nulos, entonces existen dos posibilidades:

- 1ª.- Que $O_2 = 0$; esto muestra que no existe oxígeno sobrante en los gases de combustión y que la combustión incompleta se debe a falta de aire suficiente en el quemador. La solución en este caso es inyectar aire suficiente para la combustión completa.
- 2ª.- Que $O_2 \neq 0$; esto muestra que a pesar de la existencia de un exceso de aire la combustión se mantiene incompleta. La solución en este caso es una investigación detallada en el quemador y en el hogar para determinar las causas que no permiten una combustión completa.

Una segunda verificación que se hace en el control de combustión es la determinación del exceso de aire con que se hace la combustión; el efecto negativo de un exceso de aire incorrecto se analiza por separado.

El exceso de aire E, se determina por la relación:

$$E = \frac{CO_2 \text{ max}}{CO_2}$$

en donde.

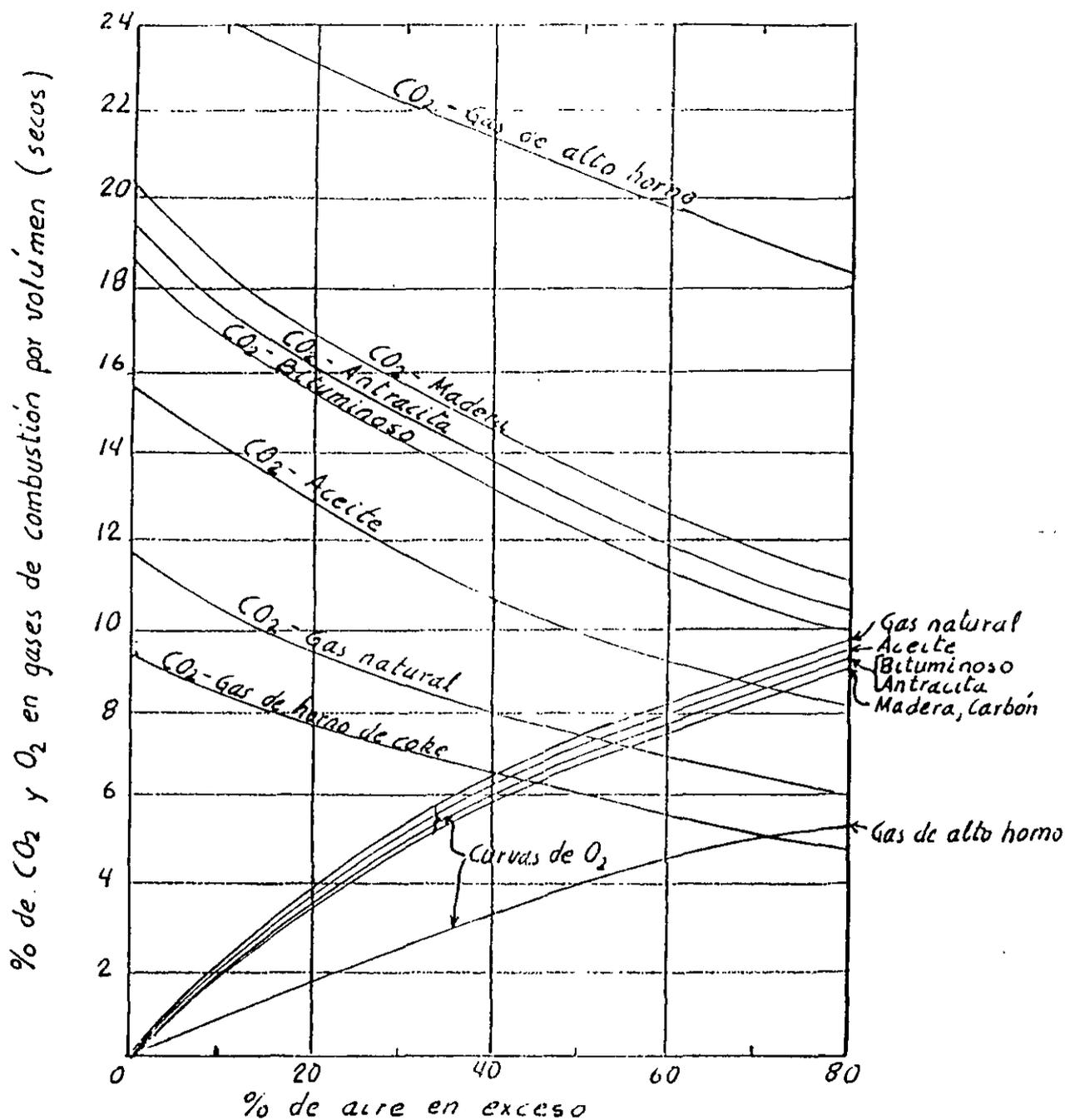
CO_2 = concentración obtenida en la medición efectuada

$CO_2 \text{ max}$ = concentración de CO_2 que se obtendría en una combustión perfecta, o estequiométrica con el aire mínimo necesario para la combustión es decir, $E = 1$.

El valor de CO_2 máximo se puede determinar por cálculo; para combustibles cuya composición no varía en grandes límites, se tiene los siguientes valores:

$CO_2 \text{ max} = 15.8\%$ para aceites combustibles derivados del petróleo (combustóleo, gasóleo, diesel, nafta, diáfano).

$CO_2 \text{ max} = 11.5\%$ para gas natural.



INTERRELACION ENTRE OXIGENO (O_2) Y DIOXIDO DE CARBONO (CO_2) Y EXCESO DE AIRE

2.- CONTROL O REGULACION DE LA CALDERA

2.1 Equipos requeridos

Con objeto de efectuar un control y seguridad en el funcionamiento del Generador de Vapor o Caldera, así como asegurar los parámetros del agente térmico (vapor o agua caliente) al usuario, se requiere incorporar a la caldera varios equipos o sistemas para apoyar al operador o efectuar por sí mismos, control, disparos o ajustes automáticos de operación.

El equipo que comprende los sistemas anteriores puede ser clasificado en los siguientes grupos principales:

- Indicadores, registradores (presión, temperatura, nivel, flujo, amperaje).
- Controladores (flujo, presión, temperatura, nivel, etc.).
- Sensores (temperatura, ambiente, calidad de gas, etc.).
- Actuadores (varios tipos).
- Alarmas (alta prioridad-emergencia, información).
- Interbloqueos (permisivos).
- Dispositivos de medición de flujo (combustible, agua, vapor, aire, gases de combustión).
- Dispositivos de medición de calidad (gases de combustión, agua, vapor).

Los equipos anteriores, pueden tener, en donde es aplicable, algunos auxiliares como switch límite, switches de flujo, elementos primarios, contactos múltiples, etc.

2.2 Medidas regulables

La instalación de automatización, tiene el objeto de efectuar la regulación sobre un cierto número de medidas regulables de la caldera. *entre las que se encuentran*

- Flujo de combustible
- Flujo de aire
- Flujo de gases de combustión evacuados
- Flujo de agua
- Temperatura de vapor sobrecalentado (y recalentado en su caso)

De éstas medidas regulables, tienen una correlación directa las siguientes:

- Flujo de combustible
- Flujo de aire
- Flujo de gases de combustión

Las medidas regulables independientes son:

- Flujo de agua (con relación al nivel de agua establecido en el domo)
- Temperatura de vapor sobrecalentado (y recalentado).

2.3 Regulación de la combustión

La regulación de la combustión comprende la regulación de alimentación de combustible, alimentación de aire y la evacuación de gases de combustión (en calderas de tiro balanceado) para mantener una depresión normal en el hogar; éstas tres medidas regulables se correlacionan entre ellas y en forma conjunta determinan la carga de funcionamiento de la caldera. La regulación de éstas tres medidas se hace con un bloque de automatización, que en cada sistema de regulación (hidráulico, neumático, eléctrico o electrónico), está formado por los siguientes elementos principales:

- Un captador o sensor que es un transductor del impulso sobre la dimensión medida.
- Un relevador que recibe el comando del sensor y produce una variación de cierto sentido de energía de accionamiento.
- Un servomotor que recibe energía dentro de un cierto sentido del relevador, transformándolo en energía mecánica (trabajo mecánico de comando).
- Un órgano o elemento de comando que acciona directamente sobre el flujo de alimentación.

En ciertos bloques de automatización, puede ser necesario un órgano suplementario llamado relevador de correlación; éste relevador es comandado simultáneamente por dos medidas, de dos captadores o sensores, asegurando la correlación entre ellos. Los relevadores de correlación se emplean cuando entre dos medidas regulables debe existir una cierta relación permanente, éste es el caso de flujo de aire y el flujo de combustible, que deben estar siempre dentro de una relación fija para mantener el exceso de aire prescrito.

Otro órgano que puede intervenir en los componentes del bloque de automatización es el relevador de reajuste; este relevador es necesario cuando el tiempo de respuesta del equipo frente al impulso recibido tiene un cierto valor relativamente grande. En éste caso, la acción hecha se percibe en la variación del parámetro regulable con un retraso relativamente grande, y en consecuencia es necesario efectuar una primera acción con un relevador de reajuste en posición inicial de relevador de comando, antes de que se produzca la respuesta con retraso del parámetro regulable.

En la Fig. 19, se muestra un esquema de automatización de combustión de una caldera, observándose los tres bloques de regulación de combustión:

- Combustible
- Aire
- Tiro

Debido a que entre todos estos elementos debe existir una cierta proporcionalidad, el impulso principal es recibido del regulador principal de la caldera; el regulador principal, es un transductor de presión montado en el conducto que conduce el vapor al usuario. Siendo el flujo de vapor suministrado al usuario el elemento final regulado, es evidente que la presión del vapor debe mantenerse constante; por lo demás, la presión del vapor suministrado es un parámetro que responde primero en el caso de la existencia de una concordancia entre el flujo de la caldera y el flujo suministrado al usuario.

El regulador principal transmite un impulso al bloque de combustible y este impulso es recibido por el sensor o captador y transmitido al relevador que acciona al servomotor. El servomotor acciona directamente, por un sistema mecánico, sobre el dispositivo de alimentación.

La modificación de la alimentación de combustible no puede percibirse inmediatamente en la forma de aumento de presión en la tubería de vapor, sin embargo para que el comando de aumento a la alimentación no pueda tener una duración larga y en consecuencia el sistema de automatización entre en penduleo no-amortiguado, un relevador de reajuste da el comando de paro a una acción del relevador cuando el flujo de combustible aumenta. El relevador de reajuste está comandado por el mismo valor del flujo de combustible por medio de un captador o sensor en el medidor de flujo.

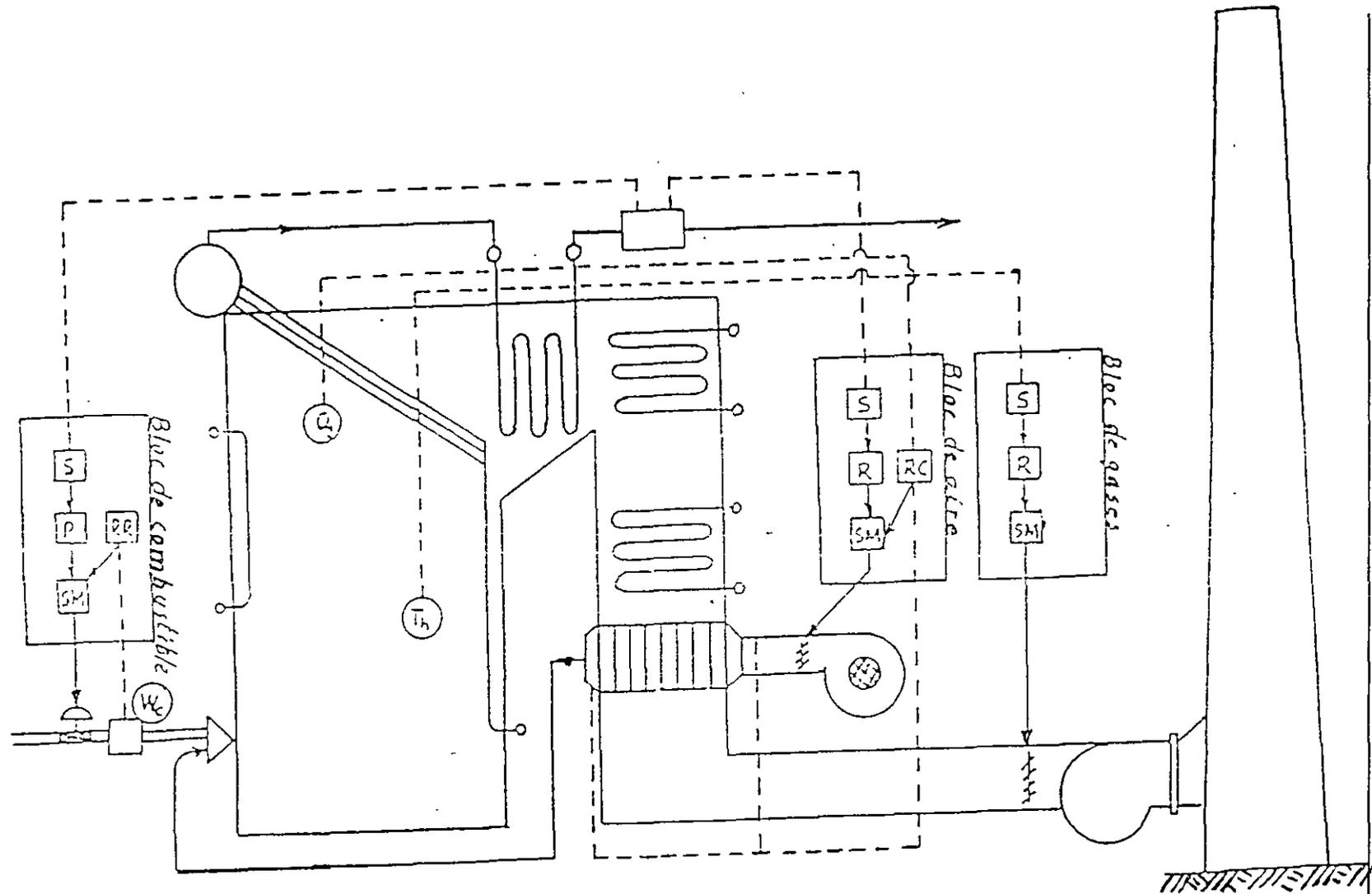


FIG. 19.- ESQUEMA DE AUTOMATIZACION DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA

Al mismo tiempo, el regulador principal comanda al bloque de alimentación de aire; el bloque de aire recibe el impulso en el sensor o captador y los transmite al relevador que acciona el servomotor. El servomotor cierra o abre las persianas o compuertas de entrada de aire, modificando la cantidad de flujo de aire inyectado, pero como en esta automatización se tiene un retraso relativamente grande, en la respuesta se necesita un relevador de reajuste; este relevador está comandado por una medición de flujo de aire suministrado por el ventilador, acostumbrándose medir el flujo de aire por la caída de presión a través del precalentador de aire (p_{pa}). Una vez que por la variación del flujo de aire el relevador de reajuste detiene la acción del servomotor, se suspende de este modo el impulso.

Existe la posibilidad que entre el bloque de combustible y el bloque de aire se tenga un enlace directo por medio de un relevador de correlación; este es un tercer impulso utilizado para mantener la proporcionalidad entre el flujo de combustible y aire. Este impulso suplementario de correlación puede obtenerse por la medición automática de un parámetro de composición de los gases de combustión (CO_2 o más bien O_2); éste parámetro puede dar el comando suplementario al bloque de aire para realizar la proporcionalidad aire-combustible.

El regulador principal acciona un tercer bloque; el bloque de regulación de depresión en el hogar. Por medio de un sensor, un relevador y un servomotor, se comanda a las persianas o compuertas de regulación instaladas en la sección del ventilador de tiro inducido; ésta variable, es la depresión en el hogar debida a la variación del flujo de gases evacuados de la instalación. El bloque de tiro, tiene una respuesta rápida y en consecuencia no es necesario un impulso de corrección que se tome del elemento regulado; la medición de la depresión en el hogar de ésta medida, un sensor o captador, introduce el impulso tomado. Cada desajuste en la depresión normal en el hogar, comanda al flujo de gases evacuados de la instalación aunque el regulador principal no entre en acción.

3.- TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE COMBUSTIÓN PARA CALDERAS

La operación satisfactoria de una planta de calderas, de cualquier tamaño o número de unidades, requiere que se mantenga constantemente la más alta eficiencia posible en el uso de combustible.

Para efectuar la economía de combustible se debe hacer todos los ajustes necesarios de compuertas, válvulas y otro equipo ajustable, cuando sea necesario y en la cantidad requerida.

El empleo de equipo automático para cumplir estos propósitos, asegura un monitoreo constante de la operación y una coordinación de los ajustes; los dispositivos automáticos proveen una solución satisfactoria en todo el rango de tamaño de calderas y para cualquier combinación de quemado de combustible y de equipo auxiliar. En la Fig. 20 se muestra un esquema conceptual de sistemas de control de combustión.

3.1 Propósitos del control de combustión

Un sistema de control automático de combustión debe proveerse para el cumplimiento de las siguientes funciones:

- Ajustar el suministro de combustible para asegurar la liberación de calor necesario para mantener la condición "maestra"; ésta es por lo general la presión de vapor, pero puede ser flujo de vapor o alguna otra medida de salida de la caldera.
- Ajustar el suministro de aire de combustión en una relación apropiada al suministro de combustible y mantener la eficiencia óptima en el proceso de combustión.
- Ajustar el equipo para mantener el régimen de remoción de productos de combustión al paso con el régimen al cual estos productos se crean en el proceso de combustión.
- Proteger al personal y al equipo.
- Minimizar la contaminación.

Algunos diseños de calderas requieren control automático para otras funciones, como por ejemplo:

- Temperatura de vapor
- Presión de aire de tiro forzado
- Presión de succión (hogar) de tiro inducido
- Temperatura de mezcla aire-carbón
- Nivel de agua.

Aunque estos controles son separados, se deben coordinar con el control de las funciones mencionadas anteriormente.

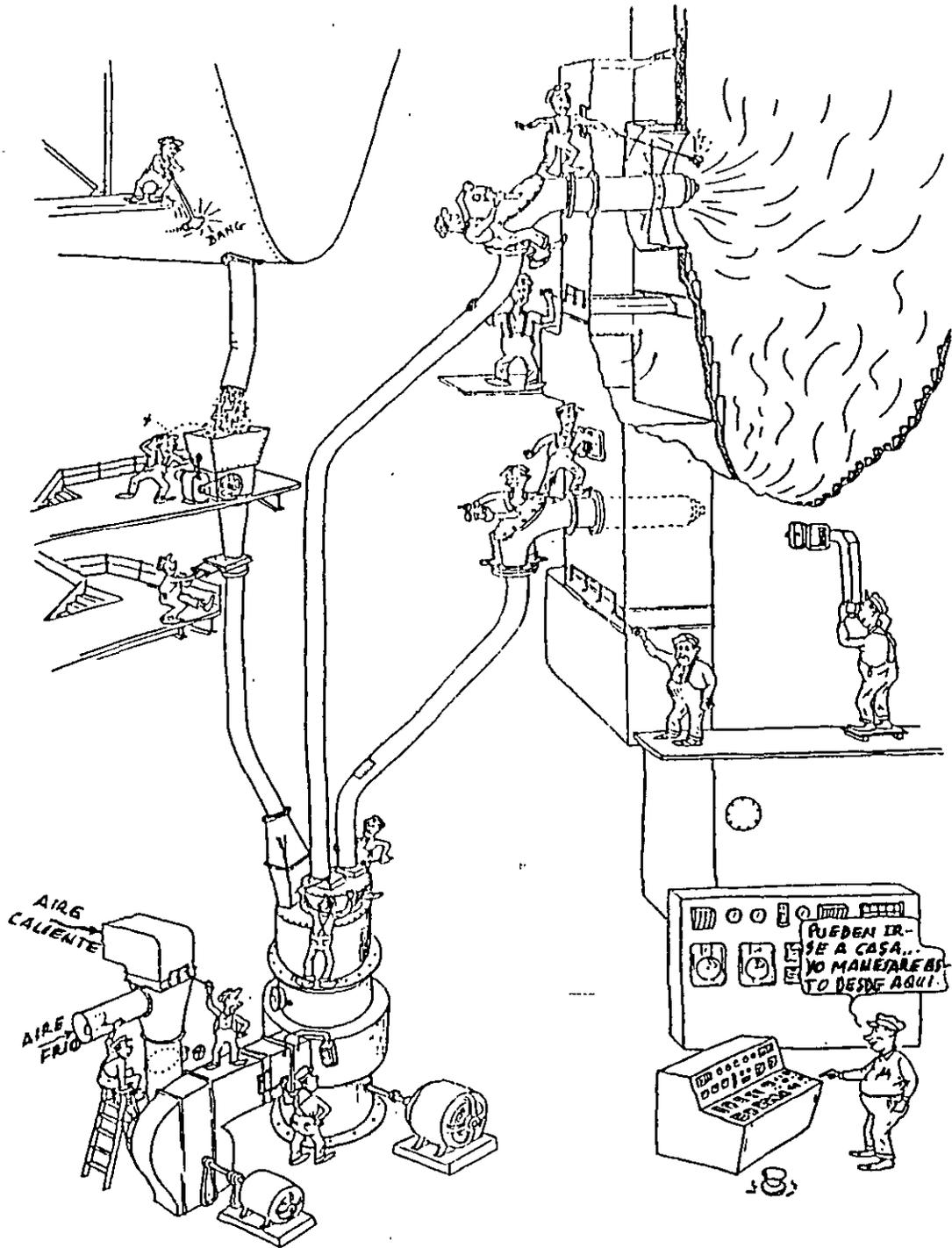


FIG. 20.- ESQUEMA CONCEPTUAL DE SISTEMAS DE CONTROL DE COMBUSTION

3.2 Sistemas básicos de control de combustión

El método seleccionado para controlar las entradas de combustible y aire está basado en las siguientes consideraciones:

- Combustible o combustibles a ser quemados
- Equipo físico a ser operado
- Prácticas de ingeniería del fabricante de equipo de control de combustión

Desde el punto de vista de control de aire y combustible, todos los sistemas de control de combustión pueden clasificarse de acuerdo a la trayectoria de la señal maestra como:

- Serie
- Paralelo
- Serie/Paralelo

La práctica de ingeniería de varios fabricantes resulta en muchas modificaciones de cada uno de estos tipos. Los diagramas funcionales de estos tipos se muestran en la Fig. 21.41

En el control serie, se monitorea ya sea el combustible o el aire y el otro se ajusta consecuentemente.

En los sistemas de control paralelos, los cambios en las condiciones de vapor resultan en cambios tanto en el flujo de aire como en el de combustible.

En los sistemas serie/paralelo, las variaciones en la presión del vapor afectan el régimen de entrada de combustible y simultáneamente el flujo de aire para la combustión es controlado por el flujo de vapor.

Los sistemas de control de combustión también pueden clasificarse de acuerdo al origen de la señal como:

- Controles ^{de} posicionadores
- Controles de medición

Los controles posicionadores responden a las demandas del sistema moviéndose a una posición pre-ajustada.

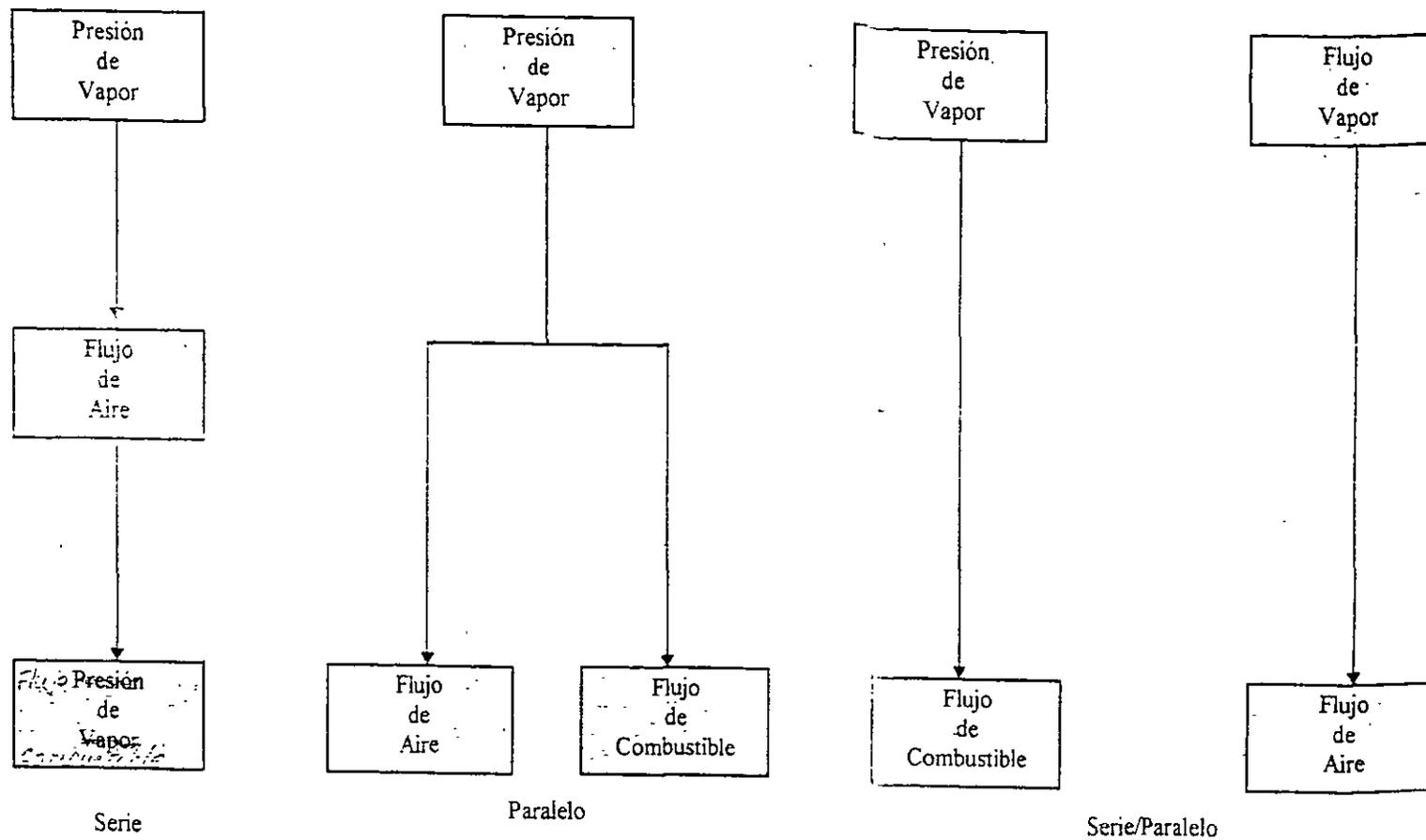


FIG. 21.- SISTEMAS BASICOS DE CONTROL DE COMBUSTION

En los sistemas de control por medición, la respuesta es controlada por la medición real de los flujos combustible y/o aire.

La aplicación y grado de control de combustión varía con el tamaño de la caldera y está influenciada por los costos. Existe un rango de óptimo exceso de aire para cada combinación de combustible, modo de quemado y condiciones del horno.

Demasiado poco flujo de aire resulta en emisiones de combustible que son peligrosas, contaminantes y pueden contener cantidades considerables de energía sin usar. El nivel mínimo seguro de exceso de aire para quemadores convencionales por lo general se toman como 10% para gas combustible y 15% para aceite combustible, sin embargo, algunas aplicaciones específicas pueden requerir otros niveles.

Demasiado exceso de aire resulta en altos niveles de emisión de NO_x e incrementa el flujo de masa y pérdidas de energía en la chimenea. Con altos niveles de exceso de aire, también se reduce la transferencia de calor dentro de la caldera, culminando en temperaturas más altas en la chimenea, perdiéndose combustible y pérdidas de comportamiento.

Todas las calderas tienen algún tipo de arreglo de control de combustión desde el simple control manual hasta los altamente sofisticados computarizados; la elección del tipo de sistema de control se hace bajo las siguientes bases:

- Capacidad de la caldera y respuesta dinámica requerida.
- Demandas de vapor y fluctuaciones esperadas en el flujo de vapor.
- Niveles de comportamiento esperado que requieran sistemas más sofisticados para eficiencias de operación más altas.
- Regulaciones de contaminación que requieran operación a bajos excesos para minimizar las emisiones de NO_x.
- Interbloqueos de seguridad.

La instrumentación, en contraste con los controles de combustión, son elementos pasivos que presentan las condiciones de la caldera como existen pero es incapaz de detectar desviaciones de la operación deseada y tomar acciones correctivas sin el involucramiento de los sistemas de control o del operador, sin embargo, sin ésta información es imposible determinar si el equipo está operando en las mejores condiciones o que acción correctiva es necesaria para restaurar el comportamiento.

Existen seis tipos básicos de sistemas de control de combustión que son los siguientes:

- Posicionamiento fijo
- Posicionamiento paralelo con atención del operador
- Relación de presiones
- Mediciones de combustible y aire
- Mediciones cruzadas limitadas
- Mediciones cruzadas limitadas con corrección por O_2

El más común utiliza la presión de vapor para generar la señal maestra de control que se utiliza por cualquiera de los dos métodos de control: posicionador paralelo o posicionador serie.

A continuación se describen los seis tipos básicos de sistemas de control de combustión.

3.2.1 Posicionamiento fijo.- Un sistema de control de posicionamiento fijo simplificado se ha aplicado extensivamente a calderas industriales basado en el mínimo costo del sistema de control. Un solo actuador mueve a ambos dispositivos de control de combustible y aire a través de articulaciones mecánicas a una posición pre-ajustada en respuesta a un cambio en la presión de vapor. (Fig. 32). 5

El sistema se calibra ajustando las articulaciones para la carrera apropiada de las compuertas del ventilador y el perfil de la levá sobre la válvula de combustible para producir la relación aire/combustible deseada sobre el rango de la carga; por lo general se provee un control manual para dominar al actuador principal.

Puesto que éste sistema solamente posiciona la válvula de control y la apertura de las compuertas de aire, no puede compensar por:

- Cambios en el combustible
- Densidad del aire
- Presión de suministro de combustible o válvula de calentamiento
- Desgaste en el orificio de la válvula de combustible
- Desgaste en las fichas de quemadores
- Desgaste en las compuertas de ventiladores

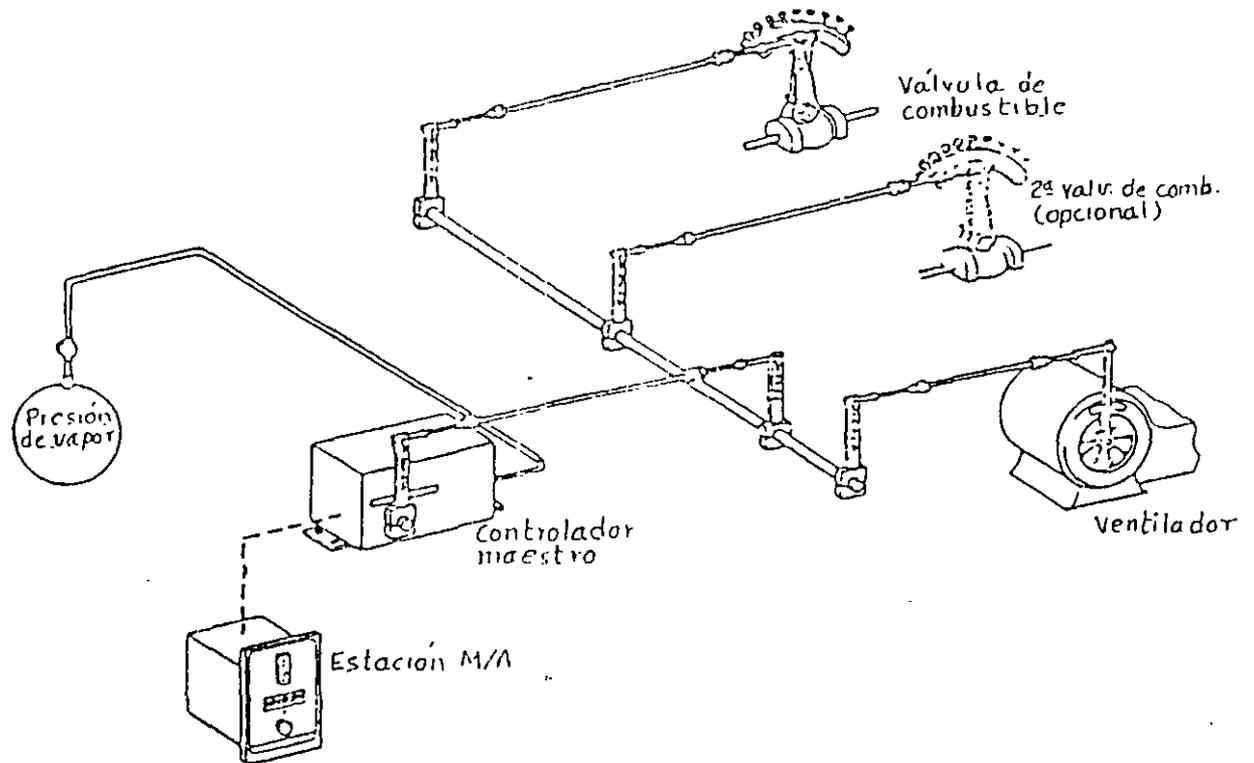


FIG. 22.- SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN TIPO POSICIONAMIENTO FIJO

Este tipo de sistema de control resulta en variaciones considerables de excesos de aire dependiendo de las condiciones particulares existentes en determinado momento.

Por lo general se deben pre-ajustar altos niveles de aire para evitar irse abajo de los requerimientos mínimos de exceso de aire; en la operación real el exceso de aire varía sobre un rango considerable.

Estos sistemas de control tienen la ventaja de simplificar la operación, tienen respuesta rápida y confiabilidad aceptable. Los componentes individuales pueden ajustarse independientemente de forma que se facilita la calibración del sistema. Algunos inconvenientes que tienen éstos sistemas son los siguientes:

- La señal maestra opera retroalimentada de la presión real del vapor.
- Los reguladores individuales de aire y combustible no tienen circuito de retroalimentación que asegure que las relaciones aire-combustible estén en el rango correcto.

En la Fig. 23, se muestra la versión de este tipo con sistema neumático.

3.2.2 Posicionamiento paralelo con operador adaptado.- Se puede lograr un bajo margen de exceso de aire sustituyendo las articulaciones mecánicas por sistemas de posicionamiento neumático o electrónico que reducen las variaciones causadas por las articulaciones mecánicas.

También

Se pueden agregar actuadores separados para la válvula de combustible y compuertas del ventilador actuando en paralelo desde un solo controlador de presión de vapor; adicionalmente, puede usarse control individual manual preferente (bias) de entradas de combustible o aire para ajustar la relación aire/combustible. Este sistema requiere una guía de combustión en la forma de un analizador de oxígeno o de flujo de vapor/flujo de aire para auxiliar al operador en el posicionamiento del exceso de aire.

El control de posicionamiento paralelo es el sistema de control de combustión más ampliamente usado en calderas de menos de 45,000 kg de vapor/hora. Ajustando la relación aire/combustible, como se muestra en la Fig. 24, se puede hacer compensaciones por variaciones en las características del combustible, condiciones de combustión o equipo del sistema de control.

3.2.3 Relación de presión.- El uso de la medición de presión de combustible en el quemador y de la diferencial de presión de la caja de aire al hogar, como una indicación de los flujos de combustible y aire respectivamente, son los más elementales de los sistemas de tipos de control por medición.

Un sistema neumático o electrónico paralelo básico se usa con la relación de presión de caja de aire al hogar/quemador empleado para acondicionar los flujos de aire y combustible. Normalmente se provee un control manual de preferencia (bias) para cambiar la relación de presión y flujo de exceso de aire, incorporándole una guía de combustión.

Este sistema (Fig. 24) elimina imprecisiones debidas a variaciones en la presión del combustible y descarga del ventilador, pero requiere que las relaciones para el combustible y el aire tengan características similares; con frecuencia existen problemas de alineamiento, causando imprecisiones. Las variaciones en el combustible y su valor calorífico, o en las densidades del aire no pueden ser reconciliadas.

3.2.4 Medición de combustible y aire.- Si se refina más el sistema de control incluyendo mediciones reales de combustible y aire, se pueden eliminar fuentes de error adicionales, reduciendo más los niveles de exceso de aire. Existen varios tipos disponibles de dispositivos de medición de flujo, sin embargo, tienen algunas limitaciones, así como también los tipos de combustibles que pueden ser medidos con precisión.

Se pueden emplear algunas combinaciones de componentes en un sistema de control por medición. Se emplean lazos de retroalimentación para permitir que el aire y el combustible autocorrijan los flujos para satisfacer las demandas del sistema. Normalmente se requiere aire adicional para compensar la diferencia en la velocidad de respuesta entre los lazos de flujo de aire y combustible.

Con éste sistema de control por medición, los reguladores de aire y combustible operan en circuitos cerrados; la presión de vapor se mide y retroalimenta a través de un control maestro que ajusta los flujos de combustible y aire. (Fig. 25) Estos flujos se miden y su señal es retroalimentada a los dispositivos de control para asegurar su coordinación con el controlador maestro.

3.2.5 Medición cruzada limitada.- Un refinamiento adicional al sistema por medición, es el sistema por medición cruzada limitada, que limita el cambio en el flujo de combustible, a través de un control lógico, al flujo de aire disponible todo el tiempo. La cantidad de flujo de aire también está "amarrada" al flujo de combustible existente y debe ser igual o más grande que el flujo de combustible.

Una forma común de sistema de medición cruzada limitada es un sistema paralelo eléctrico o neumático usando la presión de vapor como controlador maestro; se provee un anulador (override) manual de la relación aire/combustible para acondicionar (trim) los niveles de exceso de aire.

Estos sistemas se emplean para prevenir una mezcla rica en combustible durante los cambios de carga, y se requieren porque en estas condiciones, la respuesta del combustible es mucho más rápida que la del sistema de aire. El retraso en la respuesta de suministro de aire se debe a la naturaleza comprensible del aire, la lentitud de respuesta de los posicionadores de compuerta y al cambio de velocidad en algunos ventiladores.

Los rangos de retraso se seleccionan para ajustarse de forma que se tenga en cualquier momento la posición de aire suficiente para combustión evitando así la producción de humo durante los cambios de carga; por ejemplo, un selector de alta recibe la señal de demanda de combustible y la señal real de flujo de combustible. Este selector enviará el valor más alto de las dos a la compuerta de aire y lo tomará como el punto de ajuste para el flujo de aire requerido.

Por otra parte, un selector de baja compara las señales de demanda y el flujo de combustible que puede quemarse con el aire disponible, y envía la señal más baja de las dos a la válvula de combustible. En la Fig. 26, se muestra un esquema de este sistema.

3.2.6 Medición cruzada limitada con corrección por O_2 . (Fig. 27).- Los efectos sobre el exceso de aire de las variaciones en el poder calorífico de combustible y las condiciones del aire para la combustión pueden ser eliminados empleando un monitoreo continuo en los gases de combustión de los niveles de O_2 para adaptar la relación aire/combustible; la caldera puede ser operada a una nivel de O_2 ajustado, resultando en un mínimo consumo de combustible.

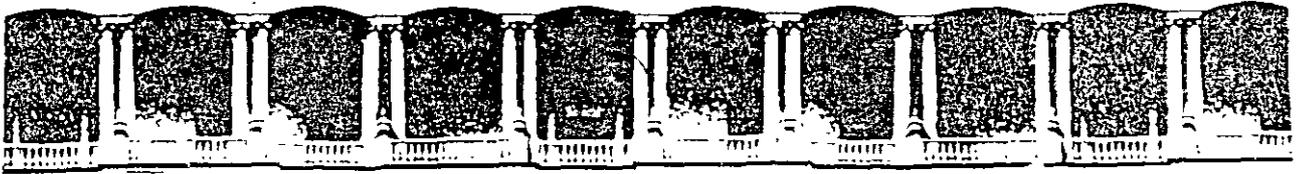
Una alternativa de corrección es por la medición de CO, que opera también sobre el exceso de aire y presenta en algunos casos ventajas sobre la corrección por O_2 .

Al medir el CO en los gases de combustión se obtiene la cantidad de combustible no quemado, se ajusta la relación aire/combustible en el control para condiciones reales de combustión en lugar de los niveles de O_2 preestablecidos. En esta forma, el sistema de corrección por CO verifica continuamente la eficiencia máxima.

Una ventaja del sistema de corrección por CO es su independencia del tipo de combustible, y prácticamente no es afectado por las infiltraciones de aire que se presentan en calderas que operan con presión negativa en el horno y conductos de gases.

Se deben tener algunas precauciones con el uso de los sistemas de corrección por CO, ya que la presencia de éste en los gases de combustión no siempre es una indicación del nivel de exceso de aire. Un alto nivel de CO puede ser causado por:

- Atomización deficiente
- Enfriamientos en la flama
- Contactos de la flama o incidencia sobre los tubos de la caldera
- Suciedad en quemadores
- Mezcla deficiente aire-combustible



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

TEMAS:

SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

**M. EN I. ISIDRO BECERRIL SALINAS
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

V.- Sistemas de control automático

1.- Introducción

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada. Un caso típico fue el control de acabado de un producto en el horno. El operario era realmente el «instrumento de control» que juzgaba la marcha del proceso por el color de la llama, por el tipo de humo, el tiempo transcurrido y el aspecto del producto y decidía así el momento de retirar la pieza ; en esta decisión influía muchas veces a la suerte, de tal modo que no siempre la pieza se retiraba en las mejores condiciones de fabricación. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en las piezas fabricadas lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que a su vez permitieron realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos.

2.- Características del proceso

El anillo de control típico está formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control.

El proceso consiste en un sistema que ha sido desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado : tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. Los procesos revisten las formas más diversas, desde las más simples hasta las más complejas. Una aplicación típica la constituye un cambiador de calor, tal como el de la figura V.1

El controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales :

- Compara la variable medida con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error.
- Estabiliza el funcionamiento dinámico del anillo de control mediante circuitos especiales para reducir o eliminar el error.

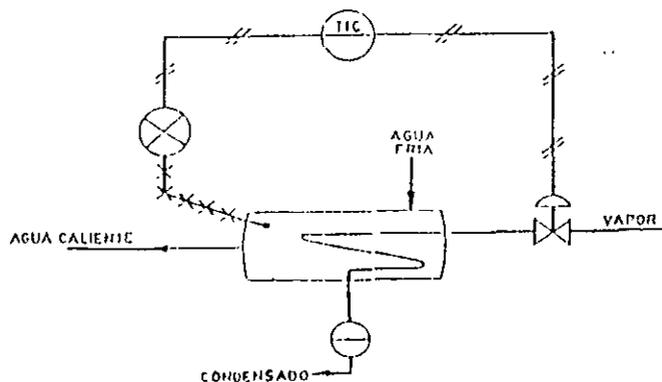


Fig. V.1 Cambiador de calor

En la figura V.2 puede verse el diagrama de bloques del anillo de control.

Un circuito abierto de regulación carece de detector de señal de error y de controlador. Un ejemplo puede consistir en el calentamiento de agua en un tanque por medio de un cambiador a resistencia eléctrica sumergido. Dada una tensión de alimentación, una temperatura de entrada del agua, unas condiciones externas y una demanda del agua constante, la temperatura de salida del agua permanecerá constante. Si cambia cualquiera de estas condiciones, la temperatura de salida del agua debe variar.

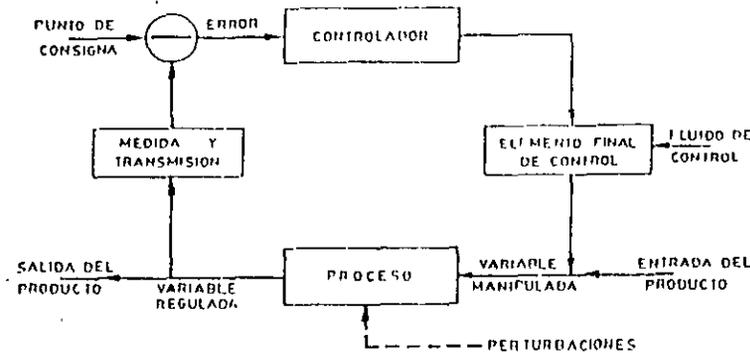


Fig. V.2 Diagrama de bloques

Se considera ahora el control manual del proceso que servirá de base para estudiar las características del proceso.

La figura V.3 representa el control manual del cambiador. El operario nota la temperatura de salida del agua con la mano y acciona la válvula de vapor para mantener el agua a la temperatura deseada. Si en estas condiciones, existiendo una temperatura constante en la salida, hay un aumento en el flujo de agua de entrada. Como la válvula de vapor sigue estando en la misma posición, el cambiador no llegará a calentar el mayor flujo del agua fría de entrada, por lo cual, la temperatura de salida deberá disminuir. Debido a la inercia del proceso, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría alcance la mano izquierda del operario. Cuando éste nota la disminución de la temperatura, debe compararla con la temperatura que desea y calcular mentalmente cuántas vueltas debe dar la válvula de vapor y en qué sentido, y a continuación realizar esta corrección manual en la misma. Se necesita cierto tiempo para llevar a cabo estas decisiones y corregir la posición de la válvula.

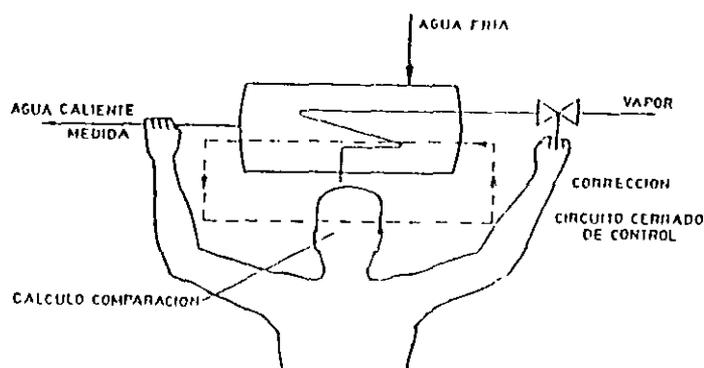


Fig. V.3 Control manual

También es cierto que pasa cierto tiempo hasta que los efectos de corrección de la válvula se notan en la temperatura de salida y pueden ser captados por el operador. Sólo entonces éste es capaz de saber si su primera corrección ha sido escasa o excesiva. En este punto, efectuará una segunda corrección, que al cabo de un tiempo dará lugar a otro cambio de temperatura. El operador observará los resultados de esta segunda corrección y realizará una tercer, y así sucesivamente.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, cálculo y corrección, constituyen una cadena cerrada de acciones y se realizan una y otra vez por el operador, hasta que transcurre un cierto tiempo y la temperatura del agua se equilibra finalmente al valor deseado por el operador siempre que no hayan cambiado las condiciones del proceso. El conjunto de elementos en circuito cerrado que hace posible este control reciben el nombre de «bucle, lazo o anillo de control» (loop control).

Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos :

- a) Los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso y llamados generalmente *cambios de carga* ;
- b) El tiempo necesario para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retardo se debe a una o a varias propiedades del proceso : *capacitancia, resistencia y tiempo de transporte*.

Cambios de carga.- La carga del proceso es la cantidad total del fluido o agente de control que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas. En el ejemplo anterior, cuando el agua fría circula con un determinado flujo y la salida de agua caliente debe estar a una temperatura dada, es necesaria una determinada cantidad de vapor. En estas condiciones, un aumento en el flujo de agua da lugar al consumo de más cantidad de vapor y constituye por tanto un cambio en la carga

del proceso. Por otro lado, un aumento en la temperatura de entrada del agua fría, precisa una menor cantidad de vapor y es también un cambio de carga.

En general, los cambios de carga del proceso son debidos a las siguientes causas :

- Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado. En el ejemplo del cambiador de calor de la figura V.1, aumento en el flujo de agua o una disminución en su temperatura a lugar a un cambio de carga porque requiere el consumo de mas cantidad de vapor.
- Variaciones en la calidad del fluido de control. Una disminución de presión en el vapor del ejemplo de la figura V.1 da lugar a un aumento del flujo en volumen del vapor para mantener la misma temperatura controlada, ya que las calorías cedidas por el vapor al condensarse disminuyen al bajar la presión
- Cambios en las condiciones ambientales.- Son muy claros en el caso de instalaciones al aire libre donde las pérdidas de calor por radiación varían mucho según la estación del año, la hora del día y el tiempo.
- Calor generado o absorbido por la reacción química del proceso (proceso exotérmico o endotérmico respectivamente). Se presenta un cambio de carga por que el proceso necesita una menor o una mayor cantidad del agente de control.

Los cambios de carga en el proceso pueden producir perturbaciones en la alimentación y en la demanda.

Las perturbaciones en la alimentación consisten en un cambio en la energía o en los materiales de entrada en el proceso. Por ejemplo, las variaciones en la presión de vapor o en la apertura de la válvula de vapor son perturbaciones en la alimentación del proceso.

Las perturbaciones en la demanda consisten en un cambio en la salida de energía o de material del proceso. Los cambios en la temperatura del agua fría y las variaciones en el caudal de agua pertenecen a este tipo.

Capacitancia.- La capacitancia de un proceso es un factor muy importante en el control automático. Es una medida de las características propias del proceso para mantener o transferir una cantidad de energía o de material con relación a una cantidad unitaria de alguna variable de referencia. No debe confundirse con capacidad del proceso que representa simplemente las características propias de almacenar energía o material.

Por ejemplo, los dos depósitos de la figura V.4a tienen la misma capacidad de 10 m^3 , pero tienen distinta capacitancia por unidad de nivel : $12,5 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más alto y $25 \text{ m}^3/\text{m}$, nivel el más bajo.

En un proceso, una capacitancia relativamente grande es favorable para mantener constante la variable controlada a pesar de los cambios de carga que puedan presentarse. Sin embargo, esta misma característica hace que sea más difícil cambiar la variable a un nuevo valor, e introduce un retardo importante entre una variación del fluido de control y el nuevo valor que toma la variable controlada. En las figuras V.4b y c pueden verse dos

procesos con dos tipos de capacitancias térmicas, una grande y la otra limitada, respectivamente.

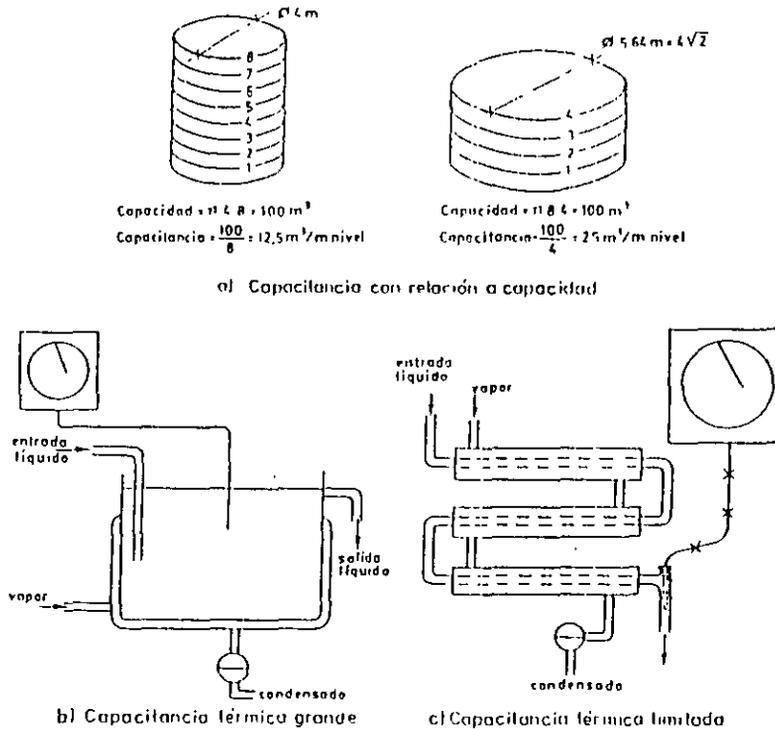


Fig. V.4 Capacitancia

En la figura V.4b el tanque contiene una cantidad de líquido de tal modo que esta masa considerable del líquido estabiliza y resiste los cambios que puedan causarse a la temperatura por variaciones en el caudal del líquido, en la presión del vapor o en la temperatura ambiente. Estas mismas perturbaciones aplicadas al intercambiador de la figura V.4c influyen poderosamente en la temperatura al ser pequeña la masa del líquido. Si este último proceso se controlara manualmente, el operador debería estar muy atento y le sería casi imposible mantener la temperatura en un valor constante.

Resistencias.- La resistencia es la oposición total o parcial de la transferencia de energía o de material entre las capacitancias. En la figura V.1, las capacitancias son el serpentín de vapor y el tanque, y su resistencia se manifiesta porque las paredes de los tubos del serpentín de vapor y las capas aislantes de vapor y de agua que se encuentran a ambos lados de los mismos, se oponen a la transferencia de energía calorífica entre el vapor del interior de los tubos y el agua que se encuentra en el exterior.

Tiempo de transporte.- En el intercambiador de calor de la figura V.1, si disminuye la temperatura del agua de entrada, pasará cierto tiempo hasta que el agua más fría pueda circular a través del tanque y alcance la sonda termométrica. Hay que hacer notar que durante el tiempo de transporte, la sonda termométrica no capta ningún cambio en la temperatura. El valor del tiempo de retardo depende a la vez de la velocidad de transporte y de la distancia de transporte.

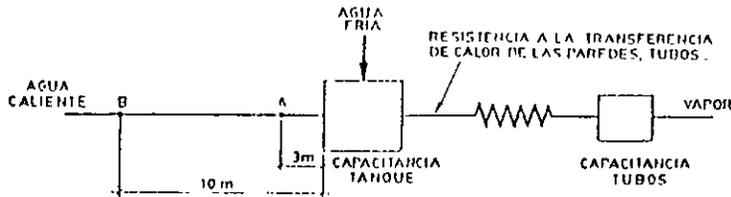


Fig. V.5 Capacitancia, resistencia y tiempo de transporte

En la figura V.5, por ejemplo, si el agua circula con una velocidad de un metro por segundo, con el bulbo a tres metros del tanque, el tiempo de transporte es de 3 s. Si el bulbo está en el punto B, a 10 m del tanque, el tiempo será de 10 s. Pero si la velocidad del agua es de 0,5 m/s el tiempo es de 6 y 20 s, respectivamente.

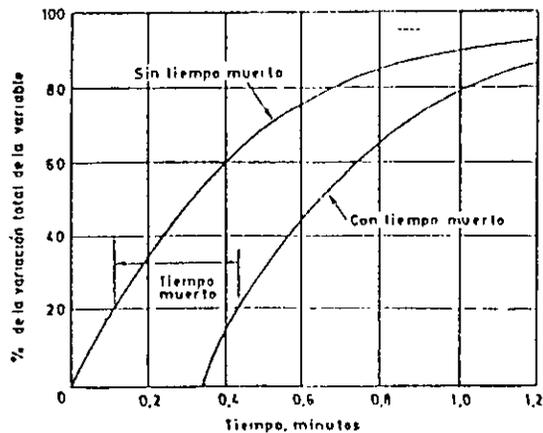


Fig. V.6 Efecto del tiempo de transporte

La situación de la válvula de control puede contribuir también al tiempo muerto de transporte, en particular en el caso de un horno tubular empleado en la industria petroquímica en el que el fuel debe pasar a través de varios cientos de metros de tubería para atravesar totalmente el horno. El tiempo de transporte retarda la reacción del proceso, existiendo un tiempo muerto durante el cual el controlador no actúa ya que para iniciar una acción de corrección debe presentársele primero una desviación (fig. V.6)

3.- Sistemas de control neumáticos y eléctricos

En el control manual, descrito en la figura V.3, el operador puede hacer las correcciones en la válvula de vapor de varias formas :

1. Puede abrir o cerrar instantáneamente la válvula.
2. Puede abrir o cerrar la válvula lentamente, a una velocidad constante, mientras se mantenga la desviación.
3. Puede abrir la válvula en mayor grado cuando la desviación es más rápida.
4. Puede abrir la válvula un número de vueltas, por cada unidad de desviación.

Asimismo el operador puede emplear otros métodos o combinaciones en la manipulación de la válvula.

En los sistemas industriales se emplea uno o una combinación de los siguientes sistemas de control :

- a) De dos posiciones (todo-nada)
- b) Proporcional de tiempo variable (anticipatoria)
- c) Flotante
- d) Proporcional
- e) Proporcional + integral
- f) Proporcional + derivada
- g) Proporcional + integral + derivada

3.1.- Control todo-nada.

En la regulación todo-nada el elemento final de control se mueve rápidamente entre una de dos posiciones fijas a la otra, para un valor único de la variable controlada. En la figura V.7 se representa un control de este tipo, que se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial (fig. V.8) o zona neutra en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de consigna y la gama diferencial.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza por que las dos

posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la operación normal.

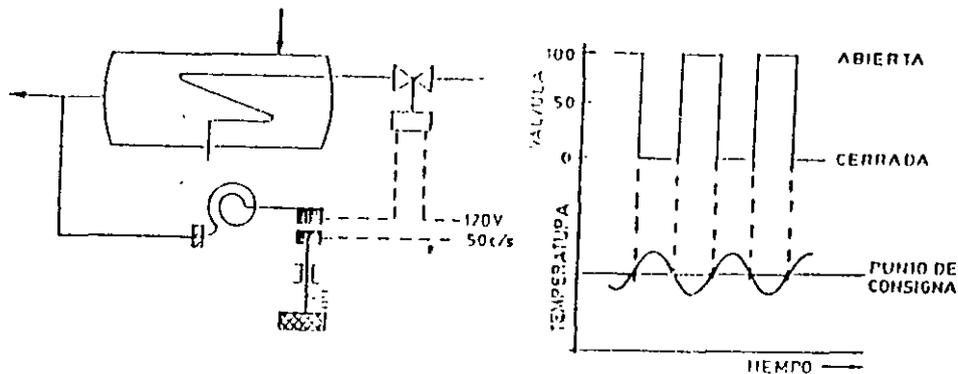


Fig. 9.7 Control todo-nada.

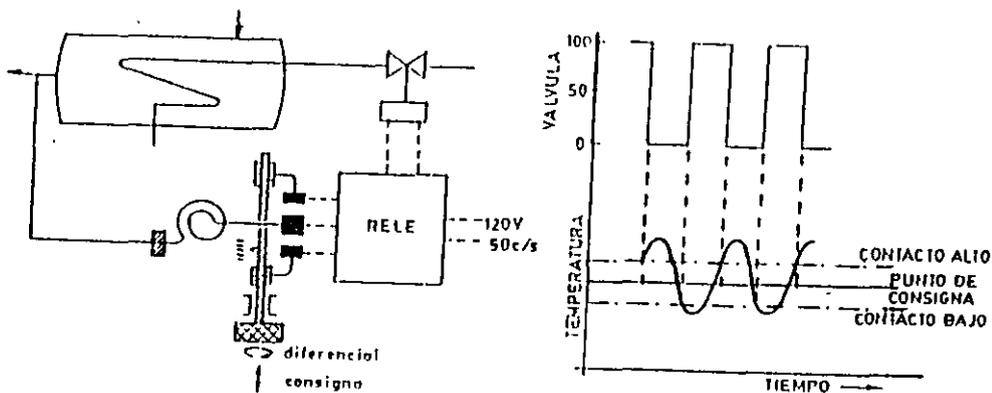


Fig. V.8 Control todo-nada con banda diferencial o zona muerta

Es evidente que la variable controlada oscila continuamente y que estas oscilaciones variarán en frecuencia y magnitud si se presentan cambios de carga en el proceso.

3.2.- Control flotante

El control flotante, denominado realmente control flotante de velocidad constante (fig. V.9a), mueve el elemento final de control a una velocidad única independiente de la desviación. Por ejemplo, una regulación todo-nada puede concertirse en una regulación flotante si se utiliza una válvula motorizada reversible de baja velocidad (con un tiempo de recorrido de 1 minuto, o más desde la posición abierta a la cerrada o viceversa).

El control flotante de velocidad constante con una zona neutra (fig. V.9b) se obtiene al acoplar a un control todo-nada con una zona neutra una válvula motorizada reversible de baja velocidad. La válvula permanece inmóvil si la variable queda dentro de la zona neutra y cuando la rebasa, la válvula se mueve en la dirección adecuada hasta que la variable

retorna al interior de la zona neutra, pudiendo incluso la válvula llegar a alcanzar sus posiciones extremas de apertura o de cierre.

El control flotante, análogamente al control todo-nada, tiende a producir oscilaciones en la variable controlada, pero estas oscilaciones pueden hacerse mínimas eligiendo adecuadamente la velocidad del elemento final para que compense las características del proceso. En general, la válvula debe moverse a una velocidad lo suficientemente rápida para mantener la variable ante los más rápidos cambios de carga que puedan producirse en el proceso.

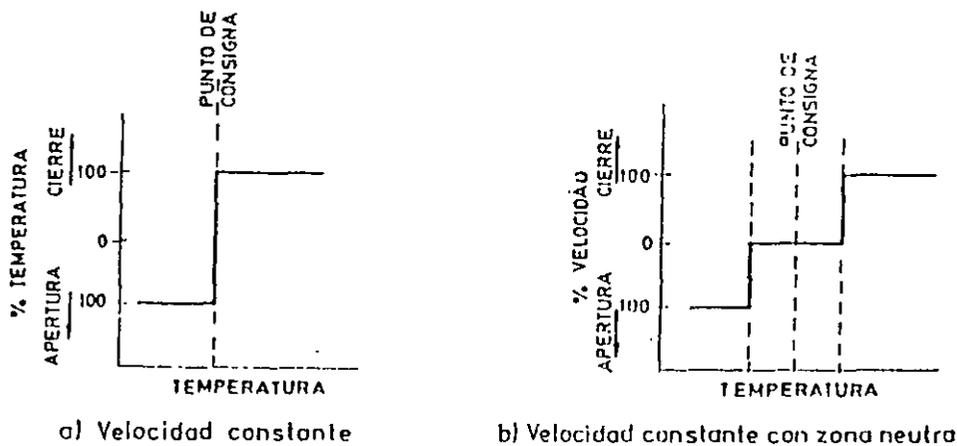


Fig. V.9 Control flotante

La ventaja principal del control flotante es que puede compensar los cambios de carga lentos del proceso desplazando gradualmente la posición de la válvula. Sin embargo, no es adecuado si hay un retardo importante o si los cambios de carga, aunque sean pequeños, son muy rápidos.

3.3.- Control proporcional de tiempo variable

En este sistema de regulación existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. Es decir, la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada. La longitud de un ciclo completo (conexión+desconexión) es constante pero la relación entre los tiempos de conexión a desconexión dentro de cada ciclo varía el desviarse la variable controlada del punto de consigna.

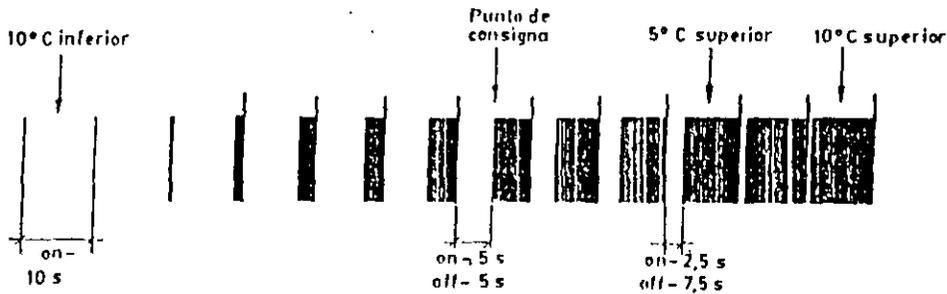


Fig. V.10 Control proporcional de tiempo variable

En la figura V.10 puede verse un ejemplo de este controlador que tiene un ciclo completo de 10 segundos y una banda proporcional de 20°C. En el punto de consigna el controlador conecta el elemento final durante 5 segundos y lo desconecta 5 segundos y así sucesivamente. Si la temperatura disminuye 10°C el elemento final está siempre conectado. A 5°C por encima del punto de consigna el elemento final está conectado sólo 2,5 segundos, desconecta durante 7,5 segundos, y así sucesivamente.

Este tipo de control se emplea sólo en controladores eléctricos. Un caso típico de aplicación lo constituye la regulación de temperatura de un horno eléctrico en que el elemento final es una resistencia o un conjunto de resistencias de calefacción.

3.4.- Control proporcional

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda proporcional). Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación.

En la figura V.11 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de consigna es 150°C y cuyo intervalo de actuación es de 100-200°C. Cuando la variable controlada está en 100°C o menos la válvula está totalmente abierta; a 200°C o más está totalmente cerrada y entre 100 y 200°C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 125°C está abierta en un 75%; a 150°C en un 50%.

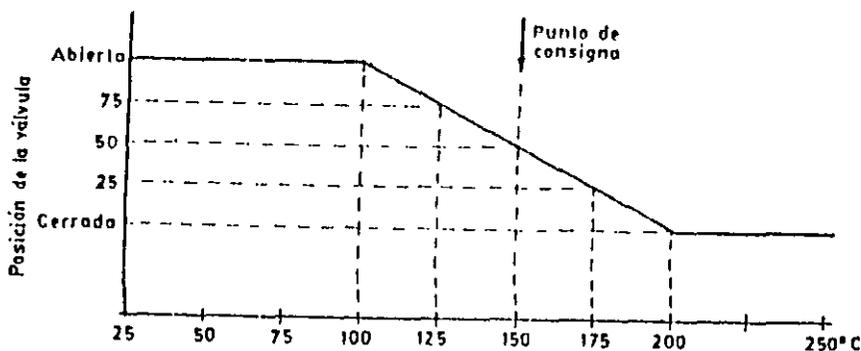


Fig. V.11 Control proporcional

3.5.- Control proporcional + integral

En el control integral, el elemento final se mueve de acuerdo con la función integral en el tiempo de la variable controlada.

En la figura V.12 puede verse un controlador neumático típico proporcional más integral.

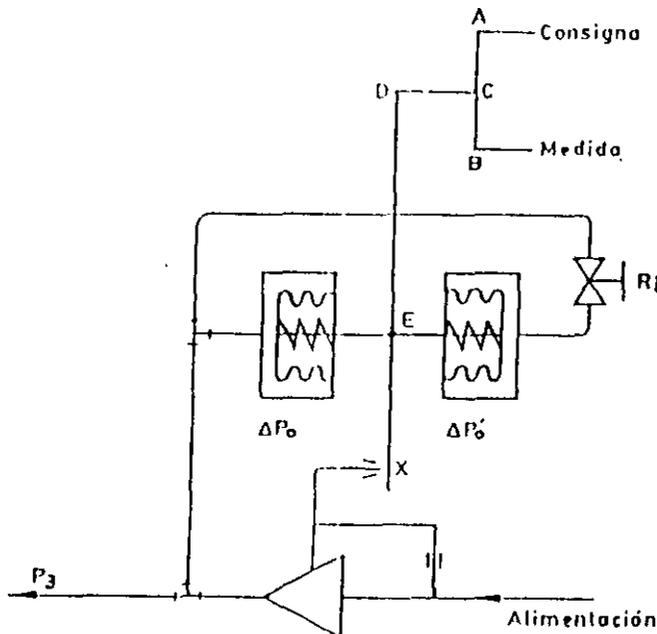


Fig. V.12 Controlador proporcional + integral

La combinación de la restricción R_1 con la capacidad del fuelle da lugar a una función de retardo con una constante de tiempo τ (fig. V.13).

Cuando existe una pequeña diferencia de presiones ($P-P'$) entre la entrada y el interior del fuelle, el caudal Q que pasa a través de la restricción capilar R corresponde a un régimen laminar, por lo cual existe la relación :

$$P - P' = R \cdot Q$$

siendo R la resistencia de la restricción.

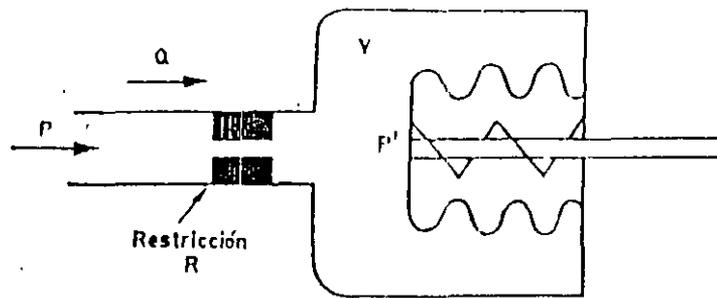


Fig. V.13 Fuelle con restricción.

3.6.- Control proporcional + derivado

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variante de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la variable, por ejemplo, la temperatura, cuanto más rápidamente varíe ésta, tanto más se moverá la válvula. En la fig. V.14 se indica esta reacción y la componente proporcional.

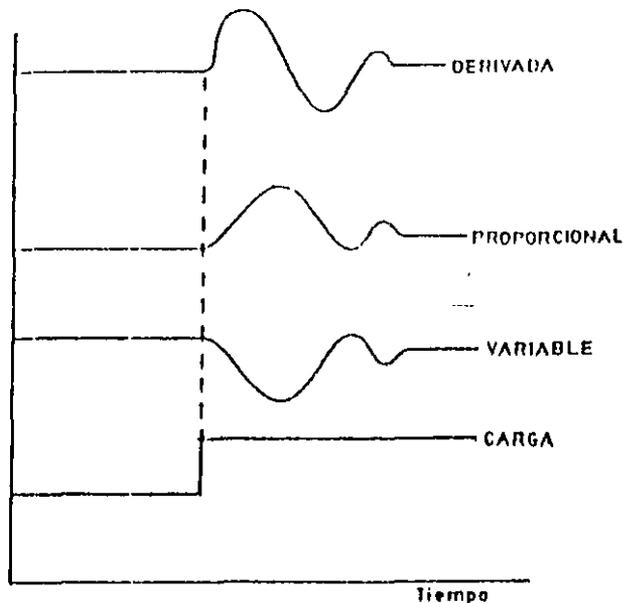


Fig. V.14 Acción derivada

El factor a señalar en la acción derivada es que se opone a todas las variaciones, posee un gran efecto de estabilización, si bien no elimina el offset característico del sistema de posición proporcional. Por este motivo la regulación derivada, suele emplearse conjuntamente con la integral.

En la fig. V.15 puede verse un controlador proporcional + derivado (PD) típico.

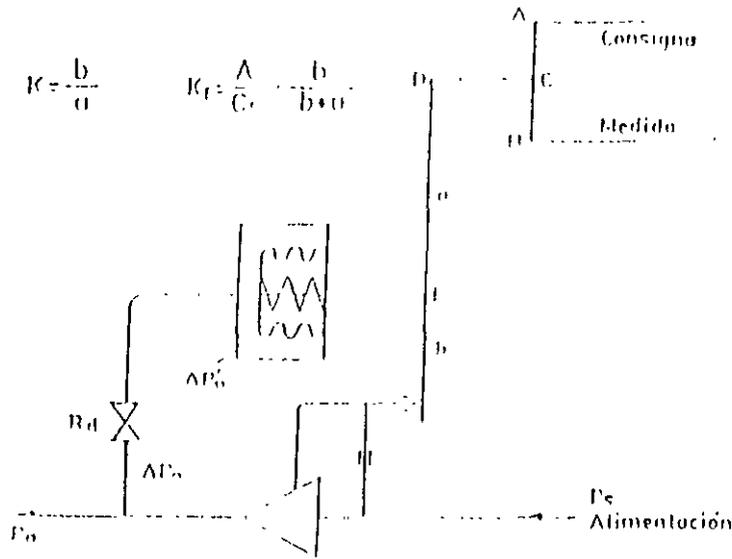


Fig. V.15 Controlador de acción proporcional + derivada

3.7.- Control proporcional + integral + derivado

Un controlador PID neumático dispone de dos fuelles (proporcional de realimentación negativa e integral con realimentación positiva) y dos restricciones (integral y derivada).

Según la disposición de las restricciones se obtienen los tres controladores PID de las figuras V.16 a, b, c. El controlador PID de la figura V.16 a se llama simétrico y debe cumplir que $R_i > R_d$, ya que en caso contrario la realimentación positiva tendría preponderancia y daría lugar a un funcionamiento inestable. El instrumento de la figura V.16b es un PID asimétrico y el de la figura V.16c es un PID asimétrico con realimentación positiva, que no se utiliza en la práctica porque existe siempre la desigualdad $\tau_d > \tau_i$.

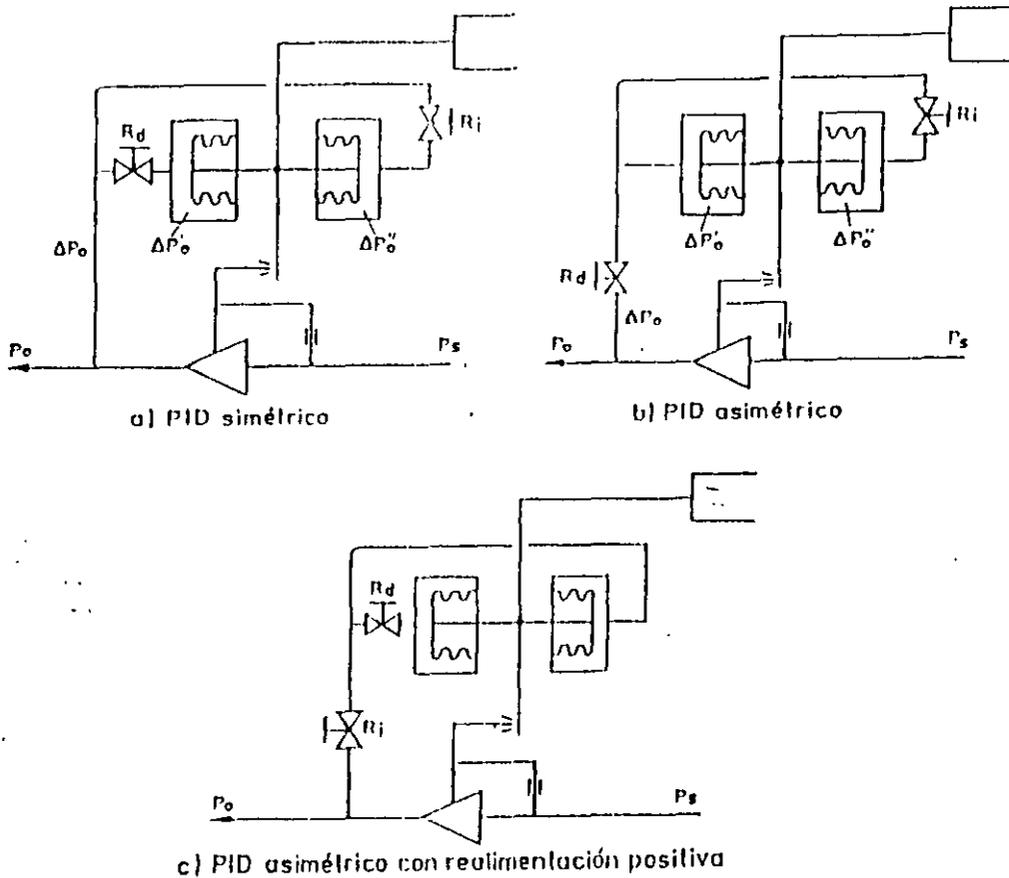


Fig. V.16 Tipos de controladores PID

3.8.- Cambio automático - manual - automático

Es evidente que los controladores deben disponer de un accesorio que permita a voluntad del operador actuar manualmente sobre la válvula de control desde el propio panel de proceso. Esta necesidad es básica en la puesta en marcha del proceso.

En los controladores neumáticos, este accesorio es un pequeño manorreductor que en la posición «manual» desconecta previamente el propio controlador y acciona manualmente la válvula desde el propio instrumento. En «automático», el manorreductor queda desconectado y la señal de salida del controlador pasa directamente a la válvula de control.

Como es lógico, debe ser posible efectuar fácilmente el cambio tanto de automático a manual como de manual a automático.

El cambio debe efectuarse de tal modo que la señal a la válvula antes y después no sufra variaciones, para evitar la variación de posición brusca de la válvula que se produciría y que podría repercutir desfavorablemente en el control del proceso.

El regulador manual (manorreductor) puede ser independiente del instrumento o bien formar el propio regulador del punto de consigna.

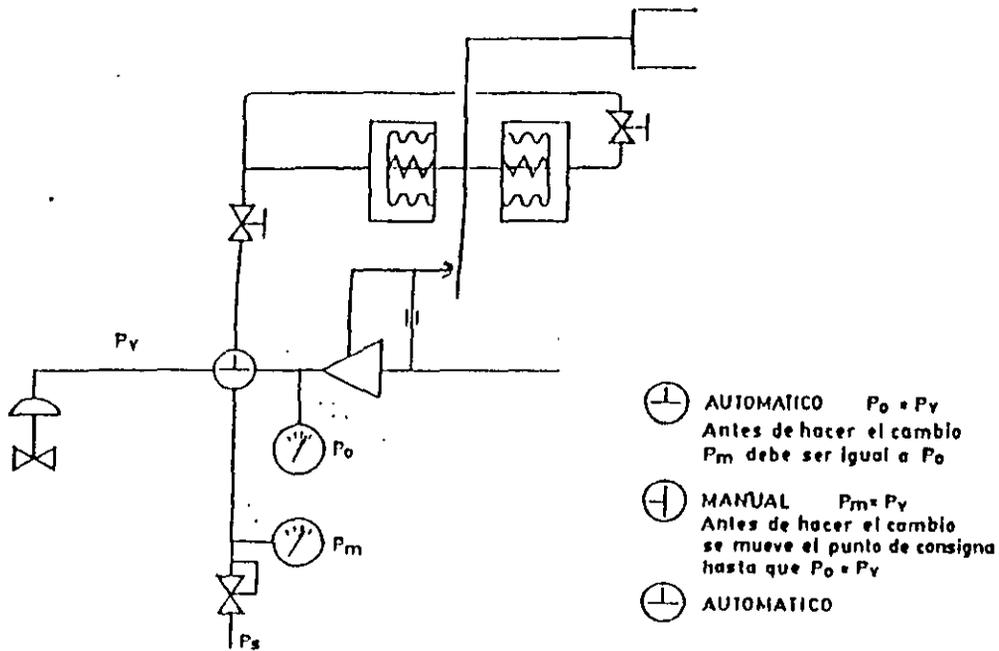


Fig. V.17 Cambio automático-manual-automático con un regulador separado

4.- Sistemas de control electrónicos y digitales

4.1.- Generalidades

Los circuitos electrónicos actuales utilizados para obtener los diversos tipos de control hacen un uso amplio del amplificador operacional. Las posibilidades de montaje que ofrece este tipo de amplificador son muy amplias debido a sus características particulares. Es usualmente un amplificador de corriente continua (c.c.) con una ganancia en tensión en bucle abierto normalmente superior a 50 000, que, mediante la conexión de componentes adecuados dispuestos en forma de realimentación positiva o negativa, constituye el «corazón» de los controladores electrónicos. Necesita sólo una corriente de entrada del orden de los 0,5 nA ($0,5 \times 10^{-9}$ A) para dar lugar a una cambio total en la señal de salida (un valor próximo a la corriente de alimentación).

Las características más importantes del amplificador operacional pueden resumirse en :

- Ganancia de tensión en c.c. elevada entre 10^3 a 10^6 - relación entre una variación en la tensión de salida y la variación correspondiente en la entrada diferencial de tensión.
- Corriente de deriva en la entrada 1 nA/a 100 μ A - corriente que fluye a través de cualquier terminal de entrada mientras la tensión de salida es nula, expresada como promedio de las dos corrientes de entrada.
- Impedancia de entrada elevada, de 10 k Ω a 1000 M Ω
- Bajo consumo - la corriente de alimentación varía entre 0,05 a 25 mA

- Tensión de entrada en desfase entre 0,5 a 5 mV - tensión en c.c. diferencial entre los dos terminales de entrada para que sea nula la tensión de salida.
- Corriente de entrada en desfase ente 1 nA a 10 μ A - diferencia ente las dos corrientes de entrada.
- Tensión máxima de salida de 1 a 5 V, menor que los límites de la tensión de alimentación.
- Corriente de salida de 1-30 mA.

La mayor parte de los amplificadores operacionales son amplificadores diferenciales que, en esencia disponen de tres terminales, dos en la entrada y uno en la salida. Una señal de entrada aplicada al termina denominado «no inversor» hará que la salida cambie en la misma dirección : el símbolo aplicado es $+V_e$. Una variación de señal en la otra entrada hará que la señal de salida cambie en dirección inversa. Este segundo terminal se denomina «inversor» y se representa por el símbolo $-V_e$.

El símbolo utilizado para representar un amplificador operacional es un triángulo equilátero con su base vetical en la que se conectan los dos terminales de entrada, el superior es el inversor $-V_e$ y el inferior el no inversor $+V_e$, mientras que el vértice se acostumbra a situar a la derecha conectándosele el terminal de salida.

Evidentemente, el circuito real del amplificador es más complejo y está rodeado por muchas conexiones que aunque sean necesarias, no intervienen en la función principal del amplificador. En la figura V.18 puede verse un esquema de estas conexiones así como el símbolo empleado en los circuitos electrónicos.

Se observará que las conexiones externas son dos alimentaciones $+V_s$ y V_s y dos componentes de compensación de frecuencia cuya misión es estabilizar el amplificador. Las conexiones internas equivalen a una impedancia de entrada muy grande Z_i , definida como la relación entre la variación de tensión entre las dos entradas y la variación correspondiente de la corriente de entrada, y a una impedancia de salida Z_o equivalente a la relación entre la variación de la tensión de salida y la variación de la corriente de salida correspondiente.

En el resto del texto se utilizará el símbolo resumido del amplificador suponiéndose que al mismo están conectados los componentes de alimentación y de compensación de frecuencia, a menos que se indique de otro modo.

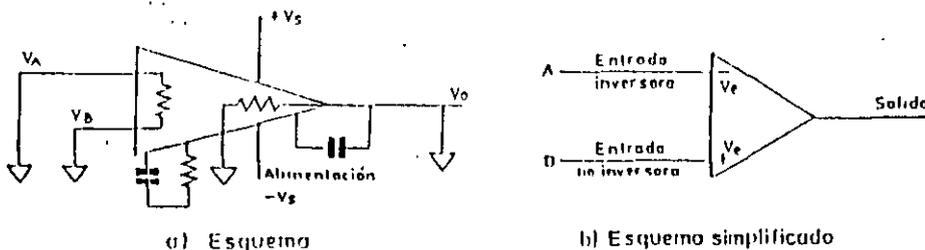


Fig. V.18 Amplificador operacional

4.2.- Control todo-nada

El amplificador operacional puede utilizarse como un controlador todo-nada muy sensible gracias a la alta ganancia del amplificador. Bastará una pequeña diferencia de señales en la entrada para que se obtenga una salida total en voltios ligeramente inferior a la tensión de alimentación. Como señal de entrada se utiliza la diferencia entre la variable y el punto de consigna y en el terminal de salida se conecta un circuito de excitación del relé final de control. La zona muerta del control todo-nada se logra mediante una resistencia conectada en serie con el terminal no inversor del amplificador y con una resistencia conectada entre este último terminal y el de salida del amplificador. En la figura V.19 puede verse un montaje de este tipo. Su funcionamiento es el que sigue.

Cuando la señal en el terminal B aumenta unos pocos milivoltios con relación a la del terminal A, la salida V_o aumenta y es realimentada vía la resistencia R_2 a la entrada del amplificador, bloqueando éste. El amplificador permanece en estas condiciones gracias al divisor de tensión que forman los terminales B y la salida.

Para que las condiciones iniciales se restablezcan, la señal de entrada debe bajar los suficientes milivoltios, con relación al terminal inversor, para compensar el efecto del divisor de tensión R_1, R_2 . El valor de la zona muerta depende de la relación R_2/R_1 y será tanto más pequeña cuanto mayor sea esta relación.

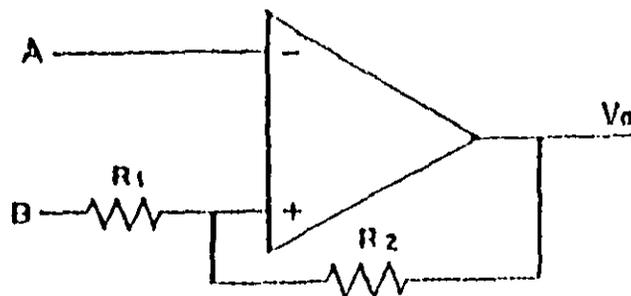


Fig. V.19 Control todo-nada electrónico

4.3.- Control proporcional de tiempo variable

El control todo-nada descrito anteriormente puede modificarse ligeramente para obtener un control proporcional de tiempo variable. En la figura V.20 puede verse el esquema correspondiente que deriva del todo-nada aplicando un circuito RC entre la salida y la entrada inversora, para conseguir de este modo un retardo en la realimentación inversora y hacer que el circuito entre en oscilación. El circuito funciona del modo que a continuación se detalla :

Sea la tensión en A nula y la tensión en B negativa con respecto a A. Evidentemente, la señal de salida será negativa, con lo cual el condensador C, se cargará negativamente y el

divisor de tensión $R_a R_1 R_2$ impedirá que el terminal inversor del amplificador operacional tenga menor tensión negativa que la entrada no inversora.

Si ahora la entrada B se hace positiva con relación a A, la señal de salida se hará positiva, cargando también positivamente el condensador C_1 en un tiempo que depende de los valores de R_2 y C_1 , es suficiente para compensar el divisor de tensión formado por $R_a R_1$, la entrada inversora se hace positiva, provocando el cambio de signo en la señal de salida, pasando ésta a negativa.

A continuación, la carga del condensador se hace negativa y va aumentando hasta que sobrepasa la influencia del divisor de tensión $R_a R_1$, con lo cual la entrada inversora se hará negativa y por lo tanto la señal de salida cambiará ahora a positiva, y así sucesivamente.

Estas oscilaciones en la salida tienen la forma de onda cuadrada, de amplitud casi equivalente a la tensión de alimentación. Las variaciones de la tensión de entrada B cambiarán la tensión real media de carga del condensador C_1 , lo que fijará la proporción entre el tiempo de conexión y el de desconexión del relé de salida. Es decir, si esta tensión media es de 0 V, los tiempos serán iguales y la relación valdrá 1/1. El sistema utilizará diferentes partes de la curva de carga/descarga del condensador variando la señal de entrada B. Por otro lado, la proporción entre el tiempo de conexión/desconexión del relé de salida vendrá fijada por el punto de trabajo del condensador C_1 .

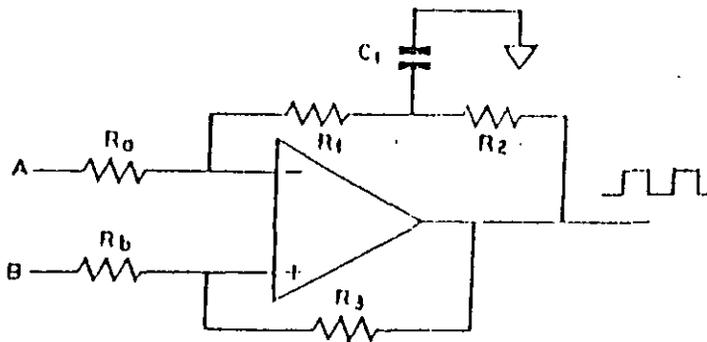


Fig. V.20 Control proporcional de tiempo variable

4.4.- Control proporcional

Si el amplificador operacional se usa como amplificador analógico de ganancia finita, su alta ganancia da lugar a que la entrada tenga que ser muy débil, casi nula, del orden de 0,2 mV. Para disminuir esta elevada ganancia es necesario realimentar la señal de salida a la entrada inversora $-V_e$ mediante una resistencia R_f , y como nos interesará que la señal de entrada tenga un valor distinto de cero, se añade al circuito otra resistencia R_a .

Consideremos ahora que las señales de entrada y salida sean nulas; evidentemente no habrá circulación de corriente a través de las resistencias R_f y R_a . Si ahora la entrada inversora A cambia a +1 V, la tensión de salida variará en la dirección $-V_e$ hasta que la

corriente de entrada del amplificador se reduzca a cero (ya que es un amplificador diferencial).

4.5.- Control integral

La acción integral puede generarse en el amplificador operacional mediante un condensador conectado en serie con la línea de realimentación negativa y con una resistencia conectada en serie con el terminal inversor, según puede verse en la figura V.21a tiene el inconveniente de invertir la señal de salida con relación a la señal de error (PV-SP), lo cual es indeseable en algunas aplicaciones. Para evitarlo puede conectarse la señal de error a la entrada inversora y conectando esta última a la línea de cero voltios a través de una resistencia (figura V.21b).

Cuando se aplica una señal de error positiva PV-SP a la entrada no inversora B, la salida cambia en una dirección positiva, con lo cual el condensador C_i se va cargando, pasando así una corriente i a través de la resistencia R_i lo que provoca una variación de la carga del condensador. La disminución correspondiente creada en la entrada inversora del amplificador hace que la salida aumente en una dirección positiva, lo cual a su vez hace que el terminal negativo, a través del condensador C , pase a tener una tensión positiva, manteniendo la corriente i , en la resistencia R_i al cursor de un potenciómetro conectado entre la entrada B de la señal de error y la línea de 0 voltios. De este modo se obtendrá un ajuste fino del tiempo de acción integral en el potenciómetro, y un ajuste más amplio cambiando los valores de la resistencia R_1 . En la figura V.21 c puede verse el esquema correspondiente.

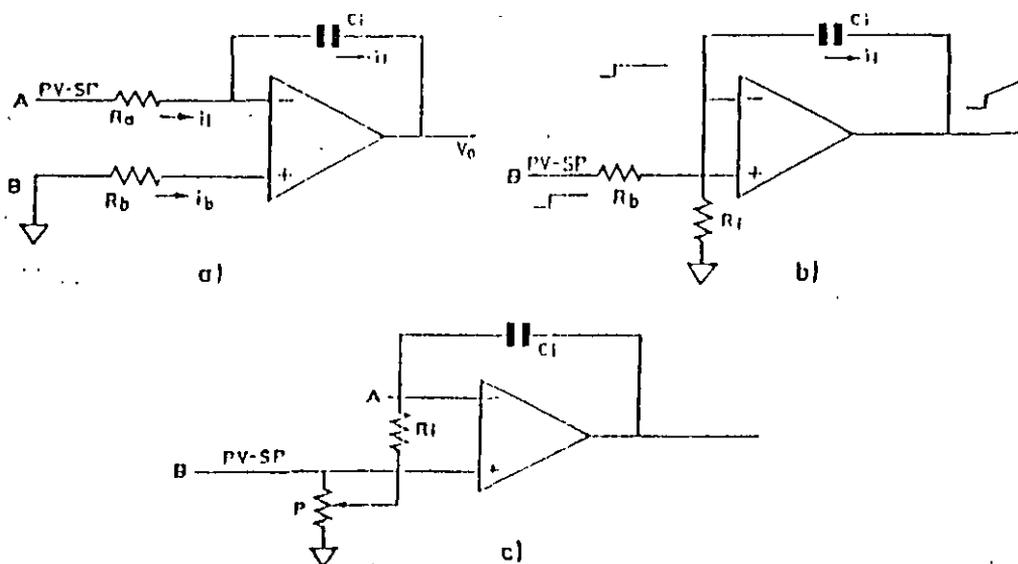


Fig. V.21 Control integral electrónico

4.6.- Control derivativo

La acción derivativa puede conseguirse colocando un condensador C_d a la entrada inversora y una resistencia R_d en paralelo entre la salida y la entrada inversora.

En la figura V.22 a puede verse el esquema básico correspondiente.

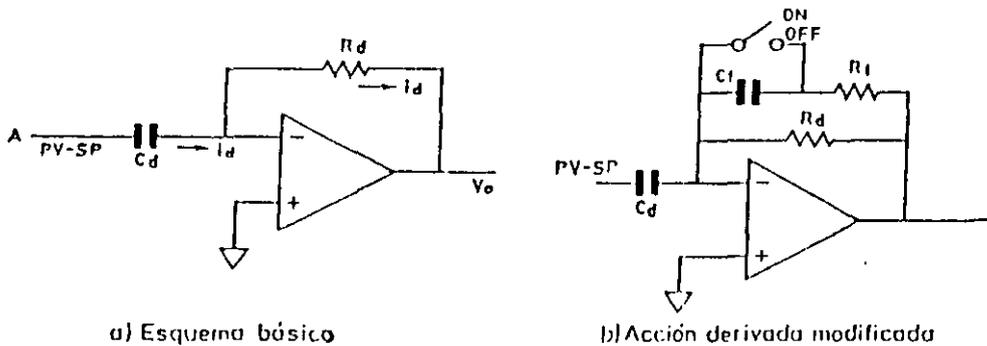


Fig. V.22 Controlador de acción derivada

Las ecuaciones correspondientes son :

$$V_o = - i_d R_d$$

$$PV-SP = \frac{\int i_d dt}{C_d}$$

derivando la segunda ecuación resulta :

$$\frac{d(PV-SP)}{dt} = \frac{1}{C_d} i_d$$

y sustituyendo en la primera se tiene

$$V_o = - R_d C_d \frac{d(PV-SP)}{dt}$$

que la ecuación de la acción derivativa de constante de tiempo $\tau_d = R_d C_d$.

El ajuste de la acción derivativa se obtiene transformando la resistencia R_d en un potenciómetro. Cuando la señal de error cambia rápidamente (debido a una variación rápida del punto de consigna o bien de la variable o quizá provocado por señales con ruido) la señal de salida aumenta muy rápidamente tomando en el límite la forma de un pico. Este efecto es indeseable ya que puede perjudicar el control del proceso.

Se soluciona este inconveniente eliminando la acción derivativa cuando el instrumento capta una variación rápida de la señal del error. Se conecta un condensador C_1 y una resistencia R_1 en serie, en paralelo con la resistencia derivativa R_d (Fig. V.22 b). De este modo, como la impedancia a través de la resistencia derivativa R_d , con lo cual el tiempo de acción derivativa será necesariamente bajo, modificándose el valor derivativo ajustado, pero sólo durante el instante de variación rápida de la señal de error. Un interruptor conectado en paralelo con el condensador C_1 permite, en la posición de conexión, eliminar la acción derivativa cuando así se desee.

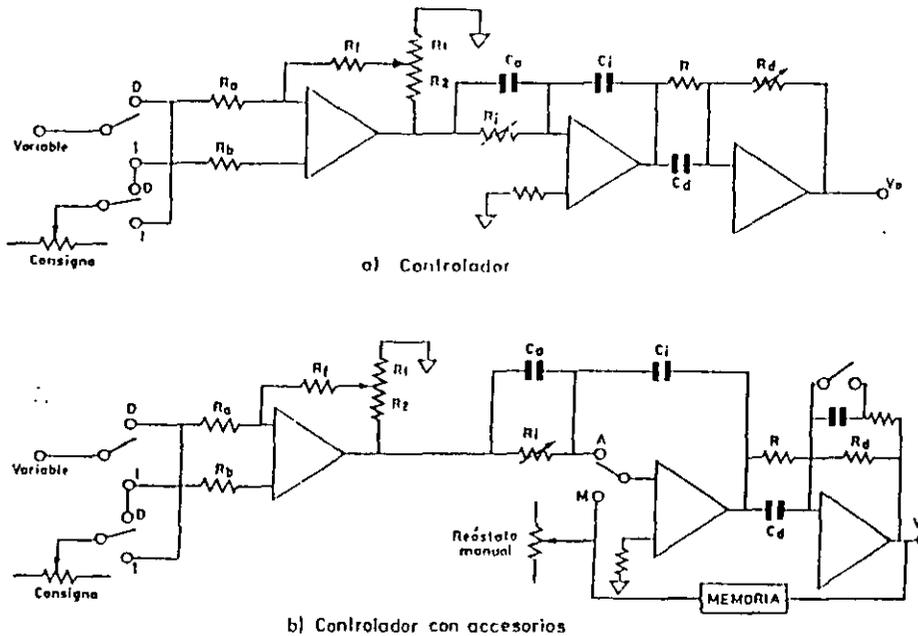


Fig. V.23 Esquema simplificado del controlador PID

La unión en un circuito de los tres controladores descritos anteriormente da lugar a un instrumento electrónico proporcional+integral+derivativo.

El circuito simplificado consiste en un módulo proporcional+integral — donde se fija la ganancia o banda proporcional, se amplifica la desviación entre la variable y el punto de consigna, se fija el valor del punto de consigna y se selecciona la acción directa o la inversa del controlador — y un módulo de acción derivada modificada donde se encuentra el potenciómetro de acción derivada.

En la figura V.23 puede verse un esquema simplificado del controlador.

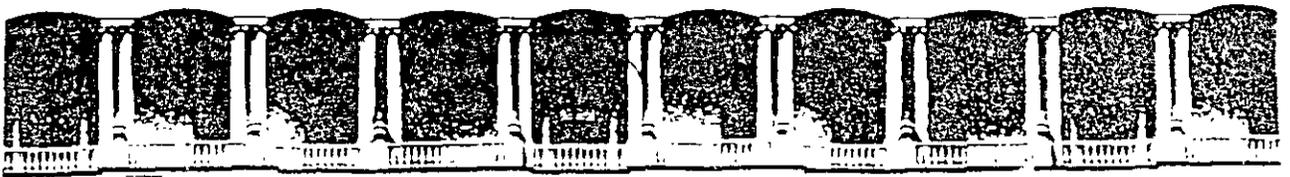
La ecuación correspondiente es :

$$V_o = g(PV-SP) + K' \int_0^t (PV-SP) dt + K'' \frac{d(PV-SP)}{dt}$$

En otros controladores, el potenciómetro de acción proporcional se encuentra en la salida del segundo amplificador operacional. Los controladores electrónicos suelen disponer además de un conmutador automático-manual con un reóstato para control manual se efectúe sin saltos. Estos accesorios se representan en la figura V.23 b.

4.8.- Cambio automático — manual — automático

En los instrumentos electrónicos, el cambio manual-automático o automático-manual se efectúa sin saltos en la posición de la válvula de control gracias a un circuito de «memoria» que mantiene el mismo nivel de potencial antes de la conmutación. En la posición «manual» el elemento final de control recibe la salida de un potenciómetro de ajuste manual, mientras que en la posición «automática» la conexión queda establecida en el bloque PID (fig. V.23)



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

TEMAS:

CONTROLADORES AUTOMÁTICOS

**ING. ALFONSO RODRÍGUEZ NAVIDAD
PALACIO DE MINERÍA
NOVIEMBRE 1999**

VI.- Controladores automáticos

1.- Medición de la señal

La primera consideración en el diseño o selección de un sistema de control es la medición de la variable a ser controlada.

Los principios y métodos de medición de temperatura, presión, etc., son exactamente los mismos para un detector primario de control automático que para un instrumento indicador.

Para un controlador automático, las características de la sonda de medición son de vital importancia ; el retraso siempre afecta adversamente la estabilidad y precisión del sistema de control. En ocasiones se considera que la precisión de medición no es tan importante en los controladores, puesto que la desviación de una lectura habitual es la información importante requerida.

Una alta sensibilidad del elemento medidor permite frecuentes y relativamente pequeñas operaciones de la válvula de control, y consecuentemente la separación del valor deseado puede conservarse pequeña. El elemento primario produce un desplazamiento, una presión una fuerza o una señal eléctrica, la cual tiene una relación funcional directa con la variable controlada.

En la forma mas simple de controlador, la presión o fuerza producida por el elemento primario se aplica directamente para mover la válvula de control ; este tipo se conoce como controlador de acción directa, y como ejemplo se tienen las trampas de vapor, válvulas reductoras de presión sencillas, válvulas de alivio y seguridad, termostatos de agua de enfriamiento de automóviles, etc.

Cuando la salida del elemento primario es el desplazamiento de una aguja, persiana o voltaje o corriente eléctrica, la salida se utiliza en un relevador que controla a un mecanismo actuador de la válvula, mas potente.

2.- Válvulas de control

Las válvulas de control pueden ser de casi todos los tipos comunes : globo, compuerta, tapón o macho, mariposa, pistón, etc. Las características deseables son :

- Baja fuerza para operarlas
- Relación invariable entre el puerto de apertura y el desplazamiento del operador.
- Confiabilidad
- Baja fuerza

La fuerza hidráulica ejercida sobre el vástago de operación debe ser siempre en la misma dirección y debe tener una relación funcional definida con la posición del operador, mientras que la variación con la posición debe ser pequeña. Las fuerzas de fricción los convierten erráticas y por lo tanto deben conservarse pequeñas en proporción con las fuerzas hidráulicas o del resorte.

Las válvulas de globo normales con disco plano tienen una relación indeseable entre la posición del vástago y la apertura del puerto, ya que éste se incrementa muy rápido con pequeños movimientos del vástago desde la posición de cerrada, mientras que grandes movimientos del vástago cerca de la posición de abierta tienen muy poco efecto sobre el punto de apertura o flujo.

Una válvula de globo no debe usarse con la presión de entrada sobre la parte superior de disco, porque vibrará cuando este casi cerrada ; la razón de esto es la baja presión de la región de alta velocidad entre el disco y el asiento, la cual tiende a sellar la válvula.

Las fuerzas hidráulicas casi pueden ser balanceadas con las válvulas de doble asiento (fig. VI.2), sin embargo, no es posible hacer que este tipo de válvula selle al cierre.

3.- Motores de válvulas

Las válvulas de control son operadas por varios medios : hidráulico, neumático y eléctrico.

Los operadores hidráulicos son normalmente del tipo pistón y cilindro operando directamente sobre un vástago deslizante de la válvula. El cilindro hidráulico puede ser de simple acción con regreso por resorte o puede ser de doble acción con fluido admitido en un extremo del cilindro para elevar el vástago de la válvula, y en el otro extremo para bajar el vástago de la válvula.

La operación neumática de válvulas con aire comprimido de baja presión ha sido el medio mas utilizado. El operador neumático mas simple comprende un diafragma superior conectado directamente el vástago de la válvula, con resorte de retorno (fig. IV.5). En la válvula de acción directa el resorte abre la válvula, y el aire a presión sobre el diafragma la cierra ; la posición del vástago de la válvula es entonces proporcional a la presión del aire sobre el diafragma, como se determina por la relación entre el régimen del resorte y el área efectiva del diafragma. Cuando la fuerza de operación de la válvula es grande, se requiere un resorte fuerte y un diafragma de diámetro grande, y consecuentemente la cantidad de aire requerido para operar la válvula es grande, lo cual tiende a disminuir la velocidad de operación de la válvula.

Un posicionador de válvula es un dispositivo que consta de un sistema auxiliar de aire-piloto con independencia del suministro de aire el cual aplica ya sea plena presión de aire o bien cero presión de aire sobre el diafragma, hasta que el vástago de la válvula esté en la posición correcta, de acuerdo con la señal de presión del elemento primario. Pequeños cambios en la presión de señal produce la máxima fuerza de corrección en el diafragma.

Un arreglo de posicionador de válvula se muestra en la fig. IV.6 ; en donde la presión de señal actúa a través de un diafragma sobre una pequeña válvula piloto de 3 vías, mostrada como una válvula de pistón. Cuando la presión de señal se incrementa, fuerza a la válvula piloto hacia abajo, admitiendo aire de presión plena al diafragma de la válvula principal de control, forzando a la válvula principal a cerrar. Conforme el vástago de la válvula se mueve hacia abajo, la palanca de posición de la válvula incrementa la fuerza sobre el pequeño

resorte en la válvula piloto, tendiendo a cerrar el suministro de aire al diafragma de la válvula principal y restaurando la posición original de la válvula piloto. Con una caída en la presión de señal, se deja escapar a la atmósfera el aire del diafragma de la válvula principal, y entonces el resorte de la válvula principal actúa para abrir la válvula principal.

Un motor de diafragma sin resorte se muestra en la fig. VI.7 ; como en los casos anteriores, la señal de presión está aplicada en la parte superior del diafragma. El espacio abajo del diafragma está sellado y alimentado con aire a una presión fija a través de una válvula reductora de presión ; la señal de presión actúa entonces contra una resistencia fija en lugar que contra una fuerza variable de un resorte. Siempre que la señal de presión exceda la presión constante bajo el diafragma, el vástago de la válvula se mueve hacia abajo, y siempre que la señal caiga abajo de la presión fija, el vástago de la válvula se mueve hacia arriba.

Para la operación de válvulas de carrera larga, amortiguadores, etc., en donde el movimiento requerido excede la capacidad de un diafragma, se emplean cilindros neumáticos y fuelles ; los métodos de operación y las posibles combinaciones de métodos de control son los mismos que los motores de diafragma.

Las válvulas operadas eléctricamente son de dos tipos :

- Solenoide
- Operadas con motor

La válvula de solenoide mostrada en la Fig. VI.8 es capaz únicamente de operaciones de abrir y cerrar ; cuando la bobina está energizada, ésta "jala" un buzo de fierro dulce hacia arriba a una posición central en la bobina. El fluido ésta aislado con una tapa de bronce entre la bobina y el buzo ; éste está conectado suelto al vástago de la válvula, lo que permite al buzo adquirir una velocidad apreciable antes de engancharse al vástago de la válvula. Cuando la bobina se desenergiza, el buzo y el vástago de la válvula caen por gravedad a la posición de cerrada ; con presión de entrada bajo el asiento, no puede esperarse que la válvula de solenoide cierre en forma hermética, con presión de entrada sobre el disco, la fuerza elevadora máxima limita la presión de operación a relativamente bajos valores.

La impulsión operada con motor puede ser, aplicada a casi cualquier tipo y tamaño de válvula ; conexión mecánica entre la flecha del motor y el vástago de la válvula se efectúa con una gran variedad de mecanismos. Un diseño de motor impulsor de válvula está diseñado para parar seguramente por períodos extendidos al final de la carrera de la válvula ; el motor puede solo correr en una dirección con regreso por resorte o bien se emplea un motor de reversa. Oro motor impulsor de válvulas provisto con motores de reversa tienen switches límites ajustados cerca del límite del movimiento de la válvula, o pueden ser ajustables para limitar el movimiento de la válvula a cualquier parte deseada de su rango total.

resorte en la válvula piloto, tendiendo a cerrar el suministro de aire al diafragma de la válvula principal y restaurando la posición original de la válvula piloto. Con una caída en la presión de señal, se deja escapar a la atmósfera el aire del diafragma de la válvula principal, y entonces el resorte de la válvula principal actúa para abrir la válvula principal.

Un motor de diafragma sin resorte se muestra en la fig. VI.7 ; como en los casos anteriores, la señal de presión está aplicada en la parte superior del diafragma. El espacio abajo del diafragma está sellado y alimentado con aire a una presión fija a través de una válvula reductora de presión ; la señal de presión actúa entonces contra una resistencia fija en lugar que contra una fuerza variable de un resorte. Siempre que la señal de presión exceda la presión constante bajo el diafragma, el vástago de la válvula se mueve hacia abajo, y siempre que la señal caiga abajo de la presión fija, el vástago de la válvula se mueve hacia arriba.

Para la operación de válvulas de carrera larga, amortiguadores, etc., en donde el movimiento requerido excede la capacidad de un diafragma, se emplean cilindros neumáticos y fuelles ; los métodos de operación y las posibles combinaciones de métodos de control son los mismos que los motores de diafragma.

Las válvulas operadas eléctricamente son de dos tipos :

- Solenoide
- Operadas con motor

La válvula de solenoide mostrada en la Fig. VI.8 es capaz únicamente de operaciones de abrir y cerrar ; cuando la bobina está energizada, ésta "jala" un buzo de fierro dulce hacia arriba a una posición central en la bobina. El fluido ésta aislado con una tapa de bronce entre la bobina y el buzo ; éste está conectado suelto al vástago de la válvula, lo que permite al buzo adquirir una velocidad apreciable antes de engancharse al vástago de la válvula. Cuando la bobina se desenergiza, el buzo y el vástago de la válvula caen por gravedad a la posición de cerrada ; con presión de entrada bajo el asiento, no puede esperarse que la válvula de solenoide cierre en forma hermética, con presión de entrada sobre el disco, la fuerza elevadora máxima limita la presión de operación a relativamente bajos valores.

La impulsión operada con motor puede ser, aplicada a casi cualquier tipo y tamaño de válvula ; conexión mecánica entre la flecha del motor y el vástago de la válvula se efectúa con una gran variedad de mecanismos. Un diseño de motor impulsor de válvula está diseñado para parar seguramente por períodos extendidos al final de la carrera de la válvula ; el motor puede solo correr en una dirección con regreso por resorte o bien se emplea un motor de reversa. Oro motor impulsor de válvulas provisto con motores de reversa tienen switches límites ajustados cerca del límite del movimiento de la válvula, o pueden ser ajustables para limitar el movimiento de la válvula a cualquier parte deseada de su rango total.

4.- Relevadores

Muchos controles automáticos son de acción directa, con el elemento de medición suministrando la energía requerida para operar la válvula de control, sin embargo, es obvio que un instrumento con salida de alta energía no puede tener alta sensibilidad y respuesta.

En aplicaciones críticas de control es necesario emplear un instrumento delicado para el elemento primario y usar su deflexión para controlar la aplicación de energía suministrada externamente para la operación de la válvula de control, de hecho, en muchos instrumentos, la energía para el posicionamiento del punto indicador se suministra de una fuente externa. El control de la energía externa por la deflexión de un instrumento se realiza con un dispositivo relevador, que puede ser eléctrico o neumático.

El dispositivo mas simple de este tipo es un punto de contacto eléctrico, el cual puede ser ajustado a cualquier posición sobre una escala en la deflexión de un instrumento, y un contacto similar se agrega a la aguja. Conforme el valor medido, por ejemplo temperatura, se incrementa bajo la influencia de la entrada de calor del proceso con un calentador eléctrico, la aguja alcanza el punto de ajuste y hace contacto con el contacto fijo ; la corriente que fluye a través del contacto del instrumento energiza un magneto relevador, y la armadura del relevador es "jalada" e interrumpe el circuito de calentamiento, como se muestra en el aneglo de la fig. VI.9. Cuando el circuito calentador se interrumpe, el tanque se enfría y la indicación de temperatura cae ; el contacto del instrumento se rompe con lo que se desenergiza el relevador y permite que el circuito calentador se cierre. Este proceso puede ocurrir repetidamente de manera que la indicación de temperatura puede permanecer razonablemente de manera que la indicación de temperatura puede permanecer razonablemente constante ; si no hay flujo a través del tanque el calentador operará por períodos cortos a intervalos largos para reponer las pérdidas por radiación del tanque, pero conforme el flujo a través del tanque se incrementa, el calentador operará por largos períodos con salidas por tiempo corto. Eventualmente, con el calentador operando continuamente el flujo no alcanza la temperatura de ajuste, lo cual indica que el sistema está sobrecargado.

En la fig. VI.10 se muestra un sistema de control neumático simple, en donde el vapor se suministra el calentador a través de una válvula operada por diafragma, la cual está normalmente abierta por el resorte de la válvula. El aire de control pasa a través de una restricción y un ramal hacia el termómetro de medición ; una aleta, deflector o baffle está en la aguja indicadora y pasa muy cerca de la salida de una tobera de aire. Conforme la indicación de temperatura se eleva, la aleta se mueve a una posición que bloquea parcialmente la apertura de la tobera ; con la tobera sin obstrucción, todo el suministro de aire se fuga por la tobera de forma que prácticamente no se suministra presión al diafragma y la válvula de control abre completamente. Con la tobera bloqueada la presión de aire se eleva y la válvula cierra hasta que baja la temperatura, y entonces abre la tobera, la presión de aire baja y la válvula abre, sin embargo, si el control ésta trabajando satisfactoriamente este no es un proceso periódico. A la temperatura deseada, la tobera está parcialmente bloqueada, y la presión de aire asume un valor intermedio que conserva la válvula de control abierta justamente lo suficiente para satisfacer los requerimientos de calor del

sistema. Este es un ejemplo de control proporcional, por estrangulamiento o modelado, mientras que el sistema eléctrico descrito antes es un control de dentro-fuera (on-off).

El relevador de control eléctrico de potencia puede ser manejado con contactores simple, pero a veces es ventajoso proveerlo con una variación mas gradual ; los reostatos operados con motor son disipadores de energía, pero los transformadores de relación variable son bastante eficientes. Los requerimientos de mucha potencia pueden ser controlados con tubos tiratrón ; la fracción del ciclo en el cual conducen ésta controlada por la variación del voltaje de rejilla de control.

5.- Operación funcional

Dependiendo de la dificultad y complejidad del trabajo de control determinado por el proceso que está siendo controlado, los sistemas de control empleados varían desde el tipo mas simple hasta los sistemas mas elaborados que incorporan refinamientos para incrementar la calidad del control o la constancia de la variable controlada ; en orden creciente de complejidad, estos sistemas son :

- Dentro-fuera (on-off) o dos posiciones
- Flotante
- Proporcional
- Reajuste
- Acción de régimen derivativo

Los primeros dos sistemas son características de relevadores eléctricos, y los restantes son típicos de operación neumática pero pueden utilizarse en sistema eléctricos.

Control (on-off) conectado-desconectado.

En el control conectado-desconectado, el elemento secundario es capaz de asumir solo dos posiciones ya sea con cero o máxima entrada al proceso, esto es, una válvula de solenoide está abierta o cerrada, o un switch eléctrico está abierto o cerrado dependiendo si la variable controlada está arriba o abajo del punto de ajuste: La acción es inherentemente cíclica, con una frecuencia y amplitud que están determinadas por las características dinámicas del proceso y del sistema de control.

En las fig. VI.11 Y VI.12 se muestra el patrón de operación de un control conectado-desconectado ; bajo cargas ligeras la máxima entrada al proceso es mucho mas grande que los requerimientos , es decir, durante la fase "conectado", la variable controlada se eleva muy rápidamente. Cuando se excede el punto de ajuste, la entrada se "desconecta", sin embargo, debido a la masa o inercia del proceso, o capacidad térmica, hay siempre un tiempo de retraso entre el cambio en la entrada y el cambio en la indicación ; a ésta se le llama "retraso" del proceso. Adicionalmente, la sonda del instrumento primario tiene su propio tiempo de retraso, por lo tanto, el indicador excederá el punto de ajuste ; eventualmente el indicador percibirá la pérdida de entrada y empezará a caer. El régimen de caída está determinado por los requerimientos del proceso ; si este es pequeño, la indicación caerá lentamente, y cuando pase el punto de ajuste la entrada completa se

conectará. De nuevo, debido al retraso, el indicador continuará cayendo abajo del punto de ajuste hasta que percibe el efecto de la entrada y empieza a subir de nuevo rápidamente.

Comparando las figs. VI.11 y VI.12 revelan que : bajo cargas ligeras, el valor promedio de la variable será mas grande que el punto de ajuste, y bajo cargas pesadas, el valor promedio de la variable será menor que el punto de ajuste.

La diferencia en valor promedio de la variable entre valores máximo y mínimo de la carga del proceso se conoce como "caída" del sistema de control ; la relación de la caída al valor de plena carga se conoce como "regulación". Esta nomenclatura se emplea en la literatura de controladores de velocidad, pero para controladores de presión o temperatura, el nivel de referencia debe ser el valor ambiente ; para controladores de nivel, la elección del nivel de referencia es arbitrario.

Cuando el retraso es pequeño, el sistema de control operará a alta frecuencia con una constante pequeña desviación del punto de ajuste ; cuando el retraso es grande, la frecuencia de operación es baja y las variaciones de la variable serán de amplitud grandes, es decir, el control conectado-desconectado operará satisfactoriamente solo en proceso de corto retraso.

En controles de dos-posiciones, o alto-bajo, la válvula de control o switch suministran dos valores de entrada, los cuales no son cero y máximo ; en el límite, estos dos valores pueden estar cerca de la demanda del proceso, el mas bajo siendo justo insuficiente para mantener el valor deseado de la variable controlada, y el mas alto siendo solo ligeramente en exceso a la demanda del flujo estable. Con la variable arriba del punto de ajuste, la entrada se incrementa al valor mas alto. La indicación continua cayendo por el propio retraso del proceso, pero eventualmente la indicación empieza a elevarse lentamente hacia el punto de ajuste bajo la influencia de la entrada incrementada ; en el punto de ajuste la entrada se cambia al valor mas bajo, y se repite el proceso. El control de dos posiciones puede proporcionar excelente constancia de la variable mientras la demanda del proceso esté dentro de los límites de dos entradas ; cuando la demanda del proceso está fuera de estos límites, la variable se sale completamente de control. Conforme la variación posible en la demanda del proceso se incrementa, la diferencia entre las dos entradas debe ser mas grande, aproximándose a la condición de control conectado-desconectado.

El control de dos posiciones es eminentemente adecuado a procesos que tienen demanda casi constante ; éste debe ser siempre suplementado por un control de emergencia límite el cual corte la entrada cuando la variable se salda de control en el lado alto a causa de pérdida de carga.

5.1.- Control Flotante

En el sistema de control flotante el punto de ajuste comprende dos contactos con una pequeña separación ; el contacto del indicador hace una conexión con estos dos contactos de punto de ajuste sucesivamente conforme la variable se incrementa. En todos los valores bajos el contacto bajo se energiza, y en todos los valores altos el contacto alto se energiza ; a valores entre alto y bajo ningún contacto se energiza.

Cuando el contacto bajo se energiza, opera el motor de la válvula para abrir la válvula de control, y cuando el contacto alto se energiza opera el motor de la válvula para cerrar la válvula de control. Cuando ninguno de los contactos se energiza, la válvula permanece en una posición fija ; la diferencia en la variable controlada entre los dos contactos recibe el nombre de "zona muerta" del contralor.

Cuando la variable es alta, se cierra la válvula a un régimen constante y decrece la entrada ; el efecto de este decremento de entrada eventualmente se refleja en el indicador un valor cayendo. Si la variable cae por abajo del contacto alto, se para el motor de la válvula, pero si la variable cae abajo del contacto bajo a causa del "retraso, el motor operará en dirección inversa para abrir la válvula, lo cual eventualmente incrementará la variable.

La operación no es necesariamente cíclica ; bajo carga constante, la entrada se ajustará para corresponder a la demanda del proceso, con el indicador en la "zona muerta" y la válvula de control estacionaria. Cuando el proceso demanda cambios, el indicador se moverá ya sea al contacto alto o al bajo el cual reposicionará la válvula para ajustarse a la nueva demanda, sin embargo el indicador puede vagar cualquier lugar de la zona sin efectuar ningún control correctivo ; el término "flotante" describe la pérdida de conexión entre la posición de la válvula y la posición del indicador.

Si el término de tránsito del indicador a través de la zona muerta y la velocidad de la carrera de la válvula son rápidos comparados con el retraso del proceso, la operación degenera en un control conectado-desconectado, con la consecuente operación cíclica, sin embargo, si la velocidad de la válvula puede ajustarse para adecuarse al proceso, el "penduleo" puede ser eliminado ensanchando la zona muerta. El incremento de la zona muerta es un detrimento de la precisión del control ; cuando el sistema esta operando en forma no-periódica, la variable debe estar siempre dentro de los límites de la zona muerta.

5.2.- Control proporcional

En los sistemas de control proporcional, la posición de la válvula de control está en función directa del alejamiento del indicador del punto de ajuste ; en el sistema de la Fig. VI.10 se muestra un ejemplo de control proporcional neumático.

El punto de control está ajustado por el posicionamiento de la tobera de sangría con relación a la aguja indicadora, la cual lleva una aleta o algún arreglo cinemático equivalente.

Cuando la aleta esta apartada de la tobera es decir, cuando la variable es baja, se aplica una mínima presión de aire al diafragma y la válvula está completamente abierta, pero cuando la aleta cubre la tobera, entonces la presión de aire máxima cierra completamente la válvula.

Bajo condiciones de estado estable ; la demanda del proceso requiere una apertura definida de la válvula de control para suministrarla entrada requerida ; para obtener esta

apertura de válvula, se requiere una presión de aire intermedia, la cual se obtiene con la aleta bloqueando parcialmente la tobera de sangría.

El cambio en la posición de la aleta requerido para cambiar la válvula desde la posición de abierta a cerrada, corresponde a un cambio en la variable desde plena carga a cero carga del proceso ; a ésta diferencia en la variable se le llama "banda proporcional" y corresponde a la caída del controlador.

El decremento en la banda proporcional mejora la regulación del control, sin embargo, cuando el tiempo de tránsito a través de la banda proporcional es relativamente pequeño con relación al retraso del proceso, entonces el control degenera en conectado-desconectado, con el consecuente ciclo de "penduleo".

Para proporcionar estabilidad, algunas veces es necesario hacer la banda proporcional extremadamente ancha, lo cual se hace cambiando la interrelación cinemática entre la aguja y la aleta, en tal forma que se requiera un movimiento relativamente grande de la aguja para un pequeño movimiento de la aleta ; en la fig. VI.13 se muestra un esquema neumático para lograr este mismo propósito. Cuando la aguja mueve a la aleta lejos de la tobera, la presión de aire a la válvula cae ; esta misma presión se aplica al fuelle conectado a la palanca de la aleta para mover esta mas cerca de la tobera, es decir, reduciendo la acción de control por el movimiento inicial de la aguja.

Cuando se usa un sistema de control de banda proporcional ancha, la caída del sistema entre plena carga y cero se vuelve grande ; esto debe ser compensado por un "reajuste" manual o automático del punto de ajuste para mantener la variable a un valor razonablemente constante.

El control proporcional de sistemas eléctricos pueden ser efectuado por varios métodos ; un método provee por alternancia mecánica de el punto de ajuste sobre la banda proporcional deseada, y el resto del sistema de control es un simple conectado-desconectado (on-off), sin embargo, conforme la aguja o indicador está dentro de la banda proporcional, el circuito de control funciona con cada alternancia del punto de ajuste. La relación de tiempo conectado a tiempo desconectado varía directamente con el alejamiento de la aguja desde la posición máxima del punto de ajuste.

Otro método utiliza un circuito de puente Wheatstone ; un motor de válvula lleva un alambre deslizante con un contacto indicando la posición de la válvula. En el instrumento de medición esta un alambre deslizante similar con un contacto indicando la posición de la aguja dentro de la banda proporcional deseada ; cualquier desbalance de voltaje energiza el relevador el cual controla la rotación del motor de la válvula para minimizar la diferencia.

5.3.- Acción de reajuste

El control proporcional causa inherentemente una desviación en el punto de control conforme la carga o la posición de la válvula cambian ; puesto que la función de un control automático es mantener la variable a un valor constante, se deben corregir las grandes desviaciones debidas a la acción proporcional.

En la fig. VI .14 se muestra un controlador neumático con acción de reajuste, en donde los fuelles a la izquierda proveen la acción proporcional como en la Fig.IV.13, y los fuelles de la derecha proveen la acción de reajuste ; ambos fuelles están llenos con un líquido y conectados a través de una válvula de aguja. Bajo una condición de perturbación, la corrección se hace por simple acción proporcional con el líquido actuando como un cuerpo rígido, sin embargo, después que la corrección está hecha, las presiones en los líquidos están desbalanceados conforme el indicador no está en el punto de ajuste. El líquido fluirá lentamente a través de la válvula de aguja y desvía la aleta para forzar de nuevo la lectura del instrumento al punto de ajuste, por la modificación de la entrada ; la válvula de aguja que concentra a los dos fuelles provee un ajuste de la tasa de tiempo de la acción de reajuste.

5.4.- Acción de rapidez

Cuando los cambios de carga del proceso son rápidos, y particularmente si el proceso es lento para responder a los cambios de entrada, las desviaciones de la variable del punto de ajuste son muy objetables durante un disturbio en la carga o alimentación ; la adición de la acción de rapidez a un controlador es un medio efectivo de mejorar la precisión del control. Un método para hacer ésto implica la inserción de una válvula de aguja de estrangulamiento en la línea de suministro de aire a los fuelles proporcionales como se muestra en la Fig.VI.14

Bajo un cambio repentino en la variable, la válvula de aguja desacelera o frena la aplicación de la presión a los fuelles proporcionales ; el sistema actúa entonces como uno con banda proporcional estrecha, y se aplica un exceso de corrección a la válvula de control. Eventualmente la presión se iguala a través de la válvula de aguja y los fuelles proporcionales llegan a su posición normal ; el ancho efectivo de la banda proporcional es así inverso a la rapidez del desplazamiento de la variable del punto de ajuste. El efecto neto es el de proveer una sobrecorrección fuerte para cambios rápidos en la variable, antes de tener grandes desviaciones ; en esta forma se anticipan y previenen las desviaciones grandes.

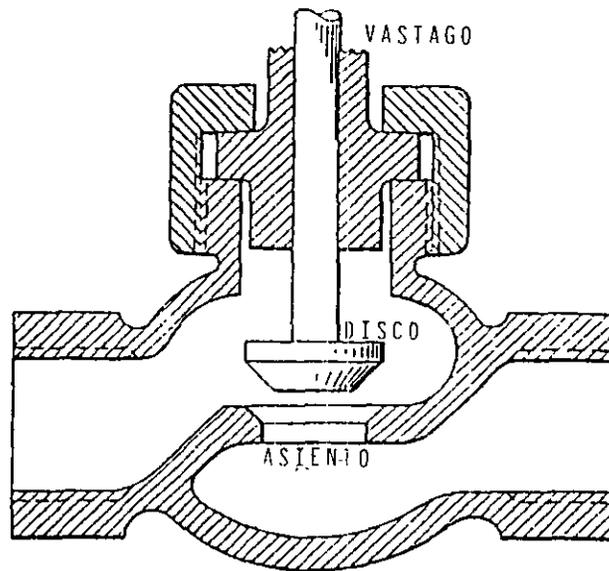


Fig. VI.1 Válvula de globo

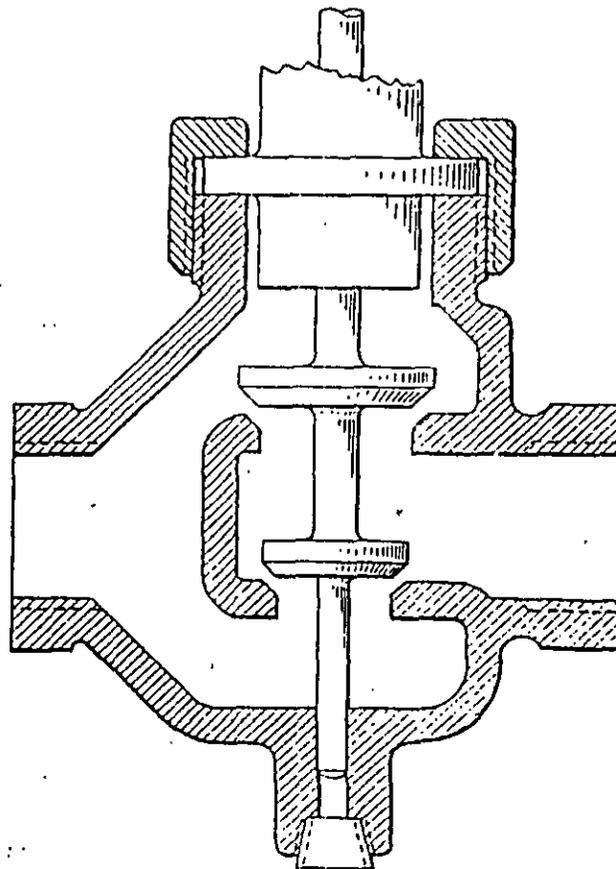


Fig. VI.2 Válvula de doble asiento

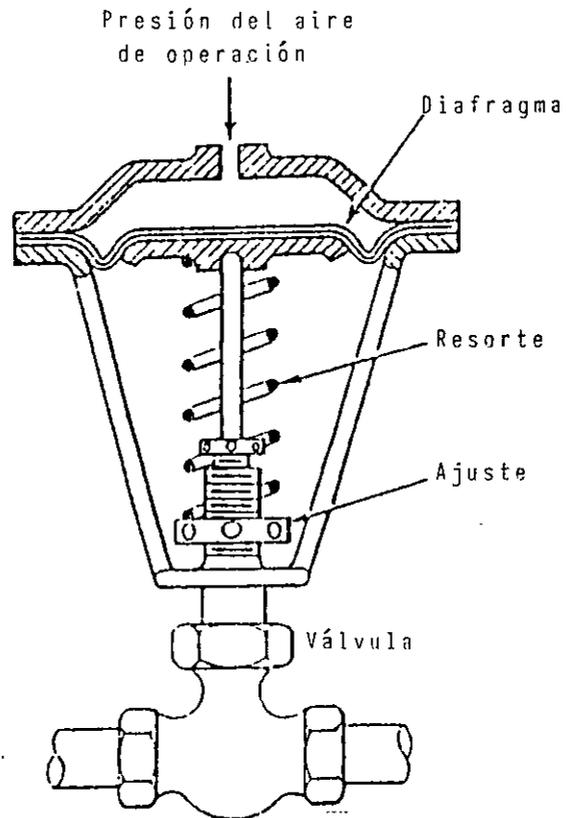


Fig. VI.5 Motor diafragma

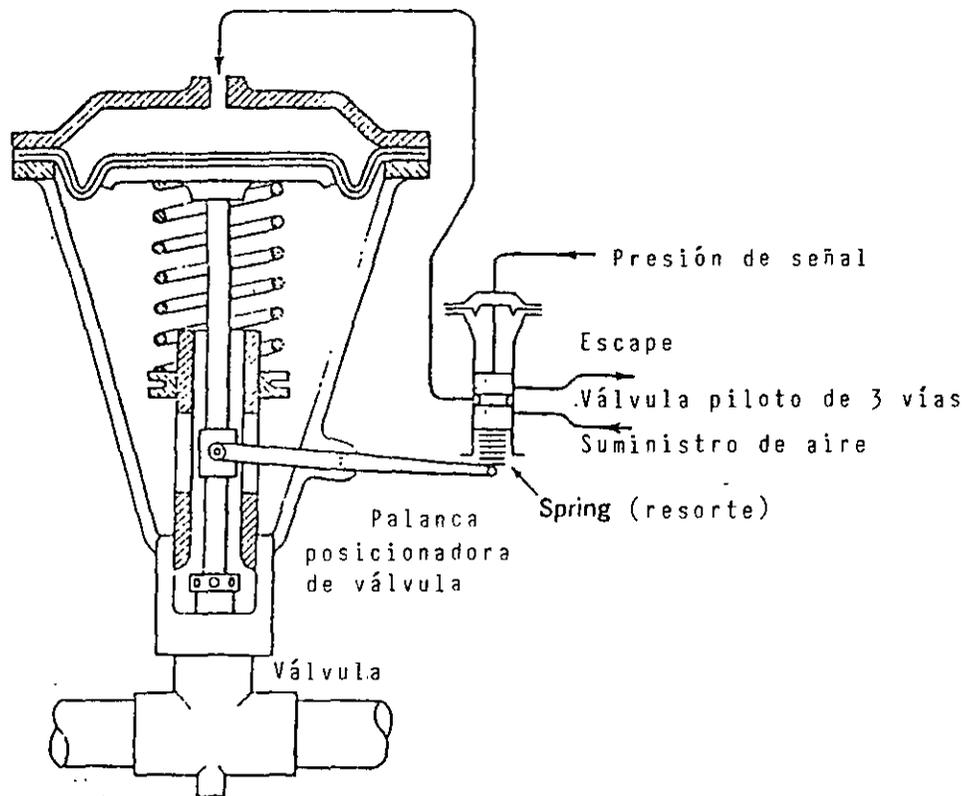


Fig. VI.6 Posicionadora de válvula

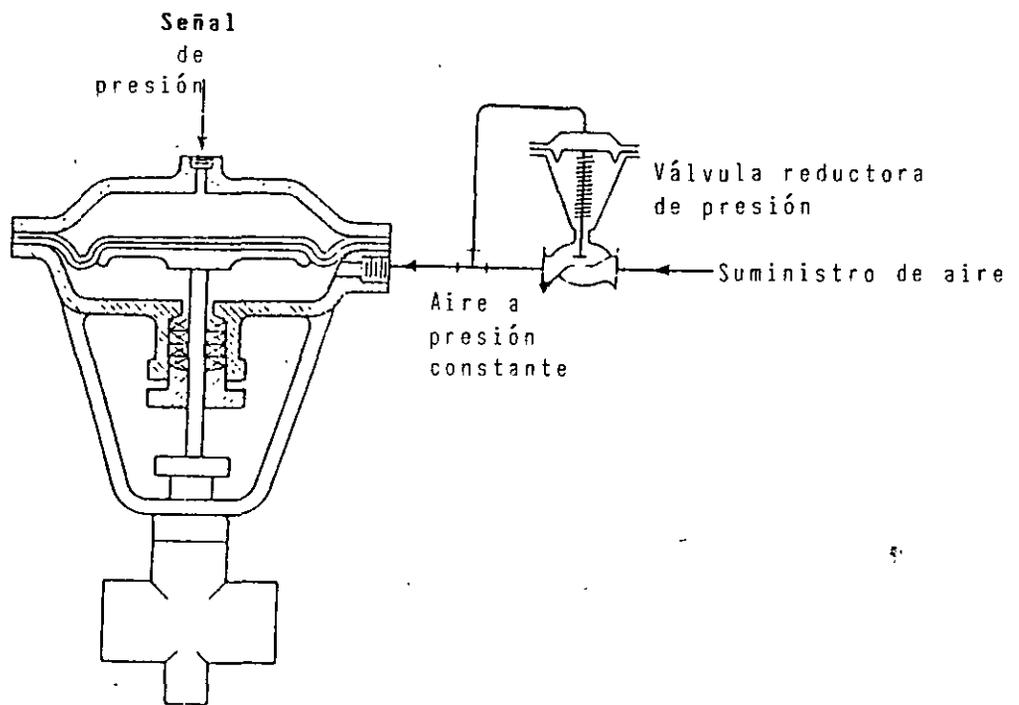


Fig. VI.7 Diafragma motor sin resorte

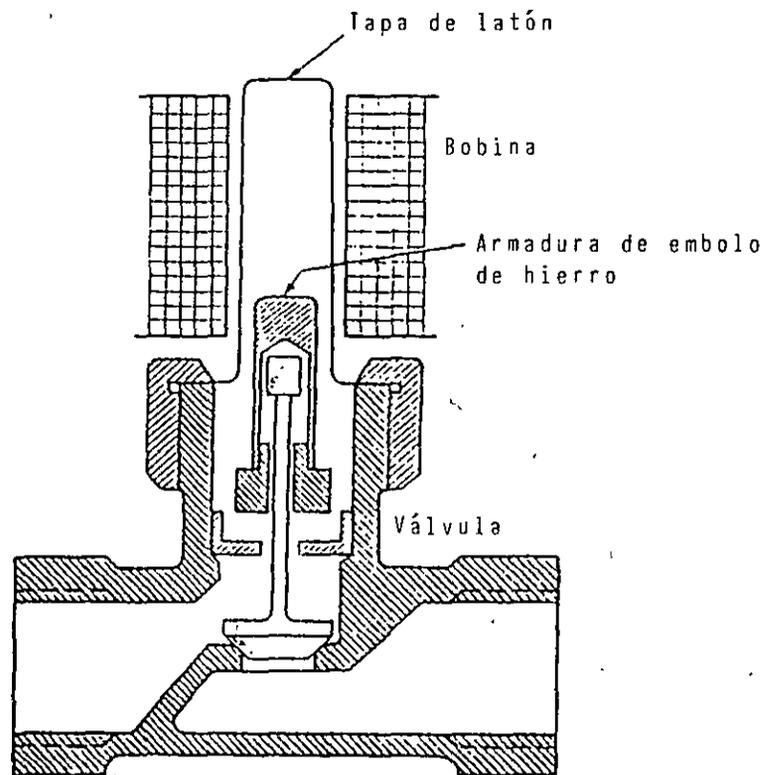


Fig. VI.8 Válvula de Solenoide

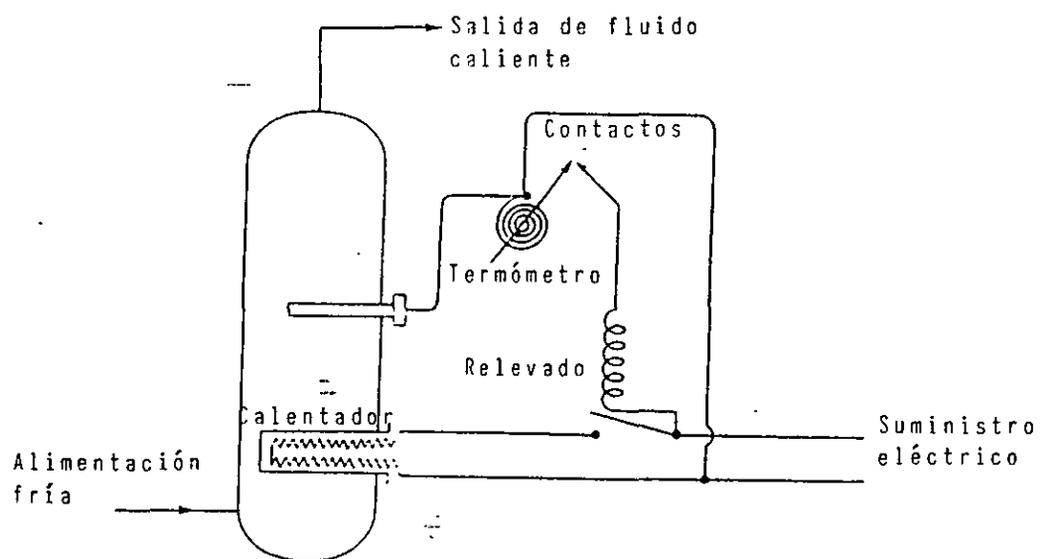


Fig. VI.9 Circuito de control de calentador

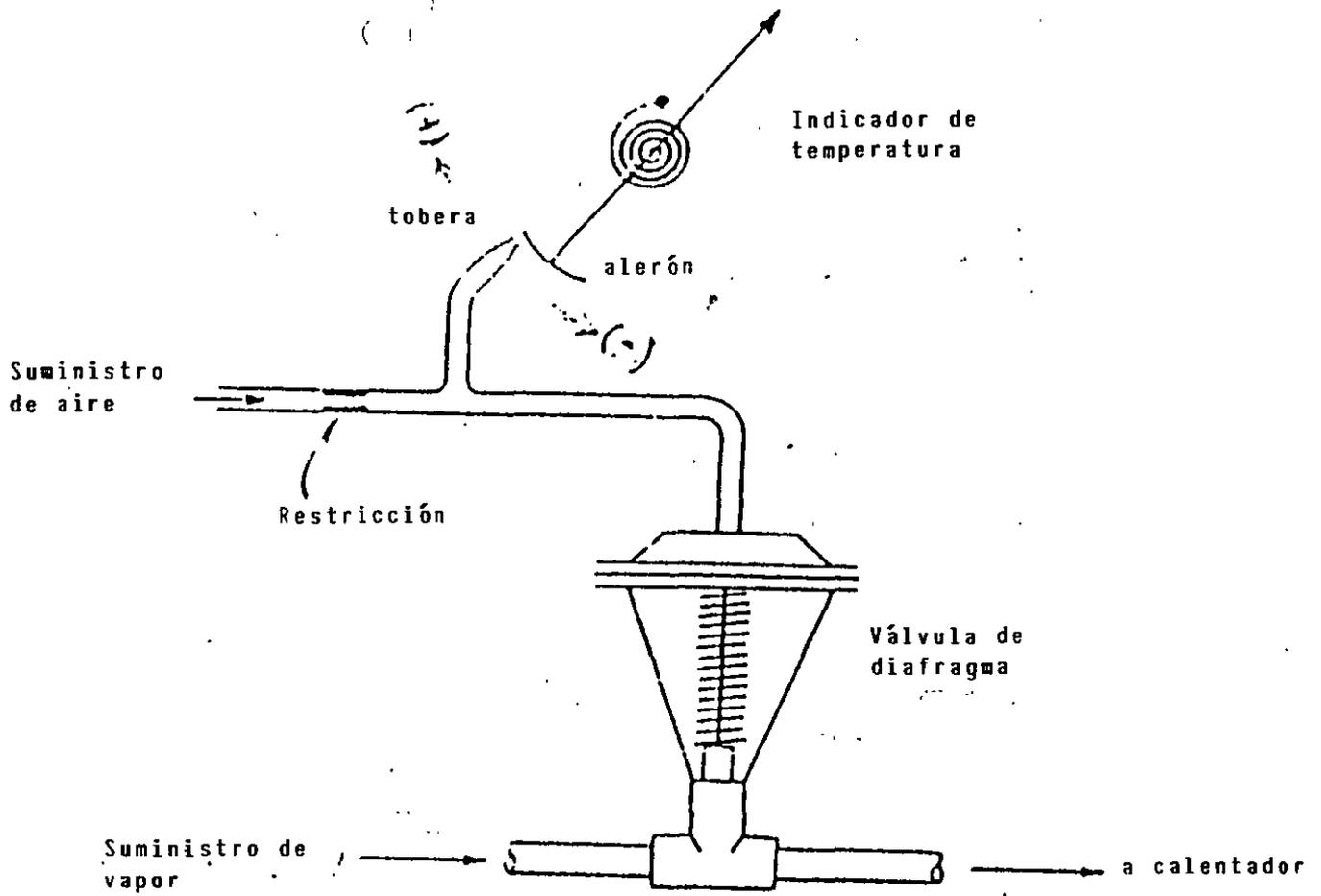


Fig. VI.10 Control neumático simple

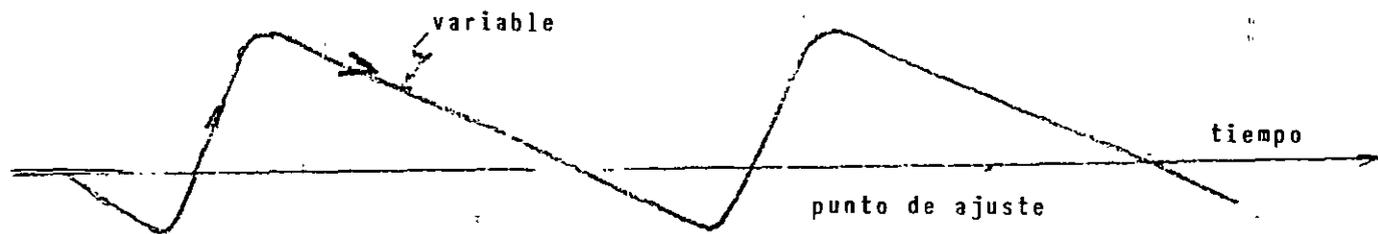


Fig. VI.11 Operación de control "on-off" con carga ligera

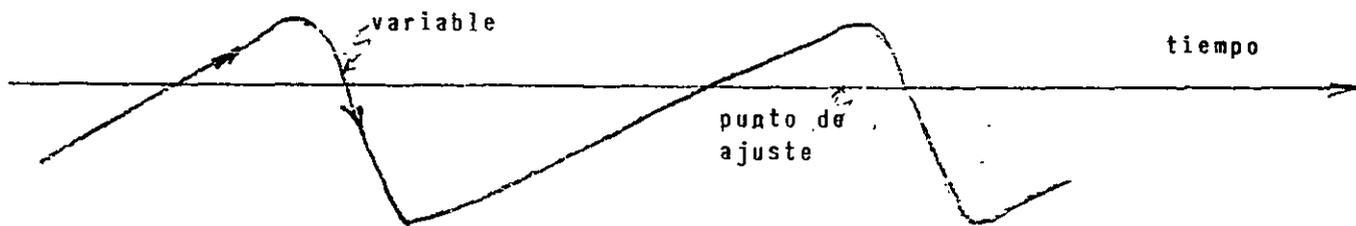


Fig. VI.12 Operación de control "on-off" con carga pesada

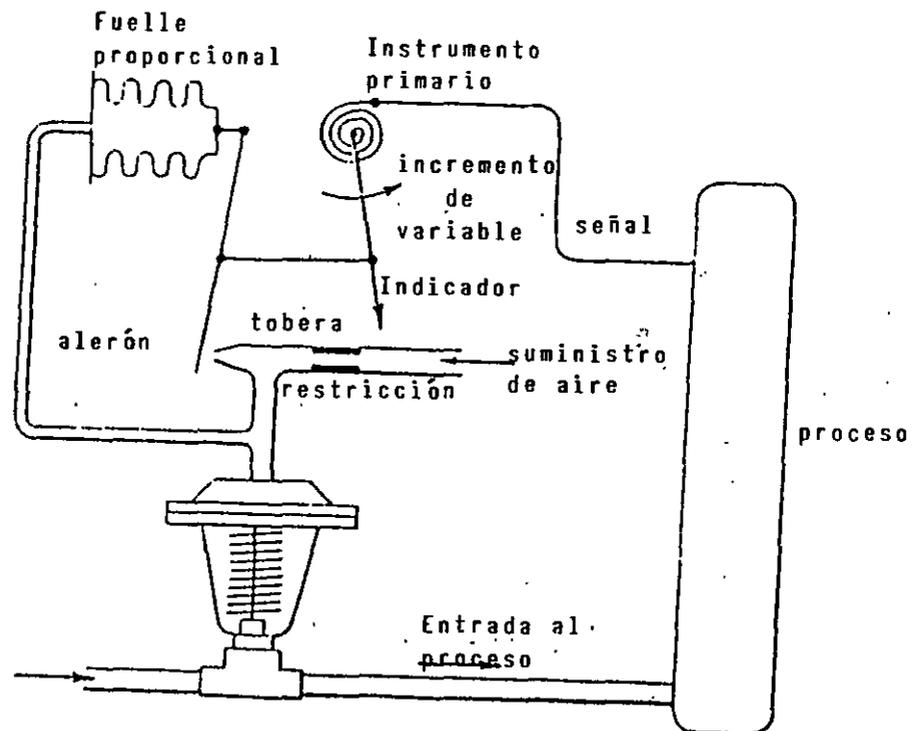


Fig. VI.13 Control proporcional de banda ancha

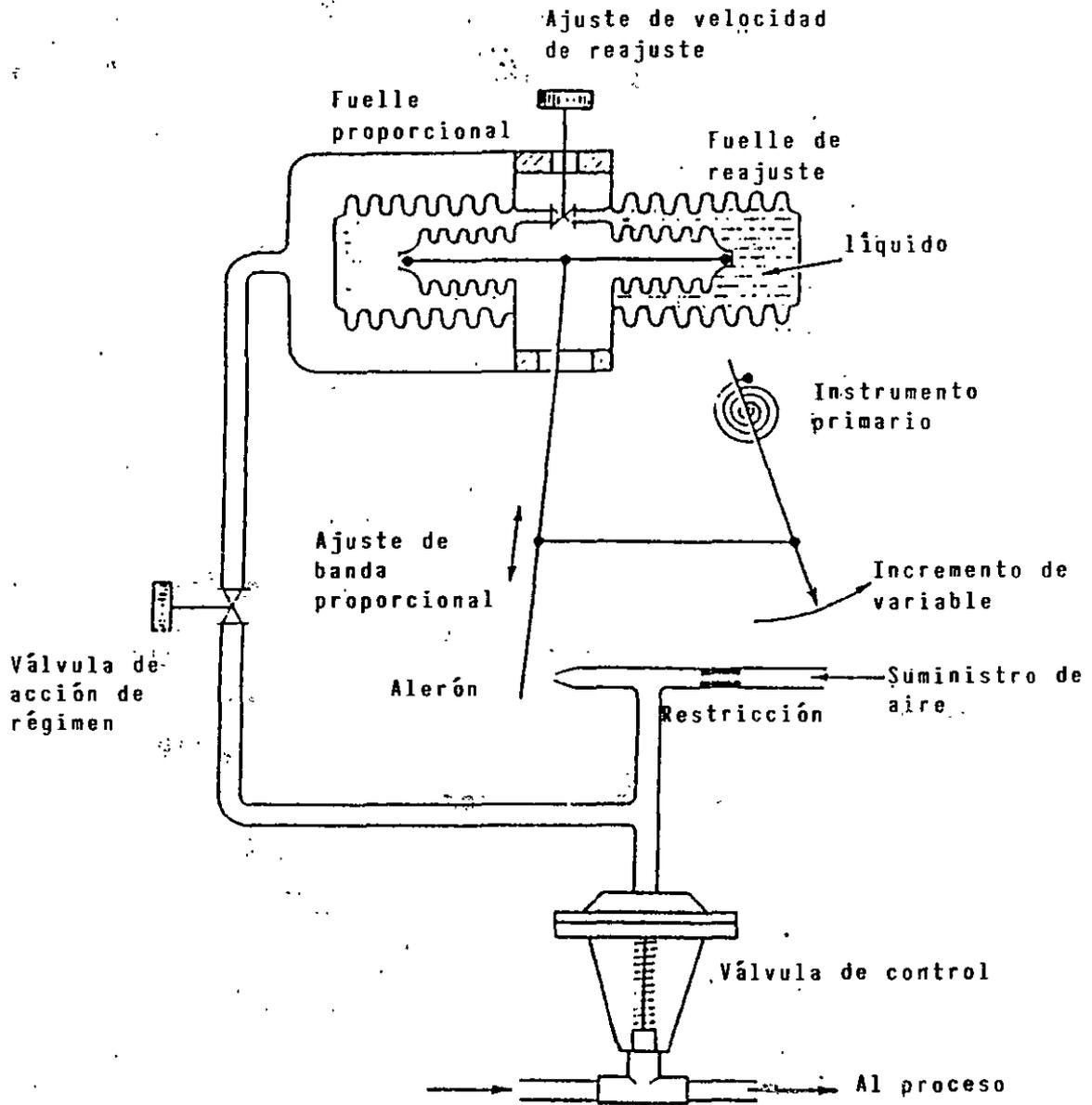


Fig. VI.1A Acción de reajuste