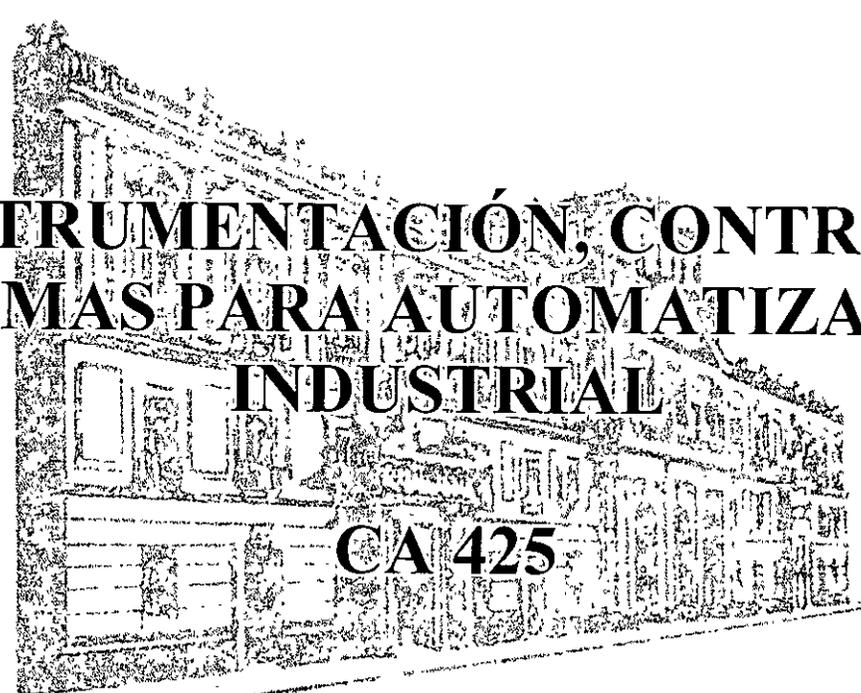




**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA**



**INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y
NORMAS PARA AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

CA 425

**EXPOSITOR: ING. FRANCISCO RODRÍGUEZ
DEL 26 AL 30 DE NOVIEMBRE DE 2007
PALACIO DE MINERÍA**

Instrumentación Industrial

**Francisco Rodríguez
Luís Amendola**

INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

OBJETIVOS

Al finalizar el curso el participante estará en condiciones de especificar, diseñar, inspeccionar, aceptar y poner en marcha proyectos de instrumentación y control industrial. Intercambiar conocimientos entre los participantes, haciendo énfasis en aplicaciones industriales (petróleo, gas y manufactura).

PROGRAMA DESCRIPTIVO

Presentar, en forma teórica - practica los conceptos de la tecnología actual para el diseño de sistemas de instrumentación y control industrial.

1. – Normas de Representación de los Instrumentos

- Simbología e Identificación de Instrumentos
- Sistema de Identificación de Instrumentos
- Normas ISA S5.1 / Normas ISA S5.3
- Interpretación PID'S

2. – Medición

- Presión
- Temperatura
- Caudal (Calculo Software)
- Nivel

3. - Válvulas de control

- Tipos de válvulas y usos
- Definición de coeficiente de capacidad
- Software de calculo

4. - Proyectos de Instrumentación

- PID'S
- Listados de Instrumentos
- Diagrama de Lazo
- Listado de Cables
- Listado de Conduits
- Detalles de Instalación
- Listado de Materiales
- Hoja de Datos de Instrumentos

5. – Ingeniería de Instalaciones

- Conexión de Elementos Primarios
- Ingeniería de Centralización de Control
- Ingeniería de Puesta en Servicio
- Ingeniería de Arranque
- Ingeniería de Cierre del Proyecto

6. - Fieldbus

- Implementación en la industria
- Aplicaciones

7. – Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

- Introducción al MCC
- Aplicaciones en Instrumentación y Control

INTRODUCCION A LA INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

DEFINICIÓN DE INSTRUMENTACIÓN

Instrumentación: es el grupo de elementos que sirven para medir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos utilizados en éste.

El instrumento más conocido y utilizado es el reloj, el cuál nos sirve para controlar el uso eficaz de nuestro tiempo.

En otras palabras, la instrumentación es la ventana a la realidad de lo que esta sucediendo en determinado proceso, lo cual servirá para determinar si el mismo va encaminado hacia donde deseamos, y de no ser así, podremos usar la instrumentación para actuar sobre algunos parámetros del sistema y proceder de forma correctiva.

- La instrumentación es lo que ha permitido el gran avance tecnológico de la ciencia actual en casos tales como: los viajes espaciales, la automatización de los procesos industriales y mucho otros de los aspectos de nuestro mundo moderno; ya que la automatización es solo posible a través de elementos que puedan sensar lo que sucede en el ambiente, para luego tomar una acción de control pre-programada que actué sobre el sistema para obtener el resultado previsto.

CARACTERÍSTICA DE LOS INSTRUMENTOS

De acuerdo con las normas **SAMA (Scientific Apparatus Makers Association)**, PMC20, las características de mayor importancia, para los instrumentos son:

CAMPO DE MEDIDA O RANGO (RANGE)

Es el conjunto de valores dentro de los límites superior e inferior de medida, en los cuales el instrumento es capaz de trabajar en forma confiable. Por ejemplo, un termómetro de mercurio con rango de 0 a 50 grados celsius

ALCANCE (SPAN)

Es la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida. Para el caso del termómetro del ejemplo, el SPAN será de 50 grados celsius.

ERROR

Es la diferencia que existiría entre el valor que el instrumento indique que tenga la variable de proceso y el valor que realmente tenga esta variable en ese momento.

PRECISIÓN

Esto es la tolerancia mínima de medida que permitirá indicar, registrar o controlar el instrumento. En otras palabras, es la mínima división de escala de un instrumento indicador. Generalmente esta se expresa en porcentaje (%) del SPAN.

ZONA MUERTA (DEAD BAND)

Es el máximo campo de variación de la variable en el proceso real, para el cual el instrumento no registra ninguna variación en su indicación, registro o control.

SENSIBILIDAD

Es la relación entre la variación de la lectura del instrumento y el cambio en el proceso que causa este efecto.

REPETIBILIDAD

Es la capacidad de un instrumento de repetir el valor de una medición, de un mismo valor de la variable real en una única dirección de medición.

HISTERESIS

Similar a la repetibilidad, pero en este caso el proceso de medición se efectuara en ambas direcciones

CAMPO DE MEDIDA CON SUPRESIÓN DE CERO

Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por encima del cero real de la variable

CAMPO DE MEDIDA CON ELEVACIÓN DE CERO

Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por debajo de cero de las variables

CLASIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Existen dos formas de clasificar los instrumentos las cuales son:

- a.- De acuerdo a su función en el proceso.
- b.- De acuerdo a la variable de proceso que miden.

Este modo de clasificarlos no es necesariamente el único, pero se considera bastante completo.

° De acuerdo a su función estos serán:

Instrumentos indicadores: son aquellos que como su nombre bien dice, indican directamente el valor de la variable de proceso. Ejemplos: manómetros, termómetros, etc.

Instrumentos ciegos: son los que cumplen una función reguladora en el proceso, pero no muestran nada directamente. Ejemplos termostatos, presostatos, etc.

Instrumentos registradores: en algunos casos podrá ser necesario un registro histórico de la variable que se estudia en un determinado proceso. en este caso, se usaran instrumentos de este tipo. .

Elementos primarios: algunos elementos entran en contacto directo con el fluido o variable de proceso que se desea medir, con el fin de recibir algún efecto de este (absorben energía del proceso), y por este medio pueden evaluar la variable en cuestión. (placa orificio)

Transmisores: estos elementos reciben la variable de proceso a través del elemento primario, y la transmiten a algún lugar remoto. Estos transmiten las variables de proceso en forma de señales proporcionales a esas variables.

Transductores: son instrumentos fuera de línea (no en contacto con el proceso), que son capaces de realizar operaciones lógicas y/o matemáticas con señales de uno o más transmisores.

Convertidores: en ciertos casos, la señal de un transmisor para ser compatible con lo esperado por el receptor de esa señal, en ese caso se utilizara un elemento convertidor para lograr la ante mencionada compatibilidad de señal

Receptores: son los instrumentos que generalmente son instalados en el panel de control, como interfase entre el proceso y el hombre. Estos reciben las señal de los transmisores o de un convertidor.

Controladores: este es uno de los elementos más importante, ya que será el encargado de ejercer la función de comparar lo que esta sucediendo en el proceso, con lo que realmente se desea que suceda en él, para posteriormente, en base a la diferencia, envíe una señal al proceso que tienda a corregir las desviaciones.

Elemento final de control: será este elemento quien reciba la señal del controlador y quien estando en contacto directo con el proceso en línea, ejerza un cambio en este, de tal forma que se cambien los parámetros hacia el valor deseado. Ejemplo: válvulas de control, compuertas, etc.

De acuerdo a la variable de proceso que miden: Esta clasificación, como su nombre lo indica, se referirá a la variable de proceso que tratemos de medir. En la actualidad, se pueden medir, casi sin excepción, todas las variables de proceso existentes, sin embargo, algunas se medirán de forma directa y otras indirectamente.

NORMAS DE REPRESENTACION DE LOS INSTRUMENTOS

DIAGRAMAS DE FLUJO

EL Diagrama de flujo de procesos es uno de los documentos más importantes para el ingeniero de diseño de instrumentación.

En éste se presentan de una forma secuencial los equipos involucrados en el proceso, así como los datos de proceso deseables y las expectativas de los rangos de variación, características más resaltantes de los equipos, sentidos de fluidos y cualquier otro dato de proceso relevante para el diseño de la Ingeniería, no solo de instrumentación, sino más importante aún, para todas las disciplinas.

Ahora bien, el diagrama de flujo informa sobre que es lo que se espera que el proceso haga y como lo hará, pero en raras ocasiones, se indica en éste los puntos y variables que se desean controlar. Para determinar este punto, se requerirá del consenso de las disciplinas de procesos e instrumentación.

A partir de ese momento, se definirán los puntos de medición, las características de los fluidos de procesos, los rangos de las variables y cuáles variables se desean indicar y/o controlar, y/o registrar.

Esta parte de la fase inicial de diseño suele ser difícil por muchos factores, tales como: los criterios del proceso que se desea controlar no están claros, en cuyo caso, las experiencias anteriores similares del ingeniero instrumentista puede ser muy valiosas, o como en muchos otros, los datos del proceso pueden no ser accesibles bien sea, que no se pueden estimar con facilidad o en el caso de plantas existentes en expansión, no se dispone de estos datos, por lo cuál habrá que proceder a un levantamiento de campo de esos valores.

NORMA ISA S 5.1

La forma de identificar y representar los instrumentos varía de proyecto a proyecto y de una tendencia tecnológica a otra.

Inicialmente, cada empresa tenía sus propios estándares, luego se fueron formando estándares nacionales y en la actualidad contamos con normas continentales e internacionales.

Una de las instituciones que en la actualidad ha logrado unificar a mas gremios de diseño en el área de instrumentación es la Instrument Society of America "ISA".

Esta organización ha elaborado una serie de normas y estándares en el área de nuestro interés y mantiene abierto un canal de comunicación continuo con todos sus integrantes para la actualización constante de ese grupo de normas.

Entre las normas de la ISA se encuentra la citada en el título de esta sección, la norma S 5.1, cuyo propósito es unificar la manera en que se representen e identifiquen los instrumentos.

El uso de esta norma no es obligatorio, sin embargo, además de su lógica conveniencia, vale la pena decir, que es usada en la actualidad en la mayoría de las organizaciones técnicas de todo el mundo.

A continuación se anexa lo siguiente, una copia de la versión mas actualizada de la norma y para fines consiguientes, una copia de una traducción de la misma, al castellano.

Sociedad Americana de Instrumentos

1. Cobertura

1.1. Generalidades.

1.1.1 La finalidad de esta norma es establecer un medio uniforme de designar instrumentos y sistemas de instrumentos usados para medición y control. A este fin, se presenta un sistema de designación el cual incluye símbolos y un código de identificación.

1.1.2 Se reconocen las necesidades diferentes de procedimientos establecidos de varias organizaciones, cuando no resultan inconsistentes con los objetivos de la norma, proporcionando métodos alternos de simbolismos. Se ofrece un número de opciones para agregar información o simplificar el simbolismo, si se desea.

1.1.3 Los símbolos de equipos de proceso no forman parte de esta norma, pero se han incluido solo para ilustrar aplicaciones de símbolos de instrumentación.

1.1.4 Si un dibujo dado, o juego de dibujos, usa símbolos gráficos que sean similares o idénticos en forma o configuración y que tengan diferente significado por haber sido tomados de normas diferentes, se tomaran las medidas adecuadas para evitar una mala interpretación de los símbolos usados. Estos pasos pueden ser el usar notas de precaución o notas de referencia, gráficos de comparación que ilustren y definan los símbolos en conflicto, u otros medios apropiados. Este requisito es especialmente crítico si los símbolos gráficos usados, siendo de disciplinas diferentes, representan dispositivos, conductores, líneas de flujo o señales cuyos símbolos, si se interpretan erróneamente, podrían ser peligrosos al personal o causar daños al equipo.

1.2 **Aplicación a las industrias**

1.2.1 *A pesar de la variedad de instrumentos que se han creado, todos ellos encajan dentro de categorías comunes de funcionamiento. La Norma resulta apropiada para ser usada en química, petróleo, generación de fuerza, aire acondicionado, refinación de metales y numerosas otras industrias.*

1.2.2 *Ciertos campos, tales como astronomía, navegación y medicina, usan instrumentos muy especializados que son diferentes a los instrumentos convencionales de los procesos industriales. No se hizo un esfuerzo específico para hacer que la Norma cubriera los requisitos de esos campos. Sin embargo, se espera que la Norma ha de ser lo bastante flexible para cubrir muchas de las necesidades de campos especiales.*

1.3 **Aplicaciones a las actividades de Trabajo**

1.3.1 *La Norma resulta apropiada para usarse siempre que se requiera una referencia a un instrumento. Tales referencias pueden ser requeridas para los siguientes usos al igual que para otros:*

Diagramas de flujo, proceso y mecánico

Diagramas de sistemas de instrumentación

Especificaciones, órdenes de compra, manifiestos y otras listas

Dibujos de Construcción

Papeles técnicos, literatura y estudios

Marcación de instrumentos

Instalación, instrucciones, dibujos y registros de operaciones, instalación y mantenimiento.

1.3.2 *Se pretende que la Norma proporcione suficiente información para permitir a cualquiera que lea un diagrama de flujo y tenga un grado razonable de conocimientos de planta entender los medios de medición y control del proceso sin tener que irse a los detalles de instrumentación que requieren los conocimientos de un especialista en instrumentos.*

1.4 **Alcance de la Identificación Funcional**

La Norma prevé la identificación y simbolización de las funciones claves de un instrumento. Los detalles completos del instrumento se dejan para ser descritos en una especificación, hoja de datos u otro documento apropiado previsto para las personas interesadas en tales detalles.

1.5 **Alcance de la Identificación de Cuadro**

La Norma cubre la identificación de un instrumento y todo los otros instrumentos asociados con éste en un cuadro. El usuario queda libre de aplicar identificación adicional --por número serial, número de planta, o de otra forma-- como considere necesario para distinguirlo entre los proyectos, o para cualquier otro fin.

2. **Definiciones**

*Para los fines de esta Norma, aplican las siguientes definiciones. Una definición que hace referencia a otro documento ha sido modificada a partir de una definición dada en ese documento para corresponder al formato de esta Norma. Los términos en *itálica* en una definición son también definidos en esta sección. Cuando se dan ejemplos, la lista no pretende incluir todas las partes.*

Alarma: *Un dispositivo que señala la existencia de una condición anormal por medio de un cambio discreto sonoro o visual, o ambos, con el fin de atraer la atención.*

Balón: *El símbolo circular usado para denotar un instrumento o la identificación de un instrumento.*

Detrás del tablero: *Un término aplicado a una ubicación la cuál (1) está dentro de un área que contiene el tablero, o de otra forma no es accesible al operario para su uso normal, y (3) no esta designado como local.*

Tablero: *Una estructura que tiene un grupo de instrumentos montado sobre sí y que se ha escogido para tener una designación individual. El tablero puede consistir de uno o más paneles, cubículos, mesas o estantes componentes.*

Montado en tablero: *Un término aplicado a un instrumento que esta montado en un tablero y el cuál es accesible al operario para su uso normal.*

Relé de computación: *Un relé que realiza uno o más cálculos o funciones lógicas, o ambas, y envía una o más señales resultantes de salida.*

Controlador: Un dispositivo que tiene una salida que puede ser variada para mantener una variable controlada a un valor específico o dentro de límites específicos o para alterar la variable en una manera específica.

Un controlador automático varía automáticamente en respuesta a una entrada directa o indirecta de una variable de proceso medida. Un controlador manual es una estación de carga manual, y su salida no depende de una variable de proceso medida pero puede ser variada solo por ajuste manual.

Un controlador puede estar integrado con otros elementos funcionales de un cuadro de control. (Ver la tabla 1.

Estación de Control: Una estación de carga manual la cuál también proporciona conmutación entre modos de control manual y automático de un cuadro de control. También se conoce como una estación auto-manual y una estación auto-selector.

Válvula de control: Un dispositivo, distinto de una válvula común operada a mano tipo conectado-desconectado (on-off), el cuál manipula directamente el flujo de uno o más corrientes de proceso fluido. En algunas aplicaciones, se conoce comúnmente con atenuador o rejilla. (Ver la tabla 1.

Se espera que el uso de la designación de válvula de control a mano se limite a válvulas actuadas a mano las cuales (1) se usen para regulación (estrangulación) de proceso, o (2) son válvulas especiales para fines de control y que han de especificarse por un grupo de instrumentación o ingeniero de instrumentos.

Convertidor: Un dispositivo que recibe información en forma de una señal de instrumento, altera la forma de la información, y envía una señal resultante de salida. Un convertidor es una forma especial de relé.

Un convertidor se conoce también por transductor (convertidor), aunque transductor es un término completamente general y sus uso específicamente para conversión de señales no se recomienda.

Elemento final de control: El dispositivo que directamente cambia el valor de la variable manipulada de un cuadro de control.

Función: El propósito de o la acción realizada por un dispositivo

Identificación: La secuencia de letras o dígitos o ambos usados para designar un instrumento o cuadro individual.

Instrumento: Un dispositivo usado directamente o indirectamente para medir o controlar una variable o ambos. El término incluye válvulas de control, válvulas de desahogo y dispositivos eléctricos tales como anunciadores y botones de presionar.

El término no aplica a partes, por ejemplo, un fuelle receptor o una resistencia, los cuales son componentes internos de un instrumento.

Local: *La ubicación de un instrumento que no está dentro, ni detrás de un tablero. Los instrumentos locales están comúnmente en las cercanías de un elemento primario o un elemento final de control.*

Tablero local: *Un tablero que no es un tablero central o principal. Los tableros locales están comúnmente en las cercanías de subsistemas o sub-áreas de plantas.*

Cuadro: *Una combinación de uno o más instrumentos interconectados dispuestos para medir o controlar una variable de proceso, o ambos.*

Estación de carga manual: *Un dispositivo que tiene una salida ajustable manualmente y que se usa para actuar en uno o más dispositivos remotos. Si bien los dispositivos remotos pueden ser elementos controladores, la estación no proporciona conmutación entre los modos de control manual y automático de un cuadro de control. (Ver controlador y estación de control). La estación puede tener manómetros, luces u otras características integrales. También se conoce como estación manual o un cargador manual remoto.*

Medición: *La determinación de la existencia o magnitud de una variable. Los instrumentos de medición incluyen todos los dispositivos usados directamente o indirectamente para este propósito.*

Luz piloto: *Una luz que indica cual de un numero de condiciones normales de un sistema o dispositivo existen. No es igual que una luz de alarma, que indica una condición anormal. La luz piloto se conoce también como luz monitora.*

Elemento primario: *Aquella parte de un cuadro o de un instrumento que detecta primero el valor de una variable de proceso, y que asume un correspondiente predeterminado e inteligible estado o salida. El elemento primario puede estar separado o integrado con otro elemento funcional de un cuadro. El elemento primario también se conoce como detector o sensor.*

Proceso: *Cualquiera operación o secuencia de operaciones que implica un cambio de estado de energía, de composición, de dimensión o de otra propiedad que pueda ser definida con respecto a un punto de referencia.*

El término proceso se usa en esta Norma para aplicarse a todos los variables distintos de señales de instrumentos.

Variable de Proceso - cualquiera propiedad variable de un proceso.

Relé: Dispositivo que recibe información en forma de una o más señales de instrumento, modifica la información o su forma, o ambos, si se requiere, envía una o mas señales resultantes de salida, y no se designa como un controlador, un interruptor, o de otra forma. (ver también Relé de computación)

El termino relé es también aplicado específicamente a un interruptor eléctrico actuado remotamente por una señal eléctrica. Sin embargo, para los fines de esta Norma, el termino no esta tan restringido (ver la tabla 1).

El término también se aplica a las funciones realizadas por relés.

Muestreo: Analizar cada uno de un número de entradas intermitentes. Un dispositivo de muestreo puede proporcionar funciones adicionales tales como registro o alarma.

Interruptor: Un dispositivo que conecta, desconecta o transfiere uno o más circuitos y no está designado como controlador, relé o válvula de control (ver tabla 1)

El termino es también aplicado a las funciones realizadas por los interruptores.

Telemetría: La práctica de transmitir la medición de una variable para lectura u otros usos. El término es más comúnmente usado aplicado a los sistemas de señales eléctricas.

Punto de Prueba: Una conexión de proceso a la cuál está conectada permanentemente un instrumento, pero esta dispuesto para la conexión temporal, intermitente, o futura de un instrumento.

Convertidor: Un termino general para un dispositivo que recibe información en forma de una o más cantidades físicas, modifica la información o su forma o ambos, si se necesita y envía una señal resultante de salida. Dependiendo de la aplicación, el convertidor puede ser un elemento primario, un transmisor, un relé, un convertidor, u otro dispositivo.

Transmisor: Un dispositivo que detecta una variable de proceso por medio de un elemento primario y tiene a demás una salida cuyo valor de estado-estable varía solo como una función predeterminada de la variable de proceso. El elemento primario puede o no estar integrado al transmisor.

Bosquejo del Sistema de Identificación

A. Generalidades

- *Cada instrumento será identificado primero por un sistema de letras usado para clasificarlo funcionalmente. Para establecer una identidad de cuadro para el instrumento, se agregará un número a las letras. Este número será, por lo general, común a otros instrumentos del cuadro del cuál este instrumento forma parte. Algunas veces se agrega un sufijo para completar la identificación del cuadro. El recuadro arriba ilustra un número típico de identificación para un controlador registrador de temperatura.*
- *El número identificador del instrumento puede incluir información codificada tal como designación de área de planta.*
- *Cada instrumento puede ser representado en diagramas por un símbolo. el símbolo puede ir acompañado de una identificación*

B. Identificación funcional

- *La identificación funcional de un instrumento ha de constar de letras de la tabla 1, incluyendo una primera letra, cubriendo la variable medida o iniciador, y una o más letras subsiguientes cubriendo las funciones del instrumento individual. Una excepción a esta regla es el uso de la letra L para denotar una luz piloto que no forma parte de un cuadro de instrumento, (ver tabla 1)*
- *La identificación funcional de un instrumento ha de hacerse de acuerdo a la función y no de acuerdo a la construcción, Así, un registrador de presión diferencial usado para medición de flujo ha de ser identificado como un FR. Un indicador de presión y un interruptor de presión conectado a la salida de un transmisor de nivel neumático serán identificados como LI y LS, respectivamente.*
- *En un cuadro de instrumentos, la primera letra de la identificación funcional ha de ser seleccionada de acuerdo a la variable medida o iniciador y no de acuerdo a la variable manipulada. Así, una válvula de control variando flujo de acuerdo a los dictados de un controlador de nivel es una LV, no una FV.*

Las letras subsiguientes de la identificación funcional designan una o más lecturas o funciones pasivas o funciones de salida o ambas. Se puede, si se requiere, usar una letra modificadora, además de una o más letras subsiguientes. Las letras modificadoras pueden modificar a una primera letra otras letras subsiguientes, como sea aplicable.

- *La secuencia de letras de identificación ha de comenzar con una primera letra. Las letras de lecturas o función pasiva han de seguir en cualquier secuencia, y las letras de función de salida seguirán a estas en cualquiera secuencia, excepto que la letra C (control) de salida ha de preceder a la letra V (válvula) de salida, por ejemplo: HCV, una válvula de control actuada a mano. Sin embargo, las letras modificadoras, si se usan, han de interponerse de tal forma que queden ubicadas inmediatamente después de las letras que modifican.*

- *Una designación identificadora de instrumento en un diagrama de flujo puede ser trazada con tantos balones identificadores como variables medidas o salidas haya. Así, un transmisor registrador de rata de flujo con un interruptor de relación de flujo puede ser identificado en un diagrama de flujo por dos círculos tangentes, uno inscrito FRT-3 y el otro FFS-3. El instrumento estaría designado FRT/FFS-3 para todos los usos en escrituras y referencias. Si se desea, sin embargo, el FFRT-3 abreviado puede servir para la identificación general o compra mientras que FFS-3 puede ser usado para los diagramas de circuitos eléctricos*

Tabla N°1
Significados de las letras de identificación

Ira Letra		Letras sucesivas		
Variable medida (3)	Letra de modificación	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra de modificación
A	Análisis (4)	Alarma		
B	Llama (quemador)	Libre (1)	Libre (1)	Libre(1)
C	Conductividad		Control	
D	Densidad o peso específico	Diferencial (3)		
E	Tensión (f.e.m.)	Elemento primario		
F	Caudal	Relación (3)		
G	Calibre	Vidrio (8)		
H	Manual			Alto (6) (13) (14)
I	Corriente eléctrica	Indicación o indicador(9)		
J	Potencia	Exploración (6)		
K	Tiempo		Estación de control	
L	Nivel	Luz piloto (10)		Bajo (6) (13) (14)
M	Humedad			Medio o intermedio (6) (13)
N	Libre (1)	Libre	Libre	Libre
O	Libre (1)	Orificio		
P	Presión o vacío	Punto de prueba		
Q	Cantidad	Integración (3)		
R	Radiactividad	Registro		
S	Velocidad o frecuencia	Seguridad (7)	Interruptor	
T	Temperatura		Transmisión o transmisor	
U	Multivariable (5)	Multifunción (11)	Multifunción (11)	Mutifunción (11)
V	Viscosidad		Válvula	
W	Peso o fuerza	Vaina		
X	Sin clasificar (2)	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y	Libre (1)		Relé o computador (12)	
Z	Posición		Elemento final de control sin clasificar	

- (1) Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva. Por ejemplo, la letra N puede representar como primera letra el módulo de elasticidad y como sucesiva un osciloscopio.
- (2) La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilicen sólo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figure en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo. XR-3 registrador de vibración.
- (3) Cualquier letra primera si se utiliza con las letras de modificación D (diferencial), F (relación) o Q (integración) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura respectivamente.

- (4) La letra A para análisis, abarca todos los indicados que no están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.
- (5) El empleo de la letra U como multivariable en el lugar de una combinación de primeras letras, es opcional.
- (6) El empleo de los términos de modificaciones alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración es preferible pero opcional.
- (7) El término seguridad, debe aplicarse sólo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal). Por este motivo una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema, mediante el alivio a escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV. La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta si las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvulas de seguridad, válvula de alivio, o válvula de seguridad de alivio.
- (8) La letra de función pasiva vidrio, se aplica a los instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso.
- (9) La letra indicación se refiere a la lectura de una medida real de proceso. No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.
- (10) Una luz piloto que es parte de un lazo de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva L. Por ejemplo, una luz piloto que indica un período de tiempo terminado se designará KL. Sin embargo, si se desea identificar una luz piloto fuera del lazo de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien alternativamente por una letra única L. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse EL, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL, suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor, o bien simplemente L. La actuación de la luz piloto puede ser acompañada por una señal audible.
- (11) El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación en lugar de una combinación de otras letras, es opcional
- (12) Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.
- (13) Los términos alto, bajo, medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.
- (14) Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre apertura, se definen como sigue:

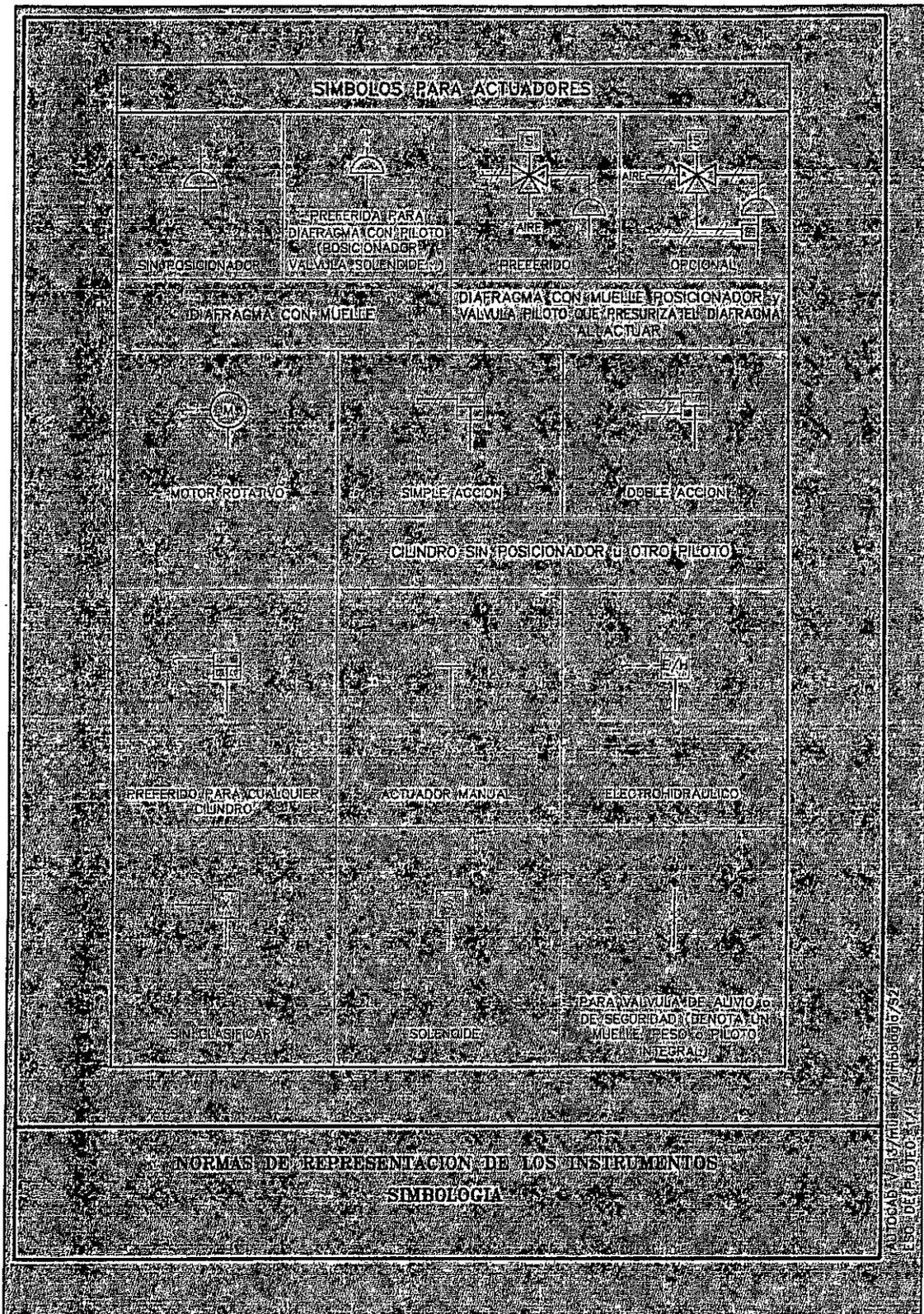
Alto: indica que la válvula está, o se aproxima a la posición de apertura completa.

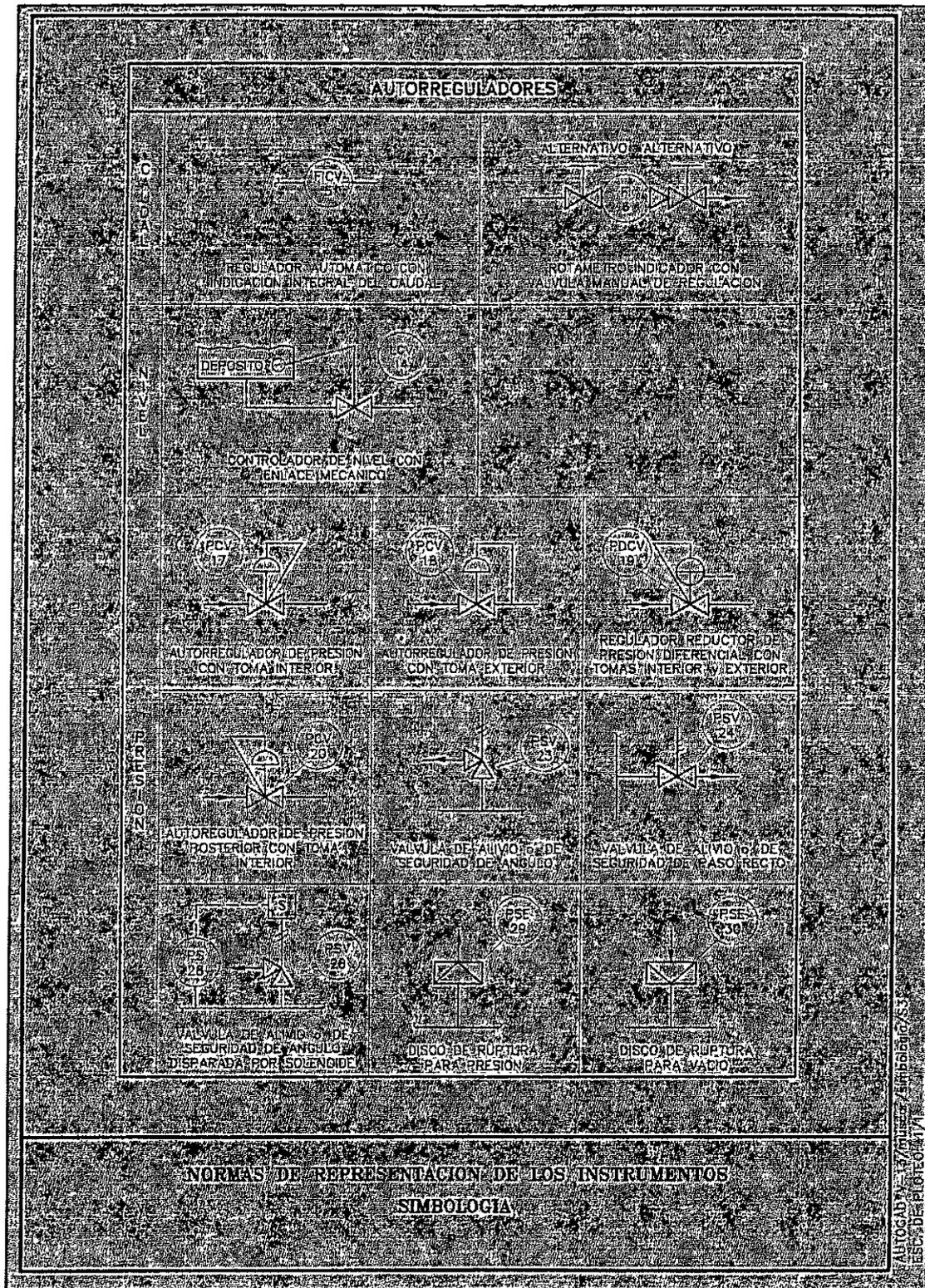
Bajo: denota que se acerca o está en la posición completamente cerrada.

- Se sugieren las siguientes abreviaturas para representar el tipo de alimentación (o bien de purga de fluidos)

AS	Alimentación de aire
ES	Alimentación eléctrica
GS	Alimentación de gas
HS	Alimentación hidráulica
NS	Alimentación de nitrógeno
SS	Alimentación de vapor
WS	Alimentación de agua

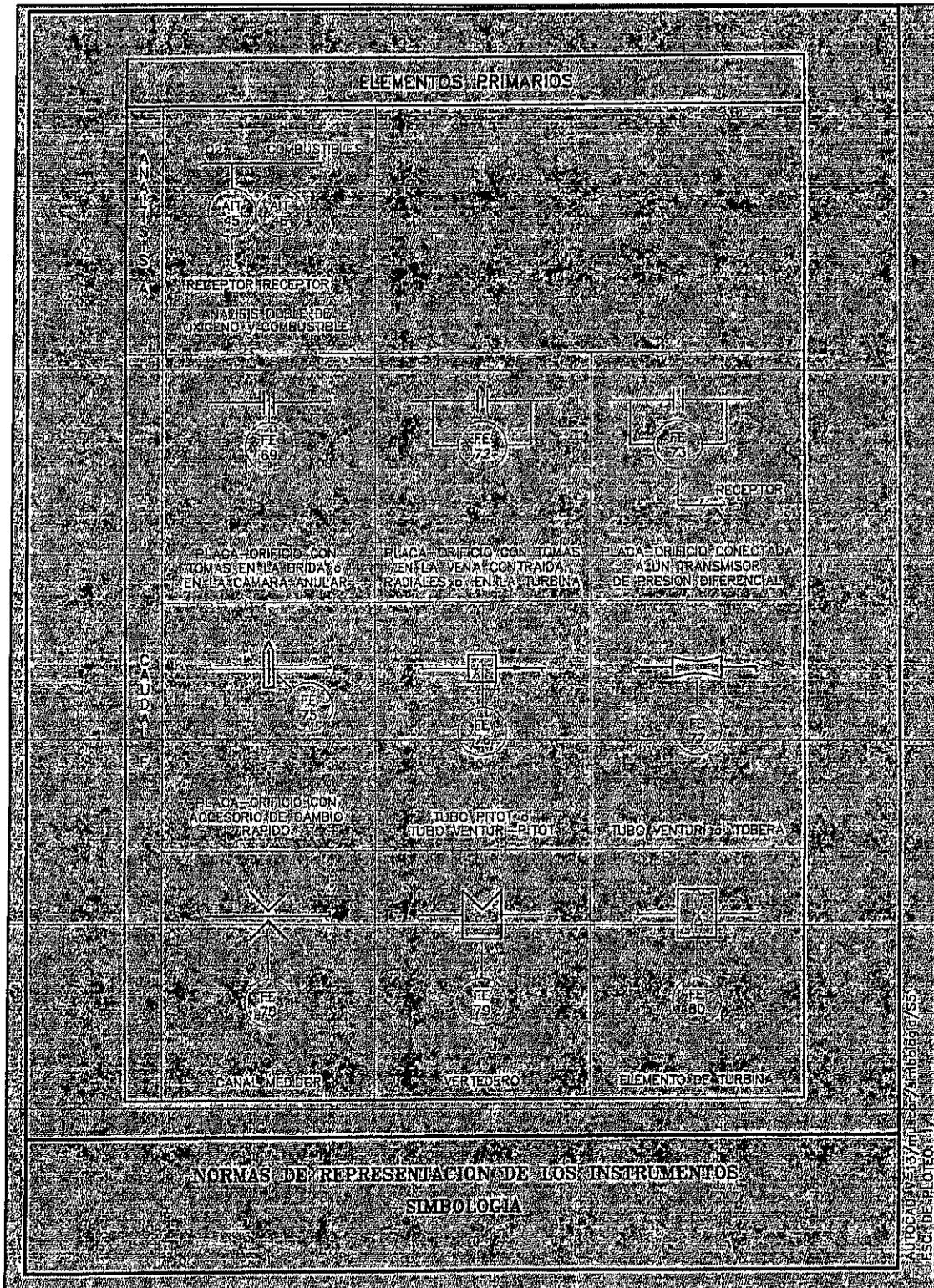
El símbolo se aplica también a cualquier señal que emplee gas como medio de transmisión. Si emplea un gas distinto del aire debe identificarse con una nota al lado del símbolo o bien de otro modo. Los fenómenos electromagnéticos incluyen calor, ondas de radio, radiación nuclear y luz

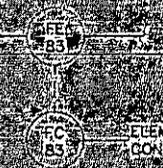
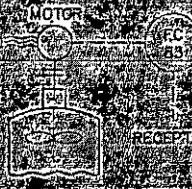




AUTORREGULADORES (Cont.)		
		
AUTORREGULADOR DE TEMPERATURA CON BULBO VICAPILAR		
ACCION DEL ACTUADOR EN CASO DE FALLO DE AIRE (O DE POTENCIA)		
		
ABRE EN FALLO (FAIL OPEN)	CIERRA EN FALLO (FAIL CLOSED)	ABRE EN FALLO A VIA A-C
		
ABRE EN FALLO A VIAS A-C Y D-B	SE BLOQUEA EN FALLO (FAIL LOCKED)	POSICION INDETERMINADA EN FALLO (FAIL INDETERMINATE)
SIMBOLOS VARIOS		
		
LUZ PILOTO	SELLO QUIMICO	
		
ENCLAVAMIENTO LOGICO SIN DEFINIR COMPLETO	ENCLAVAMIENTO EFECTIVO EN EXISTENCIA TODAS LAS ENTRADAS	ENCLAVAMIENTO EFECTIVO SIN EXISTENCIA DE MAS ENTRADAS
NORMAS DE REPRESENTACION DE LOS INSTRUMENTOS		
SIMBOLOGIA		

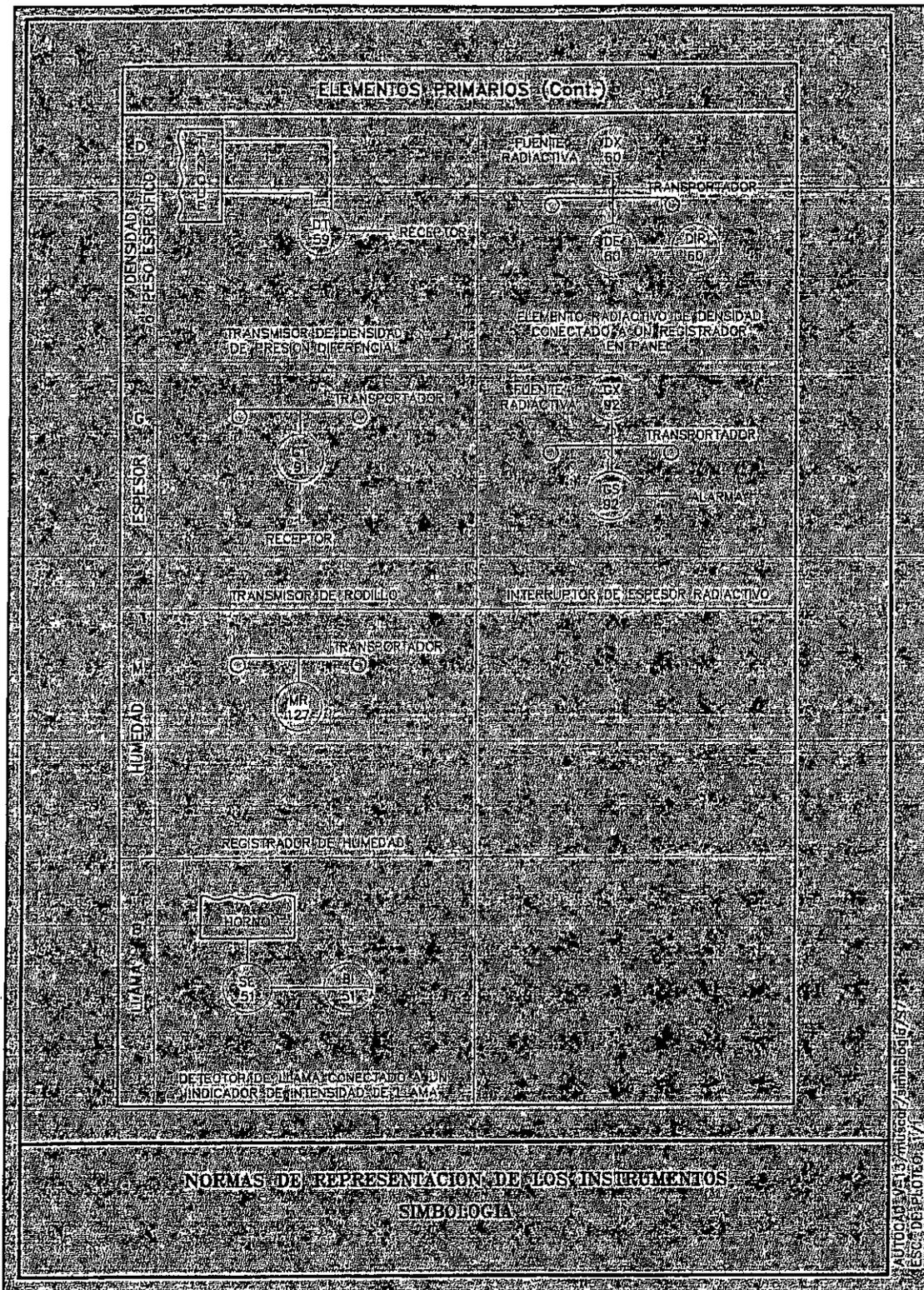
Autocad - Ets/Inicor/Simbologia/ES67 de Pílotos V1

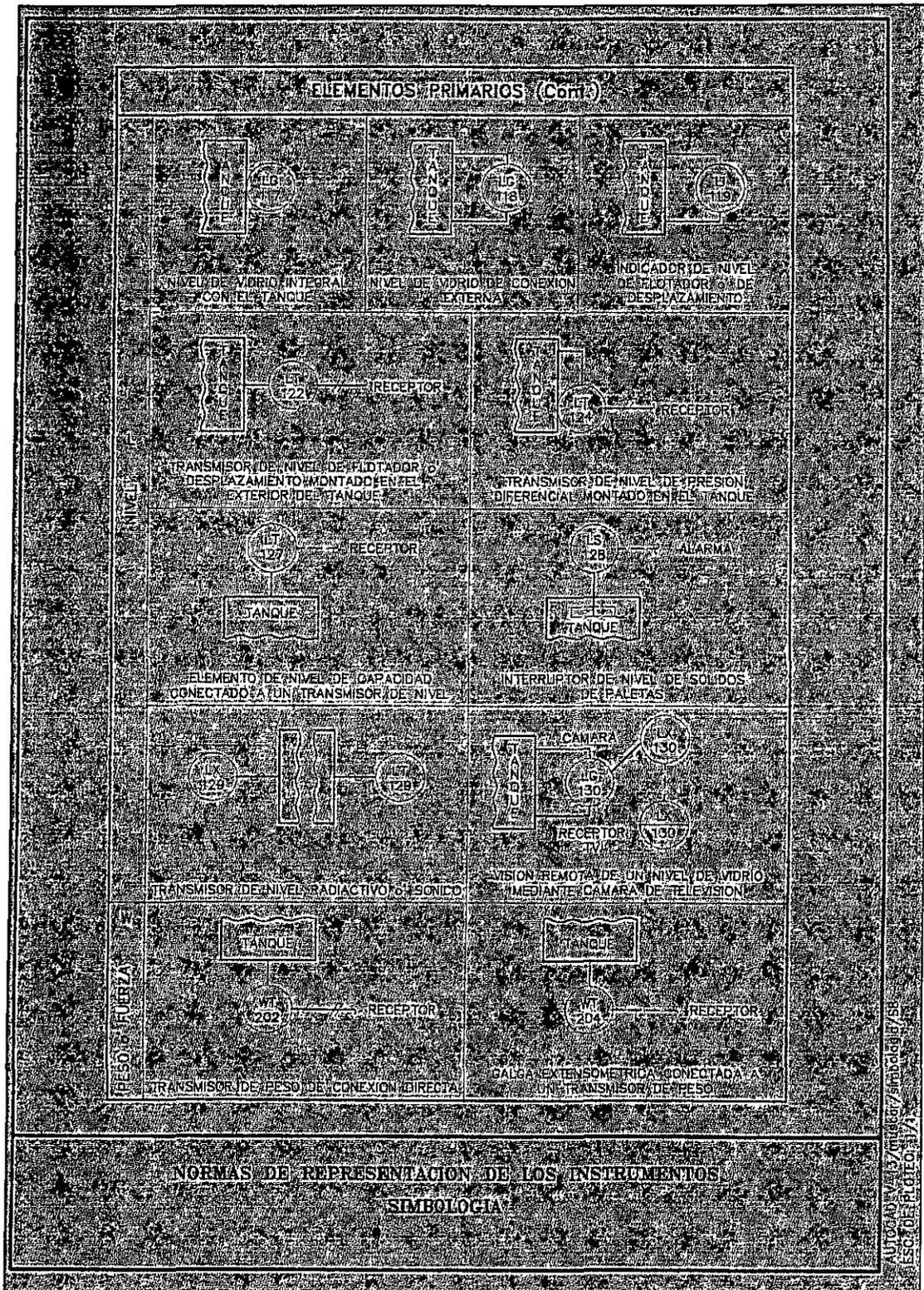


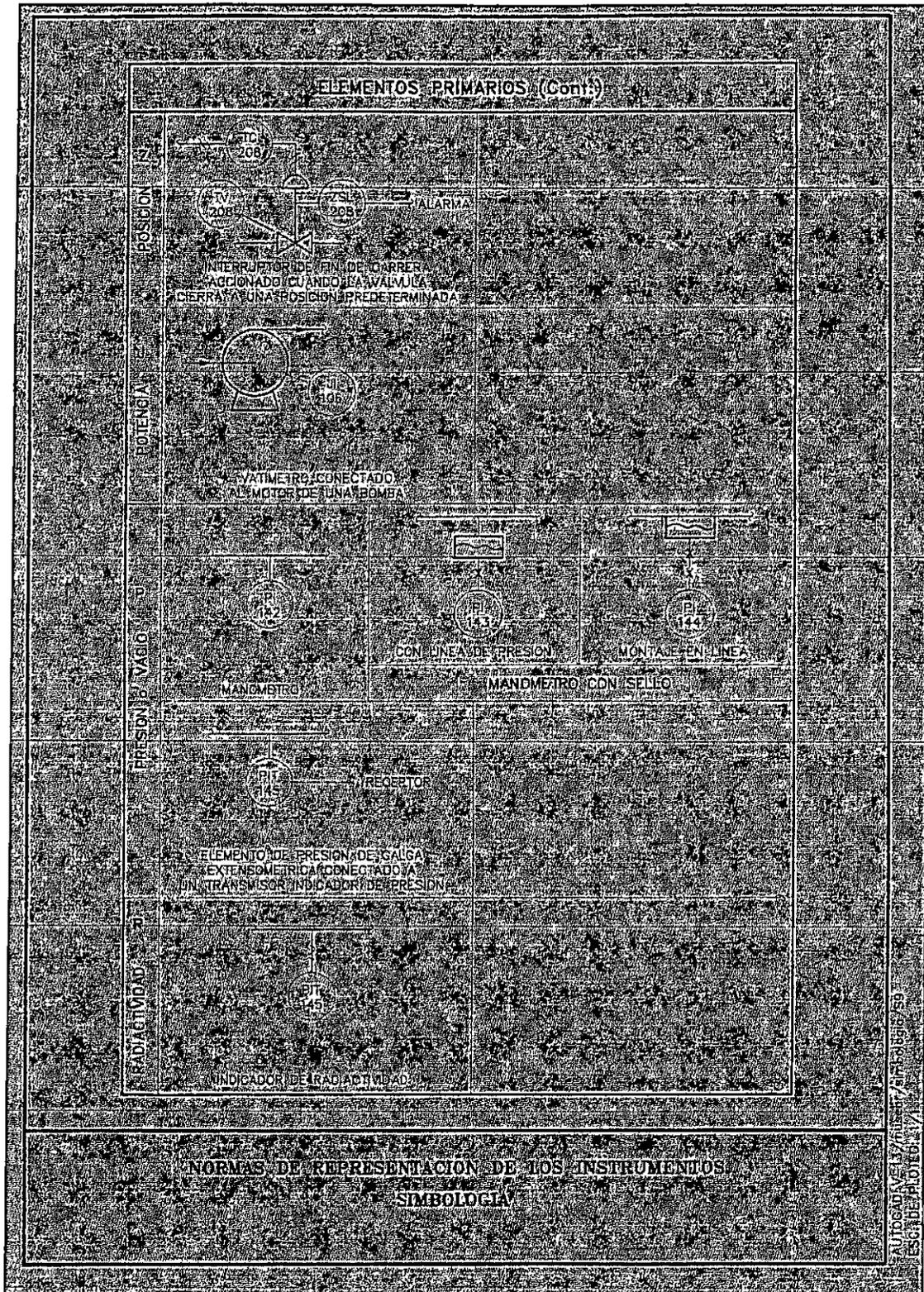
ELEMENTOS PRIMARIOS (Cont.)		
 <p>ROTAMETRO INDICADOR DE CAUDAL</p>	 <p>ROTAMETRO INDICADOR DE CAUDAL DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO</p>	 <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CONECTADO A UN CONTROLADOR DE CAUDAL</p>
 <p>RECEPTOR</p>		
 <p>ELEMENTO SIN CLASIFICAR CON TRANSMISOR</p>		
 <p>CELULA DE CONDUCTIVIDAD CONECTADA A PUNTO(S) DE UN REGISTRADOR MULTIPLE</p>		
 <p>MOTOR</p> <p>RECEPTOR</p> <p>TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD MIDIENDO CORRIENTE DE UN MOTOR</p>		

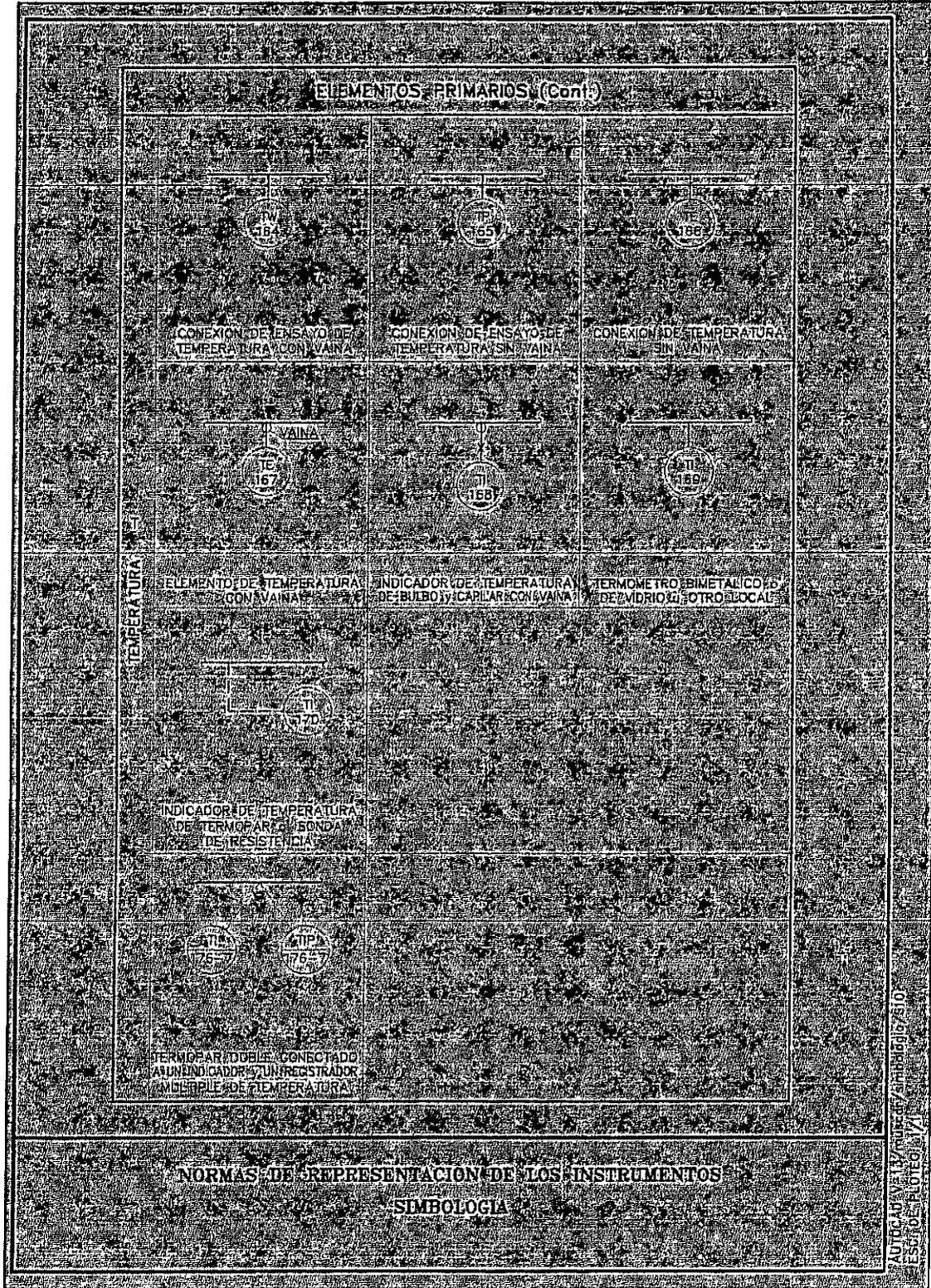
NORMAS DE REPRESENTACION DE LOS INSTRUMENTOS
SIMBOLOGIA

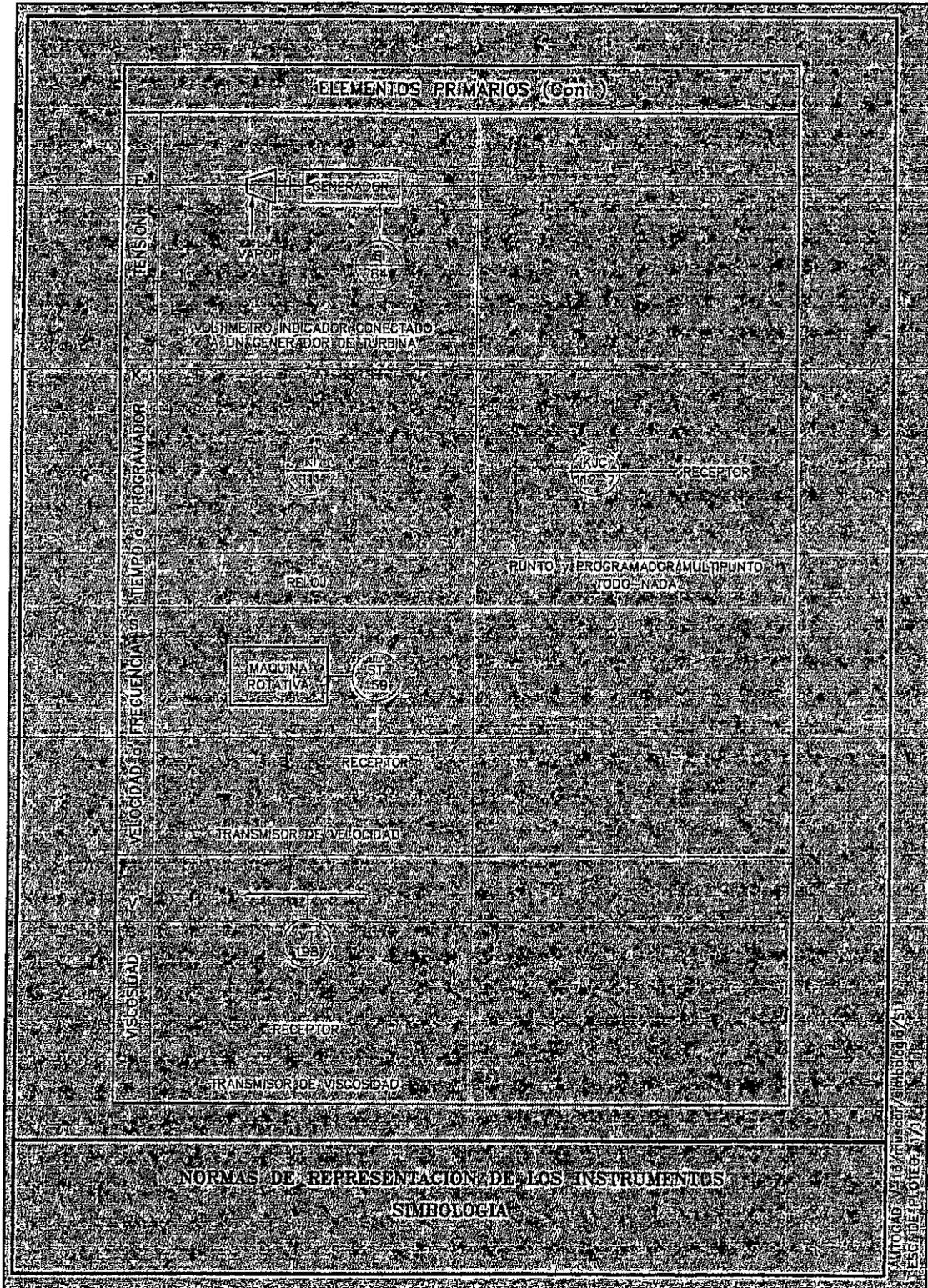
Alfred J. B. / multibear / simbologia / 56
ESCUELA POLITECNICA

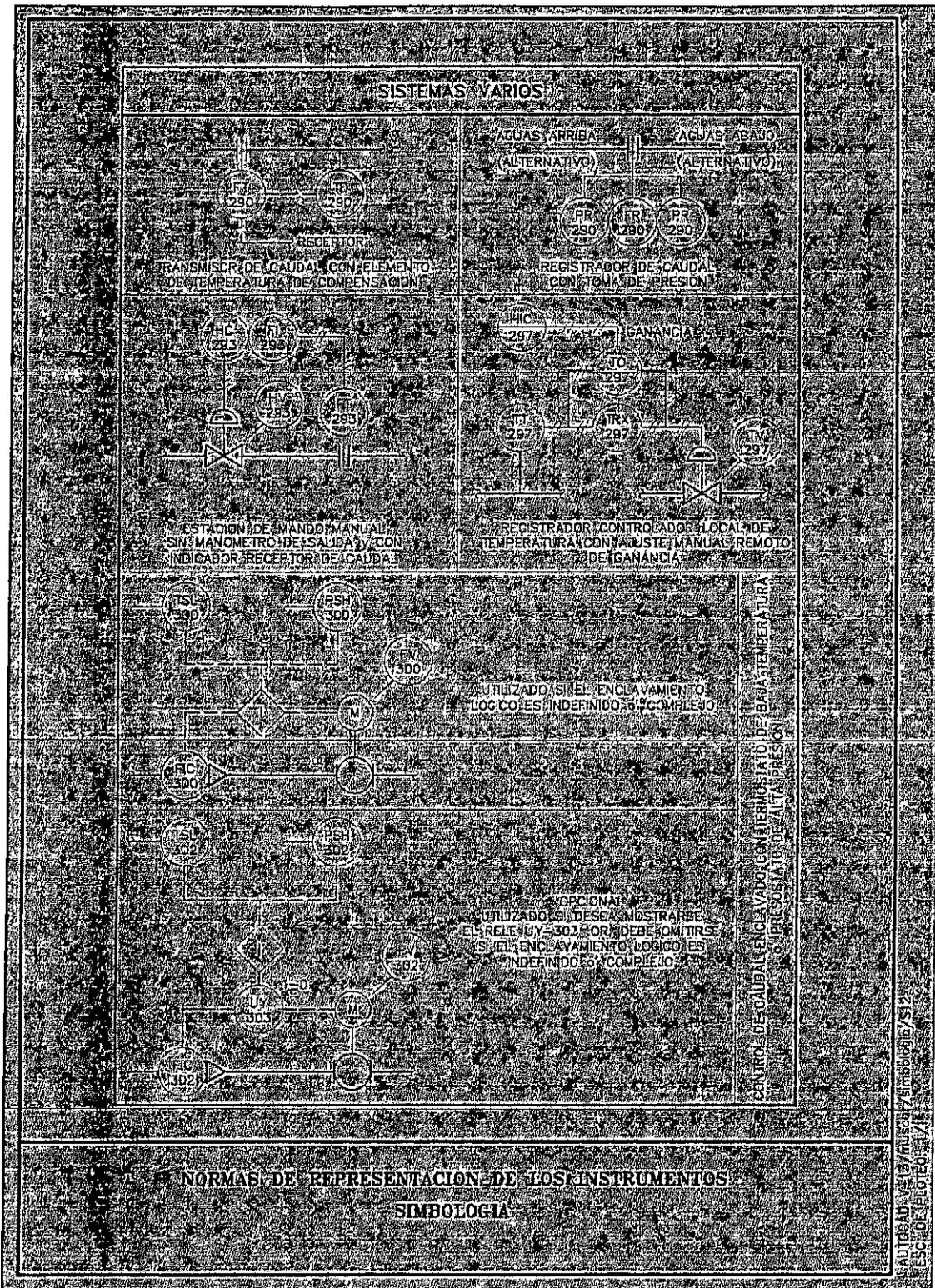


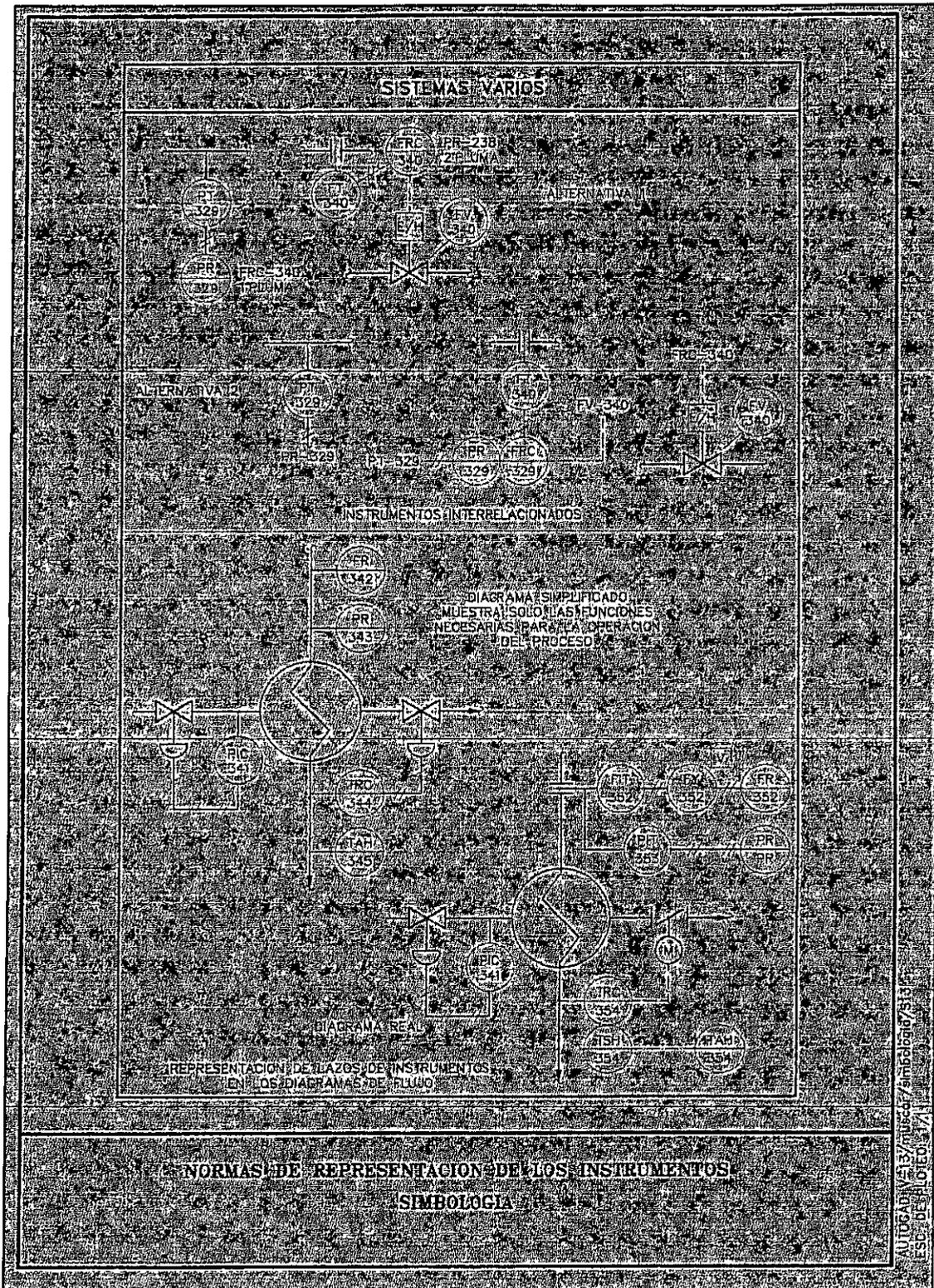


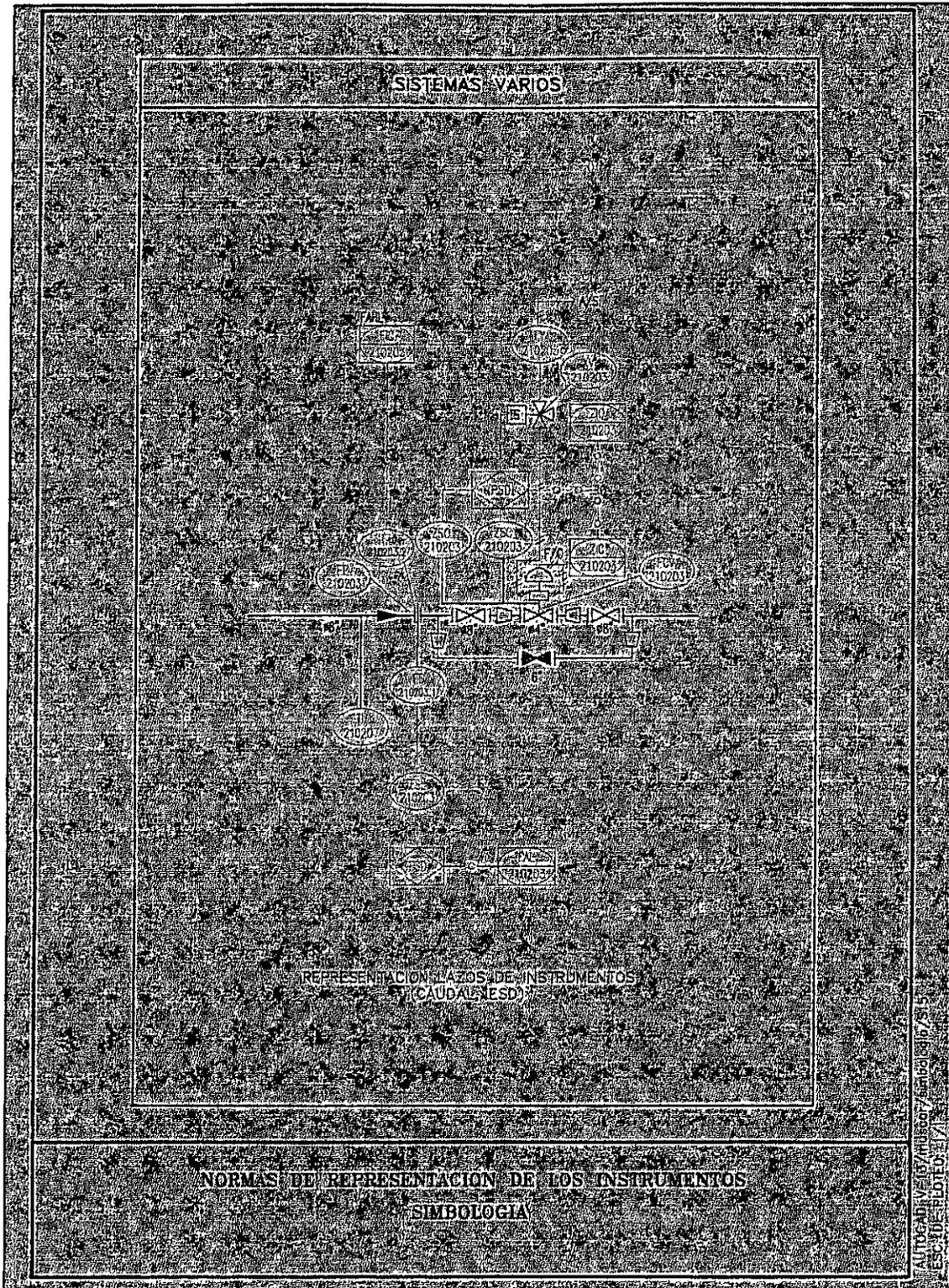


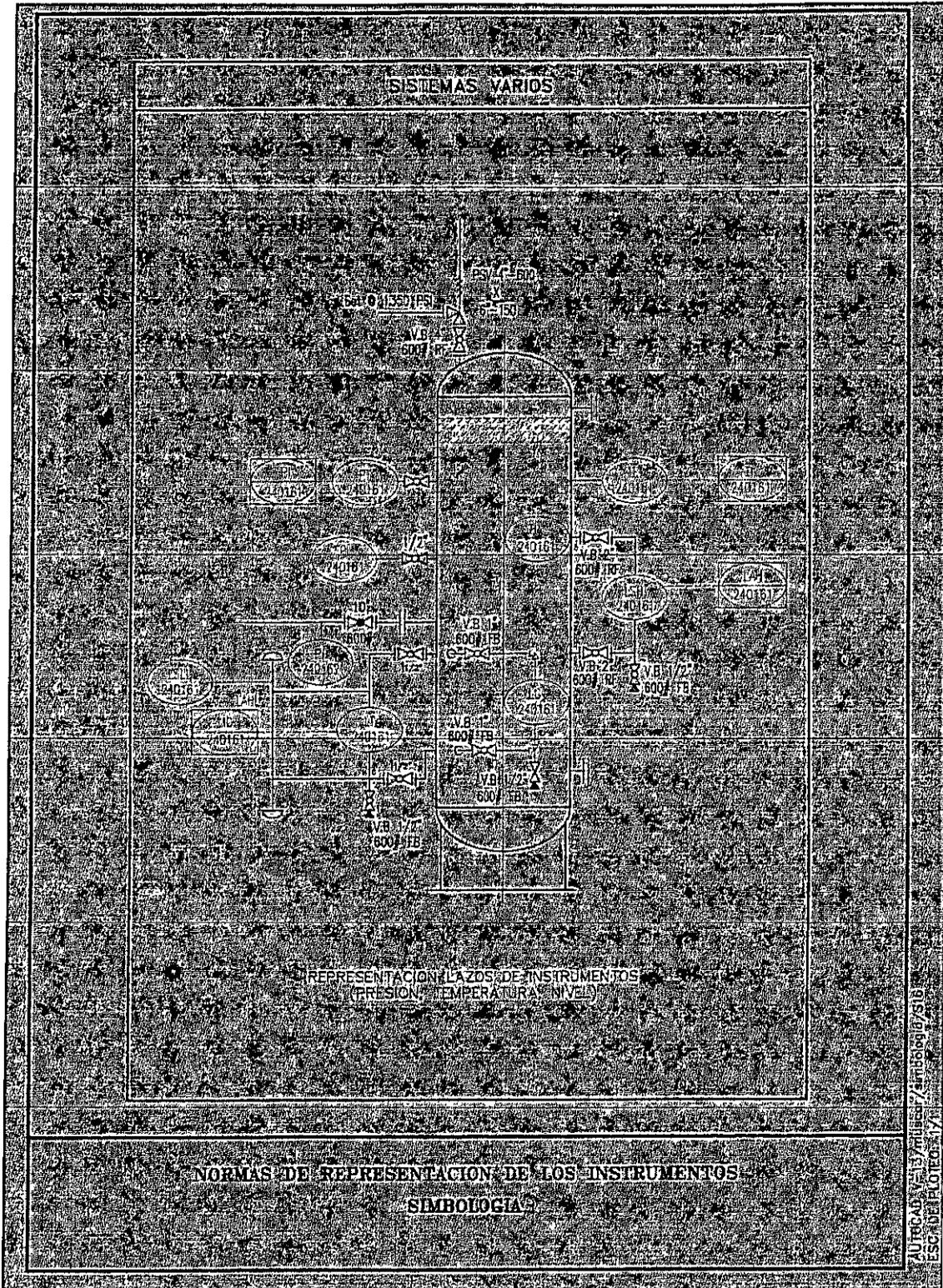












NORMA ISA S 5.3

La Norma ISA S5.3 tiene la finalidad de complementar los criterios de identificación y simbología ofrecida en la Norma ISA S 5.1; esta norma esta orientada a los sistemas de instrumentación basados en Computadores, mini computadores, controladores lógicos programables y microprocesadores que comparten un mismo sistema de presentación de la información.

Excepto por la información relacionada con las alarmas, la mayor parte de la información contenida en esta norma esta de una forma u otra contenida en al S 5.1. En efecto, las representaciones genéricas de funciones como las de conexiones por software o Softwiring, ya fueron representadas en las tablas y en las figuras mostradas.

En cuanto a las alarmas, y dada la variedad de alarmas ofrecidas por los modernos sistemas de control distribuido, la norma S 5.3 especifica que se debe indicar el tipo de alarma en las cercanías del símbolo del indicador o controlador situado en el DCS. Reconoce las alarmas de alta H; de baja L; de velocidad de cambio: dp/dt en caso de presión, dT/dt en caso de temperatura, de desviación del punto de ajuste: en caso de presión PD, en caso de temperatura TD.

Definiciones y Abreviaturas

Accesible: Una característica del sistema que significa que el sistema es visible por la interacción con el operador y permite a este cambios en el set point, transferencia auto / manual o acción on/off.

Transferible (Asignable): Esta característica permite al operador cambiar o dirigir una señal desde un dispositivo a otro, sin tener que cambiar cables, esto es, mediante suiches o comandos al sistema, a través de la consola.

Interfase de Comunicaciones (Communication Link): El computador para el control es un dispositivo en el cual acciones de control y/o indicación son generadas para ser utilizadas por otros dispositivos. Si otro dispositivo de control es utilizado en la comunicación, el computador normalmente se comporta o funciona jerárquicamente sobre los otros dispositivos de control.

Sistema de control por Computadora (computer Control System): Un sistema en el cual toda la acción de control tiene lugar dentro del computador. Computadores simples o redundantes pueden ser utilizados.

Configuración: Una característica del sistema que permite seleccionar mediante comandos la estructura básica y las características de un dispositivo o sistema, tales como algoritmos de control, formatos de pantalla o terminaciones de entrada / salida.

Sistema de Control Distribuido (Distributed Control System): Tipo de instrumentación (dispositivo de entrada / salida, dispositivos de control y dispositivos de operación) que además de ejecutar las funciones de control regulatorio también permiten la transmisión de control, medición e información de operación a y desde una o varias localizaciones mediante una interfase de comunicaciones.

Controlador Compartido (shared Controller): Es un dispositivo de control que posee una cantidad de algoritmos pre-programados los cuales son recuperados, configurables y conectables y permiten al usuario usar estrategias de control definidas o funciones a ser implantadas. El control de las múltiples variables del proceso puede ser diseñado compartiendo la capacidad de un dispositivo de este tipo.

Pantalla compartida (shared Display): El dispositivo de la interfase del operador usada para mostrar señales y/o data en la modalidad de tiempo compartido, por ejemplo información alfanumérica y/o gráfica residen en la base de datos de donde son seleccionadas por el usuario.

Programas (software): Programas digitales, procedimientos reglas y documentación requerida para la operación y/o mantenimiento de un sistema digital.

Enlace de programas (software Link): La interconexión de los componentes del sistema a funciones por medio de programas o comandos.

Sistema de Control Supervisorio (supervisory Set Point Control System): La generación del set point y/o otra información de control por un sistema de control por computador para ser usado por un controlador compartido, pantalla compartida u otros dispositivos reguladores de control.

DIAGRAMAS D.T.I (P&ID's)

El diagrama de tuberías e instrumentos D.T.I, consiste en una sección detallada del diagrama de flujo donde se incorporan todos los detalles de Ingeniería mecánica, entre éstas: diámetros de líneas, reducciones, tomas de procesos, aislamiento térmico, etc.; Y también se incluyen todos los instrumentos involucrados con el control, indicación y registro de esa área del proceso.

La forma de llamarlos es P&ID, la cuál tiene dos interpretaciones, ambos con validos significados. La primera es Piping and Instruments Diagram. La segunda es Process and Instrumentation Diagram. Como antes se menciona, ambas formas son perfectamente aceptables.

Es necesario aclarar, que este diagrama no necesariamente tendrá alguna relación con la distribución física de equipos en planta. Sin embargo, será una buena práctica el que ambos documentos guarden cierta analogía.

Los espacios físicos no serán representados a escala en el D.T.I., así como las distancias entre los instrumentos de campo y los instrumentos en paneles locales o en sala de control, tampoco serán representados en éstos.

Generalmente para un Diagrama de Flujo de Proceso existirán varios DTI's, lo que implica que estos deberán mostrar las líneas de referencias de interconexión entre DTI's.

Este documento será también la esencia inicial y fundamental de la filosofía de control del proceso en estudio. Por ello, ninguna fase posterior deberá ejecutarse antes de tener estos documentos claramente desarrollados aprobados por las partes interesadas.

Para la representación gráfica e identificación de los instrumentos en el DTI's, se usará la norma ISA.

MEDIDAS DE PRESION

CONCEPTO DE PRESIÓN Y UNIDADES

Introducción.

La presión es una fuerza aplicada a una superficie o distribuida sobre ella. La presión "P" ejercida por una fuerza "F" y distribuida sobre una área "A" se define mediante la relación.

$$P = F / A$$

La presión podrá expresarse en muy diversas unidades, tales como: Kg/cm², psi, cm de columna de agua, pulgadas o cm de Hg, bar y como ha sido denominada en términos internacionales, en Pascales (Pa), como la medida estándar según la 3ra Conferencia General de la Organización de Metrología Legal.

Dado que el Pascal (Newton/m²), es la unidad estándar, las equivalencias de las demás medidas las expresaremos en función de esta medida, a continuación:

$$1 \text{ Pa} = 0,00014 \text{ psi}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,0039 \text{ pulgadas de agua}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,00029 \text{ pulgadas de Hg}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,987 \times 10^{-5} \text{ Atmf}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,102 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$$

$$1 \text{ Pa} = 0,01 \text{ cm de agua}$$

$$1 \text{ Pa} = 0,0075 \text{ mm de Hg}$$

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ Bar}$$

La presión puede medirse de dos maneras, la primera en términos absolutos, y la segunda en términos relativos.

La presión absoluta se mide con relación al cero absoluto o vacío total.

La presión relativa se mide con respecto a la presión atmosférica, es decir, su valor cero corresponderá al valor de la presión absoluta atmosférica.

La presión atmosférica es la que ejerce la masa de aire de la atmósfera terrestre sobre su superficie, medida mediante un barómetro. A nivel del mar, la presión atmosférica es de aproximadamente 760 mm de Hg absolutos, que es equivalente a 14,7 psia.

Otro tipo de medida de esta variable, frecuentemente usada es la presión diferencial, que consistirá en la medida de la misma entre dos puntos de un proceso.

La presión de vacío es aquella que se mide como la diferencia entre una presión atmosférica y la presión absoluta (cero absoluto).

Presión manométrica. Es la presión medida con referencia a la presión atmosférica la diferencia entre la presión medida y la presión atmosférica real. Como ésta es variable, la comparación de valores medidos en diferentes intervalos de tiempo, resulta incierta.

Presión hidrostática. Es la presión existente bajo la superficie de un líquido, ejercida por el mismo.

Presión de línea. Es la fuerza ejercida por el fluido, por unidad de superficie, sobre las paredes de una conducción por la que circula.

Presión diferencial. Es la diferencia entre un determinado valor de presión y otro utilizado como referencia. En cierto sentido, la presión absoluta podría considerarse como una presión diferencial que toma como referencia el vacío absoluto, y la presión manométrica como otra presión diferencial que toma como referencia la presión atmosférica.

TIPOS DE INSTRUMENTOS PARA ESTA VARIABLE

Los elementos primarios de medición de presión son fundamentalmente de tres tipos:

- 1.- Elementos Mecánicos
- 2.- Elementos Electromecánicos
- 3.- Elementos Electrónicos.

Elementos Mecánicos: estos se subclasifican en dos categorías: a) de medición directa y b) elementos primarios elásticos. Los de medición directa realizan su función, comparando la presión con la fuerza ejercida por una columna de líquido de densidad conocida, entre estos se encontrarán: el barómetro de cubeta, el manómetro de tubo U, el manómetro de tubo inclinado, etc.

Los elementos primarios elásticos, miden la presión por deformación que estos sufren por efecto de ella misma. Los más empleados son: el tubo Bourdon, el elemento espiral, el diagrama y el fuelle.

El tubo de Bourdon es un elemento tubular de sección elíptica en forma de anillo casi completo, cerrado por un lado. Al aumentar la presión interna, el tubo tiende a enderezarse y este movimiento es transmitido por otros servomecanismos a una aguja indicadora o a un elemento transmisor.

Los materiales usualmente empleados son: acero inoxidable, aleaciones de cobre o otras aleaciones especiales como el Hastelloy/Monel.

El espiral se forma enrollando un tubo de Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común.

El helicoidal es similar al espiral con la diferencia de que las espiras se encuentran en planos diferentes y paralelos.

El diafragma consiste en una o varias cápsulas circulares, conectadas rigidamente entre sí por soldadura, de tal forma que al aplicar presión sobre ellas, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El material usado típicamente en el diafragma es la aleación de níquel o Inconel X.

El fuelle es similar a un diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse y contraerse de forma considerable.

Para los elementos antes mencionados tenemos la siguiente tabla de rango

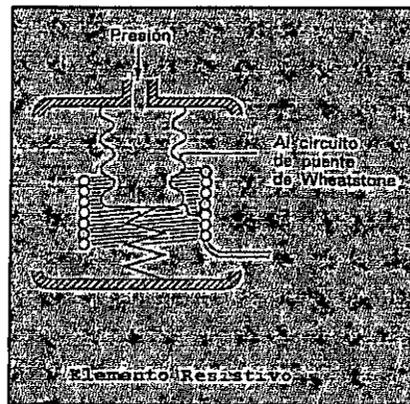
Elementos	Rango
Barómetro de cubeta	0,1 - 3 m de columna de agua
Tubo U	0,2 - 1,2 m de columna de agua
Tubo inclinado	0,01 - 1,2 m de columna de agua
Tubo de Bourdon	0,5 - 6000 Kg/cm ²
Espiral	0,5 - 2500 Kg/cm ²
Helicoidal	0,5 - 5000 Kg/cm ²
Diafragma	50 mm c/agua - 2 Kg/cm ²
Fuelle	100 mm c/agua - 2 Kg/cm ²

Los Elementos Electromecánicos: estos elementos son la combinación de un elemento mecánico elástico y un transductor eléctrico, que generara la señal correspondiente.

Los elementos electromecánicos de presión se clasifican de acuerdo al principio de funcionamiento, estos son:

- Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas
- Resistivos
- Magnéticos
- Capacitivos
- Extensiométricos
- Piezoeléctricos

Los elementos resistivos consisten de un elemento elástico, que varia la resistencia ohmica en función de la presión. Ver gráfica a continuación:

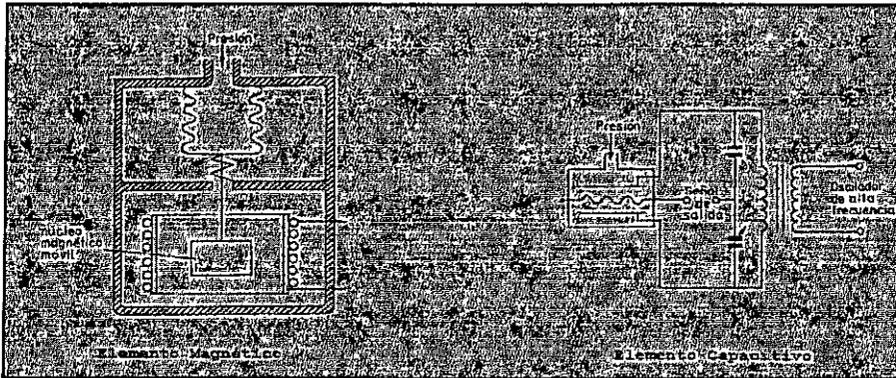


La resistencia que se obtenga mediante un puente de Wheatstone, podrá asociarse casi de forma lineal con el valor de la presión.

Su rango de medida varía entre 0,1 y 300 Kg/cm², su precisión es de alrededor del 1,5% del Span, pero su defecto es que son altamente sensibles a las vibraciones.

Los elementos magnéticos trabajan de forma similar a los resistivos, solo que en este caso el transductor no será una resistencia, sino una bobina y un imán conectado mecánicamente al elemento elástico. El devanado de la bobina es alimentado con corriente alterna y la fem inducida por el imán será opuesta a la de alimentación, siendo diferencia proporcional a la presión aplicada sobre el elemento elástico. Una gráfica de el elemento se presenta a continuación.

Los elementos capacitivos se basan en el principio que establece que un condensador variara su capacitancia al desplazarse una de sus placas. En este caso, una de las placas, la móvil, estará conectada mecánicamente a un elemento elástico, de tal forma que podemos establecer un puente de Wheatstone capacitivo, cuyas características son mas estables que las del elemento resistivo, sin embargo, como todos los anteriores sistemas sigue siendo sensible a las vibraciones.



Los elementos extensiométricos también conocidos como galgas extensiométricas (strain gage), se basan en un principio que establece que la resistividad de un conductor varía de acuerdo al diámetro y longitud de dicho conductor.

Recientemente, fue descubierto un material conductor, que tenía la peculiaridad mecánica de poseer un coeficiente de elasticidad tal que le era posible, en forma de conductor (hilo), al aplicar tensión mecánica, deformarse aumentando su longitud y disminuyendo su diámetro y al desaparecer el efecto de la tensión, el conductor recuperara sus dimensiones originales de longitud y diámetro. A este tipo de conductor se le llama hilo activo.

Este hilo activo, incorporado en un material elástico y adhesivo, forma lo que se llaman las galgas extensiométricas (strain Gage)

Al instalar una de estas galgas sobre la superficie de un elemento elástico de medición de presión, podremos mediante un puente de wheatstone, medir la variación de resistividad por el efecto de las deformaciones.

En este caso, las vibraciones tendrán un efecto nulo sobre la medición, por lo que este tipo de transductor es uno de los más novedosos y versátiles descubrimiento de finales de la década pasada

Su intervalo de medición varía entre $0,6$ y 10000 Kg/cm^2 , lo cual da una idea de su eficacia

Los transductores Piezoeléctricos, actualmente aún en estudio para su aplicación industrial, son materiales cristalinos que al deformarse por efecto de la presión, generan una señal eléctrica

Los materiales cristalinos que se estudian son el cuarzo y el titanio de bario, capaces de soportar temperaturas entre 150 y 230 grados celsius en servicio intermitente.

Este rango de temperatura no es aceptable de ningún modo para los anteriores elementos transductores, lo que advierte sobre la gama de aplicaciones industriales de los piezoeléctricos

Elementos Electrónicos de vacío

Los elementos electrónicos de vacío se emplean para la medición de alto vacío, son altamente sensibles y se clasifican:

- Mecánicos
- Medidor de McLeod
- Térmicos
- De Ionización

Los medidores Electrónicos-Mecánicos de vacío, constan de un fuelle y un diafragma conectados, midiendo la diferencia de presiones entre las presiones atmosféricas y la del proceso.

El medidor de McLeod, que es usado como instrumento de calibración de muchos otros instrumentos, se basa en comprimir una muestra del gas a un volumen mas pequeño mayor que la atmosférica, para luego deducir la presión original mediante la aplicación de la ley de Boyle.

Los transductores de Ionización utilizan el principio que habla de la formación de iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones (o bien partículas alfa en el tipo de radiación). La formación de estos iones variara directamente proporcional con la presión, en niveles muy bajos de presión absoluta.

CALCULOS TIPICOS

Sobre este particular haremos una serie de anotaciones prácticas sobre algunos cálculos frecuentes acerca de los instrumentos de presión.

Rango de un instrumento de presión: para determinar el rango comercial de un instrumento, será necesario conocer por parte de los encargados del proceso cuales serán los valores de la presión máxima y mínima.

Luego como practica recomendable, se calculara el Span del rango expedido por procesos, se obtendrá el 30% de ese valor y se le añadirán al rango por encima y si fuera el caso, también por debajo.

Con este nuevo rango, procederemos a ubicar el rango igual o por encima de los requerimientos calculados con ese factor de seguridad, del catalogo comercial que estemos usando para la selección y compra de nuestro instrumento.

Estimado de la presión por columna de liquido de un fluido de gravedad especifica conocida: es frecuente que el Ingeniero Instrumentista se encuentre en la necesidad de estimar por cuenta propia el valor del rango de un instrumento de presión para la evaluación de la altura de columna liquida en un tanque, o será necesario el calculo de la presión para un tubo U o tubo inclinado.

Para entender este cálculo, será necesario comprender lo que significa el concepto de gravedad relativa de un líquido, llamada **Gamma**. Esta es la relación que existe entre la gravedad específica de un determinado líquido y la gravedad específica del agua.

La presión ejercida por una columna de un determinado líquido, en términos de su equivalente en columna de agua vendrá determinada por la siguiente relación:

$$P = \text{Gamma} * H$$

Donde H será la altura de la columna del líquido en cuestión.

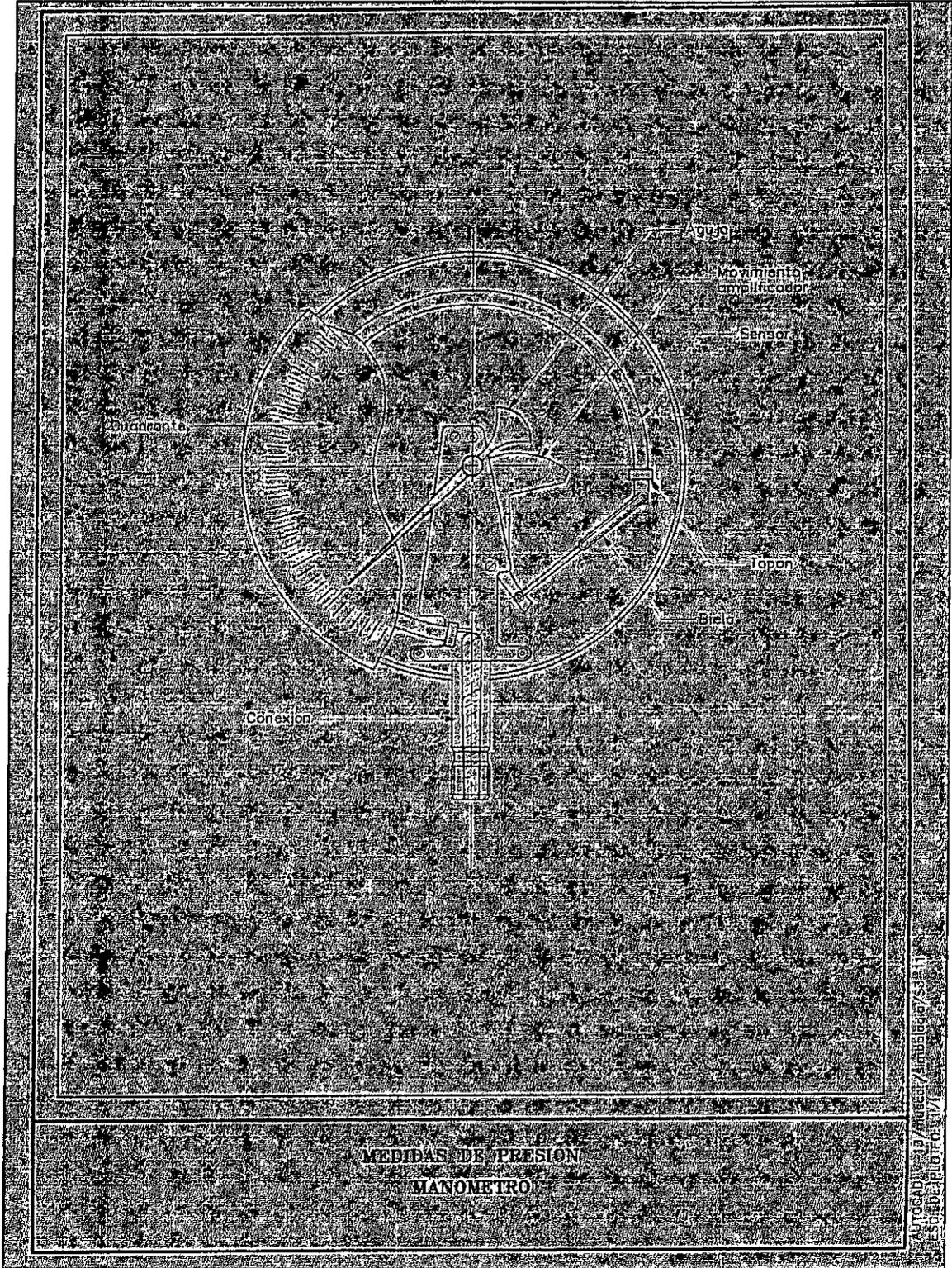
Si se toma en cuenta las siguientes equivalencias:

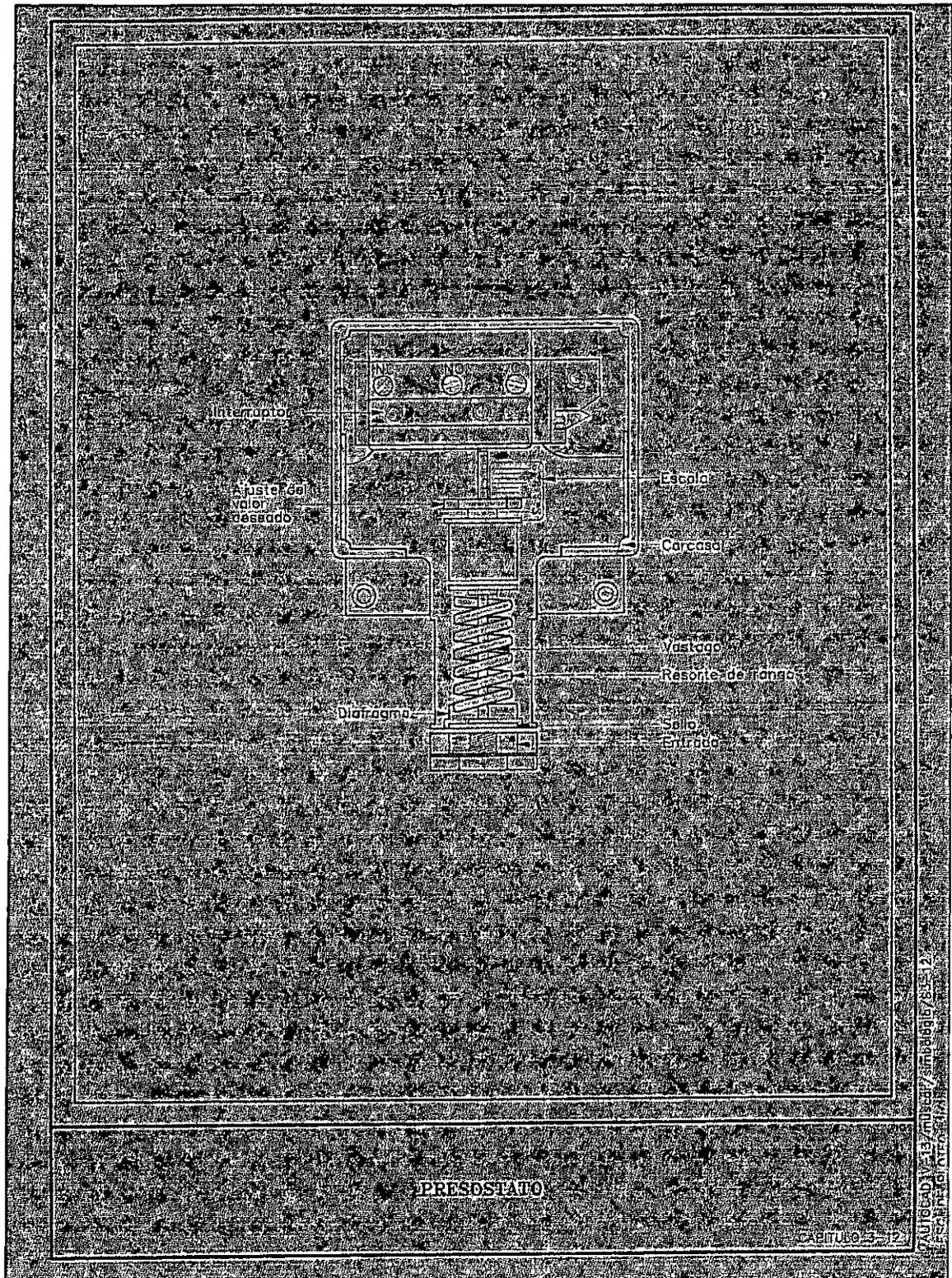
1 m de columna de agua = 1,42 psi

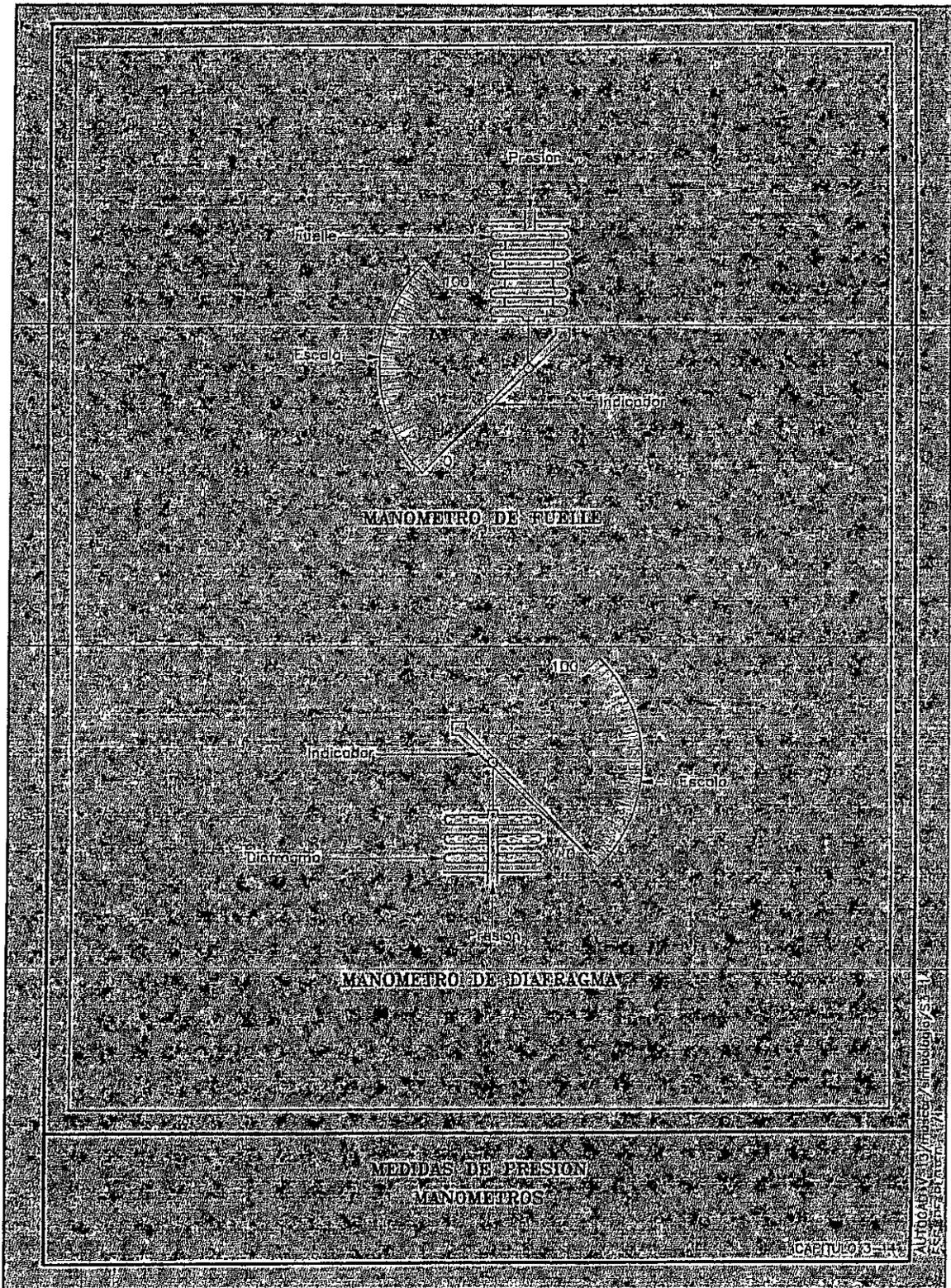
1 m de columna de agua = 0,1 Kg/cm²

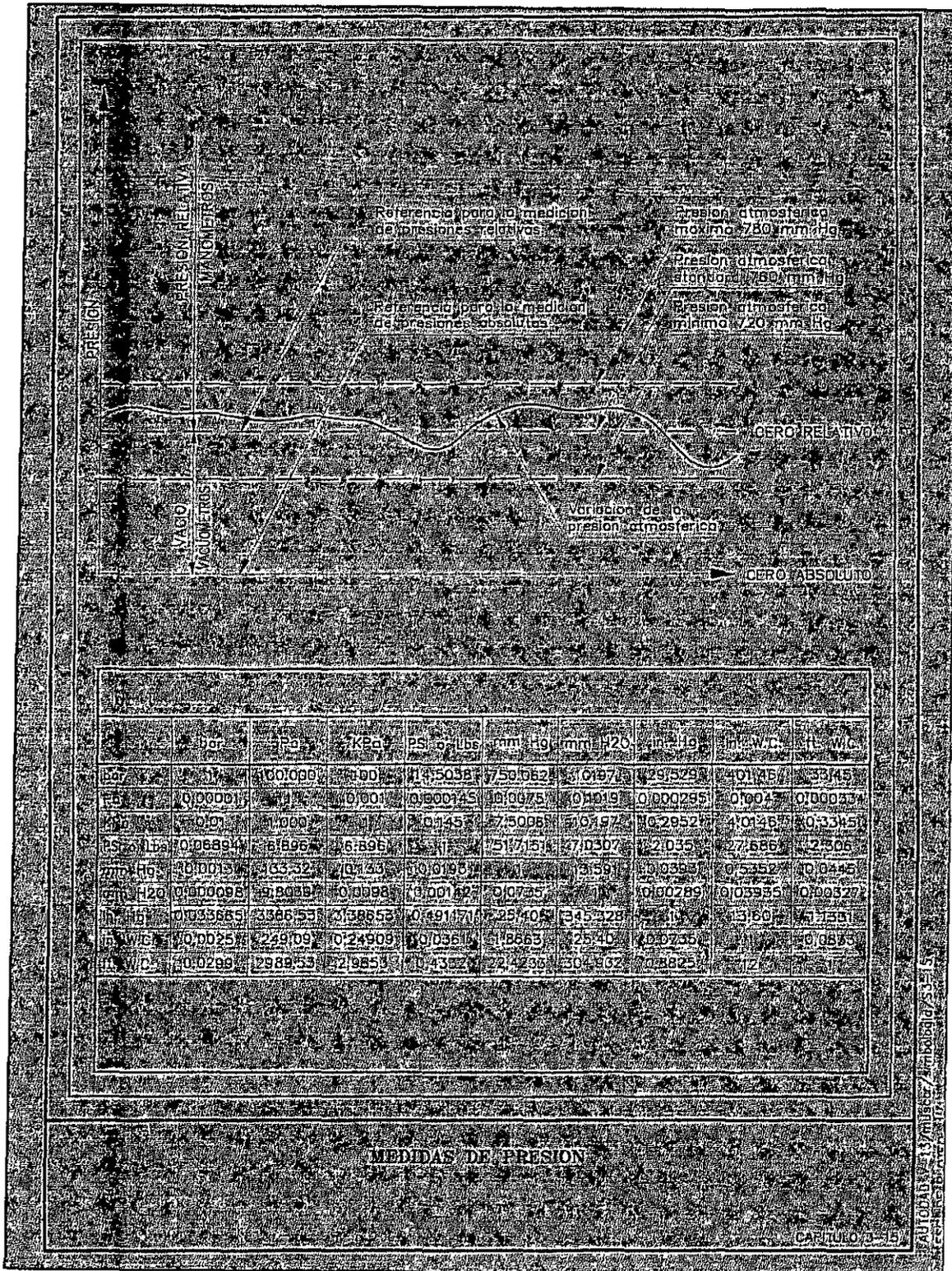
Se podrá determinar la presión en valores prácticos y manejables para una columna de líquido cualquiera.

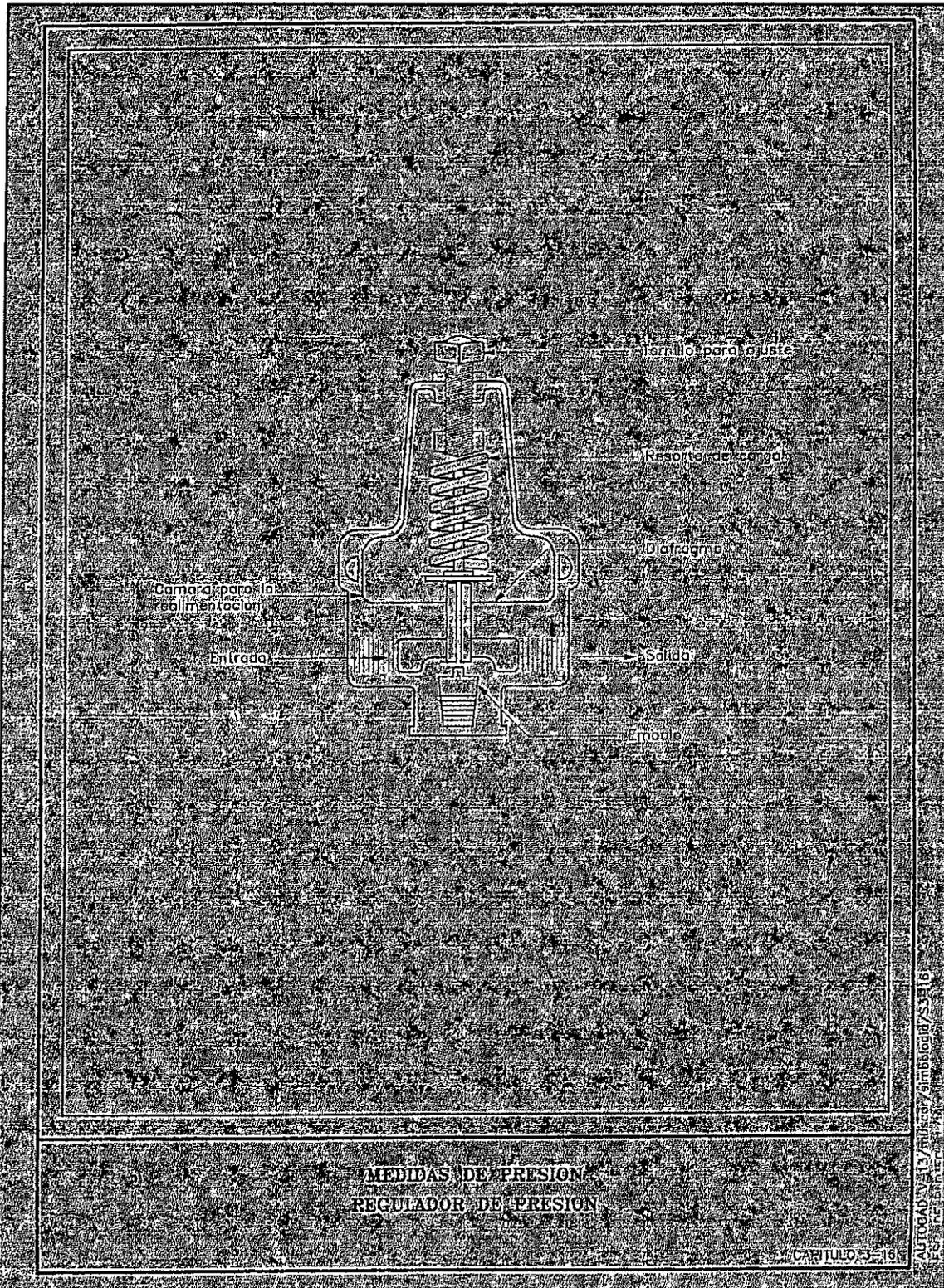
Para el caso de tubos U o de tubos inclinados, el valor de H a tomar en cuenta será la diferencia de las alturas de los meniscos de los dos lados del tubo.











MEDIDAS DE PRESION
REGULADOR DE PRESION

CAPITULO 3-19

AUTODIDACTICO / Publicar / Imprimir / 3-16
F.S. 175-01-01-01

INSTRUMENTOS DE MEDICION DE TEMPERATURA

UNIDADES Y TRANSFORMACIONES;Error! Marcador no definido.

La Temperatura es difícil de definir, ya que no es una variable tan tangible como lo es la presión, dado que en su caso, no podemos referirla a otras variables.

La temperatura es un estado relativo del ambiente, de un fluido o de un material referido a un valor patrón definido por el hombre, un valor comparativo de uno de los estados de la materia

Por otra parte, si, positivamente, podremos definir los efectos que los cambios de temperatura producen sobre la materia, tales como los aumentos o disminución de la velocidad de las moléculas de ella, con consecuencia palpable, tales como el aumento o disminución del volumen de esa porción de materia o posibles cambios de estado.

Existen dos escalas de temperatura o dos formas de expresar el estado relativo de la materia, estas son:

- Temperaturas absolutas
- Temperaturas relativas

Las escalas absolutas expresan la temperatura de tal forma que su valor cero, es equivalente al estado ideal de las moléculas de esa porción de materia en estado estático o con energía cinética nula.

Las escalas relativas, son aquellas que se refieren a valores preestablecidos o patrones en base los cuales fue establecida una escala de uso común.

En Sistema Métrico Decimal, las escalas relativas y absolutas son:

- la Escala Celsius o de grados Centígrados (relativa)
- la Escala Kelvin (absoluta)

La equivalencia entre las dos escalas es:

$$\text{Grados Kelvin} = \text{Grados Centígrados} + 273$$

En el Sistema de Medidas Inglesas, su equivalente será:

- La Escala Fahrenheit (Relativa)
- La Escala Rankine (Absoluta)

la equivalencia entre estas dos escalas es:

$$\text{Grados Rankine} = \text{Grados Fahrenheit} + 460$$

Por otra parte, las escalas Celsius y la Fahrenheit están referidas al mismo patrón, pero sus escalas son diferentes. El patrón de referencia usado para su definición fueron los cambios de estado del agua. Estos puntos son:

CAMBIO DE ESTADO	°CELSIUS	°FARENHEIT
SOLIDO - LIQUIDO	0	32
LIQUIDO - GAS	100	212

Como se puede deducir de la tabla anterior, por cada grado Celsius de cambio térmico tendremos 1,8 grados Fahrenheit de cambio equivalente. De todo esto, la equivalencia entre estas dos escalas será:

$$\text{Grados Fahrenheit} = \text{Grados Celsius} * 1,8 + 32$$

TIPOS DE INSTRUMENTOS DE ESTA VARIABLE

Los diferentes tipos de instrumentos que son usados para la medición de la temperatura son:

1. - Termómetro de Vidrio
2. - Termómetro Bimetálico
3. - Termopares
4. - Termoresistencia (RTD)
5. - Pirometro de Radiación

Existen otros tipos, además de los listados, pero su uso es poco frecuente, por lo cual nos dedicaremos únicamente a los listados.

TERMÓMETRO DE VIDRIO

Este tipo de instrumento, es el más conocido por nosotros; consta de un tubo de vidrio hueco, con un deposito lleno de un fluido muy sensible volumétricamente a los cambios de temperatura.

Dependiendo del fluido usado, tendremos diferentes rangos de temperatura para este tipo de instrumento, los cuáles, vendrán limitados, por los puntos de solidificación y de ebullición de los antes citados fluidos. Algunos de estos son:

Mercurio	-35 a 280 Grados C
Mercurio (tubo de gas)	-35 a 450 Grados C
Pentano	-200 a 20 Grados C
Alcohol	-110 a 50 Grados C
Tolueno	-70 a 100 Grados C

Estos son frágiles, requieren de una posición específica para funcionar, además de tener un rango muy limitado de la variable.

TERMÓMETROS BIMETÁLICOS

Al igual que el termómetro de vidrio, utilizan el fenómeno de cambios volumétricos, para su funcionamiento. El termómetro bimetalico, consta, como su nombre lo dice, de dos barras metálicas de diferentes unidas rígidamente, a los estos materiales ser diferentes, tendrán necesariamente, que tener diferentes coeficientes de dilatación lineal.

Esta diferencia produce una curvatura de la barra conjunta, debido a que un material se elongará mas que el otro. Mediante este método, funcionan la gran mayoría de los termostatos (interruptores de temperatura) y algunos termómetros indicadores locales.

TERMOPARES

El termopar se basa en el principio, del efecto que fuera descubierto en 1821 por Seebeck, que establece que cuando la unión de dos materiales diferentes se encuentra a una temperatura diferente que la del medio ambiente, a través de esos materiales circulará una corriente.

El uso de termopares en la industria se ha popularizado, ya que son altamente precisos y muchos más económicos que las termoresistencias.

Existen muchos métodos para realizar mediciones prácticas de temperatura. De todos ellos, unos fueron desarrollados para aplicaciones particulares mientras que otros han ido cayendo en desuso.

Las termocupulas constituyen hoy en día el sistema de medición de temperatura más usado y de mejor acceso.

Esta forma de medición abarca el rango de temperaturas requerido para la mayoría de las mediciones exigidas.

Termocupulas de diferentes tipos pueden cubrir un rango de 250°C hasta 2.000°C y más si fuera necesario.

TERMOMETRICA CON TERMOCUPULAS

Si se presenta un gradiente de temperatura en un conductor eléctrico, el flujo de calor creará un movimiento de electrones y con ello se generará una fuerza electromotriz (FEM) en dicha región. La magnitud y dirección de la FEM será dependientes de la magnitud y dirección del gradiente de temperatura del material que conforma al conductor.

En una termocupula, dos materiales que tienen diferentes características FEM / temperatura, se combinan para producir un voltaje de salida que puede ser cuantificado.

Existen varias reglas a recordar en el empleo de estos sistemas y son las siguientes:

- a) Para asegurar una operación estable y adecuada de la termocupula, las características termoeléctricas de los conductores deben mantenerse a todo lo largo de ellos (uniformidad).
- b) Sólo un circuito comprimiendo o simplemente conectando materiales diferentes, en un gradiente de temperaturas producirá una señal. Dos conductores de igual material no producirán FEM alguna.
- c) La sensibilidad termoeléctrica de la mayoría de los metales no es lineal con la variación de temperatura.

MATERIALES DE CONTRUCCION

La totalidad de los sensores de este tipo cubre el rango de 250°C hasta 2.000°C pero un solo tipo de termocupula no abarca la totalidad del rango. En la tabla siguiente se mencionan algunas codificaciones de termocupulas y los materiales de construcción de las mismas:

Designación Internacional	Material del Conductor		Rango de Temperatura en °C
	Polo +	Polo -	
K	Ni-Cr	Ni-Al	0 hasta + 1.100
T	Cu	Cu-Ni	-185 hasta +300
J	Fe	Cu-Ni	+20 hasta 700
E	Ni-Cr	Cu-Ni	0 hasta + 500
R	Pt13%Rh	Pt	0 hasta + 1.600
S	Pt10%Rh	Pt	0 hasta + 1.500
B	Pt30%Rh	Pt6%Rh	+100 hasta + 1.600

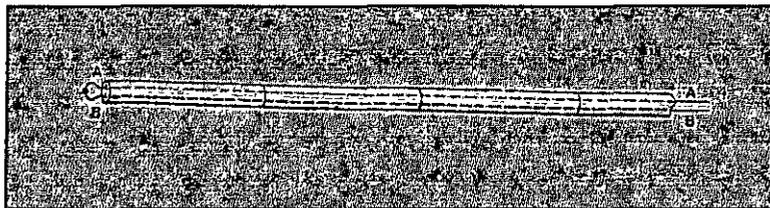
Tanto la exactitud como la sensibilidad de la medida depende de los conductores, y es recomendable que el fabricante ayude en la elección del material a usarse para garantizar así la vida y rendimiento del termoelemento.

LA TERMOCUPULA PRACTICA

Para aplicaciones simples, los termoelementos pueden hacerse usando cables compensados y algún tipo de aislante adecuado para cada caso.

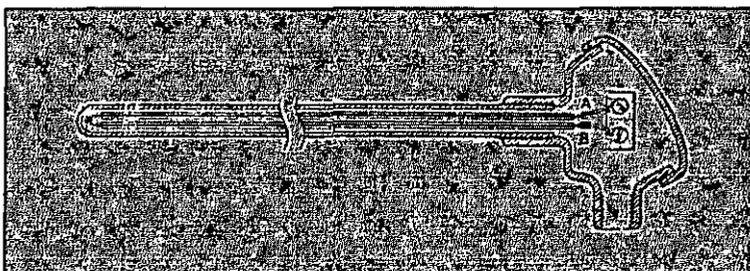
La unión de medición se forma en un extremo soldando los dos alambres conductores fundiéndolos entre sí bajo una atmósfera inerte de argón.

La condición esencial es establecer una conexión eléctrica adecuada entre los conductores (Figura)



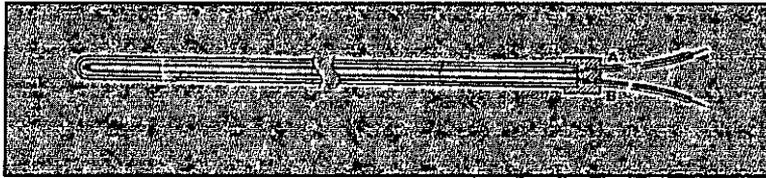
Los rangos, tipo y estilos de las termocupulas son muy grandes y completos con lo que es posible conseguir una disposición adecuada para las aplicaciones necesarias en la industria y el campo científico.

Frecuentemente, el termoelemento suele ir introducido en una carcasa cerrada en su extremo (termopozo) que se fabrica de alguna aleación metálica resistente a la corrosión o al calor y, en otros casos, se utiliza un material refractario (Figura)



Una forma alternativa de construcción es utilizar un termoelemento con aislamiento mineral; En este caso, los cables conductores están envueltos en un polvo mineral inerte y no conductor fuertemente compactado. Todo este conjunto va rodeado de una camisa metálica (de acero inoxidable o aleaciones de níquel) que forman una unidad hermética.

Este tipo de ensamblaje se puede obtener en diámetros externos desde 0.25 hasta 19 mm inclusive y longitudes de unos pocos milímetros hasta cientos de metros (Figura)



Para aplicaciones especiales donde se requiere una respuesta rápida, es aconsejable ocasionalmente, que la termocupula sea fabricada con su unión expuesta o en algunos casos aterrada; siempre y cuando el resto del sistema lo permita.

Las termocupulas están frecuentemente acabadas con una conexión o un terminal que permite su unión con resto del circuito termoelectrico. Alternativamente, un conector especial puede ser incluido; En estos dispositivos, las patas conectoras están construidas de materiales o aleaciones adecuadas para no alterar la FEM generada en la unión de medición, permitiendo así la rápida conexión o desacople del sensor a utilizar sin afectar de forma alguna la uniformidad del termoelemento.

En los termopares, también llamados termocuples, existen dos puntos importantes: las juntas caliente (en el proceso) y la junta fría (en el medio ambiente).

Los materiales que serán usados ya están estandarizados y tienen unas tablas de comportamiento, que suponen, que la junta fría se encuentra a cero (0) grados centígrados.

Esto es con el fin, de tener un valor de patrón de comparación que parta de cero, ya que de no ser así, la junta fría actuaría como un segundo termopar en serie con el primero sumando así a la f.e.m. de la junta caliente.

En la práctica industrial, lo frecuente, es tener la junta fría a temperatura ambiente, lo que hace necesario, compensar el valor de

la lectura de mV, restando los mV que generaría ese termopar a la temperatura ambiente.

TERMORESISTENCIA (RTD)

Las termo-resistencias, utilizan el principio que establece que la resistividad de un conductor varia con la temperatura, y que esta variación podrá o no ser lineal dependiendo del material usado para esa resistencia.

Físicamente está constituido por un arrollado muy fino del conductor adecuado, bobinado entre capas de un material aislante eléctrico, protegido por un termopozo para lograr una protección total del elemento sensor.

La relación fundamental para el funcionamiento será así:

$$R_t = R_o * (1 + \text{Alpha} * t)$$

donde:

R_o: resistencia en ohmios a 0 grados Celsius
R_t: resistencia a la temperatura t grados Celsius
Alpha: coeficiente de temperatura de la resistencia.

Como se puede observar, se esta suponiendo de antemano, que el material que será usado debe tener un comportamiento lineal, dentro del rango de trabajo asignado. De no ser así, la función debería tener más términos.

El método de medición de la temperatura no es directo, ya que lo que se mide es una resistencia mediante un puente de Wheastone, luego se lee el valor de la temperatura correspondiente de tabla de comportamiento de la citada resistencia. Este proceso, en la actualidad, ya esta automatizado, gracias a los sistemas de control avanzados y la electrónica digital.

Las termoresistencias más usadas en el mercadeo son:

Error! Marcador no definido METAL	RANGO DE OPERACION ° Celsius	PRECISION (grados)
Platino	-200 a 950	0.01
Níquel	-150 a 300	0.50
Cobre	-200 a 120	0.10

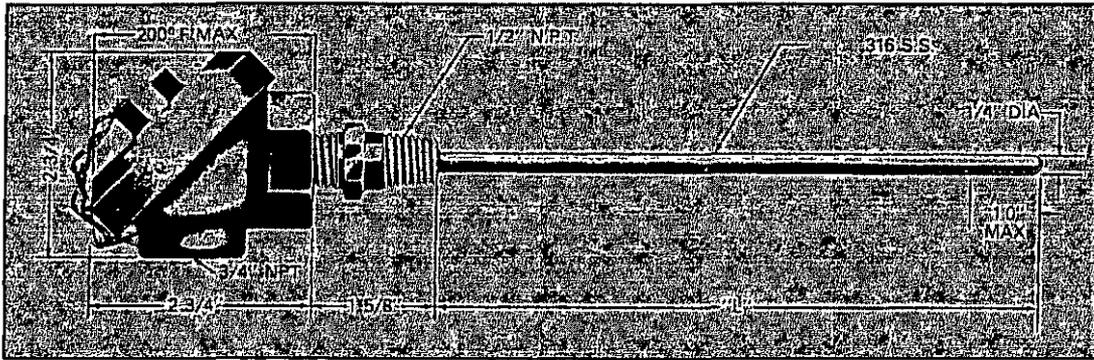
TERMORRESISTENCIAS DE PLATINO Y SUS APLICACIONES

Este tipo de sensores tiene una ventaja fundamental; son sumamente precisos y producen medidas altamente reproducibles. Su construcción permite disponer de ellos como elementos simples, dobles y, en casos muy especiales, hasta triples. Su rango de operación es un poco más limitado y va desde 50°C hasta + 350°C.

En su forma general el sensor viene introducido dentro de un tubo protector metálico de acero inoxidable pero posible, según el caso, disponer de camisas protectoras y termopozos construidos de acero especiales o aleaciones como el Inconel, Incoloy y Hastelloy.

Las termoresistencias de platino tienen normalmente un valor de 100 Ohms a 0°C con un intervalo de 38,5 Ohms.

Su construcción puede hacerse con 2, 3 o 4 cables, según la necesidad del proceso.

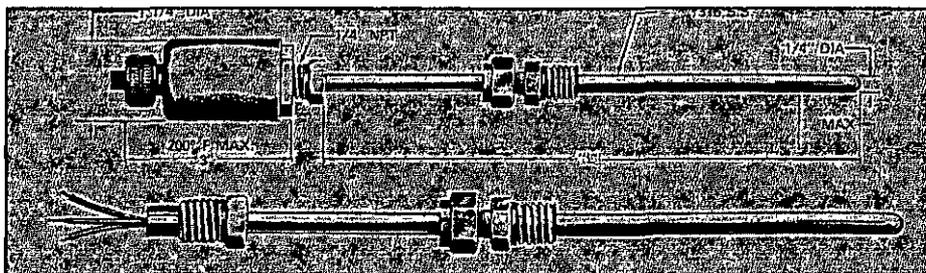


TERMORRESISTENCIAS DE USO GENERAL

Esta disposición se puede usar con o sin termopozos en una infinidad de procesos que incluyen tanques, hornos, estufas, tuberías, ductos, sistemas de incubación, fermentación, refrigeración. Los tubos protectores se hacen del largo, diámetro y material requerido por el cliente; este tipo de sensores posee además opciones de respuesta rápida o con camisa para medición de gases secos.

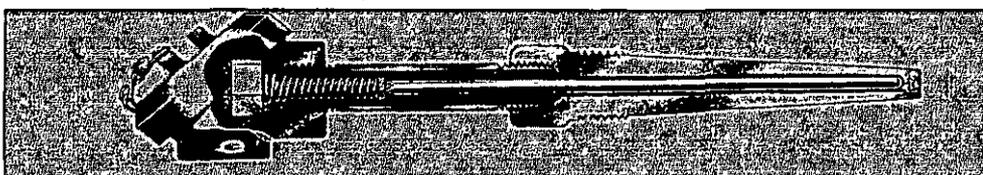


Termorresistencias con elementos de inmersión variable



Este tipo de construcción posee un conector ajustable que permite variar el largo de inmersión del elemento.

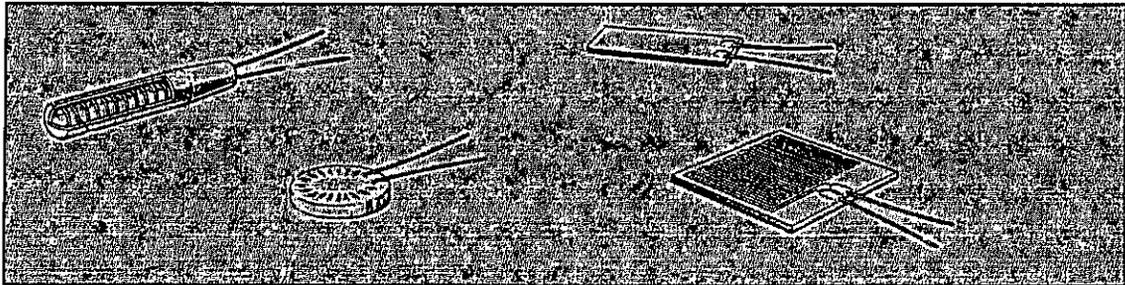
Termorresistencias tipo " SPRING LOADED "



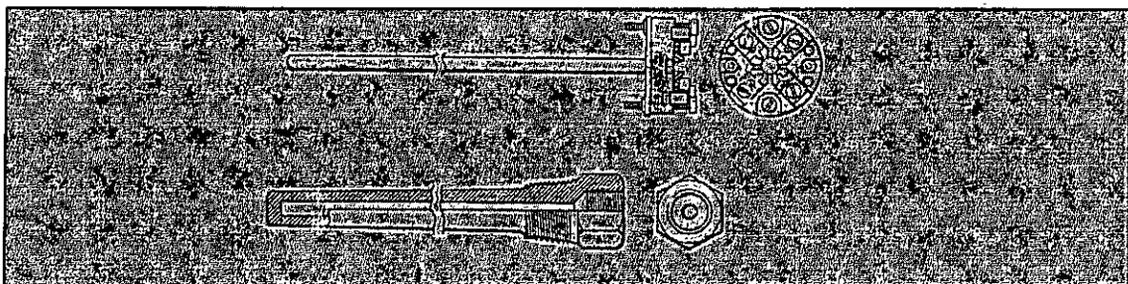
Dispositivo que permite que el elemento y el termopozo estén en contacto firme durante su operación. Esto permite controlar la variación o golpeteo dentro del termopozo, aumenta la velocidad de respuesta y facilita enormemente la instalación del sensor.

TIPOS DE SENSORES

Muchos de los sistemas de termorresistencias de platino utilizan sensores que van contruidos en forma de espiral y recubiertos o encerrados en un cuerpo aislante de cerámica o vidrio, el cual posee una relación de expansión vs. Temperatura muy similar a la del platino dentro del rango de trabajo (Figura)



Las termorresistencias de platino se pueden fabricar con una gran variedad de tubos de protección y con los terminales adecuados para la conexión con el resto del circuito así como con diferentes tipos de termopozos para lograr una protección total del elemento sensible (Figura)



Existen tres tipos de termoresistencias, de acuerdo a su construcción y cableado:

- de dos hilos
- de tres hilos
- de cuatro hilos

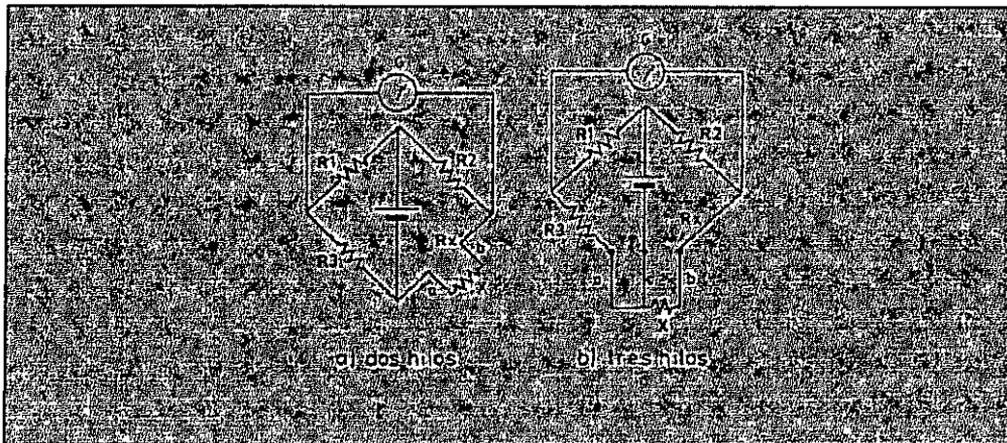
Como ya se había mencionado, la evaluación, del valor de la resistencia R_t , se hace en un puente de Wheastone, entonces es aquí, donde se hace importante la diferencia entre ambos tipos de termoresistencias.

Para las primeras, de dos hilos, será necesario estimar la longitud del conductor del puente a la resistencia en el punto de toma del proceso, para poder calcular el valor de la resistencia.

Para las de tres hilos, si además, ajustamos el puente de tal forma que $R_1/R_2=1$, y como la longitud por lado de conductor se hace igual, podremos ajustar el valor de la resistencia R_3 para equilibrio, y ese será directamente el valor de la resistencia x . Dado que en equilibrio la ecuación del puente será:

$$R_1 / (R_3 + K * a) = R_2 / (x + K * b)$$

Según esquemático de conexión, que se muestra debajo.

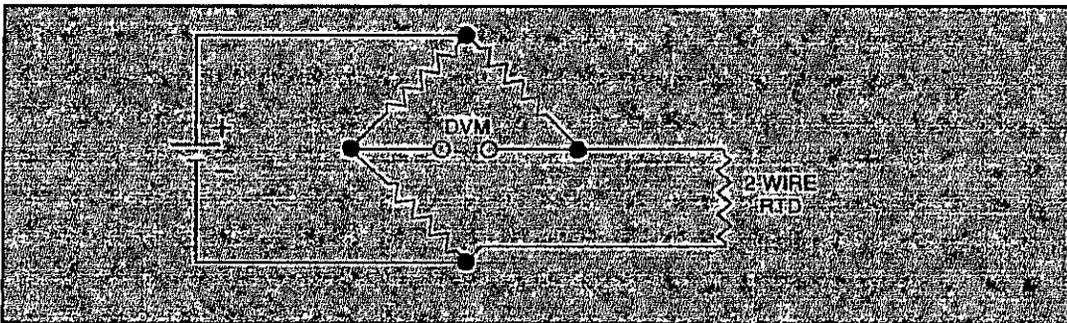


CIRCUITOS RTD

Circuito RTD dos hilos

La RTD simple reemplaza uno de los elementos del puente y causa un desbalance y así como también cambios de resistencia. La salida se lee directamente o es usada para manejar otro circuito en el transmisor. Si la RTD esta localizada a una distancia desde el transmisor y puente entonces esta conduce por los dos hilos cuando un material más económico es usado para conectar la RTD al puente.

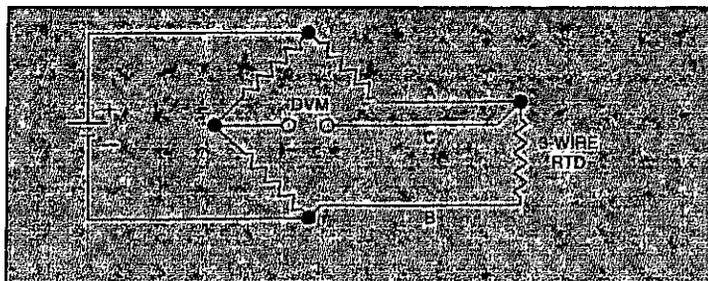
Una de las limitaciones de la RTD de dos hilos es que los hilos conductores añadidos a la resistencia del circuito pueden causar errores de lectura.



Circuito RTD tres hilos

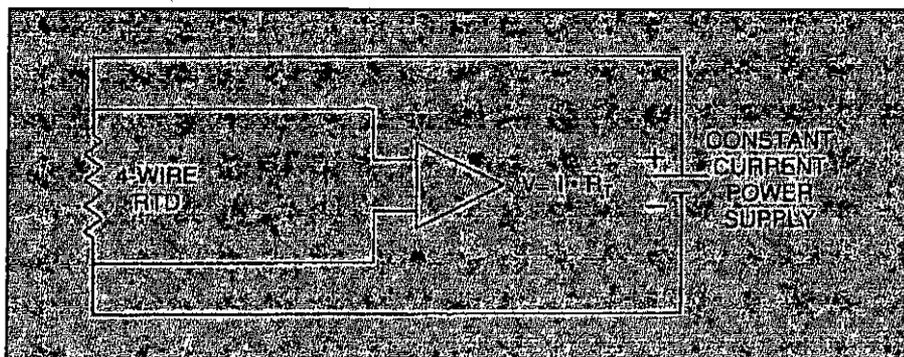
Para ayudar a eliminar el error introducido por los hilos conectores se usa comúnmente una RTD de tres hilos con este propósito los efectos de la resistencia de cada uno de los hilos conductores (A y B) son eliminados por el puente debido a que cada uno es la conexión opuesta del puente. El tercer hilo (C) es un conductor de equilibrio.

Los tres hilos unidos no eliminan todos los efectos de los hilos conductores, pero debido a que los sensores están localizados justamente cercanos a los transmisores, los efectos de los hilos conductores son pequeños y la aproximación provee una exactitud razonable.



Circuito RTD cuatro hilos

La vía más efectiva para eliminar los efectos de los hilos conductores es con cualquiera de las versiones de cuatro hilos. Es una aproximación que no requiere puente como se indica en la figura, en este método una corriente constante es conectada a dos de los hilos de la RTD, la caída de voltaje en la RTD es medida en los otros dos conductores, la caída de voltaje es independiente de los efectos de los hilos conductores.



Ventajas y Desventajas de la RTD con la Termocupla

Ventajas RTD

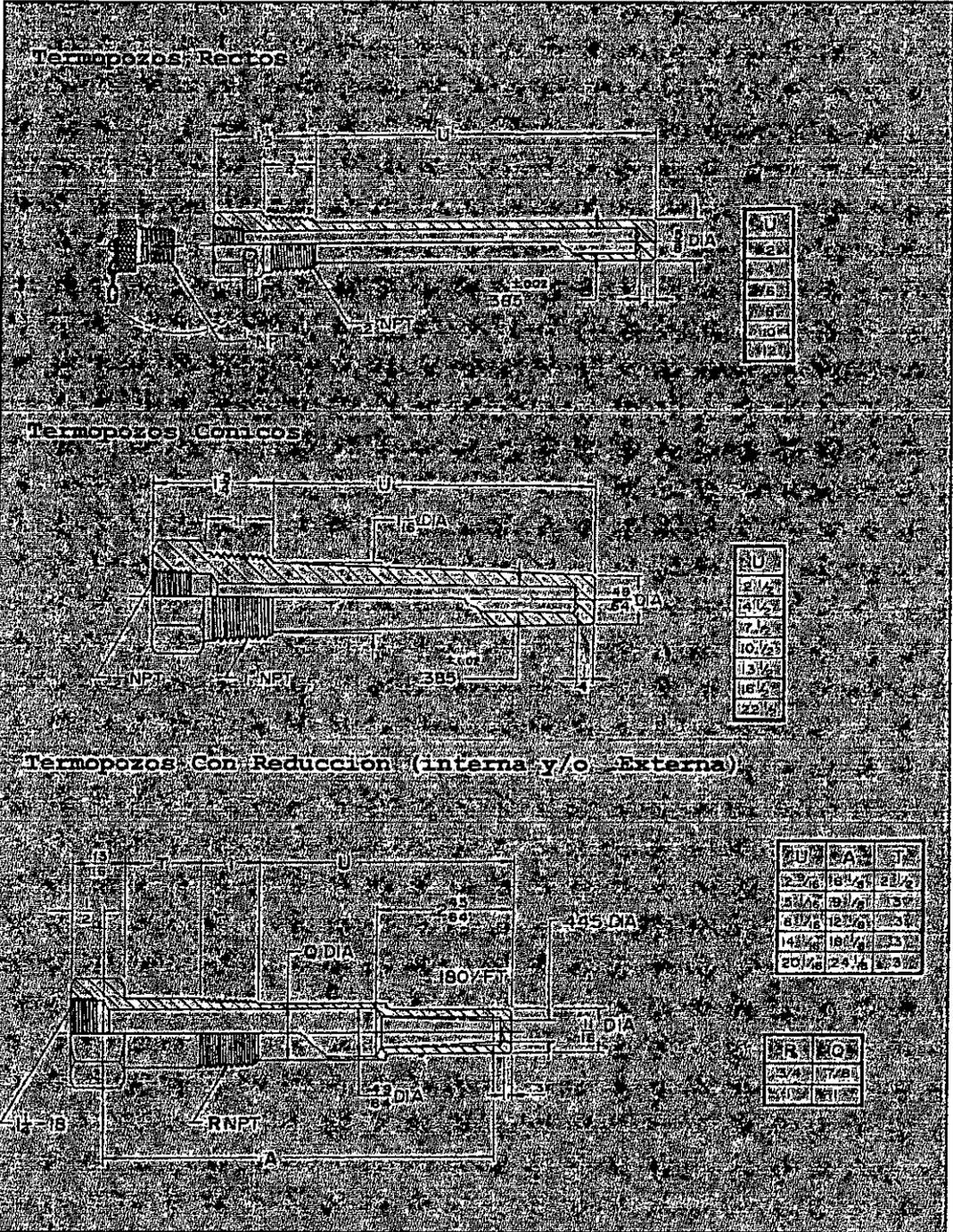
Alta Precisión
 Mejor Linealidad
 Mejor Estabilidad
 No requiere compensación por junta fría
 Los hilos no requieren especial extensión

Desventajas RTD

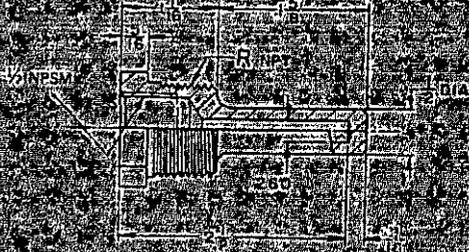
El límite de temperatura máxima es el más bajo
 El tiempo de respuesta sin el termopozo es bajo
 (El tiempo de respuesta es esencialmente equivalente cuando cualquier tipo de sensor es montado sin el terpopozo)

TERMOPOZOS

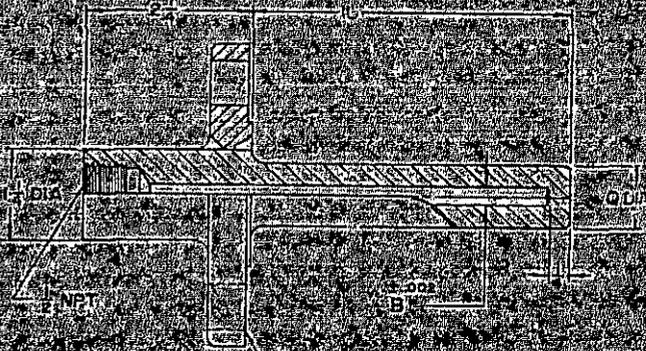
Es un elemento de conexión a proceso tal que, protegerá al elemento primario de temperatura, de los agentes corrosivos, abrasivos que este elemento no podría resistir por sí mismo. El termopozo puede adoptar varias configuraciones para su montaje, las cuales pueden ser en forma recta, cónica, reducción, flange soldado y espacios reducidos.

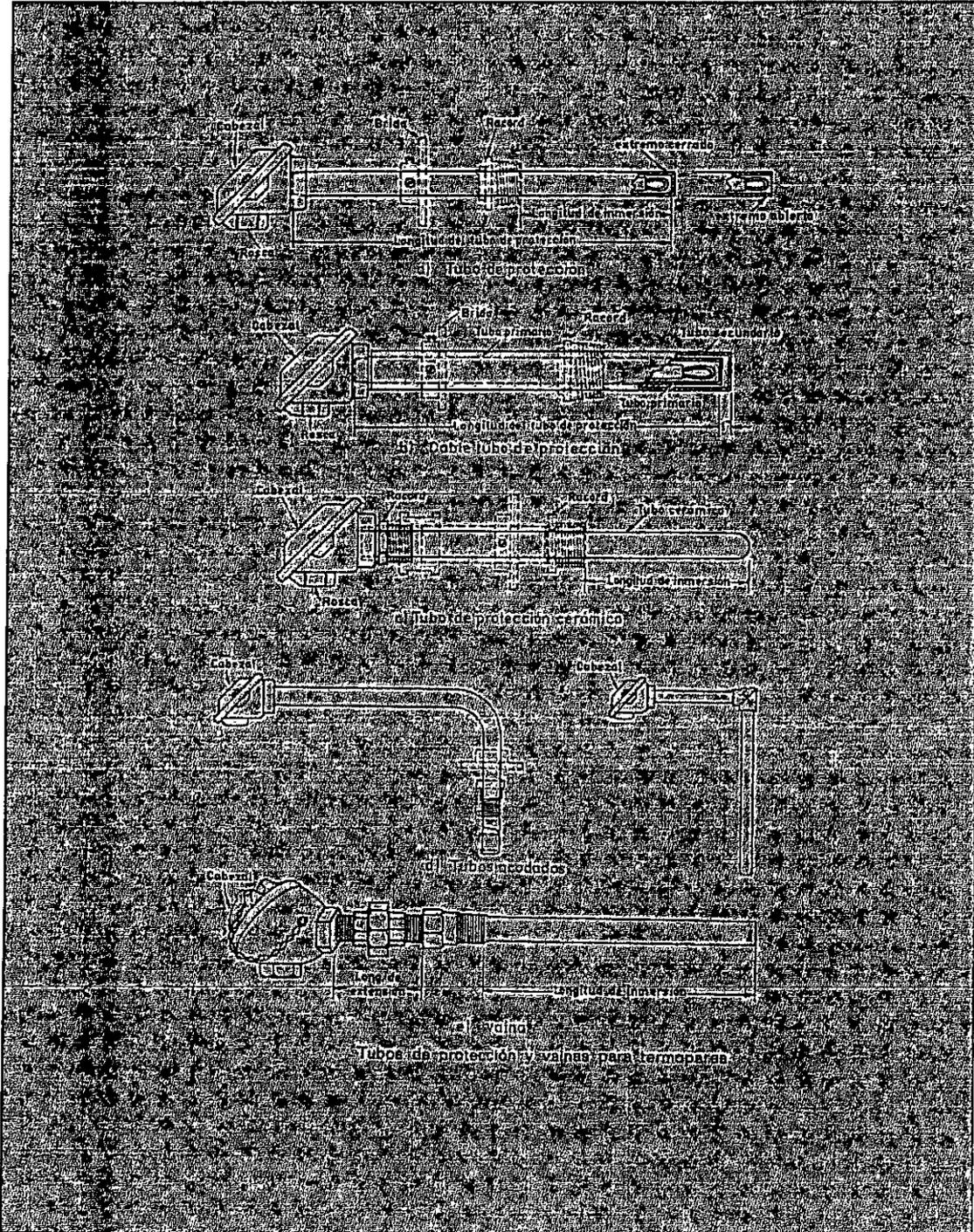


Termopozos Con Flange Soldado



Termopozos para Espacios Reducidos

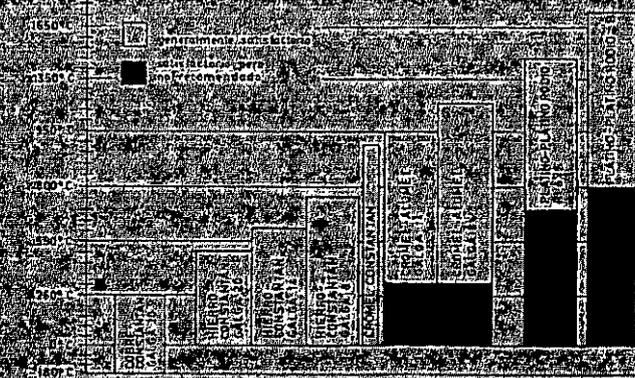




Designación de los termoelementos y su composición química

Designación	Composición química (en %)							
	Co	Cr	Fe	Ni	Mo	Cu	Pt	Rh
SP Platino (1)	—	99.5	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	—	—
RN02TN (Constantán)	—	—	—	—	45	55	—	—
ZP Cobre	—	—	—	—	—	100	—	—
CP Cromel (2)	10	—	—	—	99	—	—	—
AM Alumel (2)	—	—	—	1	—	—	12	—
RP Platino con 10% de rodio	—	—	—	—	—	—	—	10
SP Platino con 10% de rodio	—	—	—	—	—	—	—	10
RN05N Platino	—	—	—	—	—	—	100	—
SP Platino con 6% de rodio	—	—	—	—	—	—	—	6
SP Platino con 30% de rodio	—	—	—	—	—	—	—	30

Nota: (1) El platino con 10% de rodio también se conoce como platino de grado 10.
 (2) El platino con 6% de rodio también se conoce como platino de grado 6.
 (3) El platino con 30% de rodio también se conoce como platino de grado 30.
 (4) El platino con 10% de rodio también se conoce como platino de grado 10.



Selección de termopares

Guía para la selección de tubos o valvas de protección

Industria	Aplicación	Tubo o valva
Tratamientos térmicos	Recocido	Inconel o hierro
	Carburación	Inconel
Hierro y acero	Templado	Hierro forjado
	< 700°C	Inconel o hierro
Hierro y acero	> 700 a 1100°C	Cerámico o pirómetro radiación
	> 1100°C	Hierro
Hierro y acero	Nitración	Inconel-hierro o pirómetro radiación
	Baños de sales	
Hierro y acero	Hornos de soplado	Inconel o hierro o carburo de silicio
	Hogar	Inconel o pirómetro de radiación
Hierro y acero	Techo	Pirómetro de radiación
	Calderas de recuperación	Inconel o hierro
Hierro y acero	Fornos de recalentamiento	Inconel o hierro
	< 1100°C	Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación
Hierro y acero	> 1100°C	
	Palanquilla calentamiento de planchas y soldadura a tipo	Inconel o hierro
Hierro y acero	< 1100°C	Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación
	> 1100°C	Pirómetro de radiación
Hierro y acero	Soldadura fuerte	Ternopar tipo J sin tubo de protección o pirómetro de radiación
	Recocido brillante	Cerámico y carburo de silicio o pirómetro de radiación
Hierro y acero	Forjado	Acero o carburo de silicio
	Galvanización	Plomo
Hierro y acero	Baños de decapado	Acero dulce o hierro
	Estañado	
Metales no férricos	Fundición aluminio	Carburo de silicio o hierro
	Tratamiento térmico del aluminio	Hierro o sin tubo de protección
Metales no férricos	Fundición latón o bronce	Metal fundido especial
	Recocido	Hierro o sin tubo de protección
Metales no férricos	Palanquilla	Inconel o hierro
	Molinos	Hierro o carburo de silicio
Metales no férricos	Plomo	Hierro
	Magnesio	Acero sin soldadura
Metales no férricos	Estano	Acero dulce
	Cinc	Carburo de silicio o bismuto
Metales no férricos	Estadificación y calcinación de mineral	Inconel-hierro, cerámico o carburo de silicio
Cemento	Conductos de salida	Inconel o hierro
	Horno	Pirómetro de radiación

Industria	Aplicación	Tubo o vaina
Cerámica	Hornos Secadores Esmaltado vítreo	Cerámico o pirómetro de radiación Hierro Inconel, hierro o pirómetro de radiación
Química		Acero inoxidable en general Debido a la gran variedad de aplicaciones químicas es difícil establecer recomendaciones
Alimentación		Acero inoxidable
Gas	Productor de gas Gas de agua sobrecalentado	Inconel o hierro Inconel o hierro
Vidrio	Alimentador Lehrs (túnel de recocido) Tanques Conductos de tanques	Platino o pirómetro de radiación Hierro Cerámico o pirómetro de radiación Inconel o hierro
Petroquímica	Desparador Columna del fraccionamiento Cámara de reacción Unidades catalíticas Líneas de transferencia Torres Torre llamas	Acero inoxidable Inconel o hierro
Centrales térmicas	Conducto de gases Precalementadores Líneas de vapor Líneas de agua	Hierro Hierro Acero inoxidable Acero dulce
Varios	Incineradores hasta 1100° C superior a 1000° C	Inconel o hierro Cromo y carburo de silicio

Características de termopares (Norma IEC 564-1982)

Tipo	Temperatura máxima	Gama I	Gama II	Gama III	Gama IV	Error de precisión	
						Normal	Extrínseca
Crómica-constantán (tipo E)	0-600°C 0-900°C 0-1100°C	±15°C ±0,5%	±25°C ±0,75%	±50°C ±1,5%	±100°C ±3%	±0,5°C ±1°C ±1,5°C	±0,5°C ±1°C ±1,5°C
Platina-rodio (tipo B)	0-350°C 0-350°C 0-1200°C	±0,5°C ±0,4%	±1°C ±0,5%	±1,5°C ±1,5%	±2,5°C ±3%	±0,5°C ±1°C ±1,5°C	±0,5°C ±1°C ±1,5°C
Platina-rodio (tipo R)	0-750°C 0-1750°C	±1,5°C ±0,4%	±2,5°C ±0,75%			±1°C ±1,5°C	±1,5°C ±2,5°C
Platina-rodio (tipo S)	0-600°C 0-900°C 0-1300°C	±1,5°C ±0,4%	±2,5°C ±0,75%			±1°C ±1,5°C	±1,5°C ±2,5°C
Platina-rodio (tipo T)	0-600°C 0-900°C	±1,5°C	±2,5°C ±0,25%			±1°C ±1,5°C	±1,5°C ±2,5°C
Platina-rodio (tipo N)	0-600°C 0-1300°C		±1,5°C ±0,5%	±4°C ±0,5%		±1,5°C ±2,5°C	±2,5°C ±4°C

Nota: Los límites de error de precisión en los límites de la gama de valores mayor.

PIROMETROS DE RADIACIÓN

Existen casos donde no es posible tomar, por contacto directo con el proceso, la temperatura que sea necesaria para evaluar un proceso.

Uno de los instrumentos de NO CONTACTO más común, es el pirometro de radiación. Se fundamenta en el principio que dice que la intensidad de la energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura del cuerpo. En términos funcionales:

$$W = K * T^4$$

Los pirómetros ópticos son un juego de lentes de diferentes colores de acuerdo a las tonalidades que toma determinado material a diferentes rangos de temperatura.

El pirómetro de radiación consta de una serie de termocuplas en serie con un lente que hace convergir el haz de radiación hacia esas termocuplas. De esta forma, la radiación captada a cierta distancia del medio, es amplificada y calculada con bastante precisión.

La medición de temperatura sin contacto es altamente necesaria cuando estamos hablando de procesos donde las temperaturas son tan elevadas que el elemento primario podría hundirse o no trabajar ($t > 1500$ grados centígrados), como por ejemplo: fundiciones, estudios científicos, reactores nucleares, etc.

MEDICION DE CAUDAL

MEDIDA DE CAUDAL

La medición del caudal de fluidos constituye uno de los aspectos más importantes del control de procesos industriales. De hecho, probablemente sea la variable del proceso que se mide con mayor frecuencia. Aquí estudiaremos la naturaleza del caudal, así como los factores que en él influyen. Se discuten los equipos más comúnmente utilizados para de determinación, la precisión de los mismos y la forma en que ésta suele especificarse. También se incluye un resumen de las características principales de dichos equipos, así como tablas de conversión de las unidades más comúnmente utilizadas.

Las aplicaciones más habituales de este tipo de equipos en la industria consisten en:

- Medir las cantidades de gases o líquidos utilizados en un proceso dado.
- Controlar las cantidades adicionales de determinadas sustancias aportadas en ciertas fases del proceso.
- Mantener una proporción dada entre dos fluidos.
- Medir el reparto de vapor en una planta, etc.

Como hemos dicho, en numerosos procesos industriales, los equipos para la medida de caudal constituyen la parte más importante de la instrumentación. El valor de un caudal se determina generalmente midiendo la velocidad del fluido que por una conducción de una sección determinada. Mediante éste procedimiento indirecto, lo que se mide es el caudal volumétrico Q_v , que en su forma más simple, sería:

$$Q_v = A \times V$$

donde A es la sección transversal del tubo y V la velocidad lineal del fluido.

Una medición fiable del caudal dependerá pues de la medición correcta de los valores A y V . Si, por ejemplo, aparecen burbujas en le fluido, el término A de la ecuación sería

artificialmente alto. De igual forma, si se mide la velocidad como el desplazamiento de un punto situado en el centro del tubo y se introduce en la ecuación anterior, el caudal Q_v calculado sería mayor que el real, debido a que V debe reflejar la velocidad media de todo el frente del fluido al paso de una sección transversal del tubo.

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CAUDAL

Los principales factores que influyen en el caudal de un fluido que circula por una tubería son:

- Velocidad del fluido.
- Razonamiento del fluido con el tubo.
- Viscosidad del fluido.
- Densidad del fluido.

La velocidad del fluido depende de la presión que le empuja por la tubería. Cuando mayor sea dicha presión, más alta será la velocidad de circulación (siempre que los demás factores permanezcan constantes) y por consiguiente, mayor resultará el caudal volumétrico. El tamaño de la tubería también afecta al caudal. Si duplicamos, por ejemplo, el diámetro de la tubería, se multiplica por cuatro la capacidad potencial de caudal en la misma.

El rozamiento con las paredes de la tubería reduce la velocidad del fluido, considerándose por tanto, un factor negativo. Como consecuencia de dicho rozamiento, la velocidad del fluido que circula por las zonas próximas a las paredes de la tubería es menor que en el centro de la misma. Cuando más larga, limpia y menos rugosa sea una tubería, menor será el efecto del rozamiento sobre la velocidad media del fluido.

Otro de los factores que influyen negativamente en la velocidad es la viscosidad (μ) o fricción molecular dentro del fluido. La viscosidad refuerza el efecto del rozamiento con la tubería, reduciendo aún más la velocidad del fluido en las zonas próximas a paredes. La viscosidad varía con los cambios de temperatura, pero no siempre de forma predecible. En caso de líquidos, la viscosidad normalmente disminuye al aumentar la temperatura. Sin embargo, en determinados fluidos, puede aumentar la viscosidad cuando se superan ciertos valores de temperatura. Se puede afirmar que, generalmente, cuando mayor es la

viscosidad de un fluido, menor será su velocidad, siempre que permanezca los demás factores constantes. La viscosidad se mide en (poises) en el sistema cgs, pero como ésta unidad resulta excesivamente grande, en la práctica se utiliza el (centipoise). Esta es la llamada viscosidad dinámica o absoluta. Otro tipo de viscosidad es la llamada cinemática, que en el mismo sistema se mide en (stokes), pero al igual que el poise resulta una unidad muy grande, utilizándose prácticamente el (centistoke). La relación entre una y otra es la densidad resultando:

$$\text{Densidad} = \text{poises} / \text{Stokes}$$

La densidad influye en el caudal, puesto que el fluido más denso requiere mayor fuerza de empuje para mantener un mismo caudal de paso. El hecho asimismo de los gases sean comprensibles y los líquidos no, hace que se precisen, por lo general, métodos distintos para la medición de líquidos, gases y líquidos que arrastren gases.

Se ha comprobado que los factores más importantes que intervienen en el caudal, correlacionan entre sí y pueden expresarse en forma de un parámetro sin dimensiones llamado número de Reynolds, el cual describe el caudal para todas las viscosidades, velocidades y diámetro de línea. En general, se puede decir que define la relación entre las fuerzas de desplazamiento que empujan al fluido con las de viscosidad que lo frenan, o sea:

$$Rd = \frac{V D \rho}{\mu}$$

A velocidades muy bajas o viscosidades altas, Rd tiene un valor pequeño y el fluido circula estratificado en capas paralelas y uniformes con la velocidad más alta en el centro paralelas y uniformes con la velocidad más alta en el centro del tubo y las más bajas en las zonas próximas a las paredes donde las fuerzas de rozamiento producidas y reforzadas por la viscosidad retienen su marcha. Este tipo de régimen se denomina "laminar" y queda representado por valores del Número de Reynolds inferiores a 2,000.

Una característica significativa de este tipo de régimen consiste en la forma parabólica del perfil de su velocidad.

En caso de que las velocidades sea altas o la viscosidad baja, el flujo rompe en remolinos turbulentos, todos los cuales circulan por el tubo con la misma velocidad media. En éste régimen turbulento la viscosidad del fluido es menos significativa, adoptando el perfil de velocidades una forma mucho más uniforme. Normalmente se suele considerar como régimen "turbulento" al correspondiente a números de Reynolds superiores a 4,000 y de "transición" al comprendido entre Reynolds 2,000 y 4,000.

Existen diversas forma de evaluar la cantidad de volumen o masa de un determinado fluido, que pasa por una tubería por unidad de tiempo.

De lo anterior podemos deducir que existen dos tipos principales de medición de caudal, éstas son:

- Caudales Volumétricos.
- Caudales de masa o Másicos.

Los volumétricos a su vez se subdividen en:

- . Caudal por Presión Diferencial.
- . Turbinas.
- . Medidores de Desplazamiento Positivo.
- . Rotamétros.

Dentro de la medición por presión diferencial encontramos los elementos siguientes:

- Placa de Orificio
- Toberas
- Tubo de Venturi
- Uniwedge (Taylor)
- Tubo de Pitot
- Tubo Annubar

Los cuatro primeros, se basan en el principio que puede demostrarse mediante la ecuación de Benoulli, para una restricción en el paso de fluido en una tubería, que cumplirá con la siguiente ecuación general:

$$Q = K * (P1 - P2)^{1/2}$$

Donde:

Q : Caudal de fluido.

K : Constante de proporcionalidad.

P1: Presión aguas arriba de la restricción.

P2: Presión aguas abajo de la restricción.

PLACAS DE ORIFICIO

Los diafragmas de orificio concéntrico o placas de orificio pueden utilizarse para todo caudal permanente de fluido limpio y homogéneo (líquido, gas o vapor) en el campo de caudales turbulentos normales para los cuáles el número de Reynolds alcanza un valor superior a 5.000.

Se han establecido coeficientes para tuberías desde 1½" (40 mm) a 14" (350 mm) y números de Reynolds desde 5.000 a 10.000.000.

Con el fin de obtener una buena medida del caudal, la construcción y el empleo de placas de orificio deben responder a las siguientes condiciones esenciales:

- La arista exterior del orificio debe ser viva y neta. No son tolerables defectos mecánicos tales como rebabas, ranuras o salientes.

- El espesor de la placa de orificio debe estar de acuerdo con las prescripciones de la norma ISO 5167, no debiendo sobrepasar:

≡ 1/30 del diámetro interior de la tubería (D)

≡ 1/8 del diámetro del orificio (d)

≡ 1/4 del valor (D - d) / 2

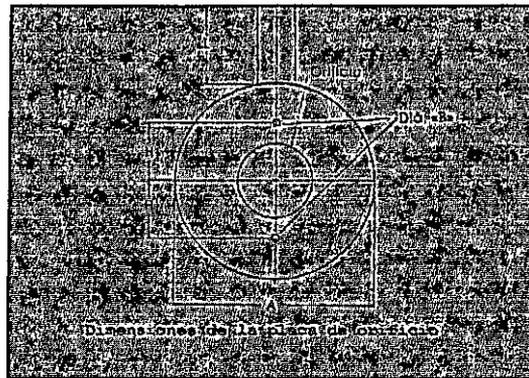
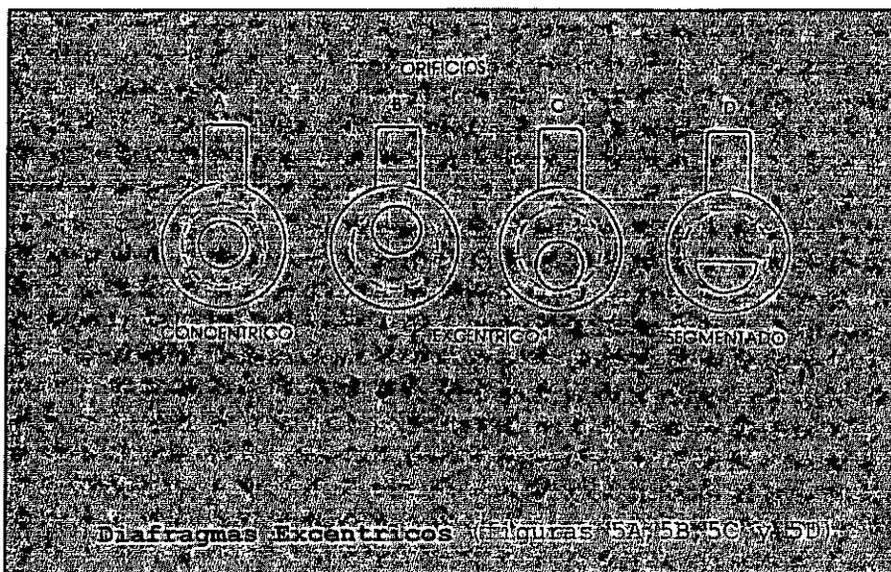


FIG. 5-A

Estas son las condiciones mínimas. Cuando el espesor real del diafragma deba sobrepasar este mínimo, la arista posterior puede ser achaflanada con un ángulo de 45 grados por lo menos, a partir de la cara de la placa o bien fresada al espesor adecuado. Debe instalarse el diafragma siempre de forma que la arista viva quede aguas arriba, no pudiendo ser utilizado para la medida de caudales que fluyan en sentido inverso.

- La placa del diafragma (o placa de orificio), se fija entre bridas y debe ser completamente plana, con una tolerancia de 0,01 mm.

- La relación de diámetros del orificio y la tubería d/D , habitualmente denominada relación de apertura β , debe estar comprendida, para una medida correcta, entre 0,2 y 0,7. En tuberías grandes (de 4" en adelante), la β podría estar comprendida entre 0,1 y 0,75 aunque no es recomendable llegar a estos extremos. Además, con este tipo de diafragma no se debe medir en tuberías de diámetro inferior a 1½" (40 mm), ya que la rugosidad de las paredes interiores puede modificar significativamente los coeficientes característicos.



Los Diafragmas Excéntricos son aquellos cuyo orificio está practicado de tal forma que al colocar la placa entre las bridas, quedan en la parte superior o inferior de la tubería. Si se miden fluidos que contengan partículas sólidas en suspensión, el orificio se sitúa en la parte inferior (figura 5C), de esta forma, las partículas sólidas que se depositan en la tubería son arrastradas por el fluido en lugar de ir formando depósitos a ambos lados del diafragma. Por otra parte, si se trata de medir líquidos que contengan gases o vapores, el orificio se colocará en la parte superior para que pasen los gases que tenderán a circular por arriba (figura 5B).

Al medir caudales de aire o vapor donde se pueden producir pequeñas condensaciones, se realiza un pequeño orificio de drenaje en la parte inferior de los diafragmas concéntricos, por donde se evacua el condensado sin que la precisión de la medida sea afectada. Generalmente no es necesario utilizar diafragmas excéntricos para la medida de la mayor parte de los gases. Se puede realizar así mismo un orificio similar en la parte superior de los diafragmas concéntricos, utilizados en la medida de líquidos, con el fin de facilitar el paso de las pequeñas burbujas de gas habitualmente creadas por el movimiento de los líquidos.

Diafragmas Segmentados

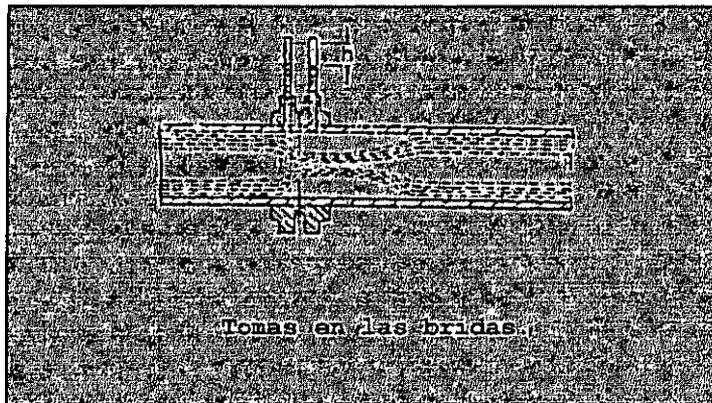
Se denominan diafragmas segmentados aquéllos cuyo orificio es un segmento circular concéntrico con la tubería. Se emplean habitualmente para la medida de líquidos o gases con impurezas no abrasivas (tales como barros ligeros) normalmente más pesados que el líquido, o de gases excepcionalmente cargados (ver figura 5D).

Tomas de Presión

La presión diferencial generada por la inserción del diafragma en la tubería, se recoge mediante tomas de diversos tipos. El método más corrientemente utilizado es el de tomas realizadas en las bridas, pero son frecuentes también otros tipos de tomas, como en la «vena contracta» o en la tubería.

Tomas en las bridas

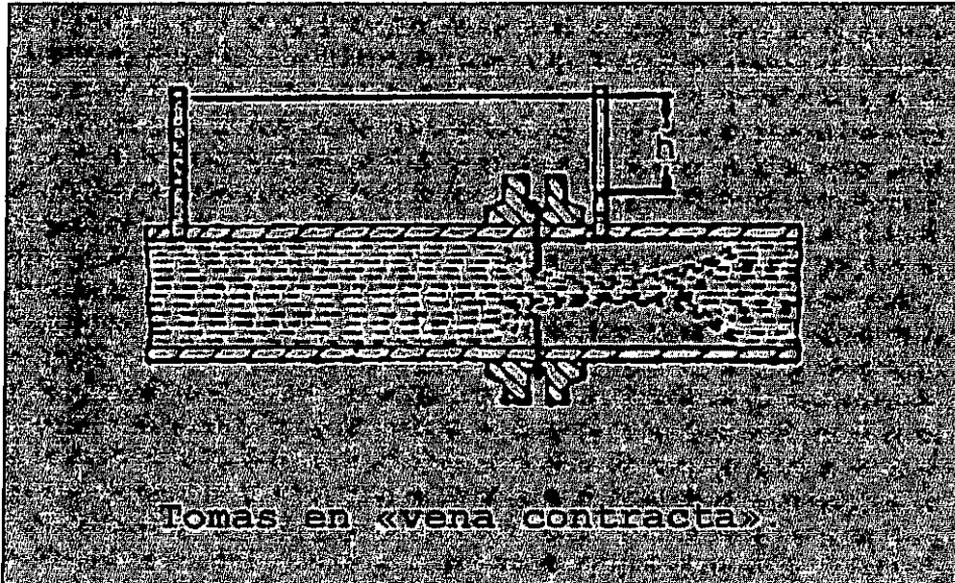
El orificio de la toma de presión está practicado en las misma bridas de sujeción de la placa de orificio, y se realizan para que su eje esté a 1" (25,4 mm) aguas arriba y aguas abajo de la placa, según se indica en la norma ANSI-B 16.36. El diámetro de la toma oscila entre $\frac{1}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " (6,35 a 12,7 mm), según la citada norma.



Tomas en la «vena contracta»

Cuando se emplean diafragma estándar siguiendo el método de la «vena contracta», se realizan las tomas a distancias máximas de D aguas arriba del diafragma (toma de alta presión) y del punto donde existe la más baja presión y donde se sitúa el más pequeño diámetro de la «vena contracta» del fluido (toma de baja presión), que se aproxima bastante a $\frac{1}{2}D$.

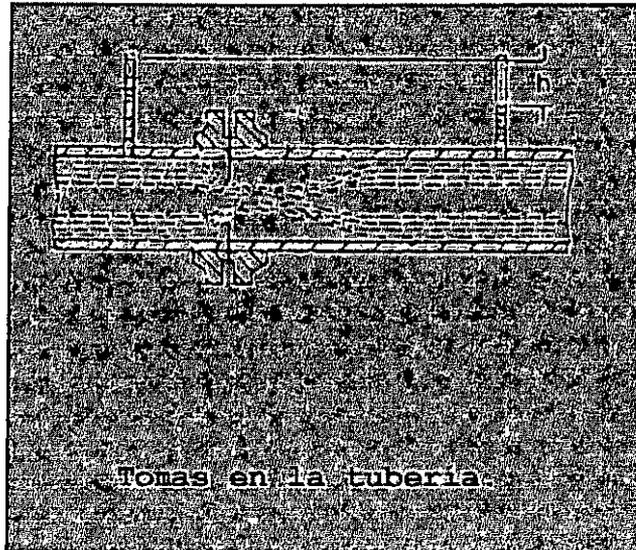
No pueden utilizarse tomas en «vena contracta» en tuberías inferiores a 4", como consecuencia de la interferencia que se produce entre la brida y la toma aguas abajo.



Cuando se utilizan tomas en «vena contracta» con diafragmas excéntricos, es preciso disponerlas a 180 ó 90 grados en relación al orificio. En el caso de diafragmas segmentados se deben disponer a 180 grados del orificio.

Tomas en la Tubería

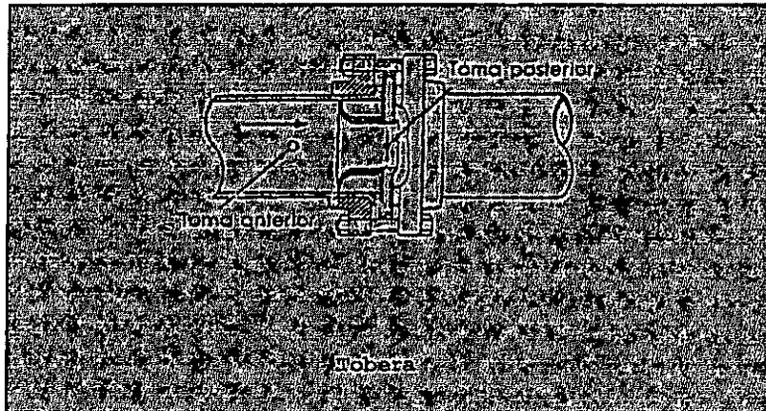
Cuando se hacen las tomas en la tubería, éstas se sitúan a $2\frac{1}{2}D$ antes del orificio (toma de alta presión) y a $8D$ aguas abajo la toma de baja presión. Este tipo de tomas se utilizan raramente en la actualidad. Tiene la ventaja de que permiten la instalación de una placa de orificio para medida de caudal donde existan una brida, y reúne además otras características necesarias, como tramos rectos anterior y posterior, etc. El error probable de la medida con este tipo de tomas es aproximadamente un 50% mayor que con tomas en las bridas y en la vena contracta.



TOBERA

La tobera es otro tipo de elemento primario. Se trata de un dispositivo con una entrada perfilada por una garganta cilíndrica. La toma de alta presión se realiza en la pared de la tubería, a una distancia D de la entrada, mientras que la de baja presión suele colocarse a la salida, donde la sección del flujo es mínima. Esta toma se realiza directamente en la pared de la tubería y suele estar a $\frac{1}{2}D$ de la placa. También se hacen toberas en ángulo.

Por medio de la tobera pueden medirse caudales superiores a 60% en aquellos que se pueden determinar mediante el diafragma o placa orificio, siendo menor la pérdida de carga permanente. Su instalación es muy simple, montándose entre las bridas de la tubería.



TUBO VENTURI

Este elemento primario de medida se inserta en la tubería como si fuera un tramo de la misma. Puede instalarse en todo tipo de tuberías mediante bridas de conexión adecuadas.

El Venturi tiene una sección de entrada de diámetro igual al de la conducción a la cual se conecta. La sección de entrada conduce hacia un cono de convergencia angular fija, terminando en una garganta de un diámetro más reducido, fabricada exactamente según las dimensiones establecidas por el cálculo. Dicha garganta comunica con un cono de salida o de descarga con divergencia angular fija, cuyo diámetro final es habitualmente igual al de entrada.

La sección de entrada está provista de tomas de presión que acaban en un racord anular, cuyo fin es el de uniformar la presión de entrada. Es en este punto donde se conecta a la toma de alta presión del transmisor. La conexión de la toma de baja presión se realiza en la garganta mediante un dispositivo similar. La diferencia entre ambas presiones servirá para realizar la determinación del caudal.

El tubo Venturi puede fabricarse en materiales diversos según las necesidades de la aplicación a que se destine. El más comúnmente empleado es el acero al carbono, aunque también se utiliza el latón, bronce, acero inoxidable, cemento, y revestimientos de elastómeros para paliar los efectos de la corrosión.

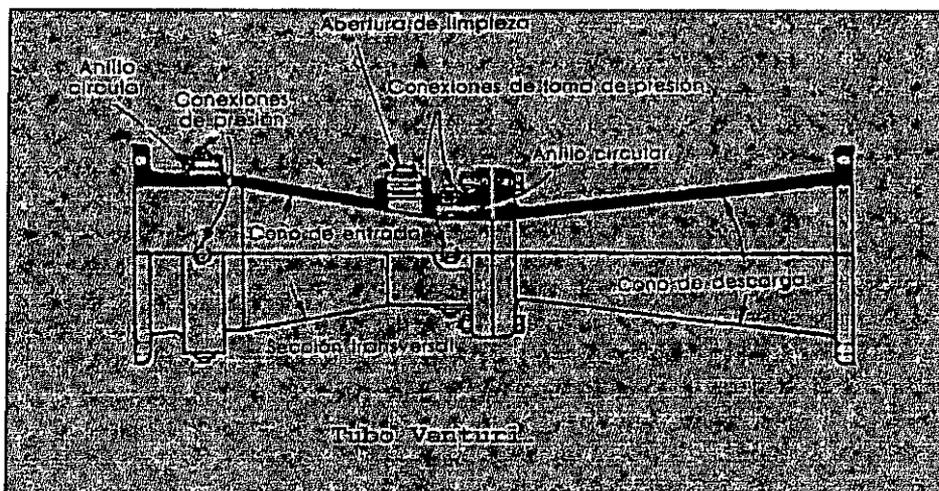
El Venturi ofrece ciertas ventajas con respecto a otros captadores, como son:

1. Pérdida de carga permanente poco elevada, menor que la del diafragma y la de la tobera, gracias a los conos de entrada y salida.
2. Posibilidad de medir caudales superiores a un 60% a los obtenidos por el diafragma para la misma presión diferencial e igual diámetro de tubería.
3. En general, el Venturi requiere un tramo recto de entrada más corto que otros elementos primarios.
4. Facilidad para la medida de líquidos con sólidos en suspensión.

Generalmente los tubos Venturi se utilizan en conducciones de gran diámetro (de 12" en adelante), donde las placas de orificio producirían pérdidas de carga muy importantes y no conseguirían una buena medida. También se utilizan en conductores de aire o humos con conductos no cilindricos, en grandes tuberías de cemento, para conducción de agua, etc.

Según la naturaleza de los fluidos de medida, se requieren modificaciones en la construcción del tubo Venturi: eliminación de los anillos de equalización; inclusión de registros de limpieza, instalación de purgas, etc.

En el corte transversal se aprecian los anillos circulares que rodean el tubo Venturi en los puntos de medida. Esos anillos huecos conectan el interior del tubo mediante orificios en número de cuatro o más, espaciados uniformemente por la periferia. El fluido, al circular, pasa por estos orificios y por el anillo donde se encuentran los racores que conectan con el transmisor.



Venturi de Inserción

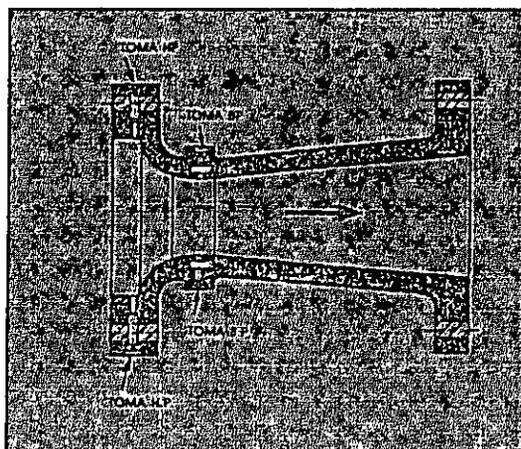
El Venturi de inserción es una versión del elemento primario recién descrito, utilizada en aplicaciones de alta presión. Se mantiene en su lugar entre las bridas mediante una brida suplementaria que hace cuerpo con la tubería y permite eliminar la costosa construcción en materiales especiales que exigiría el Venturi estándar para este tipo de servicio. La pérdida de carga permanente es más elevada que la del Venturi estándar, pero inferior a la de la placa orificio.

Tubos de baja pérdida

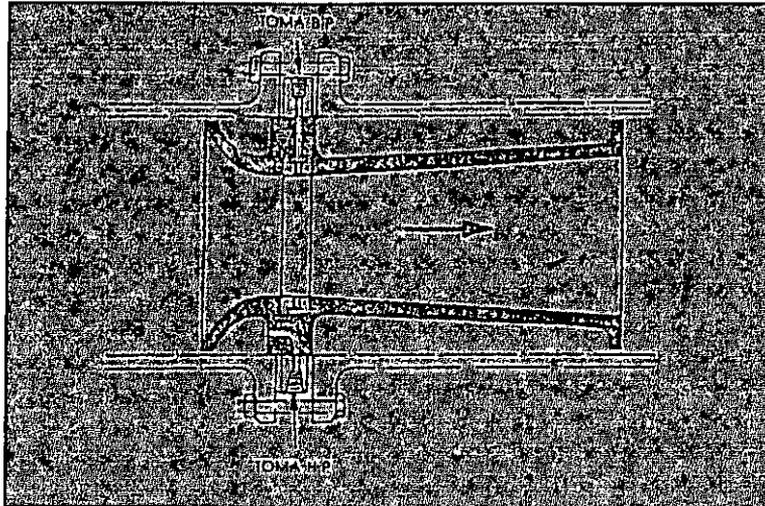
Los tubos de baja pérdida que se muestran en las figuras se denominan «Venturi corto» y constituyen la más reciente variación de este tipo de elementos primarios. Al igual que el Venturi clásico, pueden utilizarse para medir caudales de líquidos con partículas en suspensión.

La característica más notable del Venturi corto es la de producir la menor pérdida de carga de todos los captadores de este tipo. Es así mismo de volumen más reducido, y de hecho, más fácil de instalar.

Los tubos de baja presión son de construcción bridada, pudiendo fabricarse tanto en fundición como mediante mecanización. Pueden así mismo montarse insertándose en el interior de la tubería. En el caso de construcción bridada, la toma de alta presión se encuentra situada en la propia brida. Los tipos de inserción tienen sus dos tomas en el anillo de fijación.



Tubo de baja pérdida (venturi corto) completo, con bridas, realizado en fundición



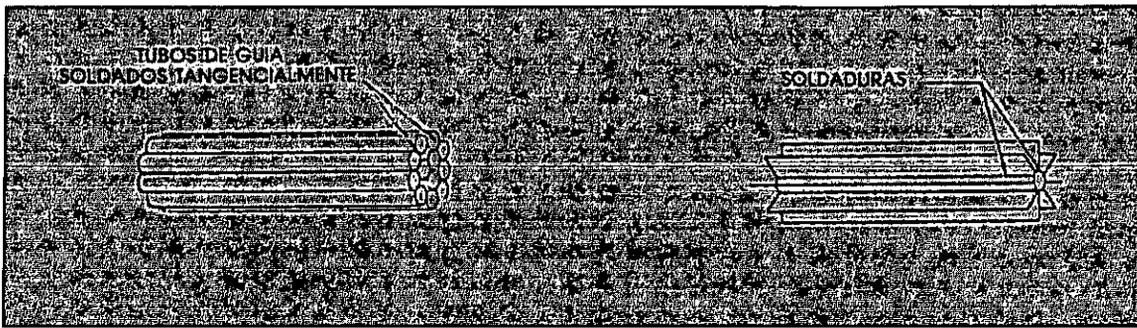
Tubo de baja pérdida, tipo inserción, realizado en material plástico.

Uniformización del flujo

Los elementos primarios tratados hasta aquí requieren tramos rectos de tuberías antes y después del elemento deprimógeno, con objeto de que el flujo sea uniforme al llegar al punto donde se produce la pérdida de presión y no se vea afectado por accesorios de la tubería tales como: codos, válvulas, etc.

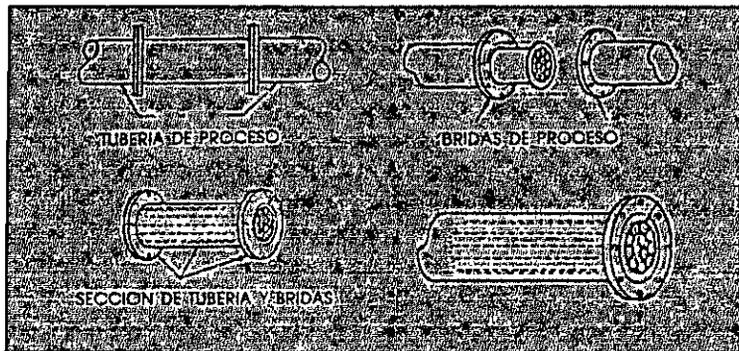
Los tramos rectos de tubería se expresan normalmente en función del diámetro de la misma, oscilando agua arriba entre **10D** para β de 0,2 y un codo simple «T» y **62D** para dos codos o más de 90° en planos diferentes y β de 0,7. Si se trata de válvulas puede oscilar entre **18D** y **32D** para los valores de β citados.

Cuando, dada la configuración de la tubería, no sea posible conseguir los tramos rectos citados, puede recurrirse a introducir en la misma aleta de guía varios tubos juntos, con objeto de uniformar el flujo.



Tubos de guía soldados tangencialmente

Aletas de Guía.



Instalación de tubo de guía.

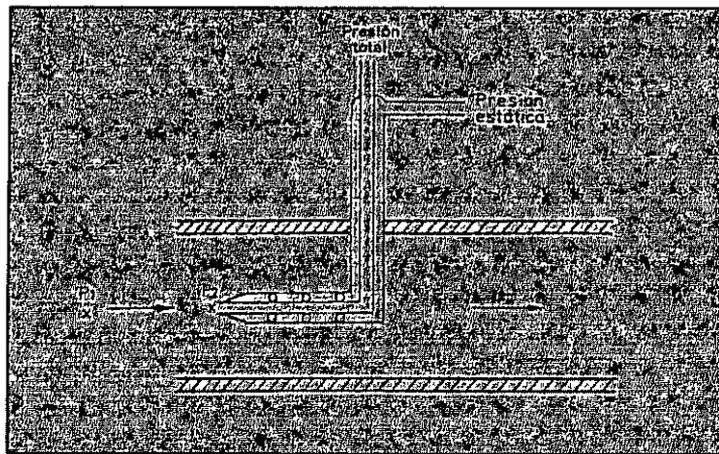
TUBOS DE PITOT

El tubo de Pitot utilizado para la medición de caudal está constituido por dos tubos que detectan la presión en dos puntos distintos de la tubería. Pueden montarse por separado o agrupados dentro de un alojamiento, formando un dispositivo único. Uno de los tubos mide la presión de impacto (presión dinámica más presión estática) en un punto de la vena. El otro mide únicamente la presión estática, generalmente mediante un orificio practicado en la pared de la conducción.

Para determinar el lugar de inserción de los tubos, es necesario localizar el punto de máxima velocidad, desplazando el orificio de los mismos a lo largo del diámetro de la tubería. A pesar de que un tubo de Pitot puede calibrarse para medir caudal en $\pm 0,5\%$, la distribución inestable de velocidades puede desencadenar errores importantes. Esto constituye uno de los motivos por lo que estos elementos se

utilizan sobre todo para la medida de caudal de gases, ya que la variación de velocidad de la mediana con respecto al centro no constituye un inconveniente grave.

Las aplicaciones de los tubos de Pitot están muy limitadas en la industria, dada la facilidad con que se obstruyen por la presencia de cuerpos extraños en el fluido a medir. En general, se utilizan en tuberías de gran diámetro, con fluidos limpios, principalmente gases y vapores. Su precisión depende de la distribución de las velocidades y generan presiones diferenciales muy bajas, que resultan difíciles de medir.



El Annubar se compone de cuatro partes esenciales:

1. La sonda de alta presión con cuatro orificios encarados al flujo. Basado en los cálculos de Chebychef, relativos a las medidas de circulación del fluido, cada orificio capta una presión generada por la velocidad del flujo en cada uno de los cuatro segmentos iguales.
2. El tubo de interpelación colocado en la sonda de alta presión transmite la media de las presiones detectadas por los cuatro orificios a la cámara de alta presión del transmisor electrónico de presión diferencial. Esta media es la suma de presiones debidas a la velocidad y a la presión estática.
3. El orificio posterior capta la baja presión. La diferencia entre la alta presión del tubo de interpelación y la baja presión del orificio es proporcional, según la teoría de Bernouilli, al cuadrado del caudal. En ciertos tipos de Annubar el orificio posterior está situado en la sonda de alta presión, mientras que en otros esta presión se capta mediante un tubo situado detrás de la sonda.
4. La cabeza de conexión transmite la presión diferencial al transmisor electrónico.

El Annubar substituye con ventaja al Pitot, por su fácil instalación y la posibilidad de montarlo en tuberías existentes sin gran obra.

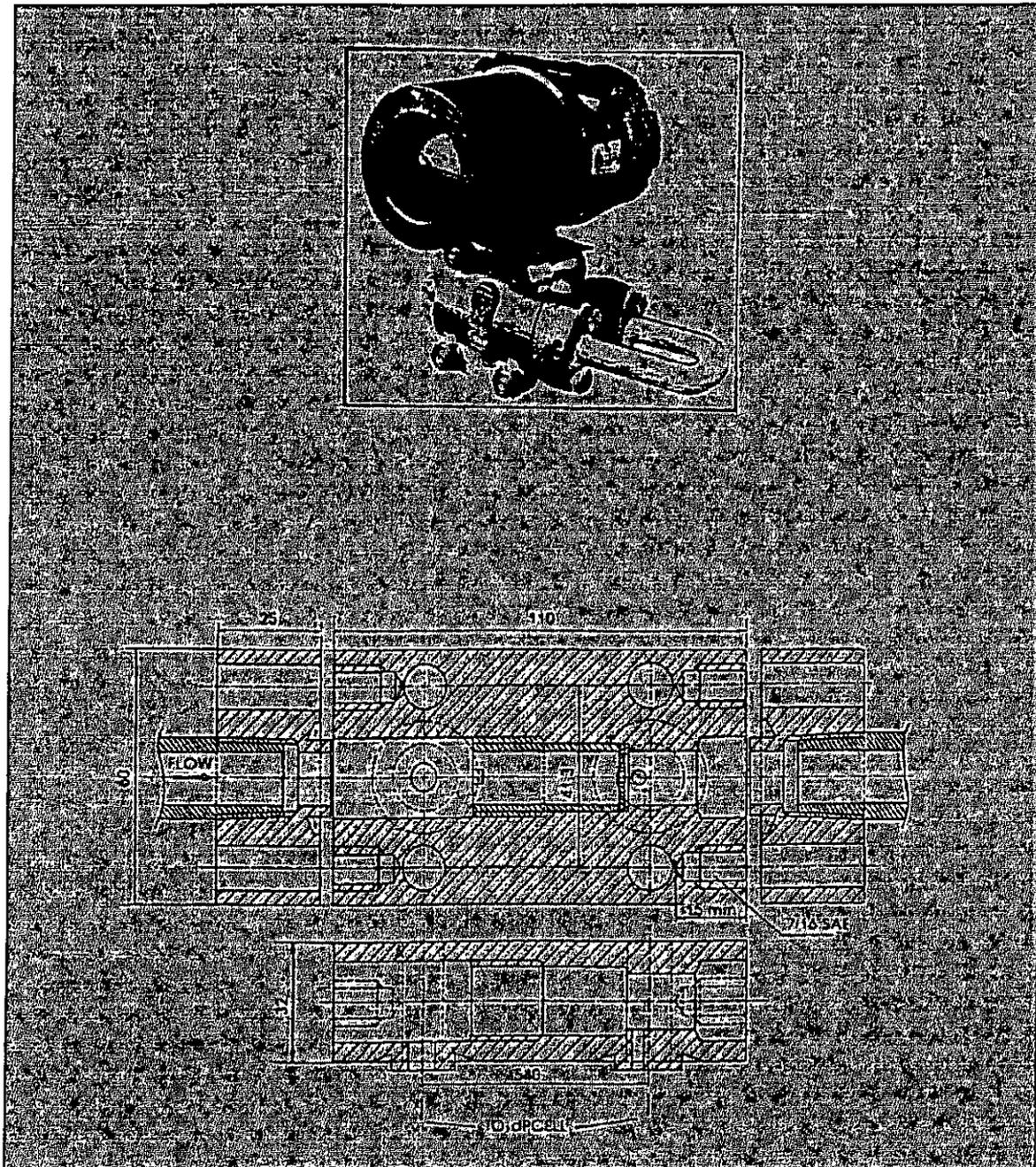
ORIFICIOS INTEGRALES

Para medir caudales muy bajos es posible utilizar micro-orificios u «orificios integrales». Se trata de bloques en los que se practica un orificio de forma precisa y que se montan directamente sobre los transmisores.

Pueden utilizarse para los siguientes caudales:

- Líquidos: 1 litro/hora a 2.000 litros/hora

- Gases: 0,02 m³/h a 50 m³/h.



Orificio Integral

El medidor de flujo **UNIWEDGE** es un elemento patentado y fabricado por Taylor exclusivamente, y su selección no requiere de un calculo especial, ya que en el catálogo, que se anexa al final de este tema, aparece un método simplificado para el. este tipo de medidor funciona según el mismo principio de los anteriormente expuestos, pero debido a su construcción, es útil para la medición de fluidos bastantes viscosos y con un régimen de flujo laminar.

CÁLCULOS

Existen diversos métodos para selección y diseño de placas de orificio, toberas y tubos de Venturi, sin embargo en esta parte del texto, explicaremos tres métodos de cálculo y selección.

Método I:

$$Q = Y * M * C * A * (2 * g * h)^{1/2}$$

Donde:

Q : Caudal volumétrico en Fts³/seg.

Y : Factor de supercompresibilidad de los gases.

Y = 1 si el fluido fuera líquido.

C : Factor de geometría

C = 0.62 placas de orificio.

C = 0.98 toberas.

C = 1.00 tubos de Venturi.

A : Área de sección de la tubería (pies cuadrados).

g : Gravedad 32.2 pies/seg².

h : Diferencial de presión en pies de agua.

M : Representa a la siguiente función:

$$M = 1 / (1 - \text{Beta}^4)^{1/2}$$

Para:

Beta = d/D donde d: Diámetro de la restricción.

D: Diámetro interno de la tubería.

Para el cálculo de Y, en el caso de que el fluido sea gas, será necesario operar con la gráfica y el método que presentamos a continuación:

- Con los valores de la presión y temperatura absolutas, determinaremos los parámetros de presión y temperatura reducidas, con los valores de estas variables para el gas en cuestión según tabla anexa a esta sección de las presiones y temperaturas críticas.

Las relaciones a usar para este fin son:

$$Pr = Pa/Pc \quad Tr = T/Tc$$

Donde:

Pr: Presión Reducida.

Pa: Presión Absoluta.

Pc: Presión Crítica.

Tr: Temperatura Absoluta.

Tc: Temperatura Critica.

Con estos valores ya calculados, podemos entrar a la gráfica que aparece en la próxima página, donde, para el eje de las X, encontraremos el valor de Pr calculado, luego, subiremos a la curva correspondiente de iso temperatura reducida y de allí, en el eje de las Y, obtendremos el valor de Z, el factor de compresibilidad de los gases.

Luego, para determinar el valor de Y, utilizaremos la siguiente relación:

$$Y = 1 / (Z)^{1/2}$$

Existen dos variedades de problemas posibles de esta índole que puedan presentársele al ingeniero instrumentista, que son:

1.- El más sencillo, que consistía en calcular el caudal para una placa, tobera o Venturi, existente, conocidos: el diferencial de presión la relación Beta y por su puesto, las características del fluido.

2.- El determinar la relación Beta y el diferencial de presión más idóneo, para el caudal de un fluido de características conocidas. Como tenemos una sola ecuación y dos incógnitas, tenemos implícito un cálculo iterativo, para el cual las restricciones recomendadas son:

$$0.4 < \text{Beta} < 0.7$$

$$50'' \text{ H}_2\text{O} < h < 250'' \text{ H}_2\text{O}$$

Método II:

$$Q = 19,65 * D^2 * E * \sqrt{h}$$

Donde:

Q	=	Galones/minuto
19,65	=	Constante
d	=	Diámetro del orificio
E	=	Coficiente Factor de Flujo
h	=	Diferencial de presión en pulgadas.

Numero de Reynolds

$$Rd = \frac{V D \rho}{\mu}$$

Donde:

V	=	Velocidad (pies/seg)
D	=	Diámetro Interno tubería (pies)
ρ	=	Densidad (libras/pies ³)
μ	=	Viscosidad (centipoise)

Método III:**LIQUIDO**

$$m = C_o \frac{\pi D_o^2}{4} \frac{2g_c (P_1 - P_2) \rho}{(1 - \beta^4)}$$

m = Flujo de masa)

C_o = Factor geométricoD_o = Diámetro del Orificio

D = Diámetro interno de la tubería

(P₁ - P₂) = Diferencial de presión del sensor en Lb / ft²ρ = Gravedad Especifica Lbs / ft³

β = 0

g_c = 32,2 ft / S²**GAS**

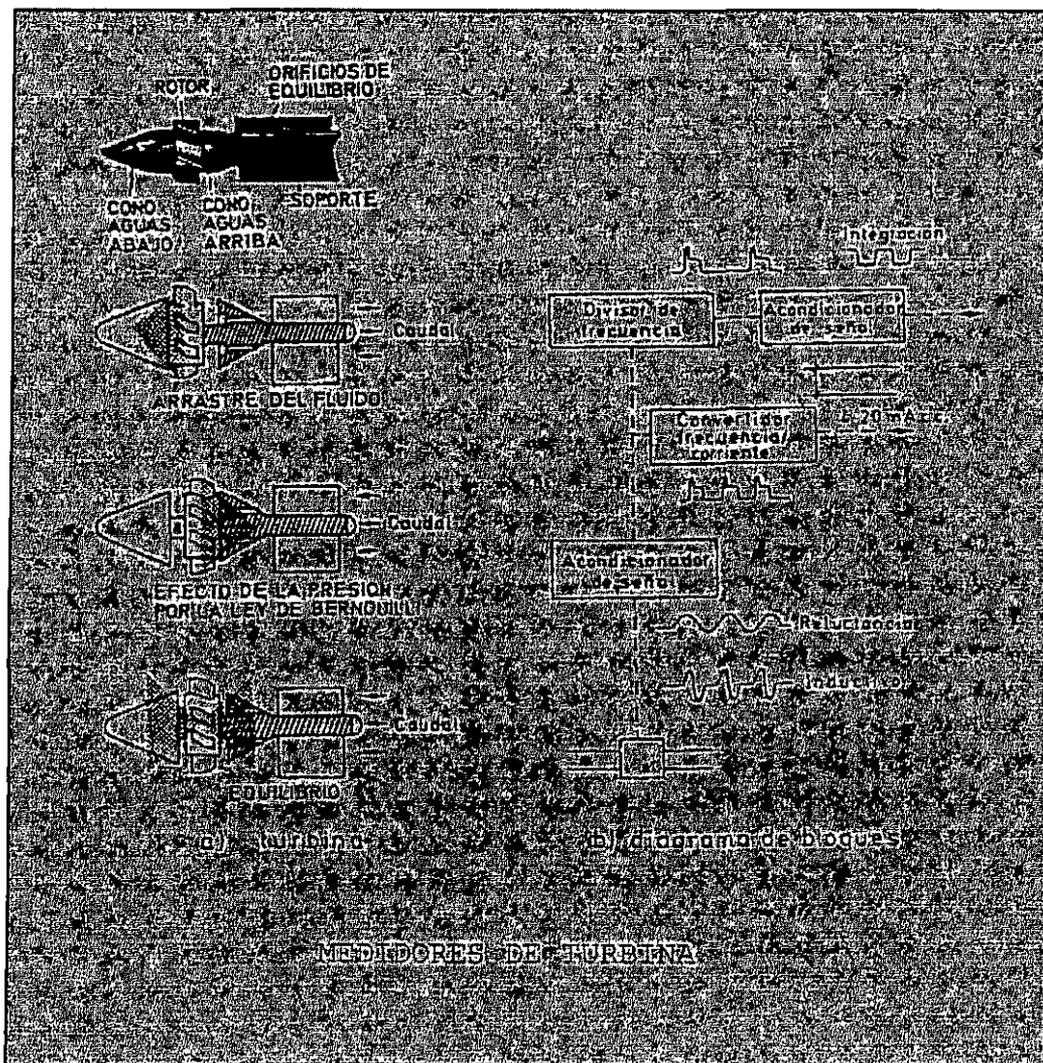
$$m = C_o \frac{\pi D_o^2}{4} Y \frac{2g_c (P_1 - P_2) \rho_1}{(1 - \beta^4)}$$

MEDIDORES DE TURBINA

Consisten en un rotor que gira con el paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal.

El rotor contiene una serie de rieles magnéticos que al girar cierran un contacto del mismo tipo en el exterior del medidor. Esto podrá ser evaluado entonces como el caudal en término de la frecuencia o bien, contabilizar (sumar) la totalidad de caudal o volumen de un fluido en un determinado lapso de tiempo.

Su aplicación se referirá a fluidos muy limpios, líquidos o gaseosos, ya de que no ser así, el rotor podría resultar seriamente dañado. El error de estos elementos es bastante bajo, alrededor del 0,3% del Span.



MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

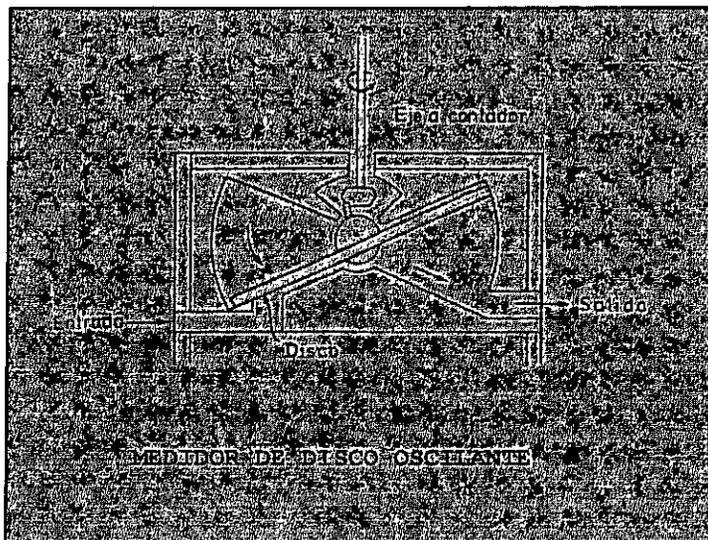
Los medidores de este tipo, toman el caudal del fluido, contando o integrando volúmenes separados del mismo. La parte mecánica del instrumento se mueve aprovechando la energía del fluido, dando esto como resultado una gran pérdida de presión en la línea.

El error de medición de estos elementos dependerá exclusivamente, de la holgura que existan entre las partes fijas y móviles, por lo cuál su uso queda generalmente limitado a líquidos.

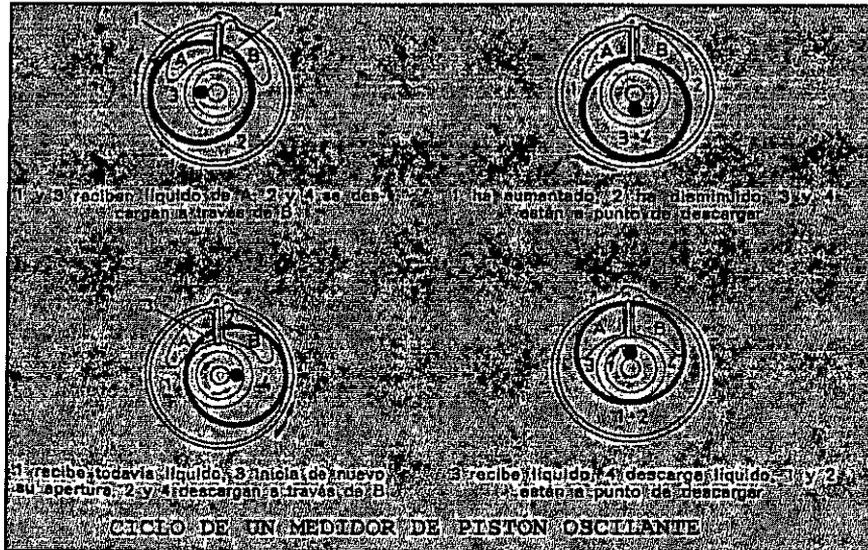
Existen tres tipos básicos de medidores de desplazamiento positivos:

- Medidor de Disco Oscilante.
- Medidor de Pistón Oscilante.
- Medidor de Pistón Alternativo.
- Medidores Rotativos.

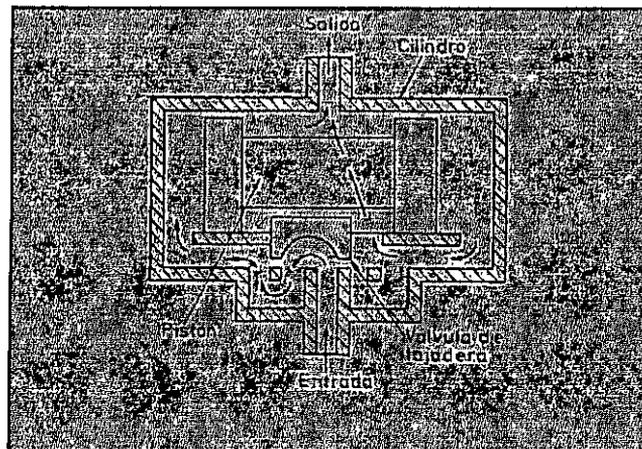
El Sistema de Disco Oscilante dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado con una ranura en la que se encuentra intercalada una placa fija. Esa placa, separa la entrada y la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. El movimiento del disco será similar al de una moneda a punto de cesar su giro en el piso o en una mesa. De esta forma, en cada vuelta, se desplazara un volumen conocido del fluido en cuestión.



El Medidor de Pistón Oscilante, consiste en una cámara cilíndrica con una salida y una placa divisoria que separa esta salida en dos. El funcionamiento de las diferentes fases del ciclo se describe mediante la gráfica siguiente:



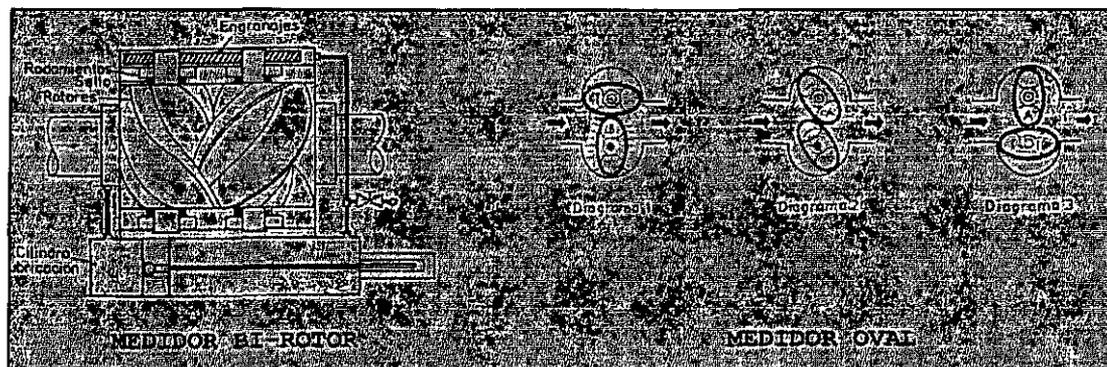
El medidor de Pistón Alternativo es uno de los primeros elementos de medición de caudal por desplazamiento positivo. Al igual que los anteriores se describe mediante un esquema a continuación:



MEDIDOR DE PISTÓN ALTERNATIVO O CONVENCIONAL

Los Medidores Rotativos son de muchos tipos, y son los más usados en la actualidad, dentro de la categoría de desplazamiento positivo. Su funcionamiento es muy sencillo y su mantenimiento bajo. Puede manejar crudos pesado algo viscoso en una gran gama de caudales.

A continuación se describen gráficamente los principales sistemas de este tipo:



Medidor Bi-Rotor

El medidor bi-rotor es un medidor tipo desplazamiento positivo diseñado para medir el flujo total de productos líquidos que pasa a través del mismo por medio de una unidad de medición que separa el flujo en segmentos separándolo momentáneamente del caudal que pasa a través del medidor. Los segmentos son contados y los resultados son transferidos al contador o cualquier otro sistema totalizador a través del tren de engranajes.

Los medidores son fabricados con cuerpo de acero en casco unitario o doble teniendo la unidad de medición removible como una unidad separada del cuerpo. Son diseñados para que los efectos adversos de líneas fuera de alineación no puedan ser transmitidas a la unidad de medición. Una ventaja adicional de la fabricación de doble casco es que la presión de operación, cualquiera que sea, es constante dentro y alrededor de la unidad de medición. Por lo tanto no hay cambio en la precisión de una presión de operación a otra.

Medidores Ovais

Desde ácido sulfúrico súper saturado, dióxido de titanio, azufre derretido y mantequilla de maní, el Medidor Oval hace la medición del producto más difícil un asunto sencillo y sin comprometer la precisión. Un diseño simple - los dos engranajes ovais de precisión - son las únicas piezas móviles, proveen repetitibilidad y larga vida con muy poca pérdida de presión en el proceso.

Como funciona el medidor tipo oval

El medidor oval mide en forma precisa el flujo de líquido utilizando el diferencial de presión para hacer rotar un par de engranajes sellan el flujo de salida, desarrollando el diferencial de presión. En la figura 1, el engranaje B está balanceado hidráulicamente desbalanceado. Por lo que el engranaje A impulsa el engranaje B hasta el engranaje A vuelva a estar balanceado hidráulicamente (figura 3). En este punto, el engranaje A (figura 4). Esta acción de impulso altera provee una rotación suave a un casi constante torque sin puntos muertos. Al rotar los engranajes atrapan cantidades precisas de líquido en los espacios vacíos de la cámara de medición de medición, y la tasa de flujo es proporcional a la velocidad rotacional de los engranajes. Ya que él deslice entre los engranajes ovales y la pared de la cámara es mínimo, el medidor no es afectado por cambios en la viscosidad y lubricación de los líquidos medidos. Un eje de salida, que rota en proporción directa a los engranajes ovales por medio de un acople magnético potente, impulsa un tren de engranajes que proveen el registro del medidor en unidades de galones, litros, libras.

Los accesorios más frecuentemente usados y disponibles para este tipo de medidores son:

- Convertidor Frecuencia-Tensión.
- Convertidor Frecuencia-Corriente (microprocesadores).
- Totalizador Electromecánico/Reset Manual.
- Totalizador Electromecánico/Parada Automática.

ROTAMETROS O MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE

Los rotámetros, son medidores de área variable en los cuáles un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo de un fluido.

Consiste en un semicono en posición invertida, de tal forma que la velocidad del flujo va disminuyendo a medida que este avanza en el medidor.

Sobre el flotador actúan tres fuerzas que producen un equilibrio a una determinada altura. Ver el siguiente diagrama de cuerpo libre:

Donde:

G: Peso del Flotador.

F: Fuerza de Empuje.

E: Fuerza de Roce.

Las dos primeros componentes de fuerza son constantes, siempre y cuando no cambie ni el material ni el volumen del flotador o el fluido de proceso.

La fuerza de roce, será la variable dependiente de la velocidad del flujo, que tendrá relación directa con el área de sección y por lo tanto con el caudal.

Los rotámetros son usados para la medición de caudales de fluidos con viscosidades normales y bastante limpios.

MEDICIÓN DE FLUJO MASICO

Los instrumentos de medición de caudales de masa, son de gran importancia en la industria, en razón del gran número de aplicaciones requeridas por este tipo de medición entre las cuales figuran: los balances de masa efectuados en un proceso complejo.

Existen dos grandes grupos de mediciones de caudal de masa, que son:

- Por Compensación de la Medida Volumétrica.
- Por Medición Directa.

La Compensación de la Medida Volumétrica, consiste en la adición de un transmisor de densidad al medidor de caudal volumétrico existente en un proceso, y luego, aplicando la siguiente ecuación obtendremos el caudal de masa:

$$D = m/V \quad m = V.D$$

La implementación de este método se puede llevar a cabo mediante un transductor multiplicador, que permita la operación expuesta en la relación.

La Medición Directa, se podrá realizar mediante una serie de elementos entre los cuales figuran:

- Medidores Térmicos.
- Medidores de Momento Angular.
- Medidores por Frecuencia Natural de Oscilación.

Medidores Térmicos.

Se basan en el principio que establece que un cuerpo se calienta al pasar cerca de otro cuerpo a mayor temperatura. El sistema consiste en un manta de calentamiento aplicada en la parte exterior de la tubería que proporciona calor constante, y dos termocúplas

conectadas aguas arriba y aguas abajo de dicha manta; cuando el caudal sea bajo, la transferencia de calor será más efectiva.

Medidores de Momento Angular.

Se basan en el principio de conservación del momento de los fluidos; éstos constan generalmente de una turbina que se encuentra acoplada a un medidor del momento angular. En términos comunes se puede decir, que el momento así medido será directamente proporcional al caudal de masa del fluido.

Medidores por Frecuencia Natural de Oscilación.

Medidor de caudal de masa directo que trabaja mediante el efecto que tienen las oscilaciones de frecuencia natural de vibración con respecto al caudal de masa que pasa por tramo de tubería que está construido con materiales de buena elasticidad y de una forma geométrica muy particular.

INTRODUCCION.

Hasta hace poco tiempo, ningún método práctico para medir la masa existía. Tales mediciones son necesarias en infinidad de aplicaciones entre las cuales se encuentran: los balances de masa de productos procesados y obtenidos en la planta, transferencia de custodia.

La medición directa de la masa de flujo evita la necesidad de utilizar cálculos complejos y como estándar fundamental de medición, la masa no deriva sus unidades de otra fuente ni se ve afectada por variaciones de temperatura o presión; tal constancia hace a la masa, la propiedad ideal para medir. El primer Medidor de Flujo Másico (MFM) fue desarrollado por la compañía Micro Motion y funciona según el principio Coriolis.

El medidor de Coriolis se basa en el teorema de Coriolis, matemático francés (1795-1843) que observó que un objeto de masa m que se desplaza con una velocidad lineal V a través de una superficie giratoria que gira con velocidad angular constante

w, experimenta una velocidad tangencial (velocidad angular x radio de giro) tanto mayor cuanto mayor es su alejamiento del centro. Si el móvil se desplaza del centro hacia la periferia experimentará un aumento gradual de su velocidad tangencial, lo cual indica que se le está aplicando una aceleración, que es precisamente la aceleración de Coriolis. Este fenómeno es el causante de que el remolino que se forma en el fondo de un depósito al vaciarlo, gira a derechas en el hemisferio Norte y a izquierdas en el hemisferio Sur. Asimismo todos los vientos de la circulación general que soplan desde el Norte al Sur en el hemisferio Norte son desviados, debido a la rotación de la Tierra de Oeste a Este, constituyendo los vientos predominantes de oeste. Por otro lado, el célebre péndulo de Foucault demuestra también el fenómeno.

PARTES DE UN MEDIDOR DE FLUJO MÁSSICO

La Unidad Sensora.

La Unidad Electrónica

La Unidad Sensora : La Unidad Sensora constituye el componente que está en contacto directo con el proceso.

COMPONENTES DE LA UNIDAD SENSORA.

Tubos de flujo : Son tubos en forma de U por donde circula el fluido de proceso, están constituidos básicamente de acero inoxidable 316L libre de obstrucciones y diseñados para vibrar a su frecuencia natural. Este hecho, permite una reducción en la energía requerida por éstos para oscilar. Están soldados a tubos de unión múltiple.

Tubos de Unión Múltiple (Manifolds): Su función es la separar el fluido en dos partes iguales en la entrada del medidor para luego recombinarlo en la salida. Estos tubos están soldados al espaciador, a la placa base, accesorios de fluido y a los tubos de flujo. El fluido fluye a través de los accesorios de fluido, tubos de unión múltiple y tubos de flujo.

Espaciador: Son segmento de tubería de acero inoxidable 304 usados para tres propósitos. Primero, separa los tubos de unión múltiple de modo que se alíen debidamente con los tubos de flujo. Segundo, actúa como un conducto para cables desde adentro del compartimiento del sensor hacia la Unidad Electrónica. Tercero, provee estabilidad dimensional para el sensor y ayuda a neutralizar las tensiones de la tubería que podrían afectar la operación del medidor.

Hay una plaqueta sobre una de las placas del espaciador para permitir un fácil acceso a conexiones de cables.

Placa Base: Consiste en una de las piezas lisas rectangulares de acero inoxidable. La placa está soldada a los tubos de unión múltiple como también a la cubierta.

Barreras Expansoras: Las barreras son piezas rectangulares lisas que abrazan a los tubos de flujo y los posicionan en forma precisa, a fin de mantener las zonas de vibración separadas de las soldaduras de conexión de los tubos de unión múltiple.

Bobina Impulsora: La bobina impulsora es un dispositivo magnético que convierte la señal eléctrica proveniente de la Unidad Electrónica en una fuerza que hace vibrar a los tubos de flujo. Esta bobina lleva anexo un magneto y juntos están fijados al centro de los brazos de soporte.

Brazos de Soporte : Los brazos de soporte, uno abraza a los tubos de flujo, el otro sirve de soporte a la bobina impulsora y a los detectores de posición. Las bobinas y detectores están unidos a uno y los magnetos asociados, al otro.

Detectores de Posición: Son los elementos sensores primarios para determinar el ángulo de torsión del tubo de flujo en función del tiempo. Los detectores, envían esta información a la Unidad Electrónica, donde se procesa y convierte a un voltaje proporcional a la rata de masa de flujo. Están constituidos por una bobina y un magneto asociado a ésta.

Se usan bases de cerámicas para las bobinas, lo que garantiza la estabilidad térmica. Los magnetos están posicionados de manera que las bobinas se mantengan dentro de un campo magnético, bajo cualquier circunstancia de vibración.

Sensores de Temperatura : Para todos los modelos, una resistencia detectora de temperatura (RTD) está unida a la parte inferior de uno de los tubos de flujo. Este sensor es utilizado con dos objetivos: Primero, a través de la Unidad Electrónica, compensa los efectos de la temperatura sobre el modo de rigidez de los tubos de flujo controlando así, la escala de conversión necesaria de voltaje/frecuencia de la señal de flujo.

A medida que sube la temperatura del fluido, los tubos se tuercen cada vez más para la rata de flujo dada. El segundo objetivo de este sensor, consiste en convertir la señal que éste produce en variaciones de voltaje el cual cambia linealmente con la temperatura. Posteriormente esta señal de voltaje ha ser convertida en lectura de temperatura.

Accesorios de Fluidos: Las bridas están fabricadas de acero inoxidable 316 L. Los Cuellos, entre las bridas y los Tubos de Unión Múltiple, son de acero inoxidable 304.

Cubierta o Caja del Sensor: Es de acero inoxidable 304 y esta soldada a la placa base, formando esta soldadura, un sello que protege el ensamblaje del tubo contra influencias exteriores. En la parte superior de cada cubierta existe un terminal llamado "Snnuber" que puede ser usado para satisfacer los requerimientos de tierra (GND) de circuitos eléctricos.

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

Todos los medidores de flujo másico trabajan bajo el mismo principio que consiste en la aplicación de la segunda ley de Newton: " fuerza es igual a Masa por Acelerador " ($F=m.a$). Esta ley es utilizada para determinar la cantidad exacta de masa que fluye a través del medidor. Dentro de la Unidad Sensora, los tubos de flujo se han diseñado para vibrar a su frecuencia natural con respaldo de un sistema electromagnético. Esta vibración tiene una amplitud que es aproximadamente menor a 1 mm, y frecuencia entre 40 y 120 Hz dependiendo del tamaño del medidor.

La masa correspondiente a cierto flujo, adquiere una velocidad lineal al fluir a través del tubo. Las vibraciones de éste sobre un eje (eje de soporte) resultan perpendiculares al flujo y hacen que el mismo acelere en el extremo de entrada y desacelere en el de salida, causando que el tubo se doble. Esto se puede analizar de manera más sencilla y

detallada a continuación: En primer lugar, imaginemos al tubo de flujo como un par de piernas, pierna 1 por donde entra el flujo y pierna 2 por donde sale.

El flujo entra al tubo por la pierna con una velocidad horizontal paralela a éste, pero al momento y por efecto de la vibración que es máxima al final de la pierna un poco antes del dobléz, se le induce una velocidad vertical y en consecuencia, una fuerza reactiva del flujo se opone a la acción del tubo creándose un desequilibrio de éste que a manera de compensarlo y por efecto del flujo saliente, causa que la segunda pierna se deforme con una fuerza igual en magnitud y en sentido opuesto a la pierna 1. Al momento de salida, esa velocidad vertical comienza a disminuir progresivamente debido a que la vibración se va haciendo nula justamente antes de abandonar la segunda pierna.

La fuerza de torsión inducida por el flujo crea un efecto llamado Coriolis que es un proporcional a la rata de flujo masivo. Este efecto constituye la fuerza utilizada para la detección de la masa de flujo.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIADORES DE FLUJO MÁSIVO

Precisión: el grado de precisión de los MFM incluyen errores de interferencia, repetibilidad y estabilidad cero pero, ya que son considerados independientes, éstos suman por sus raíces cuadradas y no por valores acumulativos. Así, el error real casi siempre será del 0.2% de la rata de flujo (+/-) la estabilidad cero dada en las especificaciones.

Repetibilidad: para un MFM repetibilidad es menor del 0.1%.

Estabilidad del Cero: La señal de la rata de flujo permanece lineal cuando éste vale cero. Existe poca estabilidad a ratas de flujo muy bajas.

Rango de Flujo: El rango de flujo es especificado en libras o kilogramos por minuto, para cada tamaño de medidor. Las únicas limitaciones son caídas de presión aceptables del sistema y la poca estabilidad a ratas de flujo muy bajas.

Flujo Mínimo a Escala Completa: Es la rata más baja de flujo completo en el que el interruptor de selección de rango (Span Select Switch) del medidor puede ser ajustado. En este valor el medidor no puede proveer salida a escala completa.

Flujo Máximo a Escala Completa: Es la rata más alta de flujo completo en el que el interruptor de selección de rango (Span Select Switch) del medidor puede ser ajustado. Es el valor más alto del rango de flujo.

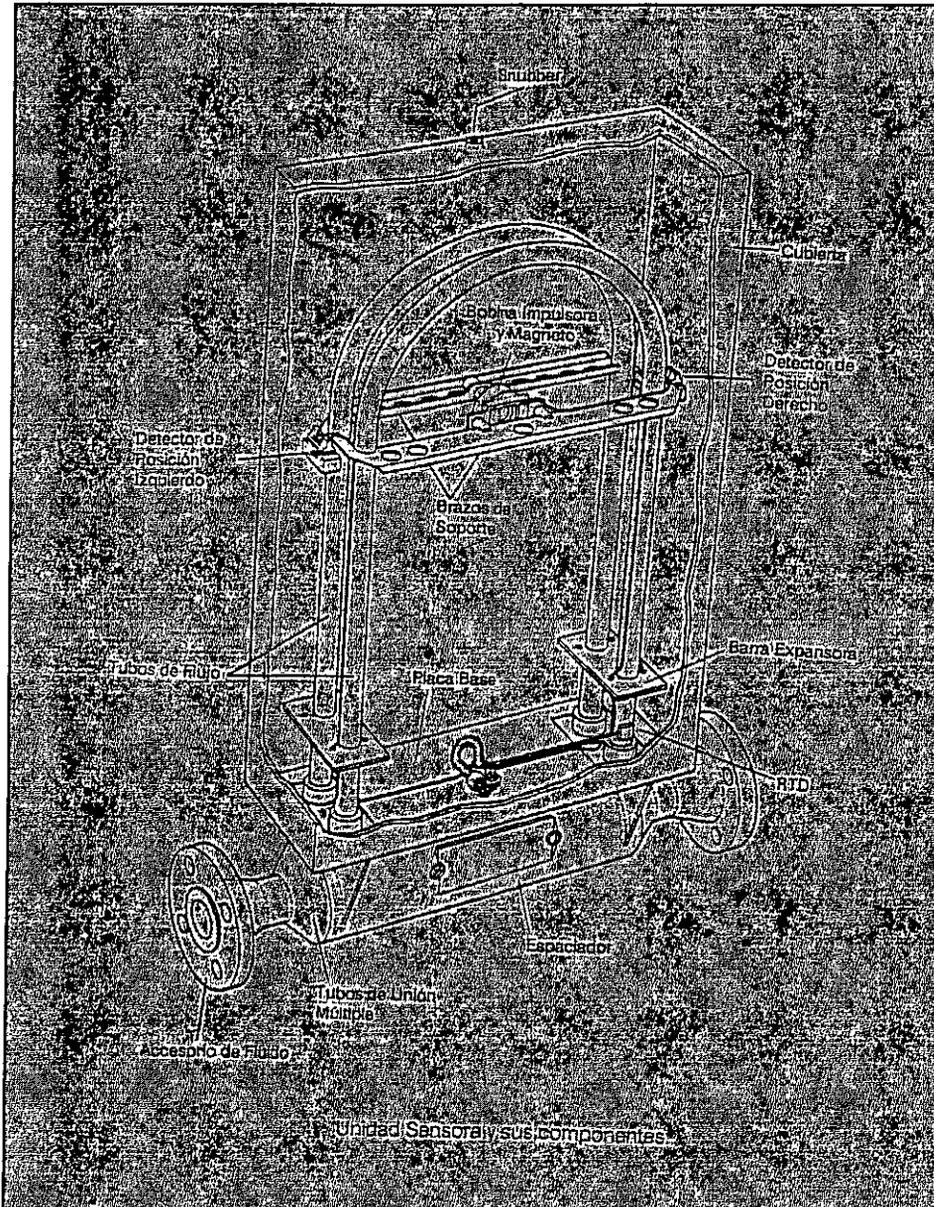
Rango de Presión de Operación : Ésta es de al menos $\frac{1}{4}$ de la presión de ruptura del material utilizado en conformidad con ANSI/ASME * B31.3, a temperatura ambiente.

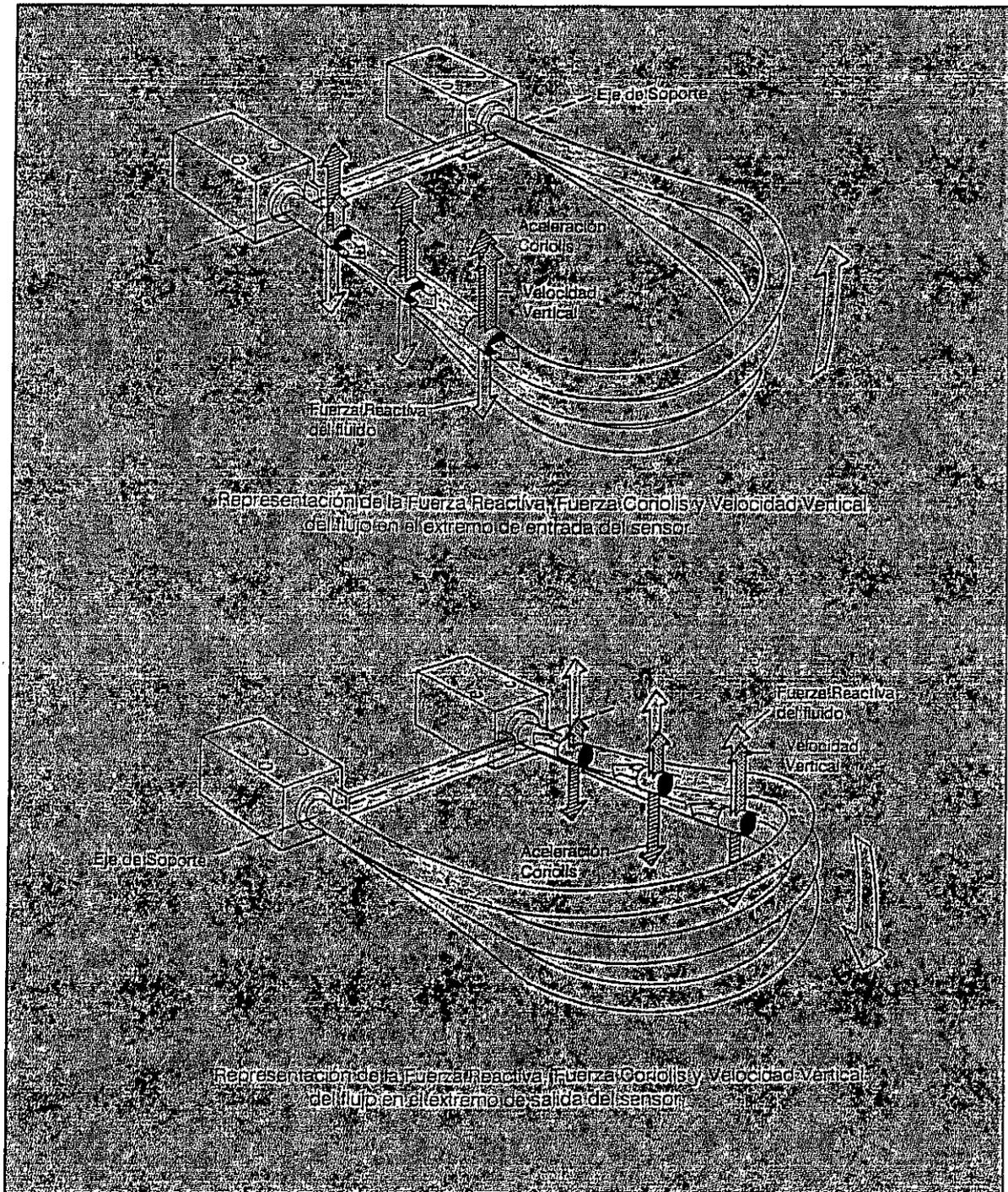
VENTAJAS DEL SISTEMA

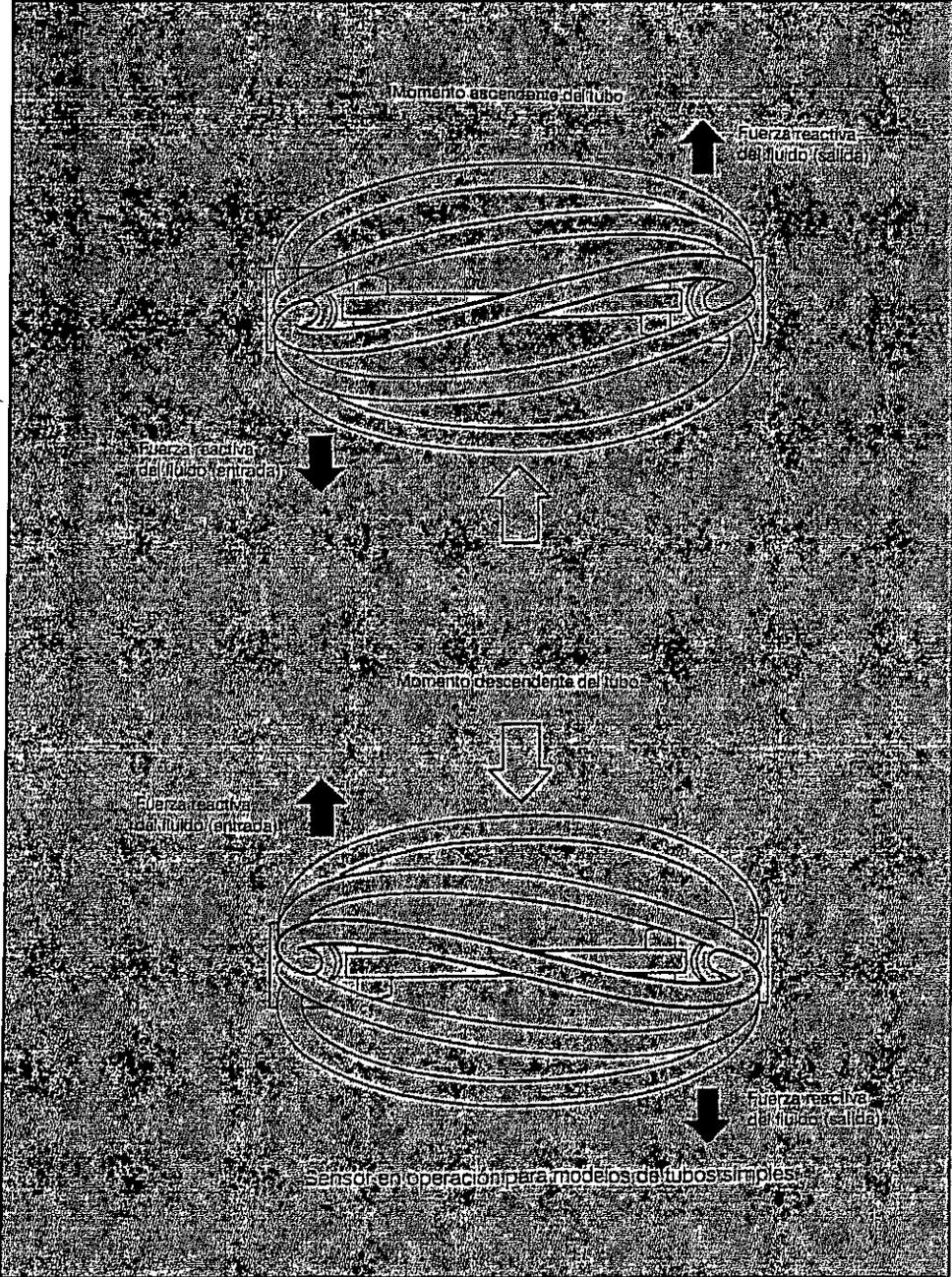
- 1.- Por utilizar como patrón de medida unidades de masa, ésta no se ve afectada por cambios en los parámetros de Temperatura o Presión.
- 2.- Por no poseer partes móviles ni desarmables, requiere de mínimo mantenimiento.
- 3.- Permite la medición de flujo en forma bidireccional.
- 4.- La señal eléctrica proporcional al flujo ya viene corregida, es decir, que no amerita de cálculos complejos para la lectura.
- 5.- Es de fácil calibración en el campo.
- 6.- El error real es de menos del 0.2% de la rata de flujo (+/-) la estabilidad cero.

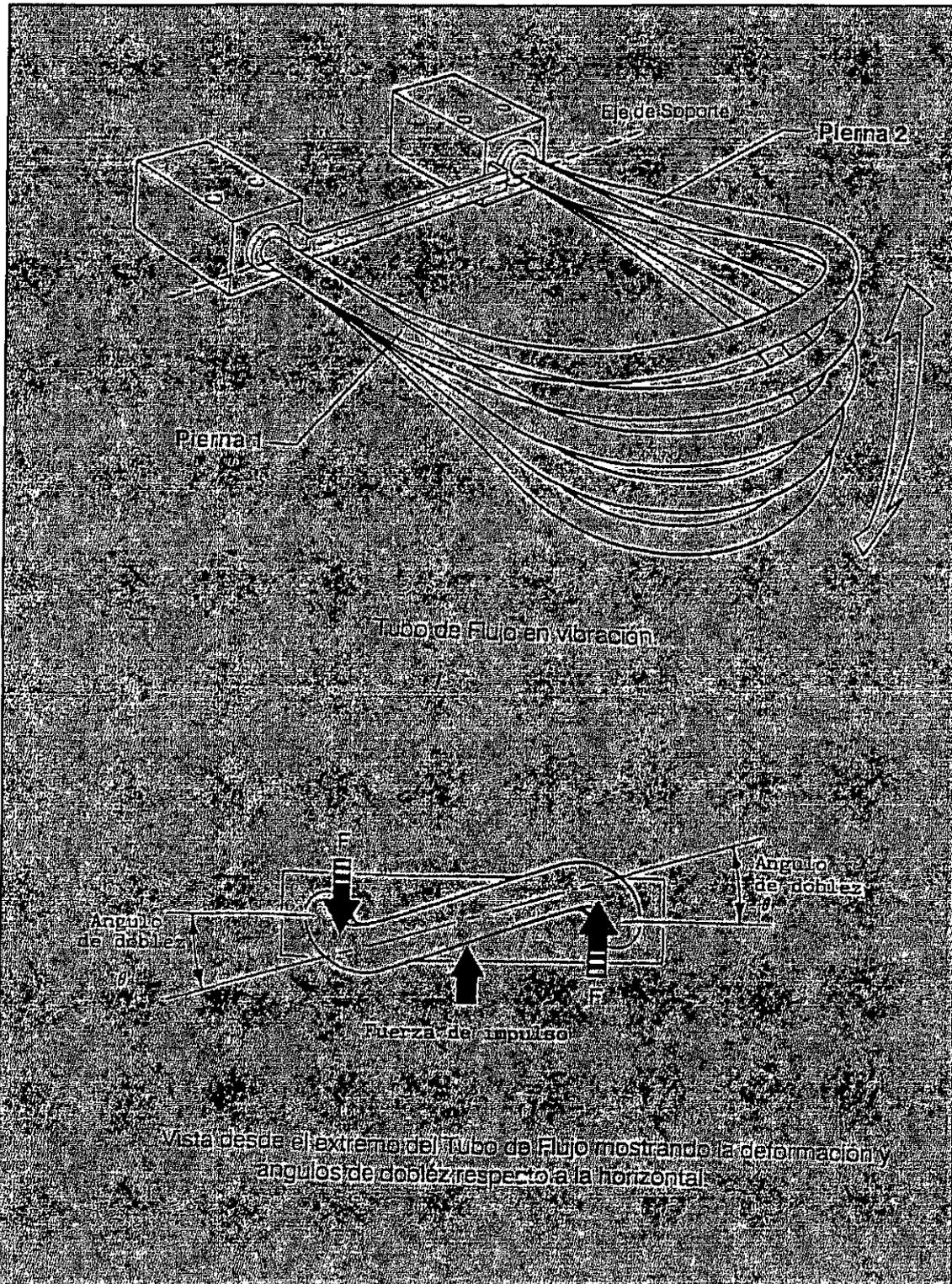
DESVENTAJA DEL SISTEMA

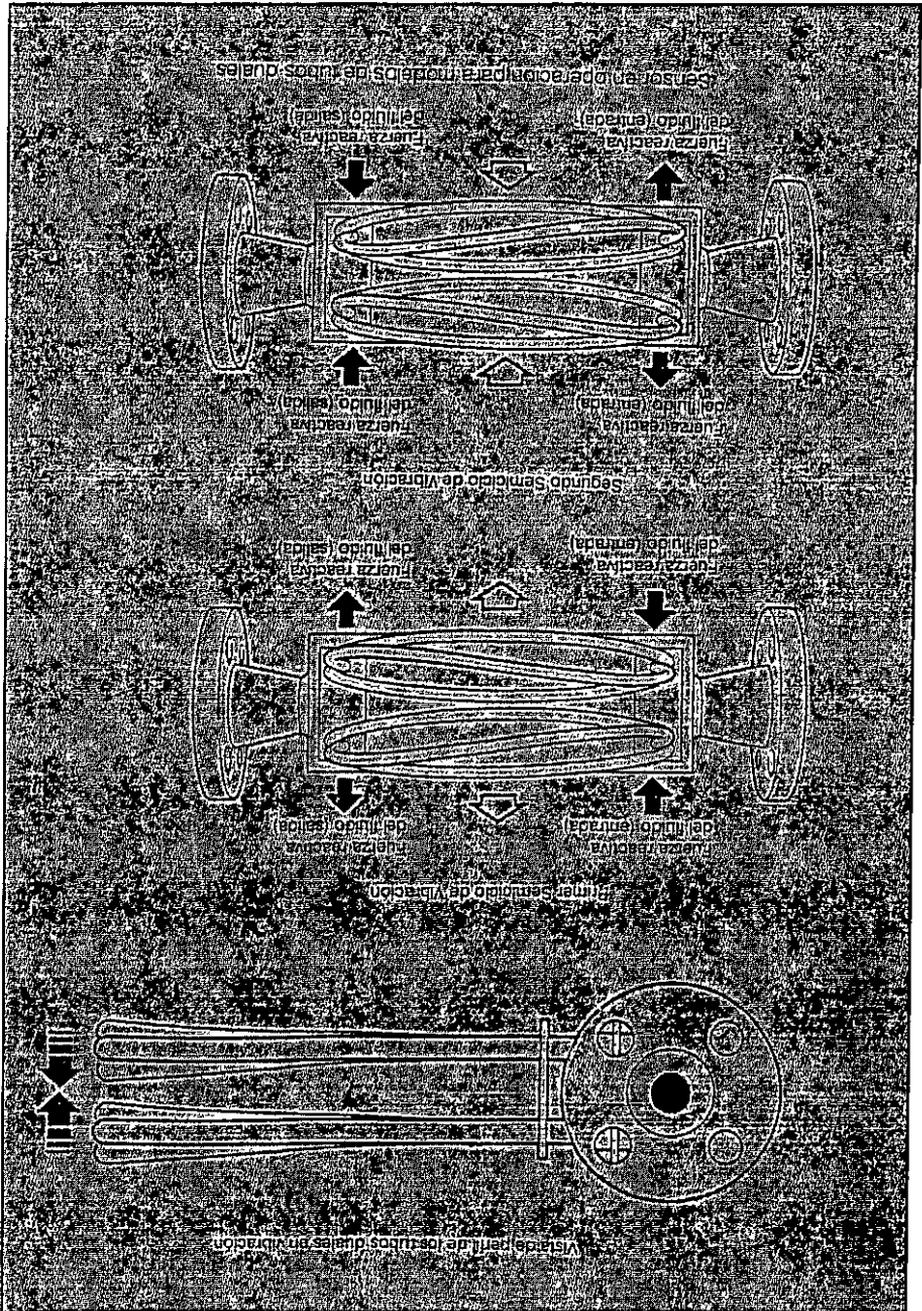
- 1.- Constituye el sistema de medición de flujo de mayor costo.







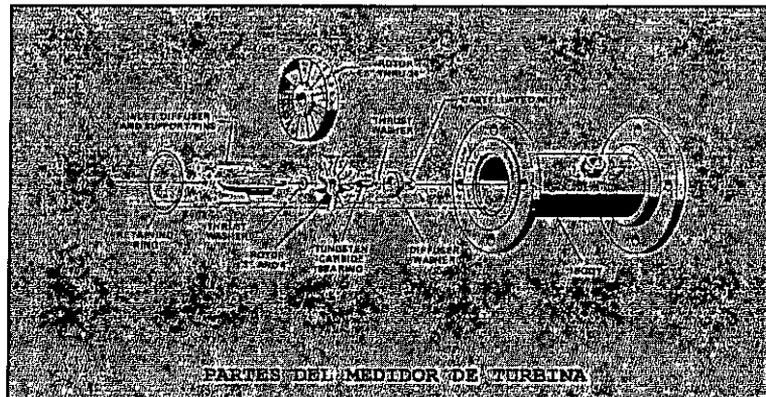




MEDIDOR DE TURBINA

El medidor de turbina es un transductor que detecta la velocidad de un flujo utilizando un tubo de flujo con una turbina de paletas suspendida axialmente en la dirección de flujo. Cuando el líquido choca contra la parte aguas arriba de las paletas de la turbina, se produce un área de baja presión en el lado aguas abajo. El diferencial de presión (o caída de presión) produce movimientos de las paletas hacia el área de baja presión. La tasa de rotación del rotor es directamente proporcional a la tasa de flujo a través del flujo. Esta rotación es luego convertida en una señal de salida utilizable. El medidor de turbina está diseñado para eliminar prácticamente cualquier desgaste interno con el balanceo hidrodinámico del rotor. Cuando el choque de la línea se sobrepone temporalmente al balance hidrodinámico, el desgaste es minimizando con superficies de contacto y arandelas de “tungsten carbide”.

La salida eléctrica es generada utilizando el principio de reluctancia, en el cual una señal es generada por el pase del rotor de la turbina en proximidad cercana a una bobina de señal. La señal es luego enviada a un amplificador que genera un pulso DC y lo transmite a la instrumentación externa. Típicamente, la instrumentación puede incluir un totalizador de factor, utilizando para una indicación de flujo volumétrico (en unidades de ingeniería). O un contactor de frecuencia o convertidor puede ser utilizado para proveer una indicación instantánea de la tasa de flujo. La curva de calibración del medidor puede obtenerse con un cuadro mostrando las diferentes tasas de flujo.



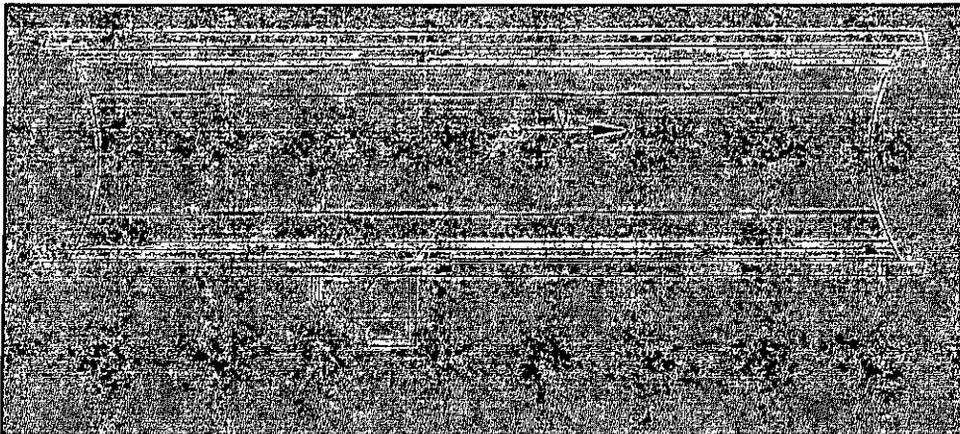
TECNOLOGIAS DE MEDICIÓN DE FLUJO POR ULTRASONIDO

Método de cambio de frecuencia de “Doppler”

El primer intento para utilizar la tecnología ultrasonido en medición de flujo se remonta al año 1.928, cuando se publica la primera patente. Desde entonces, han surgido diferentes métodos, entre los cuales se destaca el de “Cambio de frecuencia de Doppler” (1.995), el cual sólo se puede aplicar a líquidos con burbujas o sólidos en suspensión.

El principio de “Cambio de frecuencia de Doppler” establece que una onda sónica que viaja a una frecuencia dada, al chocar con un objeto en movimiento, experimenta un cambio de frecuencia en la onda reflejada que es proporcional a la velocidad del objeto en movimiento. En el caso de un líquido con burbujas o sólidos en suspensión, el medidor envía dentro del líquido una onda sónica a una frecuencia conocida y a través de un receptor, mide la frecuencia de la onda reflejada por las burbujas o las partículas que viajan junto con el líquido (fig.1). La diferencia entre las dos frecuencias es proporcional a la velocidad del líquido.

La implantación de esta tecnología a nivel de campo no ha sido del todo exitosa, ya que la precisión que se alcanza oscila entre $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$. Esto debido a que no necesariamente las burbujas o los sólidos que viajan en una corriente líquida lo hacen a la misma velocidad y en la misma dirección del líquido, por ejemplo: las partículas caen y las burbujas flotan.



TRANSMISOR/RECEPTOR

Fig. 1 Medidor de flujo por ultrasonido tipo “Doppler.”

Método tiempo de tránsito

Los últimos avances en electrónica digital, procesamiento de señales y "software", y un cambio en el principio de medición han promovido el renacimiento de la tecnología de ultrasonido en las aplicaciones de medición de flujo. Entre los desarrollos más recientes en esta materia se encuentra el medidor de flujo por ultrasonido tipo "tiempo de tránsito". Este medidor aplicable tanto a líquido como a gas, determina la velocidad de fluido dentro de la tubería a partir de la diferencia de tiempo empleada por dos señales ultrasónicas en atravesar una misma sección de la tubería, con la diferencia de que una señal viaja en el sentido del flujo y la otra en contra. En la fig. 2 se muestra un esquema de este instrumento.

El medidor consiste en dos transmisores/receptores colocados uno corriente arriba y el otro corriente abajo en la tubería. Se envía una señal de ultrasonido en el sentido del flujo, desde el transmisor/receptor ubicado corriente arriba (transmisor A), la cual es recibida por el transmisor/receptor corriente abajo (transmisor B), después de haber transitado la distancia entre ellos.

Simultáneamente, se emite una señal de ultrasonido desde el transmisor B que recibe el A (en sentido contrario al flujo). La diferencia entre estos dos tiempos de tránsito es directamente proporcional al flujo.

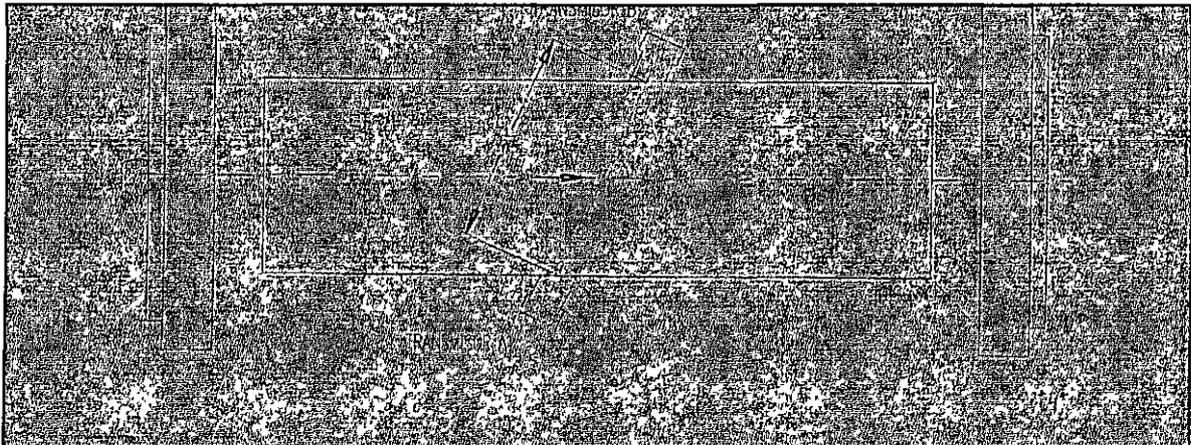
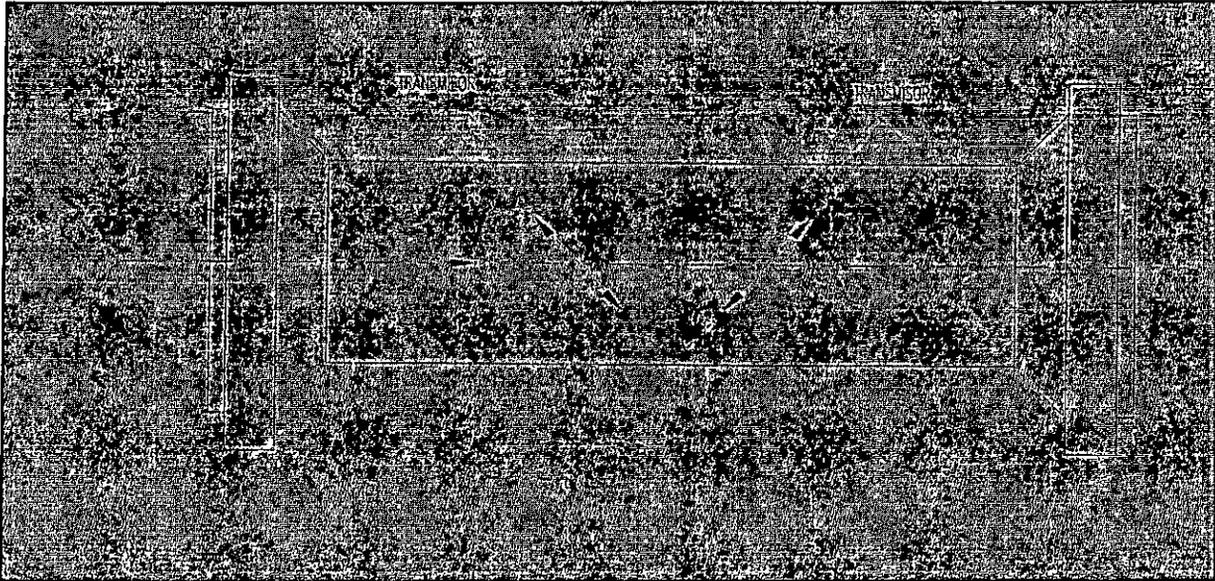


Fig. 2 Medidor de flujo por ultrasonido tipo tiempo de tránsito
"trayectoria simple"

CONFIGURACIONES PRACTICAS

El sistema descrito en la (Fig.2) se denomina "trayectoria simple". También es frecuente ver este sistema en una configuración tipo "reflexión simple" (Fig.3). Ambas configuraciones involucran dos (2) transmisores, los cuales envían señales sónicas en forma simultánea. La diferencia radica en que el primero la trayectoria de la señal sigue una línea recta, mientras que en el segundo la señal sufre un cambio de dirección al ser reflejada por la pared de la tubería. Tanto en la configuración "trayectoria simple" como en la "reflexión simple", la precisión que se alcanza está entre $\pm 1\%$ y $\pm 3\%$.



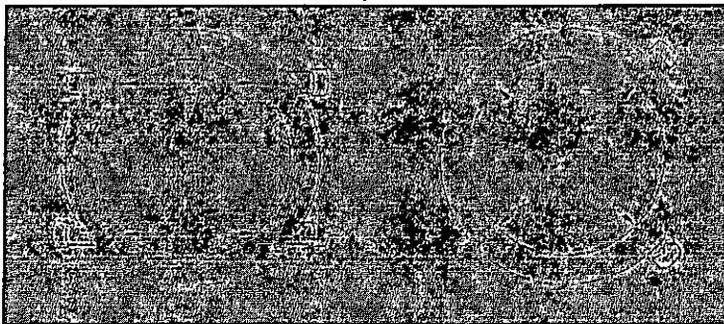
(Fig.3) Medidor de flujo por ultrasonido tipo tiempo de tránsito

“reflexión simple”

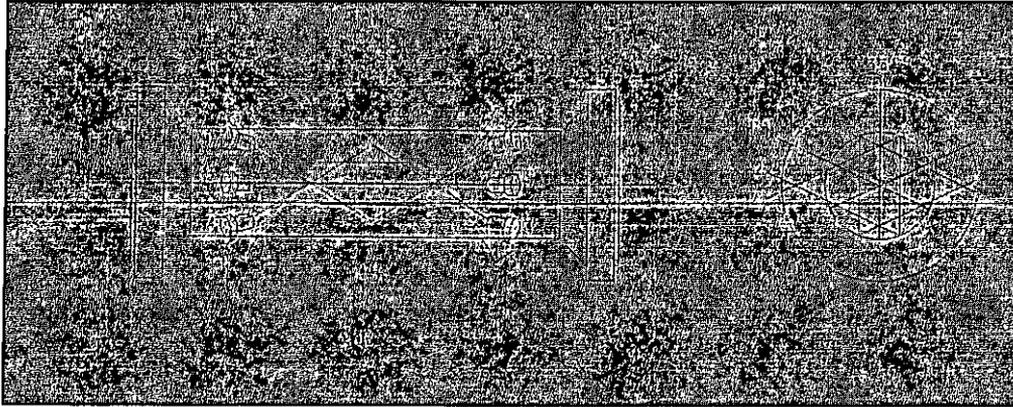
Es posible incrementar la precisión utilizando dos (2) trayectorias de medición, bien sea en arreglos en paralelo o cruzado. En la (Fig.4) se muestran ambos arreglos para este medidor llamado “doble trayectoria”.

Sistemas más complejos incorporan más de dos (2) trayectorias de medición, éstos son los llamados “sistemas multitrayectoria” (Fig.5).

La utilización de una u otra configuración depende exclusivamente de la aplicación. En operaciones en las que no se requiere mucha precisión (entre $\pm 1\%$ y $\pm 3\%$), como por ejemplo: balance de masa, transferencias internas en planta, reconciliación de datos o algunas aplicaciones de control de procesos, la configuración de “trayectoria simple” es una excelente opción. En cambio para la aplicaciones de alta precisión ($< \pm 0,5\%$) como fiscalización y entrega de productos, el instrumento apropiado es el multitrayectoria.



(Fig.4) Arreglos en paralelo y cruzado para el medidor “Doble trayectoria”.



(Fig.5) Medidor de Flujo por Ultrasonido "Multitrayectoria"

MEDIDOR MULTITRAYECTORIA

El medidor de flujo por ultrasonido en arreglo multitrayectoria presenta ventajas comparativas que superan a todos los demás arreglos, como son:

- Mayor precisión - Sistemas de cuatro o cinco trayectorias de medición puede lograr alta precisión ($< \pm 0,5\%$).
- Capaz de determinar el perfil de velocidad.
- Medición independiente de la orientación del medidor con respecto a la tubería.

Las características del medidor multitrayectoria son:

- Precisión $< \pm 0,5\%$, aun con flujo pulsante y de baja velocidad.
- Repetibilidad: 0,1%.
- Intervalo de operación: 300:1.
- Pérdida de presión prácticamente nula, ya que no tiene obstrucciones al flujo.
- Capaz de medir en operación bidireccional.
- Bajo costo de operación y mantenimiento, no tiene partes móviles.
- Capaz de medir cero (0) flujo.
- No necesita calibración.
- No es sensible a grandes variaciones en la presión.
- En operaciones con gas, es capaz de medir con un 15% en volumen de presencia de líquido.

Medidor de Flujo Tipo Torbellino (Vortex)

Básicamente este tipo de medidor está construido por un objeto en forma de barra que se coloca dentro de la tubería para obstruir el flujo (ver Figura A). Esto hace que se produzcan vórtices o remolinos aguas abajo de la obstrucción. La zona de remolinos es un área donde el fluido se mueve a una mayor velocidad que el resto de la corriente del fluido que la rodea; debido a esto, es una zona de baja presión. Los remolinos generados aguas abajo del objeto que produce la obstrucción, crean una zona de baja presión en la corriente del fluido (figura B). La frecuencia de estos remolinos (vórtices) es directamente proporcional a la velocidad del fluido. Cerca del cuerpo que produce la obstrucción, se colocan sensores sensibles a las fluctuaciones de presión que miden esta frecuencia, la cual es independiente de las propiedades del fluido; teniendo como única limitación un valor mínimo del número de Reynolds. La tasa de flujo se determina a partir de esta medición. Diferentes Tipo de sensores han sido utilizados para detectar la frecuencia de los remolinos, entre éstos se incluyen: transductores piezoeléctricos, transductores magnéticos, transductores sónicos y fibra óptica. Un diseño mejorado utiliza sensores de tipo capacitivo, los cuales son inmunes a las vibraciones y son compatibles con la mayoría de los fluidos.

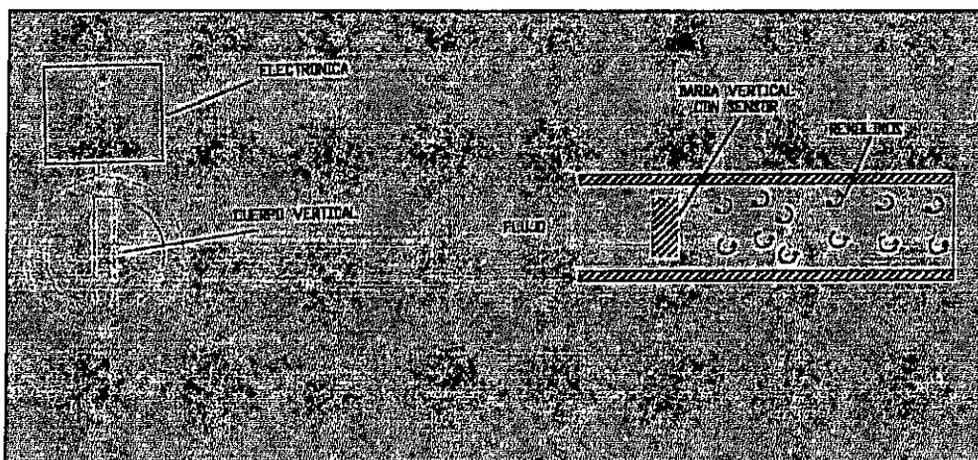


Fig. A Medidor de flujo Tipo Torbellino (Vortex)

Fig. B Formación de remolinos o Vórtices en un Medidor Vortex

Los medidores de flujo de tipo torbellino pueden ser utilizados para medir flujo de líquidos, gases o vapores, requieren tramos rectos de tubería similares a los requeridos por una placa de orificio con una relación beta igual a 0.70. Bajo condiciones similares, producen una caída de presión que es aproximadamente igual a 0.5 ó 0.66 veces la producida por una placa de orificio.

Tipo	SIFRAMECINO							Máxima Presión (PSI)	Máxima Presión (PSI)	Perada de carga	Diámetro Sub. (mm)	Abrillo de (mm)	Famios Disponibles	Presión Oper.
	Fluido de Trabajo	Alquidos Sólidos	Barros	Graso Vapor	Vapor de Agua	Máxima Presión (G)	Máxima Presión (PSI)							
Pala Chica	A	B	B	A	A	A	A	> 100	MEDIA	10-10 D	40	TODOS	21-21 FSD	
Off-line	A	C	C	A	B	A	B	100 G (113) 100 G (105)	ALTA	10-10 D	40	SUB	21-21 FSD	
Vertical	A	B	B	A	A	A	A	> 100	BAJA	5-10 D	40	3-12	21-21 FSD	
Horizontal	A	B	C	A	A	A	A	> 100	MEDIA	10-10 D	40	1-40	21-21 FSD	
Pico	A	B, C	C	A	A	A	A	> 100	BAJA	20-10 D	40	TODOS	21-21 FSD	

A- Adecuado para el servicio.
 B- Posiblemente aplicable. Consultar el fabricante.
 C- No aplicable.

Características de los principales sistemas utilizados para medición de caudal por presión diferencial.

MEDICION DE NIVEL

Introducción

El nivel de líquido fue quizás la primera de las variables en ser medida y controlada. De las variables más comunes que actualmente medimos y controlamos, es la más directa y es la única que tiene sencillez en su dimensión; es decir, que mientras la presión es fuerza por unidad de área, flujo es volumen por unidad de tiempo y temperatura es la medición de actividad molecular, nivel es simplemente una medición de longitud.

Diariamente, de una manera u otra estamos involucrados en la medición y control del nivel. En nuestro vehículo por ejemplo, constantemente medimos el nivel del aceite lubricante, el nivel de agua de enfriamiento, la cantidad de gasolina de la cuál disponemos en el tanque, etc., con la finalidad de mantenerlo nuestro vehículo en las mejores condiciones y evitar cualquier tipo de falla.

Con este ejemplo sencillo hemos visto, la importancia que representa la medición y control de nivel, imaginemos lo que ello representa en un proceso industrial, el cual es mucho más complejo.

DEFINICION

El nivel, puede ser definido como la distancia existente entre una línea de referencia y la superficie del fluido. Generalmente dicha línea de referencia se toma como el fondo del recipiente.

Medición de Nivel

Como mencionamos anteriormente el nivel es la variable que puede ser medida mas fácilmente, pero existen otros factores, tales como la viscosidad del fluido, tipo de medición deseada, precisión, si el recipiente está o no presurizado, etc., que traen como consecuencias que existan varios tipos de instrumentos medidores de nivel. El medidor de nivel seleccionado dependerá de nuestras necesidades o condiciones de operación.

Los medidores de nivel los podemos agrupar, dependiendo de su actuación en: visuales actuados por flotador, actuados por desplazador, actuados por presión hidrostática, actuados por presión diferencial y actuados por sistemas eléctricos.

MEDIDORES VISUALES DE NIVEL

La forma más antigua de medición de nivel es por medio de los medidores visuales. Entre los medidores de nivel mas comunes por este método podemos citar: la aforación y los indicadores de cristal.

Estos instrumentos son de fácil mantenimiento, bajo costo y las lecturas están dentro del rango de aceptabilidad en cuanto a exactitud.

La principal desventaja de estos dispositivos es que la medición debe ser en sitio, es decir, no puede ser transmitida a lugares remotos.

La Aforación: es el método de medir nivel por medio de cintas. El instrumento esta compuesto por tres partes principales que son: el carrete, la cinta graduada y un peso o plomada. La figura 6.1 muestra este dispositivo indicando todos sus componentes.

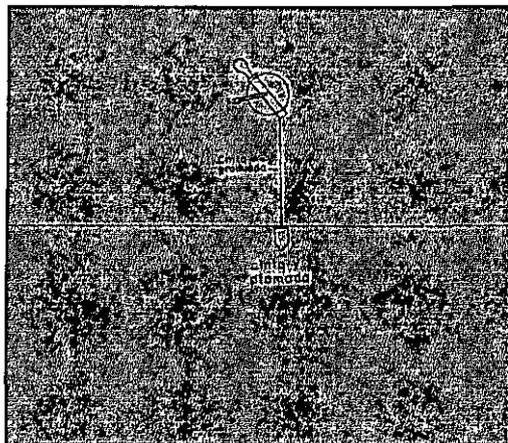


Figura 6.1
CINTA PARA MEDIR NIVEL POR AFORACION

La manera de medir el nivel por medio de este dispositivo es la siguiente; se introduce la cinta en el recipiente y se baja lentamente hasta que la plomada toque fondo, luego se empieza a recoger la cinta con el carrete hasta que aparezca sobre la cinta la marca dejada por el liquido. Como la cinta esta calibrada en milímetros, pulgadas o pies, el sitio donde éste la marca será el nivel del recipiente.

Como se puede notar es el método mas seguro de medición de nivel, pero tiene una serie de desventajas, de las cuales podemos citar:

- a.- El recipiente debe estar a la presión atmosférica
- b.- El liquido debe dejar una línea nítido sobre la cinta
- c.- El liquido no debe emitir vapores dañinos para la salud.

Indicador de Cristal: quizás el medio más común y simple para medir nivel. Estos tipos de indicadores sirven para varias aplicaciones y se pueden utilizar tanto para recipientes abiertos como cerrados. La figura 6.2 muestra dos de estos instrumentos. El indicador de la figura 6.2 A, es usado para servicios con temperaturas y presiones bajas mientras que el indicador de la figura 6.2 B, es para servicios con presiones y temperaturas altas.

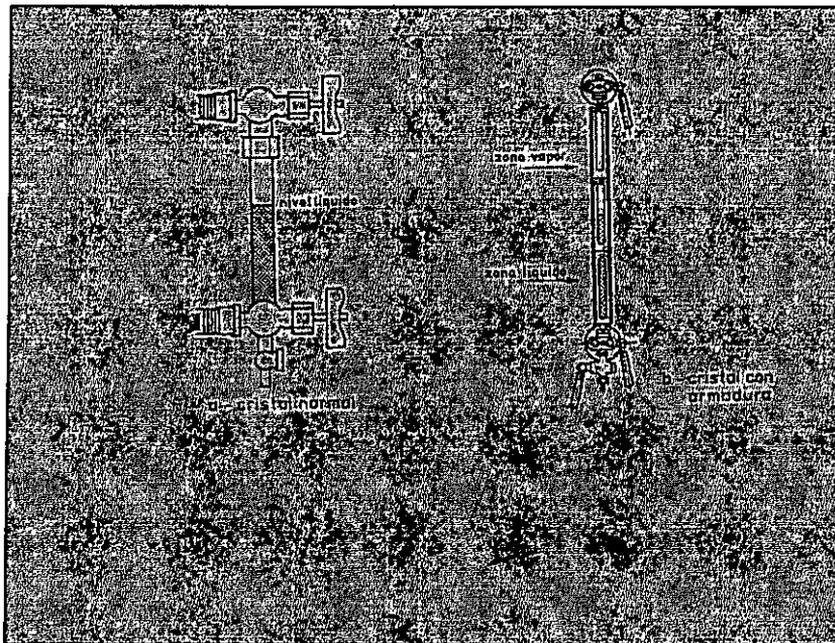


FIG 6.2.

TIPOS DE INDICADORES DE CRISTAL

El indicador consiste en un tubo de vidrio, en el caso del indicador de bajas presiones y de un vidrio plano en el caso del indicador para altas presiones, montadas entre dos válvulas, las cuáles se utilizan para sacar de servicio el indicador sin necesidad de parar el proceso.

El principio de funcionamiento se basa en los vasos comunicantes, es decir, el líquido del recipiente sube en el tubo de vidrio hasta que ambos niveles sean iguales.

La figura 6.3 muestra un arreglo sencillo usando un indicador de cristal.

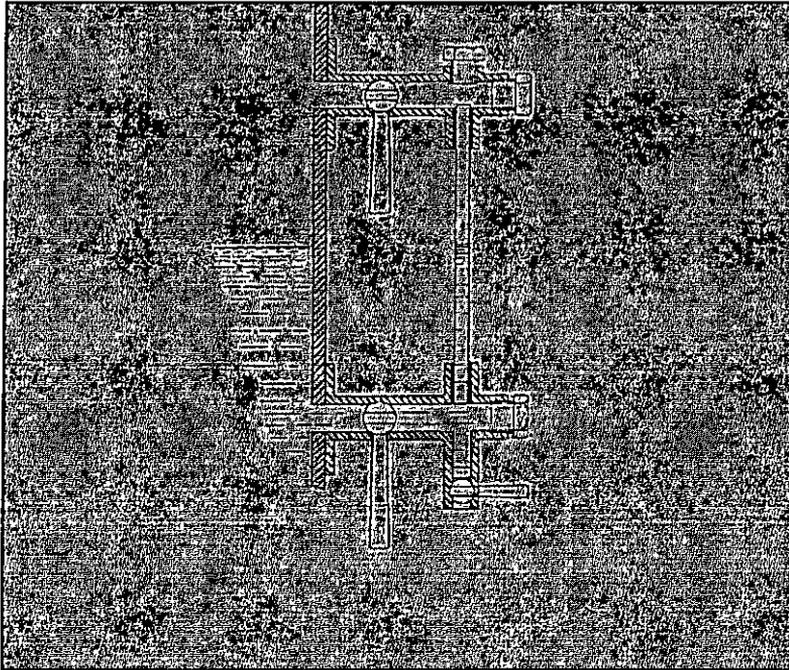


FIG 6.3

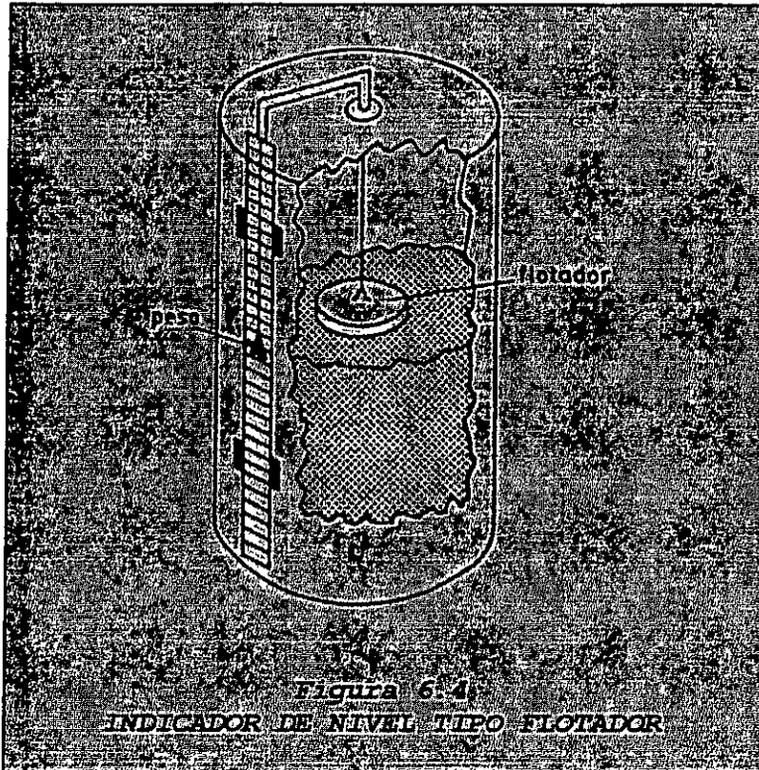
ARREGLO SENCILLO CON UN INDICADOR DE CRISTAL

Indicador por Flotador

Este tipo de medidor se utiliza cuando el nivel del recipiente se desea indicar localmente sobre una escala. Está compuesto por un flotador, un cable, poleas, una escala y un indicador.

El flotador está unido por medio de un cable, a través de un sistema de poleas, a un peso con una aguja indicadora, la cual señalará sobre una escala previamente calibrada el nivel del recipiente. Es de hacer notar que la indicación es inversa, es decir, si el recipiente está lleno el indicador estará en la parte más baja de la escala y si está vacío, en la parte más alta.

La figura 6.4 muestra uno de estos dispositivos, indicando todo sus componentes.



Ventajas y Desventajas: La aplicación de flotadores para medición y control de nivel del líquido presenta algunas ventajas y desventajas, mencionadas a continuación:

VENTAJAS

- Fácil instalación.
- Método de medición probado y confiable.
- No requiere calibración.
- Adecuado para aplicaciones en altas temperaturas, hasta 530°C.
- Adecuado para aplicaciones de altas presiones, hasta 5.000 psig.
- Turbulencia y espuma en la superficie del líquido no afectan de manera significativa la medición.

DESVENTAJAS

- El encostramiento o depósito de materiales sobre el flotador puede impedir la operación de algunos flotadores.
- La exactitud normalmente está limitada a $\pm \frac{1}{4}$ ".
- No son adecuados para aplicaciones de líquidos viscosos.
- Las partes móviles están sujetas a desgaste requiriendo mantenimiento frecuente.

MEDIDORES ACTUADOS POR DESPLAZADORES

Estos tipos de instrumentos se utilizan generalmente para llevar la medición a sitios remotos o para el control de nivel, aunque también pueden utilizarse como un indicador directo.

Están compuestos principalmente por un desplazador, una palanca y un tubo de torsión.

La figura 6.5 muestra los componentes básicos de uno de estos medidores. Como podemos observar, el objetivo principal de estos componentes, es convertir el movimiento vertical del desplazador en un movimiento circular del tubo de torsión.

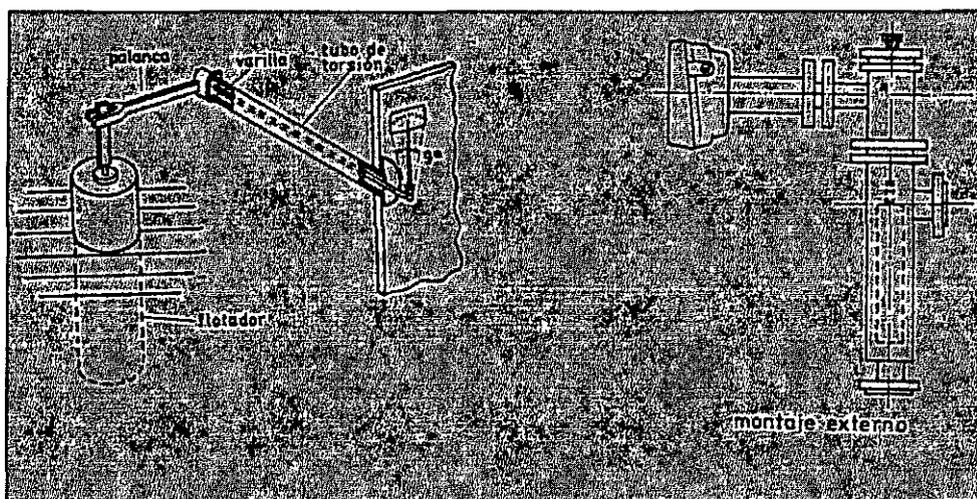


Figura 6.5
Medidor de nivel tipo desplazador

Figura 6.6
Torque producto del peso

El principio de funcionamiento se basa en el principio de Arquímedes y puede resumirse de la siguiente manera: el peso del desplazador ejerce una fuerza sobre el tubo de torsión (ver figura 6.6), pero al subir el nivel, el desplazador libera más líquido y éste ejercerá una fuerza o empuje sobre el desplazador, el cual se vuelve más liviano. Esto trae como consecuencia que el tubo de torsión gire debido a la disminución de la torsión, que el desplazador ejerce sobre él. Este giro es aprovechado acoplándole una aguja, que indicara el nivel directamente o acoplándolo a un sistema tobera-obturador para una indicación remota o para el control del nivel

El otro mecanismo utiliza un resorte sobre el cual está soportado el desplazador, tal como se muestra en la (figura 6.7). A medida que el desplazador pierde peso, la fuerza ejercida sobre el resorte disminuye haciendo que ésta se mueva. Este movimiento se utiliza para producir una señal proporcional al nivel o para activar un interruptor.

La fórmula utilizada para determinar el span de la fuerza de flotación para aplicaciones de nivel de líquido es:

$$F_b = V (LW/L) (B) (SG)$$

Donde:

F_b = Span de la Fuerza de Flotación (lbf o Newton)

V = Volumen total de desplazador (pulg.³ o cm³)

L_w = Longitud de trabajo del desplazador (pulgadas o mm)

L = Longitud total del desplazador (pulgadas o mm)

B = Constante (0.036 lbf/pulg ó 9.8 x 10⁻³ N/cm)

SG = Gravedad específica del fluido

Los desplazadores se diferencian de los flotadores en que en vez de flotar sobre la superficie del líquido, están soportados por brazos que les permite muy poco movimiento vertical a medida que el nivel cambia.

Todas las mediciones de nivel que utilizan desplazadores son mediciones de interfase, ya que la variable es el nivel entre dos medios que tienen diferente gravedad específica. La magnitud del movimiento del desplazador depende del cambio de interfase y de la diferencia de gravedad específica entre el medio superior e inferior.

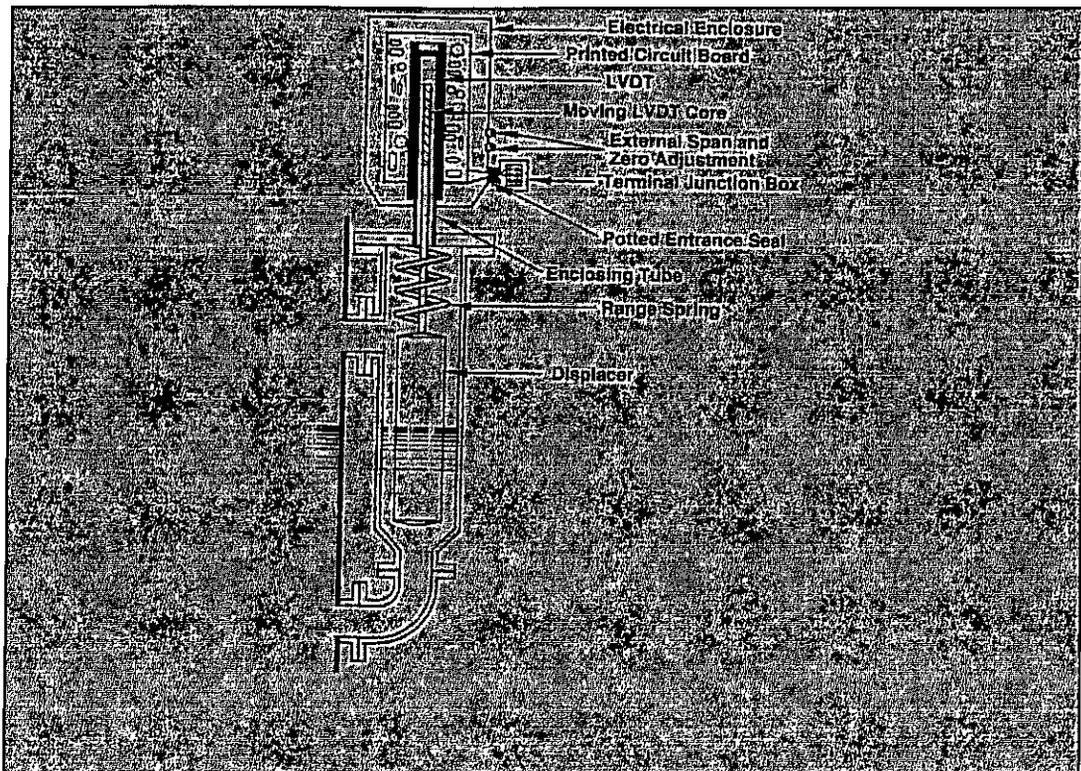


Figura 6.7 Principio de Operación de Desplazador con Mecanismo de Resorte.

En aplicaciones de nivel de líquido, la medición se realiza a medida que el líquido varía sobre la longitud total del desplazador. Las longitudes estándar de desplazadores van desde 0.3 hasta 3 metros (11.8 hasta 118 pulgadas). En aplicaciones de nivel de interfase, la medición se realiza a medida que el nivel de interfase entre dos líquidos inmiscibles de diferente gravedad específica, varía a lo largo de la longitud total del desplazador. Los desplazadores también pueden ser utilizados para medir densidad de líquidos; en este caso la medición se realiza con el desplazador completamente sumergido.

Al igual que los flotadores, los desplazadores también se utilizan en aplicaciones de alarmas o control ON-OFF. En vez de un flotador que activa un interruptor en respuesta a un cambio en el nivel de líquido, los desplazadores se conectan a un resorte por medio de un cable de suspensión, tal como se muestra en la figura C. El cambio en la fuerza ejercida sobre el resorte, debido a la pérdida de peso del desplazador, activa un interruptor; el cual a la vez activa una alarma o, arranca o para una bomba. También existen configuraciones de interruptores dobles o triples con los cuales se puede controlar más de una bomba o configurar más de un punto de alarma.

Ventajas y Desventajas: Las ventajas y desventajas en la aplicación de desplazadores para medición de nivel son las siguientes:

VENTAJAS

- Instalación sencilla
- Principio de operación confiable y probado
- Calibración Para trabajar a altas Presiones y temperaturas (5.000 psig, 540°C)
- No lo afectan la turbulencia ni la espuma.

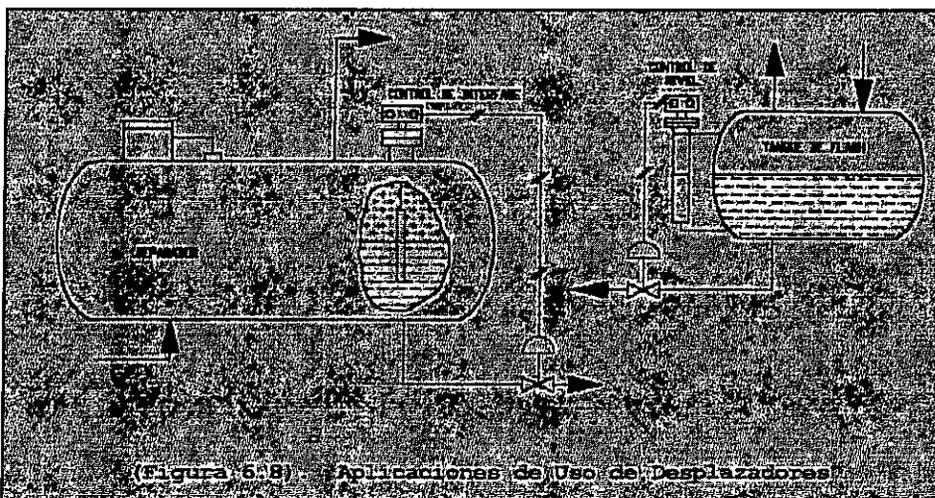
DESVENTAJAS

- Es afectado por depósito de materiales sobre el desplazador
- La exactitud normalmente está limitada a $\pm \frac{1}{4}''$
- No es apropiado para líquidos viscosos
- Partes móviles sujetas a desgastes
- La medición es afectada por los cambios en la gravedad específica del fluido

Aplicaciones:

- Medición de nivel de líquidos de gravedad específica constante.
- Medición de interfase líquido-líquido.
- Control de bombas.
- Interruptores para señal de alarma.

En la (figura 6.8) se muestran algunas aplicaciones de los desplazadores



MEDIDORES ACTUADOS POR ULTRASONIDO

Se utilizan en los mismos servicios donde los medidores actuados por radiación encuentran aplicación. Constan básicamente de una fuente emisora- receptora, instalada en el fondo del recipiente.

Este emisor o transmisor envía ondas sonoras de alta frecuencia, que chocan con las superficies del liquido y regresan al receptor. El tiempo que tardan las ondas en salir del emisor y regresar, depende de la altura del liquido, la cual es señalada en un indicador de nivel.

La figura 6.9 muestra esquemáticamente la disposición de estos tipos de medidores.

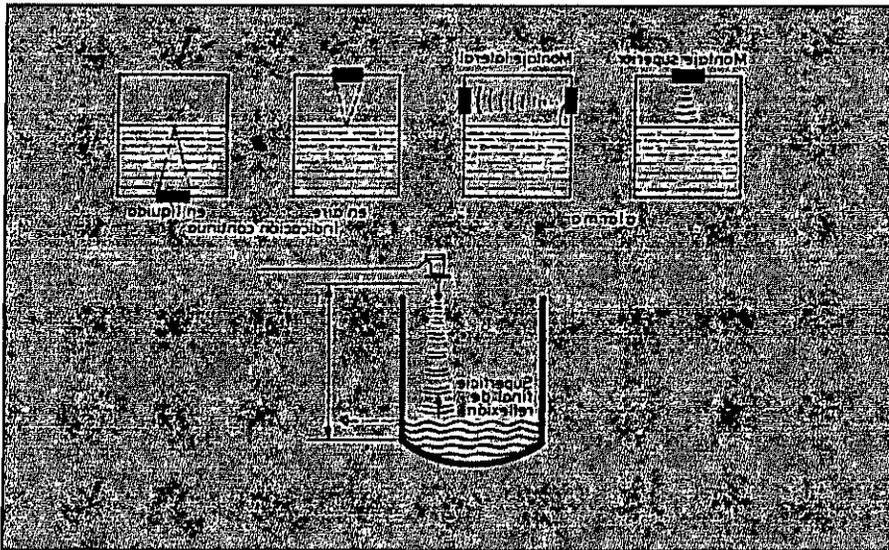


FIGURA 6.9
MEDIDORES DE NIVEL POR ONDAS ULTRASÓNICAS

MEDIDA DE NIVEL

Una de las aplicaciones más frecuentes de los transmisores de presión y presión diferencial consiste en la medición de nivel en tanques u otros recipientes. En este caso, lo que se mide es la presión hidrostática, cuyo valor es igual al producto de la altura de la columna de líquido por su densidad. La presión es independiente del volumen del recipiente.

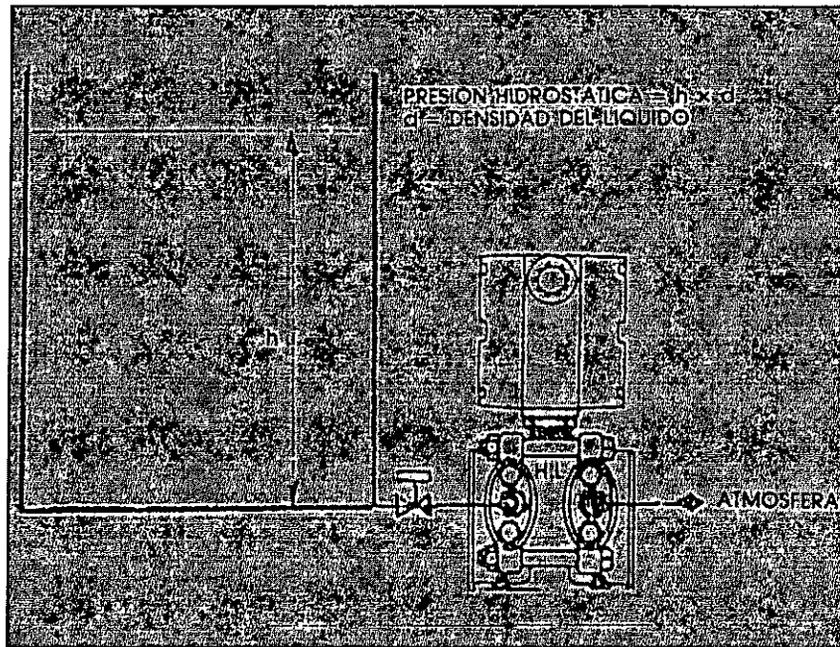


Figura 6.10
Medida de Nivel

Los tipos de instalación más habituales son:

Tanques o recipientes abiertos: se consideran como tales, a aquellos a presión atmosférica, es decir, que de alguna forma estén comunicados con la atmósfera.

Transmisor instalado en la parte inferior del tanque

La altura total del nivel de líquido en el interior del recipiente se calcula a partir de la relación:

$$\text{Presión hidrostática} = h * d$$

siendo **d** la densidad del líquido y **h** la altura del mismo en el interior del tanque.

La conexión al transmisor se realiza en el lado de alta presión del mismo, dejando el de baja presión abierto a la atmósfera.

En el caso de que se desee medir el nivel a partir de un cierto punto del tanque, se debe suprimir el cero en el transmisor, lo que en el transmisor se realiza de forma simple, ajustando el control externo de cero situado bajo la placa de características. Esta supresión queda limitada al 500 % del SPAN.

Ejemplo (figuras 6.11 y 6.12)

Sea **X** = distancia entre niveles máximo y mínimo que puedan medirse = 10 metros c.a.

Y = distancia entre el punto de instalación del transmisor y el nivel mínimo que pueda medirse = 1 metro c.a.

d = densidad del líquido = 0,9

h = máxima presión a medir en mm c.a.

e = presión producida por **Y** expresada en mm c.a.
Rango de medida = desde **e** hasta **e + h**

$$h = Xd = 10.000 * 0,9 = 9.000 \text{ mm c.a.}$$

$$e = Yd = 1.000 * 0,9 = 900 \text{ mm c.a.}$$

Rango de medida = desde 900 mm c.a. hasta 900 + 9.000 mm c.a

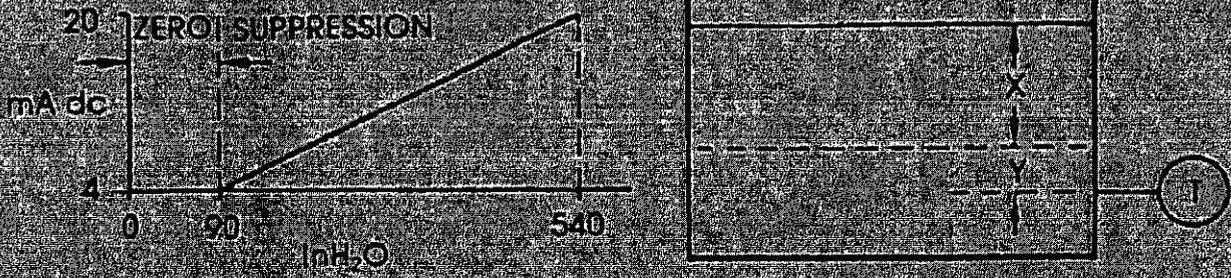


Figura 6.11
TRANSMISOR SITUADO POR DEBAJO DEL FONDO DEL TANQUE

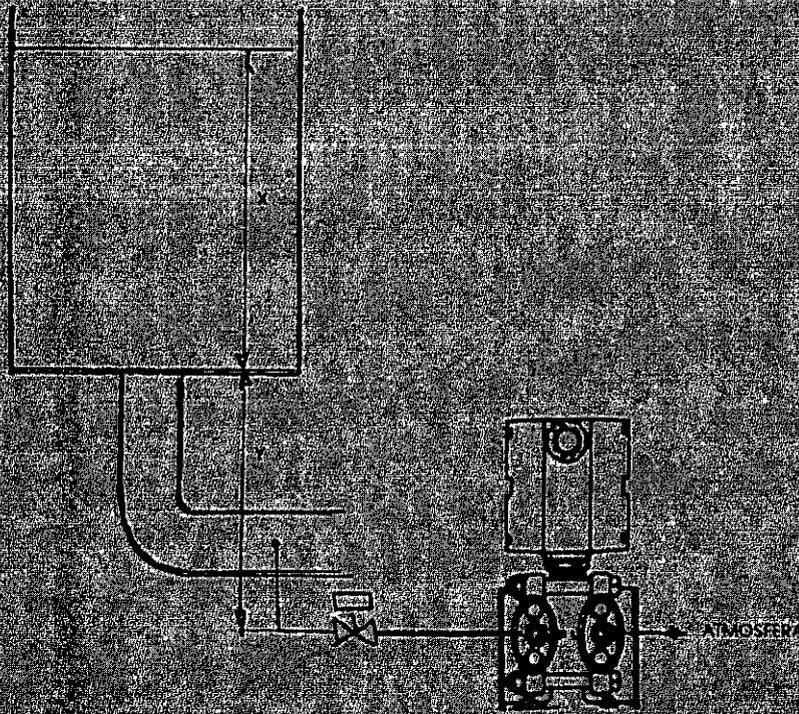


Figura 6.12
TRANSMISOR SITUADO POR DEL FONDO DEL TANQUE

Transmisor instalado en la parte inferior del tanque

Es frecuente que en balsas o depósitos enterrados no pueda situarse el transmisor en la parte superior, en tal caso y disponiendo de aire comprimido, se puede realizar el montaje de la figura 6.13, que consta de un transmisor electrónico de presión, un regulador de purga (caudal) y un tubo que se introduce en el tanque o recipiente.

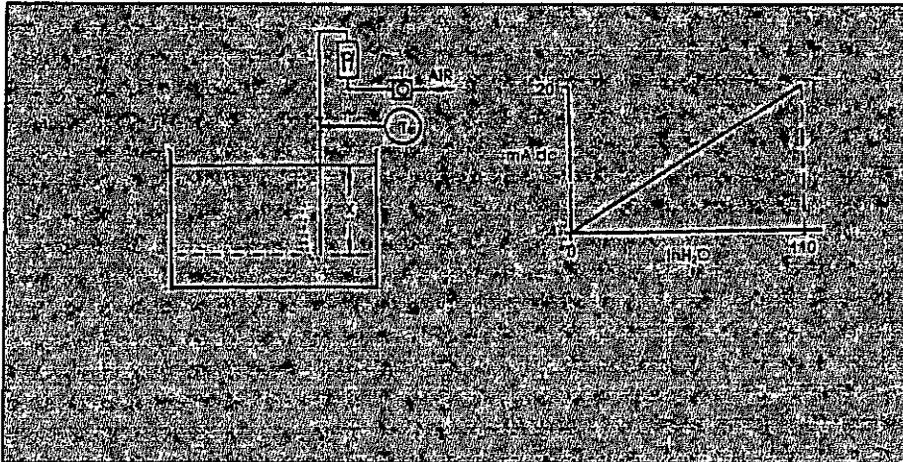


Figura 6.13
MEDICION POR BURBUJEO

El aire sale por la parte inferior del tubo, burbujando en el líquido contenido en el tanque, a caudal constante. La presión requerida para mantener dicho caudal es la correspondiente a la altura de la columna de líquido situada por encima de la boca de salida del tubo, multiplicada por la densidad del mismo.

Ejemplo (figura 6.13)

Sea **x** = distancia entre los niveles mínimo y máximo que se desee medir = 10 m. c.a.

d = densidad del fluido = 1,1

h = máxima presión de la columna a medir, expresada en mm c.a.

Rango de medida = desde cero hasta h

$$h = Xd = 10 * 1.000 * 1,1 = 11.000 \text{ mm c.a.}$$

Rango de medida = desde 0 hasta 11.000 mm c.a

Como es natural, antes de utilizar este sistema, es necesario verificar si el líquido contenido en el tanque puede estropearse por el contacto de aire. Si así fuera existen diafragmas separadores que generan una señal neumática de relación 1:1 con presión de la columna de líquido.

Tanques o recipientes cerrados

En el caso de recipientes cerrados (aislados de la atmósfera), la presión del aire o gas contenido en la parte superior, por encima del líquido a medir, se sumará a la de la columna del mismo medida en la parte inferior, siendo por tanto necesario restarla mediante la utilización de ambas tomas del transmisor diferencial.

A este fin, se conecta la toma (+) a la parte inferior del tanque, en contacto con el líquido, y la toma (-) a la parte superior, en contacto con el gas situado por encima del nivel del líquido a medir. Al aplicarse la misma presión de dicho gas en ambas cámaras del transmisor, se anula, siendo la señal generada por el mismo proporcional a la presión del líquido exclusivamente. Como en los casos anteriores, la presión será igual a la altura del líquido multiplicada por su densidad.

El cálculo para determinar el rango del transmisor es el mismo que en el caso de tanques abiertos.

Tanque cerrado conteniendo gases condensables

Si el gas o vapor contenido en la parte superior del tanque se condensa en el interior del tubo de conexión a la toma (-) del transmisor, dicho tubo se irá llenando de líquido progresivamente. La presión producida por ese líquido se sumará a la del gas, produciendo como consecuencia un error en la medición del nivel.

Para evitar este inconveniente, se llena a propósito desde el principio el tubo con un fluido que resulte adecuado, ajustándose el transmisor mediante la elevación del cero. Esta elevación podrá alcanzar un valor máximo del 600 por 100 del SPAN en el transmisor.

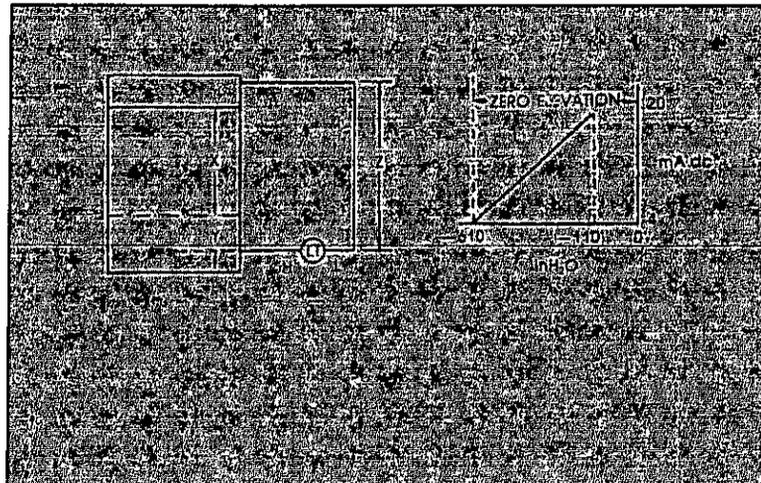


Figura 6.14
TANQUE CERRADO CON VAPORES CONDENSABLES

Ejemplo (figura 6.14)

- Sea
- $x =$ distancia entre los niveles máximos y mínimos que se deseen medir = 5 metros
 - $y =$ distancia entre el centro del diafragma del transmisor y el mínimo nivel a medir = 500 mm
 - $z =$ distancia vertical entre la parte superior del líquido alojado en el interior del tubo conectado a la toma (-) del transmisor y el centro del diafragma del mismo = 6 m.
 - $d_1 =$ densidad del líquido del tanque = 1,0
 - $d_2 =$ densidad del líquido del tubo = 1,1
 - $h =$ máxima presión de columna en mm c.a
 - $e =$ presión producida por y , expresada en mm de columna de agua
 - $s =$ presión producida por z , expresada en mm de columna de agua

El rango será = $(e - s)$ a $(h + e - s)$

Luego,

$$h = x d_1 = 5 * 1.000 * 1 = 5.000 \text{ mm c.a.}$$

$$e = y d_1 = 500 * 1 = 500 \text{ mm c.a.}$$

$$s = z * d_2 = 6 * 1.000 * 1,1 = 6,600 \text{ mm c.a.}$$

$$\begin{aligned} \text{Rango} &= (500 - 6,600) \text{ a } (5.000 + 500 - 6.000) \\ &= -6.100 \text{ hasta } -1.100 \text{ mm c.a.} \end{aligned}$$

Es conveniente dotar de una inclinación hacia el tanque al tramo horizontal superior del tubo, con objeto de mantener constante el nivel del líquido contenido en el mismo, que así quedará limitado al tubo vertical.

SENSORES DE NIVEL RADIOACTIVOS

En este tipo de sensores, una fuente radiactiva emite un haz de rayos (gamma, alfa) que viaja a través del tanque y de su contenido, hasta un detector ubicado en el lado opuesto. En el detector existe un contador Geiger que produce un impulso eléctrico en respuesta a cada fotón que llega al detector. Estos pulsos son integrados y transformados en una señal de corriente directa proporcional a la radiación recibida en el contador. Si el nivel del material en el recipiente está por debajo del haz de rayos, la radiación recibida en el contador es mayor que cuando el material está en la trayectoria del rayo. En la figura 6.15 se ilustra el principio de operación de estos sensores.

Los sensores de nivel de tipo radiactivo pueden ser utilizados para medir niveles límites o nivel continuo. Pueden ser utilizados para detectar el nivel de la mayoría de los líquidos, sólidos o material viscoso almacenado en un recipiente. Todos los elementos del sensor son externos al recipiente; de modo que la presión la temperatura, materiales altamente viscosos, corrosivos, abrasivos o muy pesados no afectan al sistema de medición.

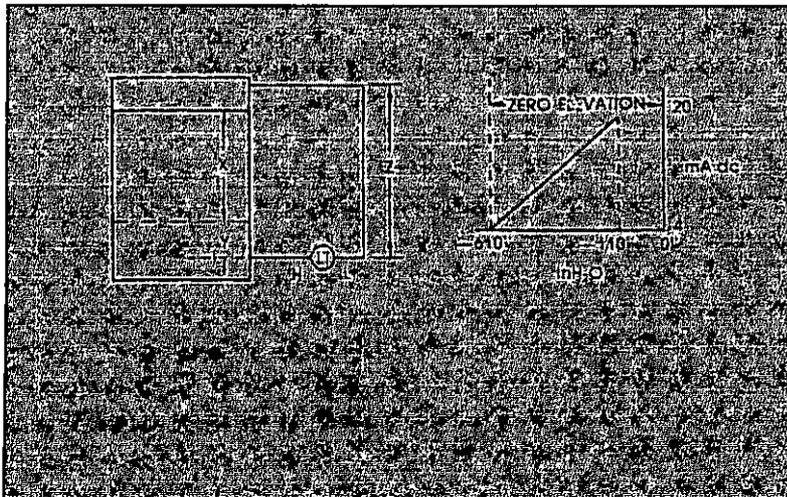


Figura 6.15. Sensor de Nivel de Rayos Gamma

El material radiactivo del sensor está contenido en una doble cápsula de acero inoxidable soldada, de modo que en ningún caso hay peligro de que pueda escapar dicho material. Debido a que el material radiactivo irradia en todas direcciones, se le coloca en el interior de un cabezal productor que permite la salida de radiación por un sólo lado, precisamente sólo en la dirección en que está situado el detector.

SENSORES TIPO MICRO-ONDAS (RADAR)

Un sensor de nivel de tipo micro-ondas es un sensor no intrusivo. El sistema de medición está formado principal por un módulo electrónico de micro-ondas, una antena, sensores adicionales (principalmente sensores de temperatura) y una unidad local o remota de indicación, tal como se muestra en la figura 6.16 - 6.17

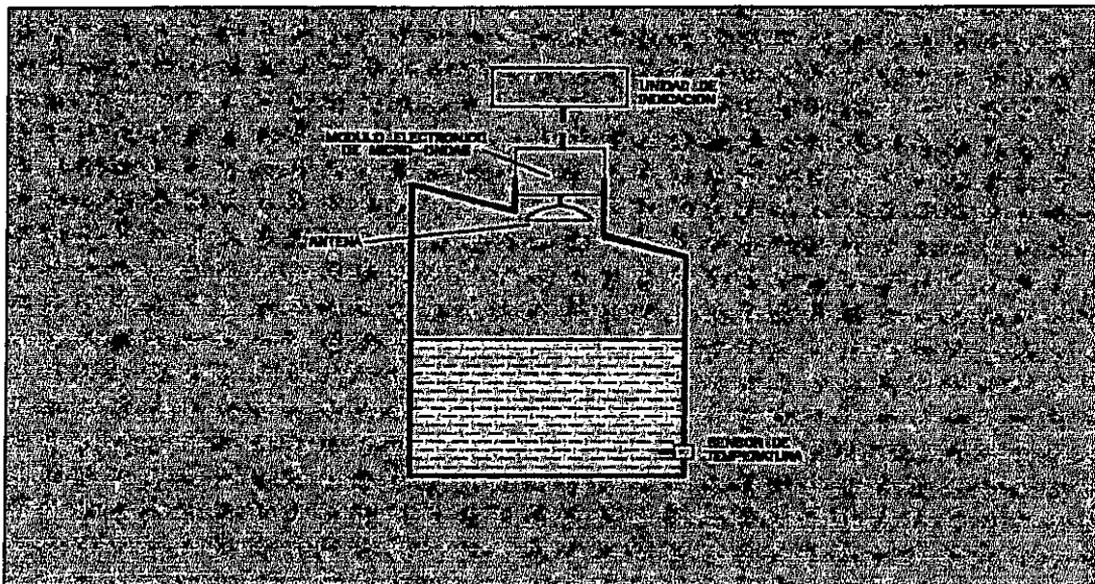


Figura 6.16 Componentes de un Sistema de Medición por Radar



Figura 6.17 Tipos de Antena

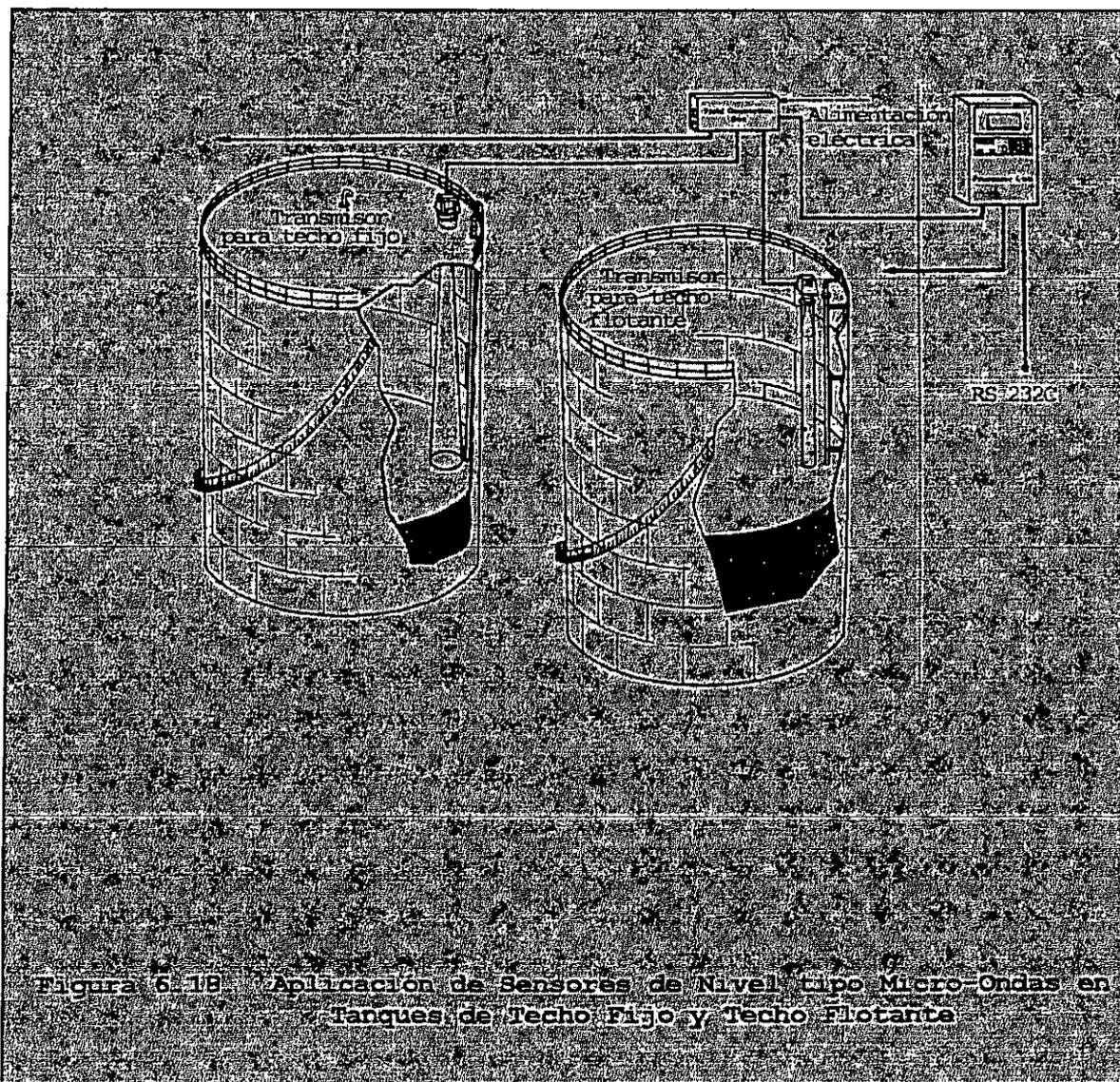
El principio de operación está basado en el cambio de frecuencia de la señal de radar emitida hacia la superficie del líquido. La señal reflejada por la superficie del líquido en el recipiente tiene una frecuencia diferente a la de la señal transmitida.

Esta diferencia de frecuencia es proporcional a la distancia que existe entre el transmisor y la superficie del líquido.

La señal de micro-ondas es emitida por una antena la cual direcciona la señal perpendicularmente hacia la superficie del líquido. Existen dos tipos principales de antena:

La antena parabólica y la antena tipo corneta, tal como se muestra en la figura.6.17

Algunas aplicaciones incluyen: medición de nivel de productos de hidrocarburos, asfalto, químicos, gas natural licuado (GNL). También se puede medir el nivel en tanques de techo fijo y tanques de techo flotante, en la industria petrolera y petroquímica. La figura muestra un detalle de este tipo de instalación.



CÓMO ESCOGER EL MEDIDOR DE NIVEL APROPIADO

Tipo	Principal Aplicación	Ventajas	Inconvenientes
Flotador	Líquidos en general	Sencillo, preciso y de bajo costo.	Tiene partes móviles que pueden sufrir roturas, desgastes, la suciedad puede impedir el movimiento del flotador.
Desplazamiento	Líquidos en general	Puede distinguir entre líquidos de distinta densidad y detectar la zona de separación entre ellos.	Similares a los que presenta el empleo del flotador pero en menor grado, porque los desplazamientos son menores o casi nulos.
Peso	Toda clase de materiales	Indica directamente el contenido de producto. Puede ser muy preciso.	Las soluciones más precisas son caras y difíciles de instalar. La medida de nivel sólo es correcta si no varía la densidad.
Presión	Líquidos en general	Robusto, preciso y de respuesta rápida. Existen soluciones para líquidos muy agresivos.	La medida sólo es correcta si no varía la densidad.
Sonda electromecánica, paletas rotativas	Principalmente sólidos	Existen soluciones para rocas, granos, líquidos muy viscosos.	Generalmente tienen partes móviles que pueden sufrir roturas, desgaste. Deben protegerse contra la caída de sólidos sobre el detector.
Conductividad eléctrica	Materiales conductores normalmente líquidos	Bajo costo. Puede distinguir entre líquidos más o menos conductores.	Limitado a ciertos materiales y a detectores todo o nada (ON/ OFF)
Capacidad	Toda clase de materiales	Bajo Costo	Poco preciso. Debe calibrarse para cada sustancia, El material que se adhiere a la sonda y las burbujas pueden causar errores.
Métodos ópticos, barrera, reflexión y refracción .	Principalmente líquidos	Bajo costo. Puede distinguir sustancias por sus distintas propiedades ópticas.	Limitado a detectores por todo o nada. La suciedad puede impedir su funcionamiento.
Radar, Sonar	Toda clase de materiales,	No hay contacto con el producto. Puede	Poco precisos. Posibles problemas por ecos

	especialmente los muy agresivos o los que deben protegerse de la contaminación	medirse distancias de varias decenas de metros.	parásitos.
Radioactivo	Toda clase de materiales especialmente los más agresivos.	No hay ningún contacto con el producto o sus vapores, ya que puede actuar a través de las paredes del depósito.	Poco preciso. Se utilizan materiales radioactivos.

MEDIDA DE DENSIDAD Y PH

INTRODUCCIÓN;Error! Marcador no definido.

El transmisor puede ser utilizado para medir densidad en línea o en depósitos, por comparación con el agua mediante artificios que permitan mantener constante el volumen de líquido a medir, de forma que las variaciones de presión sean función de las de densidad.

Medida de densidad en línea

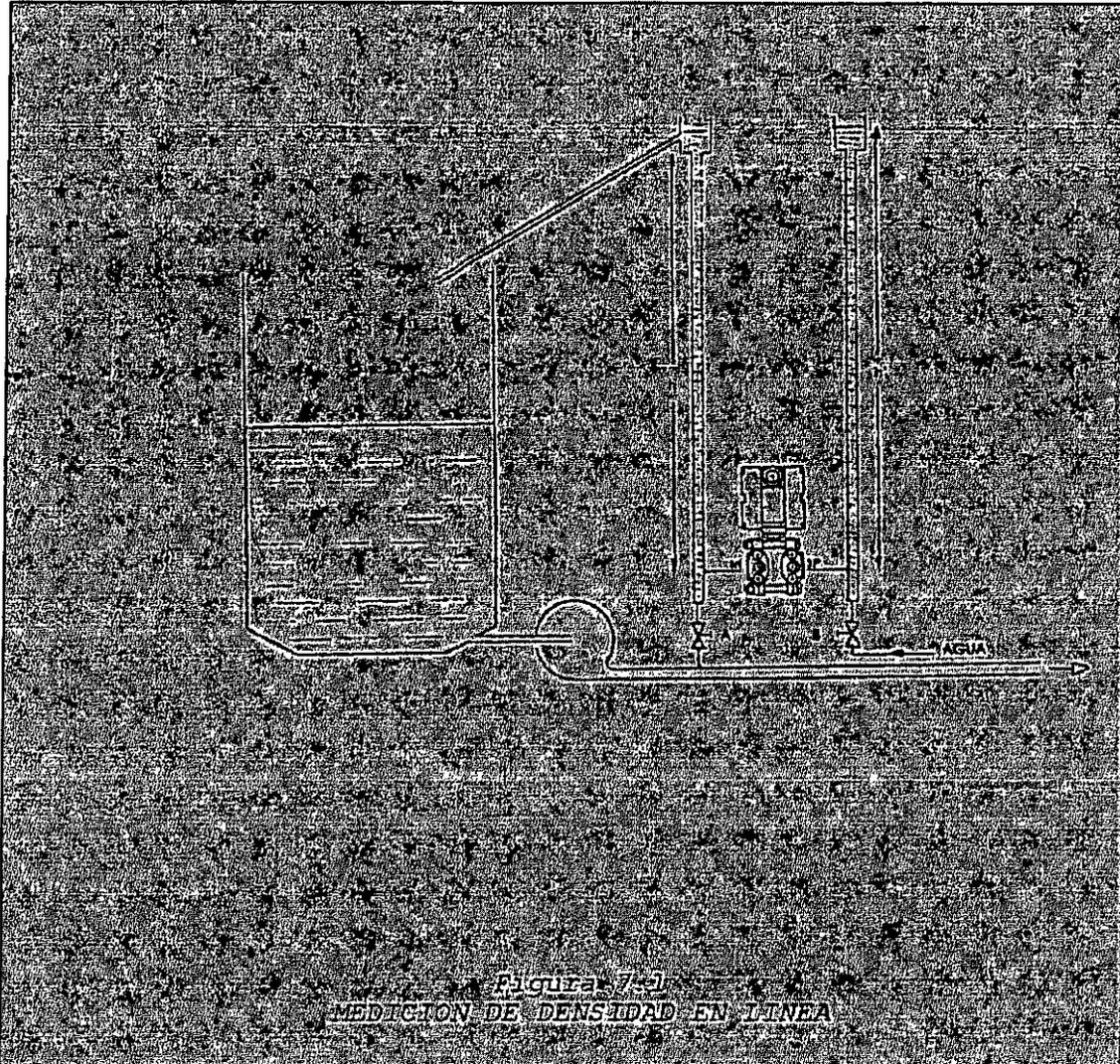
La medición de densidad en este caso se realiza por comparación con agua u otro líquido de densidad conocida y constante, como se muestra en la figura 7.1.

Las válvulas A y B deberán reglarse de manera que los caudales correspondientes no creen pérdida de carga apreciable en los conductos superior a 0,5% de la diferencia de presiones. Por otra parte, el caudal del fluido a medir no debe descender por debajo de un valor en función del tiempo de respuesta mínimo permitido.

$$T_{\min} = \frac{\text{Vol. de la columna}}{\text{caudal}}$$

Si $T = 1$ y el volumen = 500 cm³, el caudal mínimo será 0,5 l/m, o lo que es lo mismo, 30 l/h.

$$\text{Pres. dif. media} = HP - BP = (h \times \delta) - (h' \times 1)$$



h y h' no tienen necesariamente que tener la misma longitud, pudiendo realizarse mediante la elevación del cero en el transmisor, las correcciones de escala necesarias. Sin embargo, si las columnas son iguales, la ventaja es que los coeficientes de dilatación serán idénticos ante las variaciones de temperatura ambiente. Como es natural, deberá procurarse mantener ambas columnas a la misma temperatura.

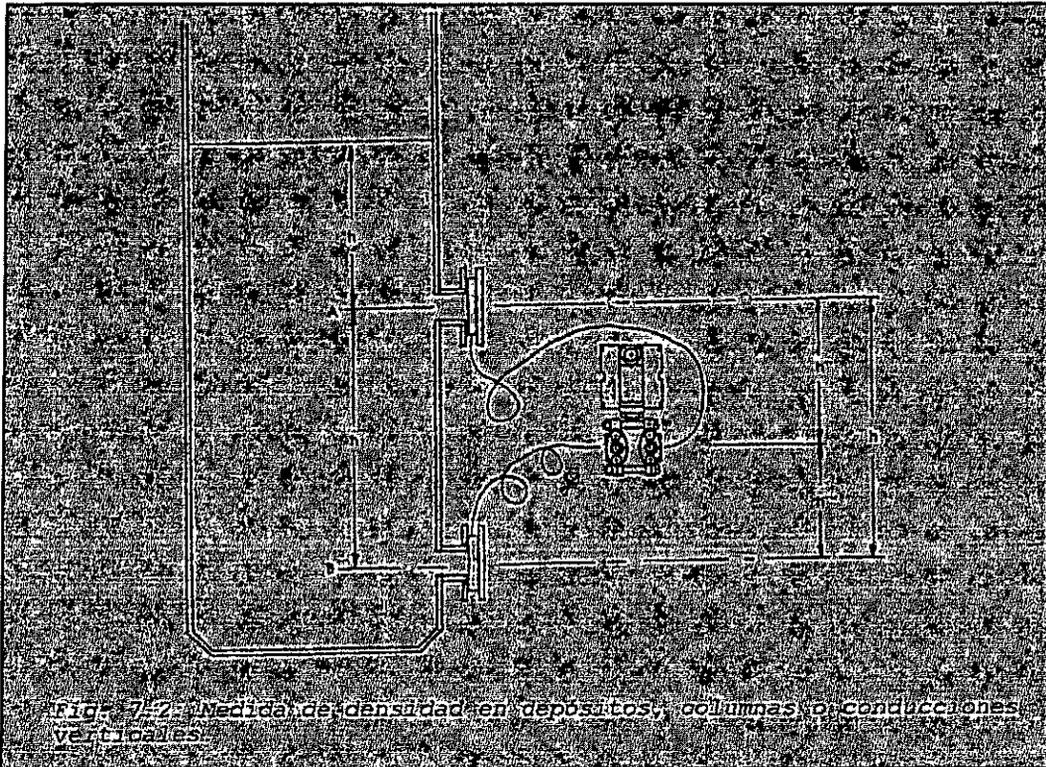
Ejemplo: medición de densidad de 1 a 1,2; tomemos $h=h'=2m$

$$\text{Pres. dif. max.} = (2 * 1,2) - (2 * 1) = 0,4 \text{ metros c.a.}$$

luego se deberá utilizar un transistor DP

MEDICIÓN DE DENSIDAD EN TANQUES, COLUMNAS O CONDUCTOS VERTICALES

Es posible utilizar la disposición que se muestra en la figura 7.2 para medir densidad en tanques o columnas verticales, siempre que la pérdida de carga debida a la circulación del fluido entre A y B sea despreciable y el nivel no descienda jamás por debajo del punto A.



Sea δ = densidad del fluido a medir.

δ' = densidad del líquido de relleno de capilares y separadores (si los hubiera)

$$\text{Pres. dif.} = HP - BP$$

$$HP = h' * \delta + h * \delta - h''' * \delta'$$

$$BP = h' * \delta + h'' * \delta'$$

$$HP - BP = h' * \delta + h * \delta - h''' * \delta' - h' * \delta - h'' * \delta'$$

$$\text{Pres. Dif.} = h * \delta - (h''' + h'') * \delta' = h * \delta - h * \delta'$$

$h * \delta'$ es un factor constante, que se elimina mediante el decalaje del cero en el transmisor, luego la presión diferencial es proporcional a la densidad del fluido.

MEDIDA DE PH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad del agua. Su expresión viene dada, por el logaritmo de la inversa de la concentración del ión H expresada en moles por litro.

$$pH = \log \frac{1}{[H+]}$$

Señalemos que el agua pura neutra tiene una concentración de ion hidrogeno de 10^{-7} moles por litro. Luego el pH será

$$pH = \log \frac{1}{10^{-7}} = 7$$

Una disolución ácida tiene mayor concentración de ión hidrógeno que el agua pura y por lo tanto su pH será y menor de 7. Una disolución básica le ocurre a la inversa y su pH será mayor de 7. Las medidas prácticas de pH se encuentran entre los valores 0 a 14. En la tabla 7.1 figuran las concentraciones de varios tipos de solución con su pH correspondiente.

En la medida de pH pueden utilizarse varios métodos, entre los cuales el más exacto y versátil de aplicación industrial es el sistema electrodo de vidrio.

pH	Concentración H ⁺ Mols/litro	Concentración OH ⁻ Mols/litro	pH de productos alimenticios comunes	pH de reactivos químicos a 25°C
0	1	0.000000000001		Acido sulfúrico 18% (1.0N)
1	0.1	0.00000000001		Acido clorhídrico 0.37% (0.1N)
2	0.01	0.00000000001	Jugo de limón	Acido acético 0.5% (0.05N)
3	0.001	0.00000000001	Jugo de naranja	
4	0.0001	0.00000000001	Cerveza	
5	0.00001	0.00000000001	Queso	Acido nítrico 0.27% (0.01N)
6	0.000001	0.00000000001	Leche	
7	0.0000001	0.00000000001	Agua pura	
8	0.00000001	0.000001	Burros blancos	Bicarbonato sódico 0.84% (0.01N)
9	0.000000001	0.00001	Borax	Acetato de potasio 0.98% (0.01N)
10	0.0000000001	0.0001	Magnesia	
11	0.00000000001	0.001		Amoníaco 0.017% (0.001N)
12	0.000000000001	0.01		Ambiacón 0.7% (1.0N)
13	0.0000000000001	0.1		Sosa cáustica 0.04% (0.01N)
14	0.00000000000001	1		Sosa cáustica 4% (1.0N)

Tabla 7.1 Valores de pH de varias soluciones

El electrodo de vidrio consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidrógeno del pH.

En la parte interna de esta membrana se encuentra una solución de cloruro tampón de pH constante dentro de la cual está inmerso un hilo de plata recubierto de cloruro de plata.

Aunque el mecanismo que permite que el electrodo de vidrio mida la concentración de ion hidrógeno no es exactamente conocido, está establecido que al introducir el electrodo en el líquido se desarrolla un potencial relacionado directamente con la concentración del ion hidrógeno del

liquido. Es decir, si esta concentración es mayor que la interior del electrodo existe un potencial positivo a través de la punta del electrodo y si es inferior, el potencial es negativo.

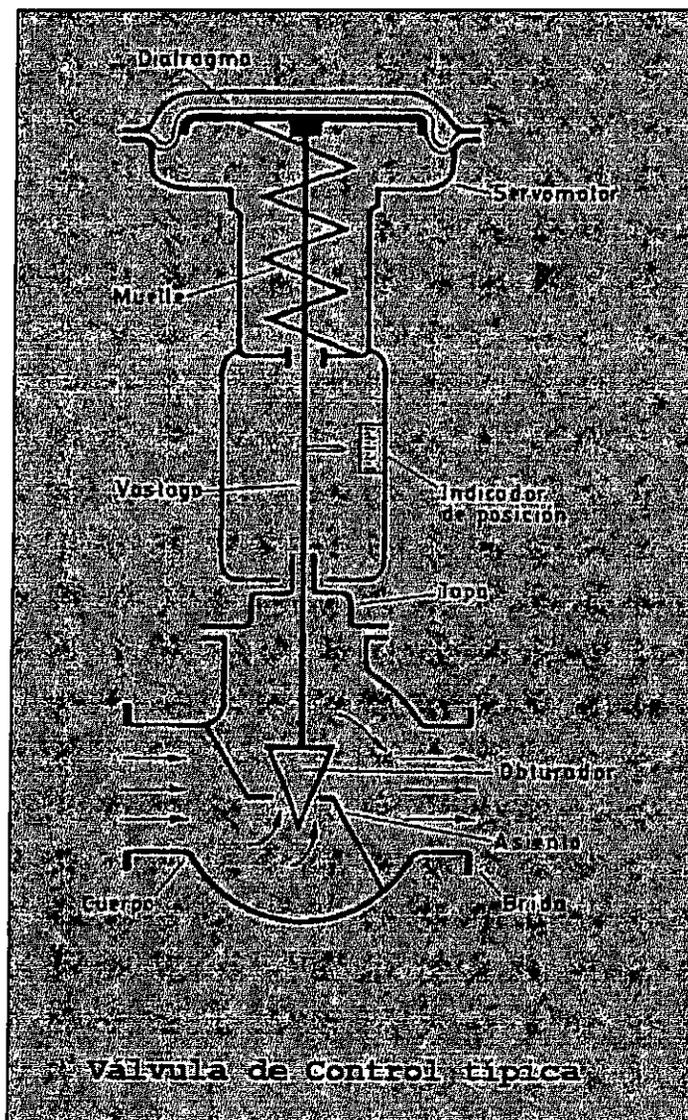
Este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54,2 mV a 0 °C a 74 mV a 100 °C por unidad de pH. Para medir el potencial desarrollado en el electrodo de vidrio es necesario disponer en la solución de un segundo elemento o electrodo de referencia. Este, aparte de cerrar el circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el potencial variable del electrodo de vidrio. El electrodo de referencia contiene una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata en contacto con un electrolito de cloruro de potasio. Este electrolito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida. De este modo, la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que por lo tanto proporciona una referencia estable de potencial.

VALVULAS DE CONTROL

TIPOS DE VÁLVULAS DE CONTROL

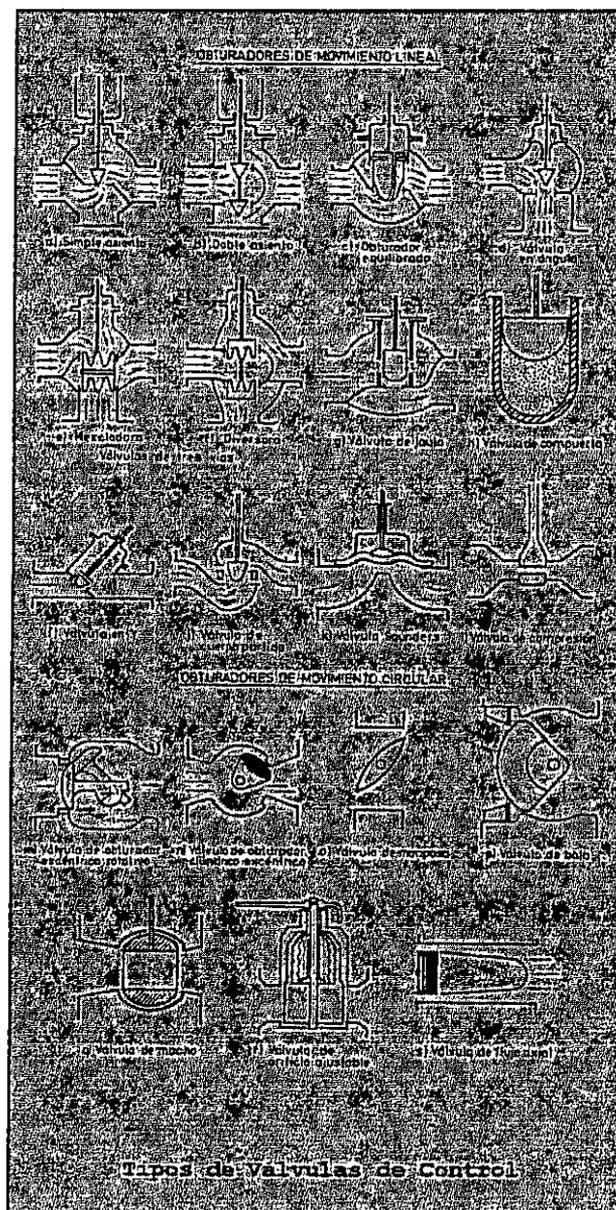
La válvula de control es uno de los elementos más importantes dentro del lazo de control y por supuesto, es el elemento que realiza en definitiva, la acción de control para lograr la automatización de los procesos industriales.

A continuación se presenta una válvula de control completa que cuenta fundamentalmente de dos partes: el cuerpo de la válvula y el servo-motor, llamado comúnmente, actuador.



El cuerpo de la válvula tiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o bridas, según sea la conexión en línea a usar. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y podrá actuar en la dirección de su propio eje o tener un movimiento rotativo. El obturador estará unido al actuador mediante el eje que tendrá el mecanismo adecuado al tipo de movimiento que deba tener el obturador.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se puede deducir, que tal y como sea el cuerpo de la válvula y su obturador respecto a su movimiento tendremos los siguientes tipos de válvulas:



A continuación se hará una breve descripción de cada una de ellas:

CON MOVIMIENTO EN LA DIRECCIÓN DE EJE:

Válvulas de Globo: podrán ser de simple o doble asiento, en el segundo caso, con obturador equilibrado. Las de simple asiento son para presiones diferenciales bajas y las de doble asiento podrán trabajar a presiones diferenciales altas o bajas.

Este tipo de válvulas proporcionan buen control y regulaciones bastante precisas, donde no se requiere su uso para fluido con sólidos en suspensión o fluido muy viscoso, donde éstas podrían quedar trancadas. Corresponden a las gráficas "a" y "b".

Válvula de Ángulo: similares a las de agujas, solo que serán más útiles que las anteriores para regular sin excesivas turbulencias y para disminuir la erosión del asiento en caso de que el fluido tenga partículas en suspensión y el diferencial de presión sea alto. Serán ideales también para fluido con tendencia al flashing (vaporización).

Las válvulas de ángulo corresponden a la gráfica "d".

Válvula de Tres Vías: usadas específicamente para derivar un caudal en dos o para el control de mezcla de dos fluidos. Corresponde a la gráfica "e" y "f".

Válvula de Jaula: el obturador cilíndrico tendrá una jaula protectora con orificios, que minimiza el defecto de desequilibrio de fuerzas, minimiza el ruido generado, y facilita el mantenimiento de la válvula. Se utiliza en válvulas de gran tamaño o cuando deba trabajar con altas presiones diferenciales. Estas válvulas pueden lograr el cierre hermético. Corresponde a la gráfica "g".

Válvula en Y: utilizada especialmente en instalaciones criogénicas como válvula de cierre y control. Es capaz de auto drenarse cuando es instalada en ciertos ángulos. Figura "i".

Válvula de Cuerpo Partido: es una válvula de globo con una adaptación mecánica especial, que consiste en que el cuerpo, está dividido en dos partes, entre las cuales se encuentra presionado el asiento del obturador. Esto permite un rápido reemplazo del mismo, para válvulas que están sometidas a mucho desgaste. Figura "j".

Válvula Saunders: el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago, unido a un servo-motor, es llevada hacia un saliente del cuerpo del cuerpo interno de la válvula, limitándose así el paso del fluido.

Se caracteriza porque usualmente estas válvulas se recubren interiormente de una superficie de goma o plástico para trabajar con fluidos muy ácidos o químicamente incompatibles con cualquier metal. También se utilizan para casos de fluidos con sólidos en suspensión. Figura "k".

VÁLVULAS CON OBTURADOR DE MOVIMIENTO CIRCULAR

Válvulas de Obturador Excéntrico Rotativo: con un obturador de superficie esférica, que tendrá un movimiento rotativo excéntrico y está unido al eje de giro por uno o dos brazos flexibles. Masoneilan, fabricante de válvulas, las clasifica con un nombre de patente llamado CAMFLEX, cuyas características son la de permitir un gran paso de caudal, con una excelente precisión de regulación y es capaz de manejar con facilidad grandes diferenciales de presión debido a su construcción. Figura "m".

Válvulas de Obturador Cilindro Excéntrico: tienen un obturador del tipo antes especificado, que se asienta contra otra superficie cilíndrica. Se puede garantizar el cierre hermético, siempre y cuando, se revista de teflón o goma la superficie del asiento. Tiene gran capacidad de manejo de caudales y es adecuada para fluidos muy viscosos, con sólidos en suspensión o corrosivo. Figura "n".

Válvula de Mariposa: su cuerpo es un anillo cilíndrico, dentro del cual gira transversalmente un disco circular, que en este caso es el obturador. Estas se utilizan para el manejo grandes caudales a bajas presiones, y adicionalmente, ocupa muy poco espacio en la línea. Figura "o".

Válvulas de Bola: la válvula tiene en su cuerpo una cavidad esférica, que alberga a un obturador de forma geométrica similar, que tiene una perforación perpendicular a la dirección del eje de giro. Puede tener cierre hermético con la adición de revestimientos en el interior del cuerpo de la válvula y es usada para el manejo de caudales con sólidos en suspensión. Este tipo de válvula debe ser usada cuando se requiera que la línea no tenga interferencias que impidan el paso de elementos internos de mantenimiento como los raspa tubos (cochinos). Figura "p".

Válvula de Orificio Ajustable, el obturador es una camisa de forma cilíndrica, que está perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida, que giran mediante la acción manual o motorizada exterior. Figura "r".

COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE UNA VÁLVULA

Se define como coeficiente de capacidad de una válvula, C_v , el caudal de agua en galones USA por minuto que pasa a través de una válvula en posición totalmente abierta y con una pérdida de carga de 1 psi.

Para el sistema métrico decimal, esta definición dirá así: Caudal de agua (entre 5 y 30 grados Celsius) en metros cúbicos por hora, que pasará por una válvula totalmente abierta con una pérdida de caudal de 1 Kg/cm^2 . A este término se le diferencia del sistema inglés denominándolo con la letra K_v .

La equivalencia entre ambos coeficientes son:

$$K_v = 0,86 C_v \text{ (m}^3\text{/h)}$$
$$C_v = 1,17 K_v \text{ (gpm)}$$

El cálculo del coeficiente C_v , se expone en copia del manual que para este fin editó Masoneilan, el cuál es uno de los pioneros y líderes de la fabricación de válvulas de control. Esta copia se encuentra al final de este tema.

Para el cálculo del coeficiente de capacidad de una válvula, deberán tenerse en cuenta dos posibles situaciones críticas que afectan que afectan el comportamiento del fluido y por consiguiente, al funcionamiento de la válvula que son: La Vaporización (FLASHING) y la Cavitación.

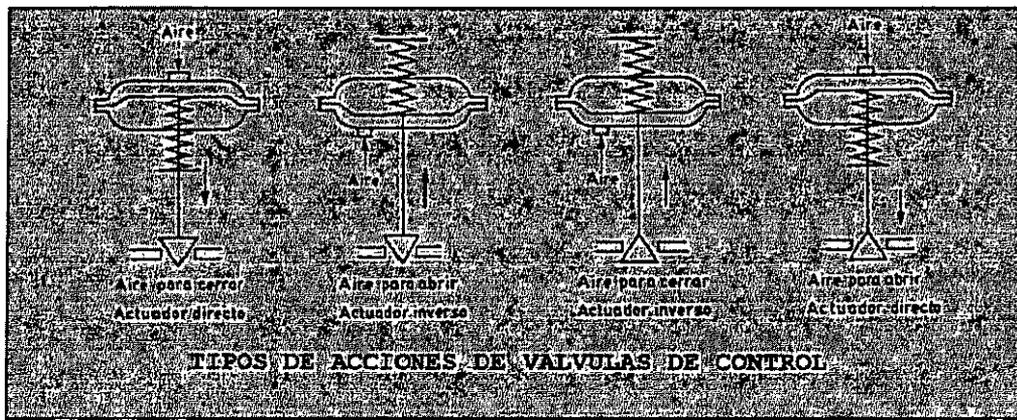
La Vaporización: consiste en el fenómeno que puede ocurrir eventualmente en el paso de un líquido por una válvula, donde todo él, pasa a la fase gaseosa o vapor. Esto puede ocurrir para fluidos muy volátiles o en condiciones de presión y temperatura cercanos al cambio de fase. En este caso las fórmulas para gases o líquidos no son directamente aplicables. Se utilizarán fórmulas empíricas, que son una aproximación a la solución del problema.

La Cavitación: consiste en el fenómeno en el cuál la vena contracta del fluido alcanza su máxima velocidad y su mínima presión. Si esta velocidad es tal que la presión del vapor del líquido es inferior a la del saturado, comienzan a formarse

burbujas que colapsan a la salida de la válvula. Si esa presión es superior a la de saturación del líquido, será necesario un cálculo especial, que aparece en el manual antes citado

TIPO DE ACCION DE UNA VALVULA

Según la acción de los cuerpos de las válvulas se dividen en: válvulas de acción directa, cuando tienen que bajar para cerrar, e inversa, cuando tiene que bajar para abrir. La misma división es aplicada a los actuadores de las válvulas, que son de acción directa cuando al aplicar aire éstos mueven el vástago hacia abajo y de acción inversa cuando al suministrar el aire el actuador se mueve hacia arriba.



Se considerara siempre la posición de la válvula sin aire sobre su diafragma, con el resorte manteniendo el diafragma, y por lo tanto en una posición extrema.

Otra forma de expresar el conjunto de válvulas actuador en función de su falla será como aire para abrir (ATO), cuando requiere aire para permitir el paso de flujo y se cierra sin éste y aire para cerrar (ATC), cuando requiere de aire para cerrar y sin este aire la válvula quedara totalmente abierta. Esta forma de denominar la acción de la válvula es la mas usada por los fabricantes de equipos.

TIPO DE FALLA DE UNA VALVULA

El tipo de falla de una válvula tendrá relación directa con el tipo de acción de la válvula y será un parámetro que se determinará en base a lo más conveniente para la seguridad del proceso y personas que rodeen. Existirán dos criterios de falla: falla abierta o falla cerrada.

CURVAS CARACTERISTICAS DE OPERACION

La Curva Característica de una válvula determina el comportamiento de apertura o cierre de una válvula respecto a las variaciones de la señal que éstas reciben, de tal

forma que se podrá seleccionar el más adecuado para lo requerido en nuestro proceso.

Existen muchos tipos de curvas de comportamiento de las válvulas, sin embargo, para nuestro estudio, sólo tomaremos en cuenta tres tipos fundamentales de curvas características de operación:

- Lineal
- Isoporcentual
- Cierre rápido

Para entender estos tipos de funciones, será necesario definir el termino Ganancia de la Válvula.

La Ganancia de una válvula viene expresada por la relación entre la variación del caudal de salida de una válvula y la variación de la señal de entrada:

$$G_v = dQ_s / dS$$

Las válvulas con curvas características lineales, tendrán una ganancia constante en el transcurso de todos los valores de la variable de proceso.

Las curvas con características Isoporcentual, tendrán una ganancia directamente proporcional al caudal de salida de ellas.

El uso de la característica de Cierre Rápido, se limita a casos donde esperamos solo situaciones extremas de control en el proceso, por lo cuál, su aplicación es muy limitada.

A pesar que lo ideal para un proceso, es que todos sus cambios puedan ser transferidos a funciones de respuesta lineal, ésto puede que no sea posible o indeterminado inicialmente. Por ello el tipo de curva característica mas usada es la Isoporcentual.

Servomotores o Actuadores.

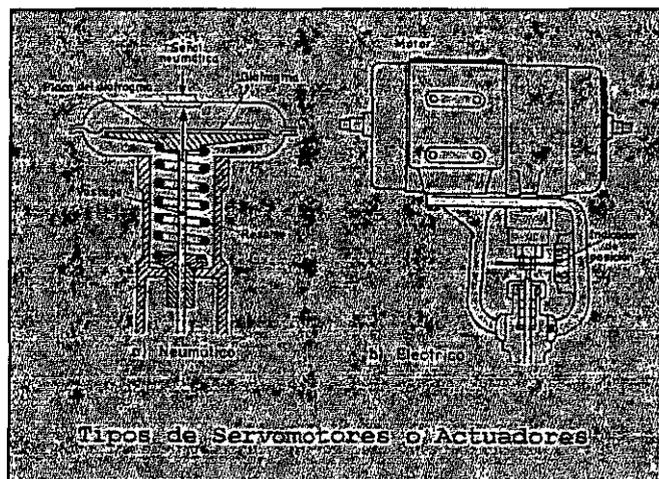
Los servomotores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos y digitales, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo. Puede afirmarse que el 90 % de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

Los servomotores hidráulicos consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

Las válvulas digitales disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas que, a su vez, son excitadas por la señal de salida binaria de un microprocesador. Su respuesta es muy rápida (una compuerta 500ms), y el grado de abertura depende de la combinación de las compuertas (8 compuertas darán 1,2,4,.....,128 relaciones de capacidad). Aunque estas válvulas están limitadas a fluidos limpios y no corrosivos, presentan interés para el mando digital directo, si bien su velocidad de apertura instantánea no representa una ventaja esencial frente a las válvulas neumáticas industriales (5 a 20 segundos según el tamaño), y su coste es elevado.

Los servomotores neumáticos consisten en un diafragma con resorte que trabaja entre 3 y 15 psi (0,2-1 bar), es decir, que la posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 psi. Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que se llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte.

Idealmente, con una señal de 3 psi (0,2 bar) la válvula debe estar en posición 0 de su carrera y para una señal de 15 psi (1 bar) en la posición 100. Asimismo, debe existir una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones.



PROYECTOS DE INSTRUMENTACION

Para la implementación de una planta y su puesta en marcha es absolutamente necesario definir un plan de actividades claramente descritas y de forma muy específica, de tal manera que el resultado final sea lo más parecido posible a lo deseado inicialmente.

A la serie de documentos, que definen como se desea realizar un determinado trabajo se les llama **Proyecto de Ingeniería**.

Todo comienza cuando un determinado inversionista (el Estado y/o la empresa privada) determina su decisión de producir algún tipo de insumo o servicio. en ese momento, comienza la primera etapa de la Ingeniería de Proyectos; a esta etapa se le denomina **Ingeniería Conceptual**.

Durante la Ingeniería Conceptual se determina con claridad que es lo que se desea producir, como producirlo y en que cantidad, para luego determinar en términos de costos la factibilidad de dicho proyecto, tomando como base fundamental el parámetro de la tasa de retorno de la inversión. Por supuesto, la Ingeniería en esta etapa trabaja en conjunto con las Finanzas y el Mercadeo.

Posteriormente, si el resultado de la Ingeniería Conceptual es exitoso, es decir, la factibilidad está dada, se procede con el proyecto en su siguiente etapa, que es la **Ingeniería Básica**.

El propósito fundamental de la Ingeniería Básica es el de convertir las necesidades conceptuales, en un proceso suficientemente detallado como para poder determinar el número y tipo de equipos principales con el fin de proceder a su pronta adquisición, evitando así, que los estimados de costo hechos en la Ingeniería Conceptual sean poco menos que válidos o reales.

Como resultado de esta actividad, surge una nueva necesidad en el proyecto, el definir con total precisión como van a ser conectados entre si los diferentes

equipos y que otras necesidades no previsibles en la Ingeniería Básica serán requeridos para el proceso total. A este nuevo grupo de actividades minuciosas se les llama **Ingeniería de Detalle**.

La Ingeniería de Detalle involucra la serie de necesidades dentro y fuera de una disciplina específica creando en definitiva los planos de como deberán ser instalados y puestos en marcha, los diferentes elementos de un proceso. Esto trae consigo la adquisición de materiales de instalación y de equipos no determinados durante la Ingeniería Básica.

Luego de finalizada la Ingeniería de Detalle comienza uno de los procesos más delicados del proyecto: **La Instalación**.

Esta parte de la Ingeniería combina la realidad con el papel, convirtiendo las ideas en realidades, cuya bondad o poca funcionalidad dependerán no solo del diseño previo

sino también de la habilidad de los encargados de esta nueva fase para interpretar lo deseado y hacer oportunamente los cambios sobre la marcha, que mejoren lo propuesto inicialmente. Durante esta fase, la documentación generada en la Ingeniería de detalle, deberá ser revisada, para adaptarse a lo que realmente se complete en el campo, lo cual le permitirá en el futuro, a personas, no relacionadas previamente con el proceso realizar cambios, mejoras o ampliaciones, o simplemente hacer más fácil el mantenimiento.

La instrumentación como una de las disciplinas de la Ingeniería de muchos de los proyectos industriales pasa por todos los pasos anteriormente expuestos generándose en cada uno una serie de documentos que se listan a continuación:

Ingeniería Básica:

- 1) P&ID's (D.T.I)
- 2) Listado de instrumentos
- 3) Hojas de especificación de instrumentos
- 4) Especificación de sistemas
- 5) Diagramas de lógica
- 6) Memorias descriptivas preliminares
- 7) Requisiciones de equipos principales

Ingeniería de Detalle:

- 1) Detalles de instalación de instrumentos
- 2) Planos de ubicación de instrumentos
- 3) Planos de ruteo de señales
- 4) Planos de cajas de conexión
- 5) Diseño de la sala de control
- 6) Definición de paneles locales
- 7) Listados de cables
- 8) Listados de protectores para cables
- 9) Listados de materiales
- 10) Cómputos métricos
- 11) Especificaciones de instalación
- 12) Lazos de control
- 13) Lista de instrumentos revisada para el nivel de detalle
- 14) Requisiciones de materiales
- 15) Documentos de interrelación con otras disciplinas

PROYECTO TIPICO DE INSTRUMENTACION

ACTIVIDADES DE INGENIERIA BASICA

1. - ESPECIFICACION GENERAL DE INSTRUMENTACION

En este documento se define la "Especificación General de Instrumentación." Esta hace referencia a:

- . Título del proyecto a realizar.
- . Breve descripción de la planta o el proceso.
- . Trabajos de Ingeniería a realizar en el Proyecto.
- . Normas a ser utilizadas en el desarrollo de la
- . Ingeniería de Instrumentación

Bases o criterios de diseño. En este punto se debe explicar:

- . El tipo de instrumentación a utilizar.
- . Tipo de sistema de control.
- . Diseño sala de control.
- . Niveles de las señales de los transmisores
- . Clasificación de áreas de la instalación.
- . Premisas para el diseño de instrumentación y control, tales como flujos, bases y características particulares de procesos que obliguen a diseñar la instrumentación y el control de una manera determinada.
- . Filosofía de control.
- . Tipo de simbología a utilizar en el diseño de instrumentación.

2. DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS P&ID.

Se deberá indicar:

- . Todos los equipos con presiones y temperaturas de diseño.
- . Todas las tuberías de interconexión, con su tamaño, material y especificaciones de fabricación.
- . Requerimientos de energía incluyendo, tamaño de tubería, materiales y métodos de fabricación.
- . Representación esquemática de todos los lazos de control.
- . Numeración de cada uno de los componentes de los lazos de control.

- Representación esquemática de los encorvamientos y señales que interrelacionan los diferentes lazos de control.
- Representación de los dispositivos e instrumentos de seguridad.

3. - LISTADO PRELIMINAR DE INSTRUMENTOS.

Este listado provee un resumen de todos los instrumentos requeridos para el trabajo a realizar. En general una hoja de listados de instrumentos debería contener la siguiente información cuando este completamente elaborada:

- TAG.
- Servicio.
- P&ID en la cual aparece el instrumento.
- Lazo de control al cual pertenece el instrumento.
- Descripción o tipo de instrumento.
- Tipo de montaje.
- Fabricante y modelo.
- N' de la hoja de especificación del instrumento.

La información del listado de instrumentos se completará a medida que se vayan realizando las actividades del proyecto en sus fases de Ingeniería Básica e Ingeniería de Detalles; de manera tal que el listado generado en la fase de Ingeniería Básica puede considerarse como un listado preliminar.

4. - ESPECIFICACION DEL SISTEMA DE CONTROL.

Debido a que el sistema de control es considerado como un equipo de largo tiempo de entrada, su especificación es prioritaria en el desarrollo de la Ingeniería Básica del proyecto. Este documento permite solicitar oferta a los diferentes fabricantes para establecer precios y plazos de entrega.

5. - HOJAS DE ESPECIFICACION DE INSTRUMENTOS.

Las hojas de especificación sirven para los siguientes propósitos:

- . Contienen información relacionada al proceso.
- . Proveen al Departamento de compras y otras personas interesadas la información necesaria para realizar su trabajo.
- . Sirve de información permanente para el uso de la planta, instalación producción y mantenimiento.
- . Proporcionan información relacionada con el o los instrumentos específicos. (Ejemplo: rangos, tipos de conexión al proceso, modelo y marca del instrumento, etc.).

ACTIVIDADES DE INGENIERIA DE DETALLE.

1. - ACTUALIZACION DE LOS DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS.

En la fase de Ingeniería de Detalles se deben revisar los Diagramas de Tuberías e Instrumentos (P&ID) , generados en la Ingeniería Básica, con el objeto de actualizarlos en función a los cambios que puedan haber ocurrido principalmente los siguientes aspectos:

- . Simbología del instrumento en el plano (incluyendo el TAG).
- . Tipos de Alimentación (Eléctrica o Neumática). Tipos de montaje.
- . Características de las señales de entrada y salida.

2. - ACTUALIZACION DEL LISTADO DE INSTRUMENTOS.

Este listado será completado a medida que se vaya desarrollando la Ingeniería de Detalle.

3. - DIAGRAMAS DE LAZOS DE CONTROL.

Los diagramas de lazos de control son documentos básicos para realizar pruebas de instrumentos durante el arranque de una planta y para realizar labores de mantenimiento en fases

posteriores. Se debe realizar un diagrama por cada lazo de control que esté representado en el plano de tuberías e instrumentación (P&ID). Cada uno de los instrumentos que intervienen en el lazo de control debe aparecer claramente identificados en el diagrama de lazo.

4. - DIAGRAMAS ESQUEMATICOS DE CONTROL.

Los Diagramas Esquemáticos de Control se requieren en circuitos eléctricos y neumáticos cuando la complejidad del sistema amerita un énfasis adicional para explicar e ilustrar la función de los diferentes componentes.

5. - PLANOS DE UBICACIÓN DE INSTRUMENTOS.

Los planos de ubicación de instrumentos tienen como finalidad indicar la localización aproximada de los instrumentos en campo; así como también la elevación a la cual se encuentran instalados, y el tamaño de la toma de proceso.

6. - PLANOS DE RUTA DE SEÑALES DE INSTRUMENTACION.

Los planos de Ruta de Señales de Instrumentación son generados con la finalidad de mostrar las rutas de los conduits y cables de instrumentación (sí la instrumentación es neumática mostrarán las rutas de los tubing de señales neumáticos y multitubos); desde el instrumento hasta la sala de control, pasando por las cajas de conexionado en campo. En estos planos se debe aparecer además: La identificación del instrumento; identificación del conduit, indicando su diámetro y elevación.

7. - PLANOS DE DETALLES DE INSTALACION DE INSTRUMENTOS

Los detalles de instalación de instrumentos son necesarios para mostrar el montaje y los métodos de instalar las tuberías. En ellos se muestra el tamaño, tipo de materiales necesarios para la instalación correcta, aún cuando el técnico no esté familiarizado con el instrumento. También se hacen detalles típicos de conexión para instrumentos con conexiones eléctricas. Normalmente en ellos se muestran las entradas al instrumento, diámetro y número de cables

requeridos, el diámetro y tipo de conduit utilizado, y los empalmes eléctricos requeridos.

8. - LISTA DE CABLES Y CONDUITS DE INSTRUMENTACION

Listas de cables: este documento permite verificar en forma rápida la ruta y el tipo de cable utilizado para un instrumento en particular. En él deben aparecer todos los cables de instrumentación utilizados en el proyecto.

Lista de Conduits: la lista de conduits junto con la lista de cables se elaboran con el fin de suministrar al contratista toda la información necesaria para que la instalación de los conduits y cables se haga de acuerdo al diseño.

9. - PLANOS DE ALIMENTACION DE AIRE A INSTRUMENTOS

Estos planos tienen como finalidad mostrar la ruta de las tuberías de alimentación de aire a instrumentos, identificado el instrumento que está siendo alimentado a través de una toma respectiva.

10. -PLANOS DE ARREGLO DE EQUIPOS EN SALA DE CONTROL

Estos planos tienen como finalidad mostrar a escala la distribución de equipos en la sala de control. Estos planos son generados a partir de los planos de construcción de la sala generados por Ingeniería Civil. La distribución deberá ser diseñada considerando las dimensiones de los equipos que van en la sala de control, tales como: gabinetes, paneles de control, interfase hombre máquina. , etc.

11. -LISTA DE MATERIALES

En esta lista se colocan todos los materiales, indicando la cantidad y el tipo de material que se utilizará en la fase de construcción para realizar la instalación de los instrumentos.

12. -ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCION Y DESCRIPCION DE PARTIDAS

Las Especificaciones Generales de Construcción se utilizan para solicitar a los contratistas la oferta para la construcción de las instalaciones objeto del proyecto. En ellas se debe especificar claramente cual es el trabajo a realizar.

La especificación general de construcción varía dependiendo del tipo de instalación que contemple el proyecto; sin embargo esta estará constituida básicamente por lo siguiente:

- Descripción General de la obra.
- Alcance de la Obra.
- Lista de Planos y Documentos.
- Normas Aplicadas.
- Especificaciones Técnicas.
- Modelo de Presentación de Oferta.
- Descripción de Partidas.

Las Especificaciones Generales de Construcción deberán incluir las partidas con los cálculos métricos correspondientes. Esto permite que las ofertas que se reciban de los diferentes contratistas sean similares y puedan ser comparados.

PLANIFICACIÓN, PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE PROYECTOS

Cada proyecto, sobre todo en grandes empresas, suele estar compuesto por un elevado número de tareas en las que intervienen recursos que a menudo han de ser compartidos con otras actividades de la empresa. Para que el proyecto llegue a su término en el menor plazo de tiempo y con el costo más bajo posible, el responsable del mismo ha de compaginar los recursos disponibles de la forma más adecuada. Para ello, cuenta con una serie de herramientas de ayuda a la

planificación como son, entre otras, las técnicas PERT, CPM y los gráficos de Gantt.

En cualquier caso, la labor asociada a la gestión de un proyecto es complicada por que supone una intensa tarea de seguimiento y control de cada etapa del mismo. De igual manera, la mayoría de las veces las previsiones realizadas durante la planificación no se ajustan a los datos obtenidos al finalizar una fase del proyecto, con lo que se han de replantear costos y plazos de ejecución de las actividades que restan hasta la finalización del trabajo.

La informática aplicada a la gestión de proyectos hoy en día refleja el constante cambio del mundo de los negocios, los continuos desarrollos en software proporcionan a los usuarios recursos y posibilidades ni siquiera imaginable tan solo hace años. La utilidad de los programas de informática en la planificación, programación y control de proyectos que se ofertan en la actualidad tiene un sin número de aplicaciones, por lo que la elección de uno de éstos, depende de la dimensión de los proyectos y los resultados que deseamos obtener.

Gestión de Proyectos

Un proyecto puede definirse como una combinación de actividades interrelacionadas que deben ejecutarse en un cierto orden antes que el trabajo completo pueda terminar.

Las actividades están interrelacionadas en una secuencia lógica en el sentido que algunas de ellas no puedan comenzar hasta que otras se hayan terminado o hayan alcanzado cierto grado de ejecución. Una actividad en un proyecto, usualmente se ve como un trabajo que requiere tiempo y recursos para su

terminación. En general, un proyecto es un proceso único o singular de solo un período; esto es, la misma sucesión de actividades pueden no repetirse en el futuro.

En el pasado, la programación en el tiempo de un proyecto no recibía la importancia que tiene en la actualidad. La mejor herramienta conocida de planificación entonces, era el diagrama de barras o de Gantt, el cuál especifica el tiempo de inicio y terminación de cada actividad en una escala de tiempo horizontal. Su desventaja es que la interdependencia entre las diferentes actividades, la cuál controla principalmente el progreso del proyecto, no puede determinarse a partir del diagrama de barras.

La complejidad crecientes de los proyectos actuales han demandado técnicas de planificación más sistemáticas y más efectivas con el objetivo de optimizar la eficiencia en la ejecución del proyecto. Dicha eficiencia implica efectuar la mayor reducción en el tiempo requerido para terminar el proyecto mientras se toma en cuenta la factibilidad económica de la utilización de los recursos disponibles.

La gestión de proyectos ha evolucionado como una nueva técnica, con el desarrollo de dos métodos analíticos para la planificación, programación y control de proyectos. Tales son el Método del Camino Crítico (CPM), y la técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (PERT).

Los métodos PERT y CPM están básicamente orientados en el tiempo en el sentido que ambos permiten obtener un calendario de actividades. Aunque los dos métodos fueron desarrollados casi independientemente, ambos son asombrosamente similares. Quizá la diferencia más importante es que originalmente las estimaciones en el tiempo para las actividades se supusieron deterministas en CPM y estocásticas en PERT. Ahora PERT y

CPM comprenden realmente una técnica y las diferencias, si existe alguna, son únicamente históricas.

La programación de proyectos por PERT-CPM consiste de tres fases básicas : Planificación, Programación y Control. La fase de planificación se inicia descomponiendo el proyecto en actividades distintas. Posteriormente se realizan las estimaciones de tiempo para estas actividades y se construye un diagrama de red donde cada uno de sus arcos representa una actividad. El diagrama de red completo da una representación gráfica de las interdependencias entre las actividades del proyecto. La construcción del diagrama de red como una fase de planificación, tiene la ventaja de estudiar los diferentes trabajos en detalle, sugiriendo mejoras o detectando problemas antes de que el proyecto realmente se ejecute.

El objetivo de la fase de programación es construir un diagrama temporal que muestre las fechas de iniciación y terminación para cada actividad, así como su relación con

otras actividades del proyecto. Además, el programa debe señalar las actividades críticas en función del tiempo que requieren atención especial si el proyecto se debe terminar oportunamente. Para las actividades no críticas el programa debe mostrar los márgenes o tiempos de holgura que pueden utilizarse cuando tales actividades se demoran o cuando se deben usar eficientemente recursos limitados. La fase final en la administración de proyectos es la de control, ésta incluye el uso del diagrama de red y la gráfica de tiempo

para hacer informes periódicos del progreso. La red puede, por consiguiente, actualizarse y analizarse y si es necesario, determinar un nuevo programa para la porción restante del proyecto.

Gestión Informatizada de Proyectos

La oferta de aplicaciones de este tipo se caracteriza por las diferencias ostensibles entre los programas disponibles en el mercado. Unos realizan ciertas tareas mejor que otros, o sacrifican algunas funciones en aras de la simplicidad o de un menor costo.

Requisitos Variables.

A la hora de decidir la compra de una aplicación de este tipo, hay que comparar en primer lugar, las posibilidades de los distintos productos. Unos están diseñados para crear y manejar recursos y para controlar qué empleados llevan a cabo sus trabajos; mientras que otros, están orientados a la gestión de actividades y al seguimiento de su ejecución.

En segundo lugar se debe evaluar su potencia y flexibilidad. Algunos programas permiten a los usuarios asignar miles de tareas por proyecto, aunque por ello decaiga el tiempo de respuesta; otros ofrecen numerosas facilidades de uso, pero el espacio para la descripción de tareas es muy limitado, y también existen productos que dan gran importancia a la elaboración de gráficos.

La cantidad media de recursos y actividades por proyecto que los programas pueden manejar es un factor fundamental en el momento de la selección de un software de aplicación para la programación y planificación de proyectos. La forma

de iniciar un proyecto consiste, en la mayoría de las aplicaciones, en definir las actividades y los recursos que van a formar parte del mismo, indicando, para las primeras, nombre, duración, fecha de inicio y final de acuerdo con el calendario del proyecto, recursos que utilizan; para los segundos se especifica el coste y dedicación.

Después, la aplicación elabora gráfico de Gantt, un diagrama Pert y calcula el camino crítico. Asimismo, se contempla la gestión, asignación y valoración de recursos, entre otras funciones. No obstante, dependiendo del fabricante de la aplicación, éstas incluyen otras rutinas que permiten establecer un mayor control sobre el proyecto, como son la creación de gráficos y tablas, obtención de informes, si bien algunas de ellas se encuentran en aquellos programas más evolucionados.

Creación de Diagrama Pert.

Tras la introducción de los datos correspondientes a cada actividad, el programa elabora el diagrama Pert y determina el camino crítico. Este proceso se puede llevar a cabo de dos maneras; a través de una tabla o "planning" en la que el usuario especifica los datos del proyecto, tras lo cual

es la aplicación la que elabora la red Pert, o de forma que sea el propio usuario el que cree el diagrama directamente en la pantalla, con lo que se evita que aparezcan líneas de dependencia cruzadas, cosa que puede suceder en el primer caso.

Respecto a la información que puede visualizar el Pert, algunos de los programas tienen serias restricciones, ya que en ocasiones los datos que aparecen se reducen a un número identificativo de la actividad y a su duración. Pero lo normal es que haya varias opciones .

Gráficos de Gantt.

Por lo general, todas las aplicaciones incluyen la posibilidad de realizar gráfico de Gantt, al que se puede acceder tras introducir los datos del proyecto. En ellos se distinguen entre, actividades críticas y no críticas, proporcionan información acerca de la holgura disponible, de la situación originalmente prevista y el estado actual del proyecto. Sin embargo, a pesar de que el usuario puede conocer el tiempo consumido por una determinada actividad, no tiene medios para determinar el progreso real de la misma, es decir, el gráfico Gantt permite saber que han transcurrido 10 días desde el inicio de una actividad que se debe realizar en 20, pero no qué parte de la misma queda por hacer.

Otra característica incluida en la práctica totalidad de los software es la posibilidad de representar este tipo de gráficos tomando como unidad distintos lapsos de tiempo (meses, semanas o días) teniendo en cuenta los días considerados no laborables para ese proyecto, que se determinan en un calendario.

Calendario del Proyecto.

La posibilidad de especificar un calendario para cada proyecto, e incluso para cada recurso permite al usuario establecer con mayor exactitud la duración real de cada actividad. Todas las aplicaciones incorporan esta

característica mediante la cual se pueden determinar los días laborables y los que no lo son, con la posibilidad de indicar, en este último caso, sus causas (vacaciones, enfermedad). Estos datos repercuten directamente en los plazos de ejecución, de forma que cuando el usuario indica, para una determinada actividad, cierto número de días de duración, el sistema calcula la fecha de finalización de la misma teniendo en cuenta los días festivos.

Gestión de Recursos y Costos.

La gestión de recursos y costes es una tarea bastante laboriosa ya que, por un lado, es muy frecuente que un mismo recurso deba ser compartido por varias actividades de un mismo proyecto o incluso por varios de ellos y, por otro, porque siempre es preciso ajustar al máximo las previsiones de costes. En cualquier caso, este apartado debe estar ligado a una labor de seguimiento y control y debe contar con la posibilidad de modificar las previsiones con los datos reales obtenidos tras la finalización de una fase del proyecto.

Informes y Gráficos.

La obtención de impresos de los diagramas Pert, de los gráficos de Gantt y de los esquemas en los que aparece toda la información relativa a las actividades y recursos no es en ocasiones suficiente para satisfacer las necesidades de información de los responsables de un proyecto. Por ello, la mayor parte de los programas incluyen otro tipo de informes y gráficos que proporcionan una cobertura más amplia.

Gestión de Sub-proyectos.

En ocasiones la capacidad operativa de los programas de control de proyectos pueden verse desbordada por el número de actividades que componen los mismos. En tales casos, el usuario puede crear un proyecto en el que cada actividad sea a su vez un subproyecto, que en otro lugar será considerado como un proyecto en sí mismo y por lo tanto contará con actividades y recursos propios.

Suponiendo que se den situaciones de este tipo, caso poco frecuente teniendo en cuenta que alguna de las aplicaciones pueden manejar más de 400 actividades por proyecto, aumentará enormemente la complejidad en el manejo de recursos empleados en varios subproyectos, ya que pueden aparecer conflictos de difícil localización provocados por la sobreutilización de los mismos. Este problema puede solucionarse mediante una estricta labor de control.

Utilidades del Microsoft Project.

En principio, usando papel y lápiz podríamos hacer una planificación y programación del proyecto, pero en el caso de proyectos muy complejos en la que se necesitan conocer los caminos críticos para comparar los tiempos iniciales y finales necesarios para realizar una previsión; se necesita disponer de una herramienta de informática para su planificación.

Microsoft Project es un programa interactivo que permite combinar actividades, recursos y costes para diseñar un proyecto; se utiliza para la configuración de un plan de

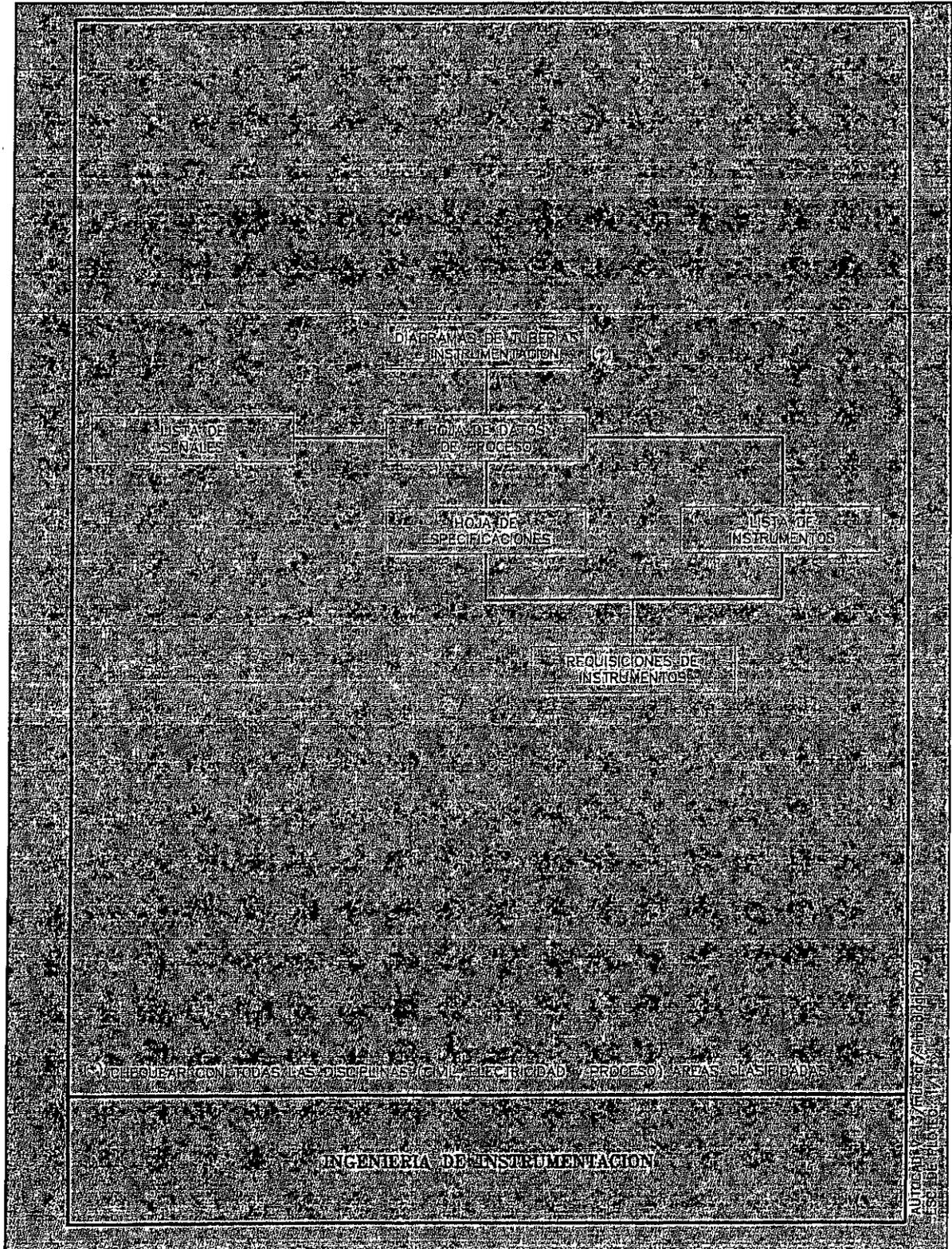
actividades, necesitando sólo la información sobre tareas, fechas e información sobre qué actividad debe finalizar antes que otra, localizar recursos para cada actividad ayudando a tener un esquema y una idea clara de los tipos y de las cantidades de recursos que necesitamos.

También permite analizar y controlar los costes una vez introducido los recursos y costes por horas, semanas, meses e incluso los gastos fijos, computando los costes totales del proyecto. De la misma manera es posible realizar el proyecto con otros, teniendo en cuenta en los que se utiliza un recurso compartido.

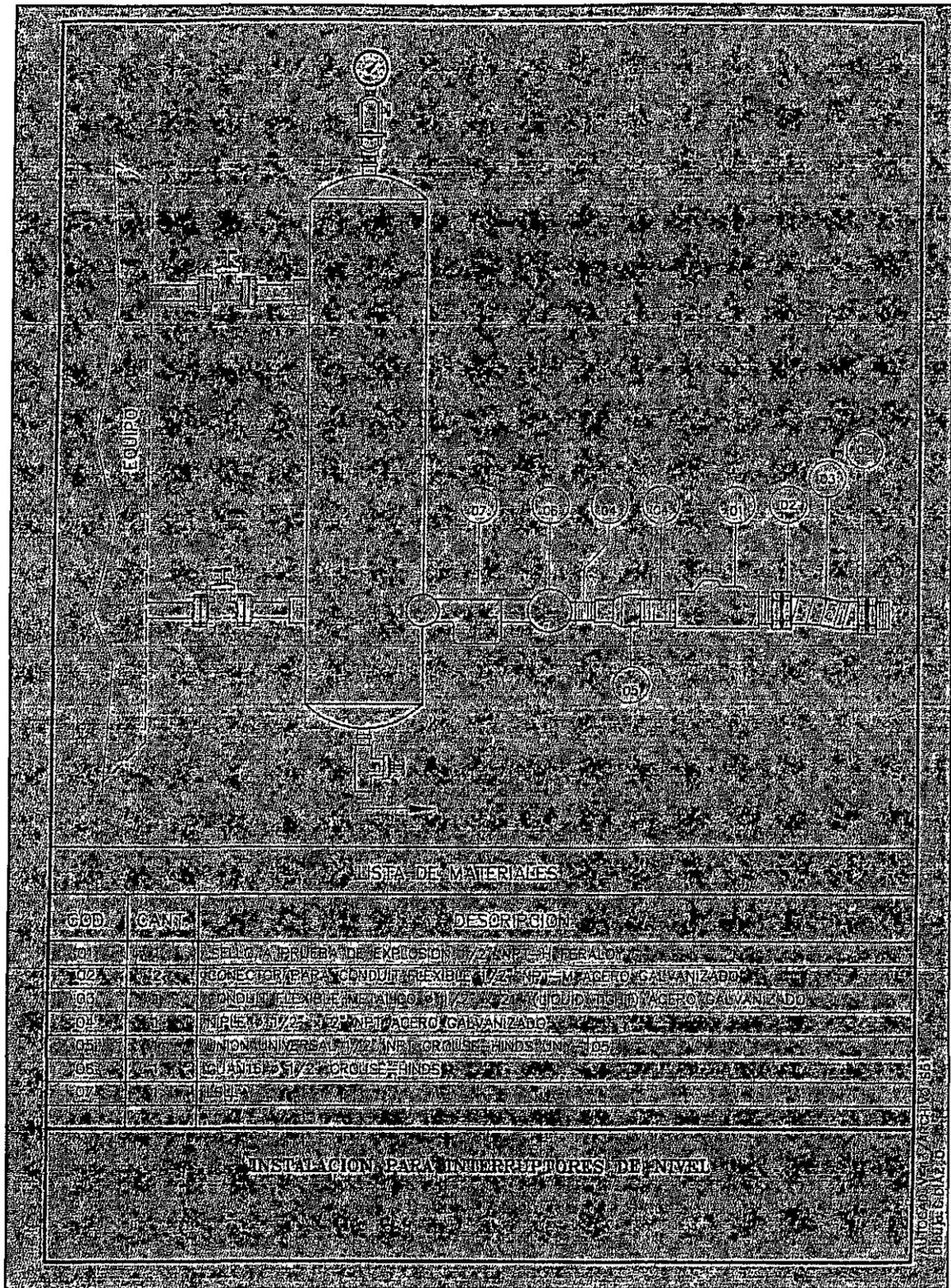
En el MicroSoft Project, el usuario puede añadir y borrar actividades, modificar su duración y adelantar o retrasar su comienzo, observando, en cualquier caso, las repercusiones que dichas modificaciones suponen para la totalidad del proyecto. Otra opción dentro de este programa permite ver el proyecto tomando días reales (considerando laborables y festivos), de forma que puede observar los períodos de tiempo perdidos a causa de fines de semana o vacaciones .

La gestión de recursos permite especificar diferentes prioridades para la ejecución de las diversas tareas y resolver los conflictos de asignación surgidos.

El programa destaca por ser una aplicación que realiza comparación de datos presupuestados reales, duración y coste de cada actividad, utilización y coste de recursos entre otros.



Instalaciones Típicas

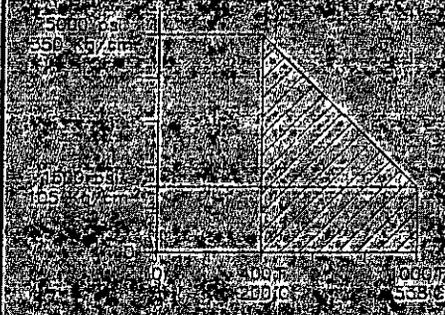
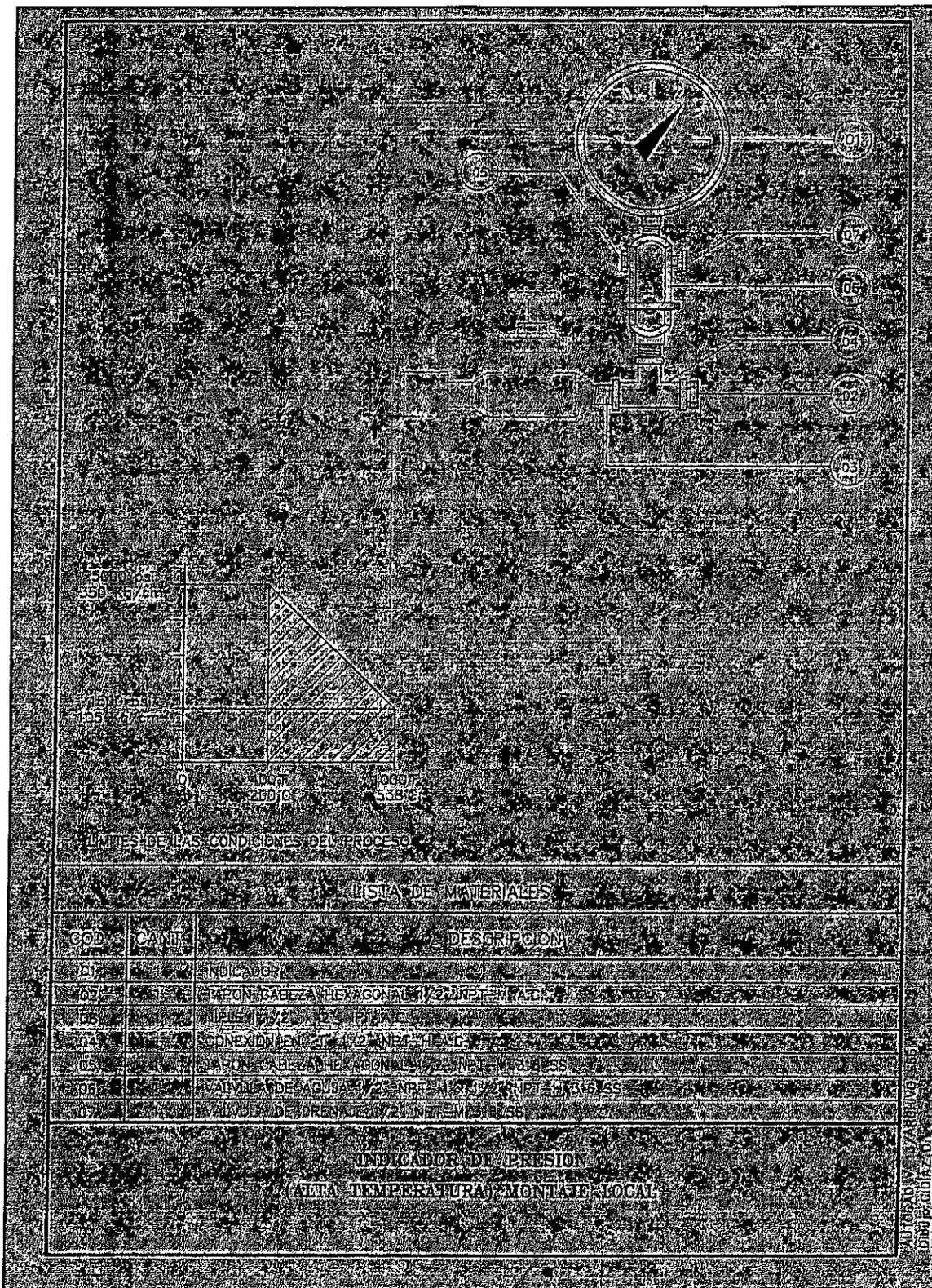


LISTA DE MATERIALES

COD.	CANT.	DESCRIPCION
01		SEÑAL A PRUEBA DE EXPLOSION 1/2" ANCH. 1100
02		CONECTOR PARA CONDUIT REXIBUE 1/2" NPT - MACHO GALVANIZADO
03		CONDUIT FLEXIBLE METALICO 1/2" NPT (QUID) MACHO GALVANIZADO
04		EMPL. 1/2" NPT MACHO GALVANIZADO
05		UNION UNIVERSAL 1/2" NPT FOR USE WITH UNIF. 05
06		CUANTE 1/2" FOR USE WITH UNIF. 05
07		ELABOR.

INSTALACION PARA INTERRUPTORES DE NIVEL

ALTOCELANO S.A. 1970
 BUENOS AIRES

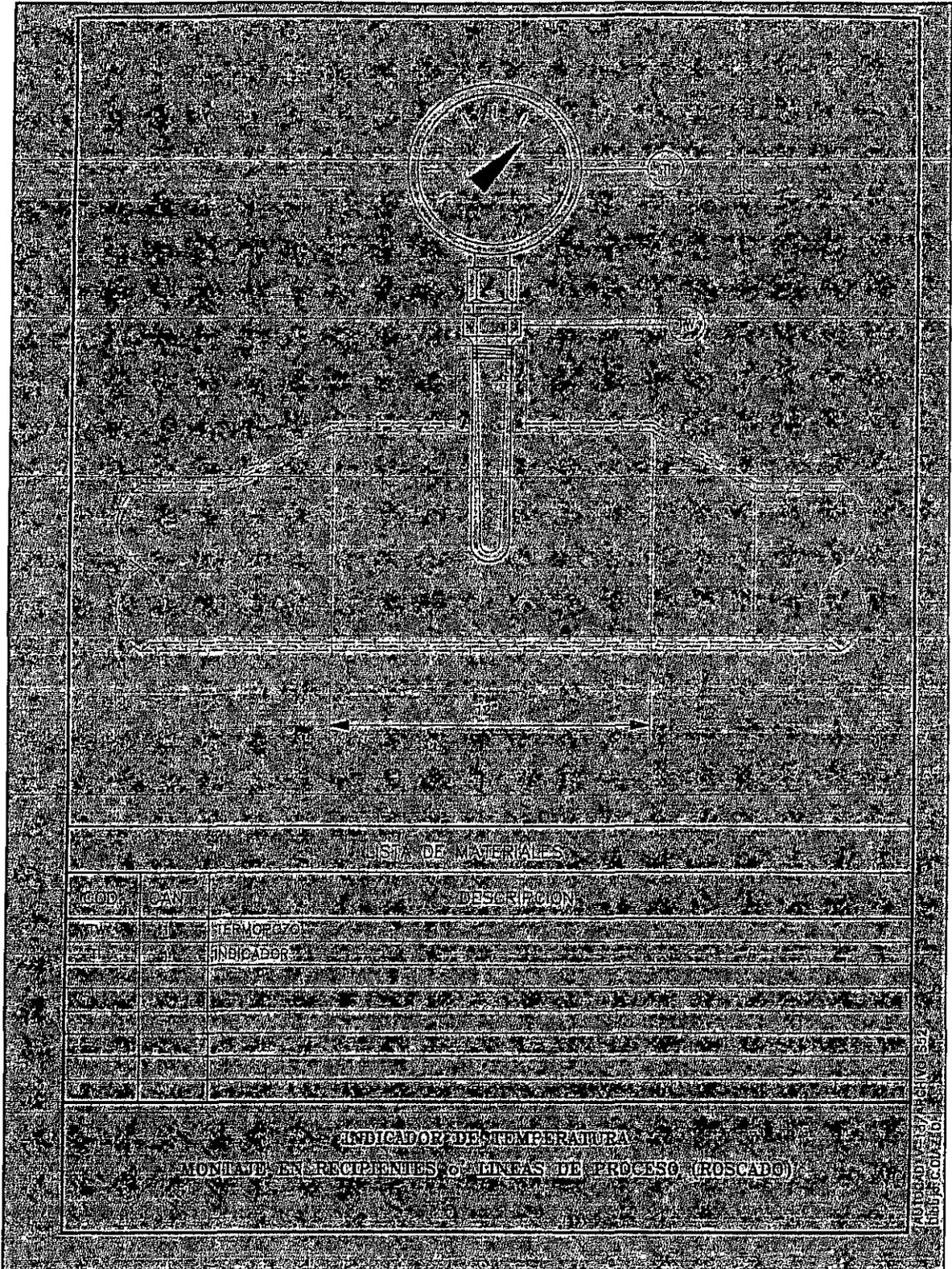


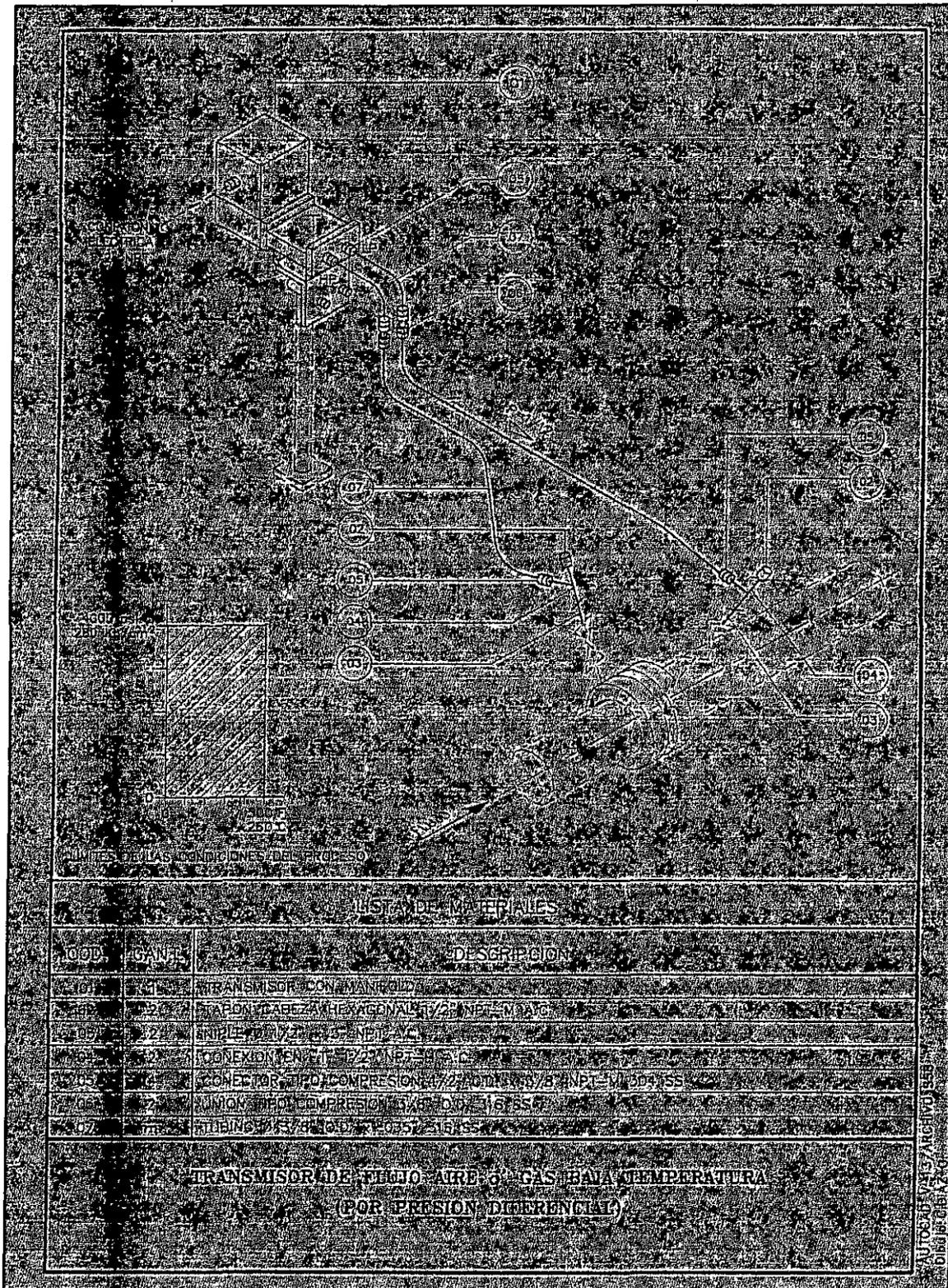
LISTA DE MATERIALES

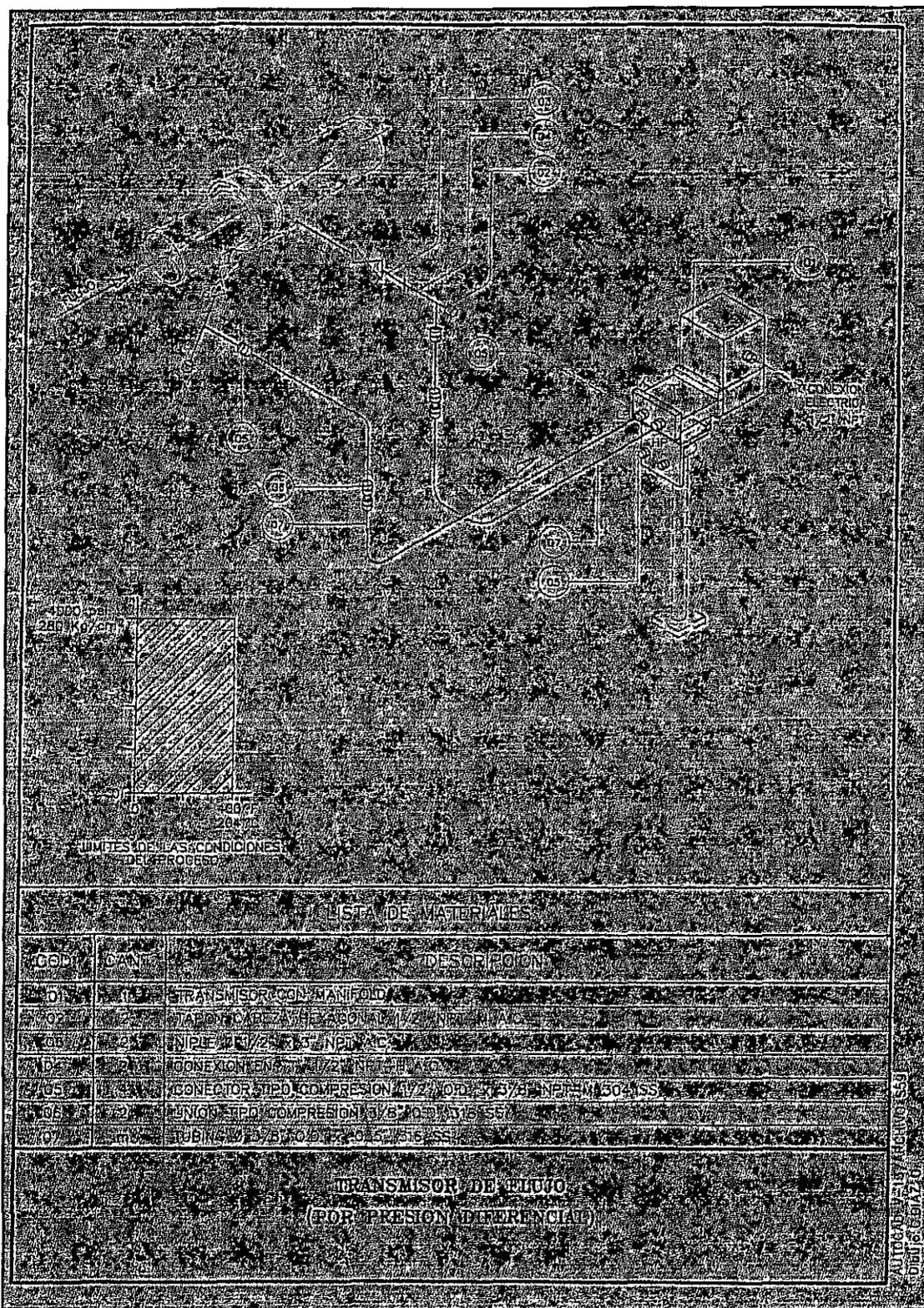
COD.	CANT.	DESCRIPCION
01	1	INDICADOR
02	1	TAPON CABEZA HEXAGONAL 1/2" NPT EN 316 SS
03	1	NIPLA 1/2" NPT EN 316 SS
04	1	CONEXION HORIZONTAL 1/2" NPT EN 316 SS
05	1	TAPON CABEZA HEXAGONAL 1/2" NPT EN 316 SS
06	1	VALVULA DE AGUA 1/2" NPT EN 316 SS
07	1	VALVULA DE DRENADO 1/2" NPT EN 316 SS

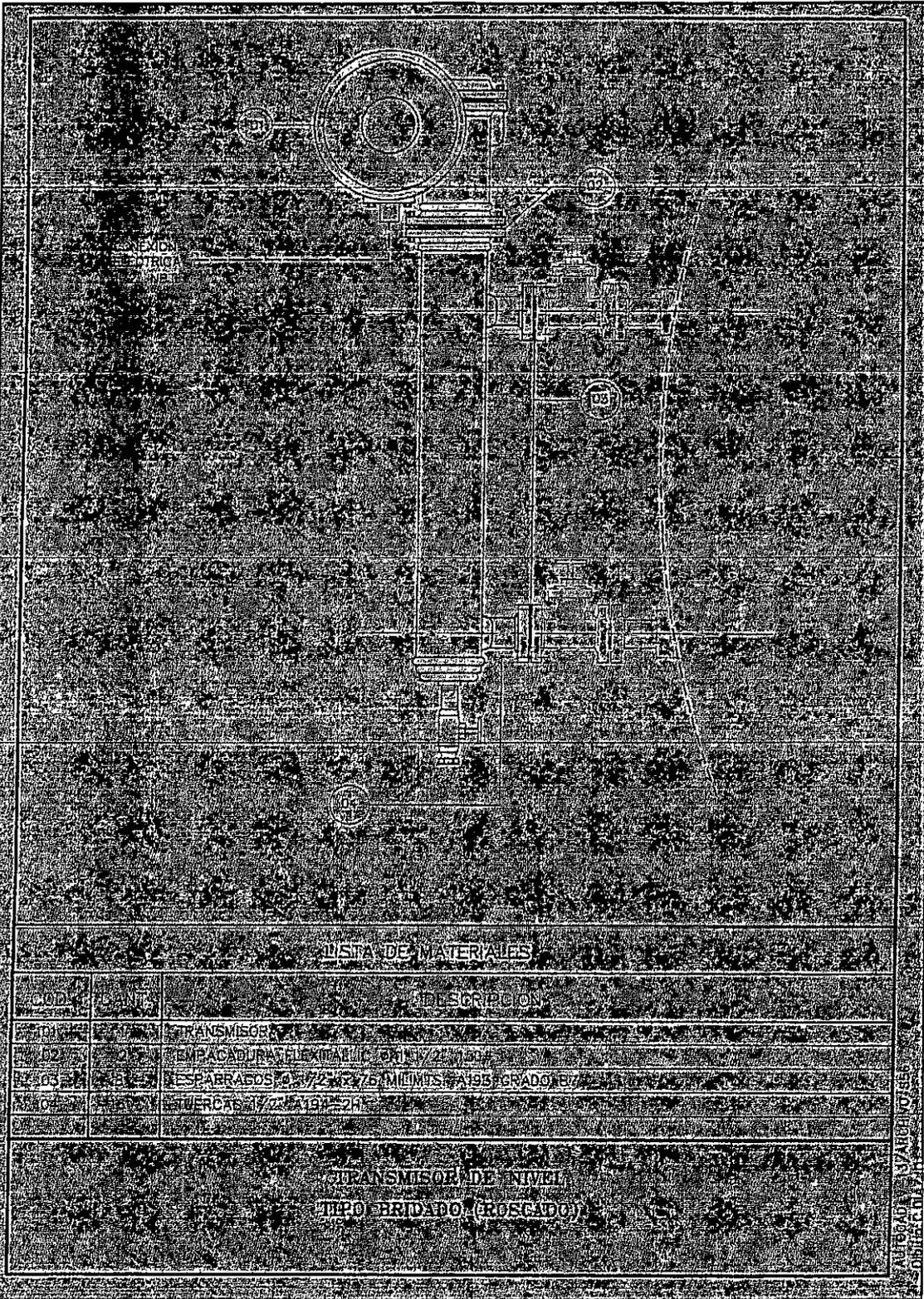
INDICADOR DE PRESION
(ALTA TEMPERATURA) MONTAJE LOCAL

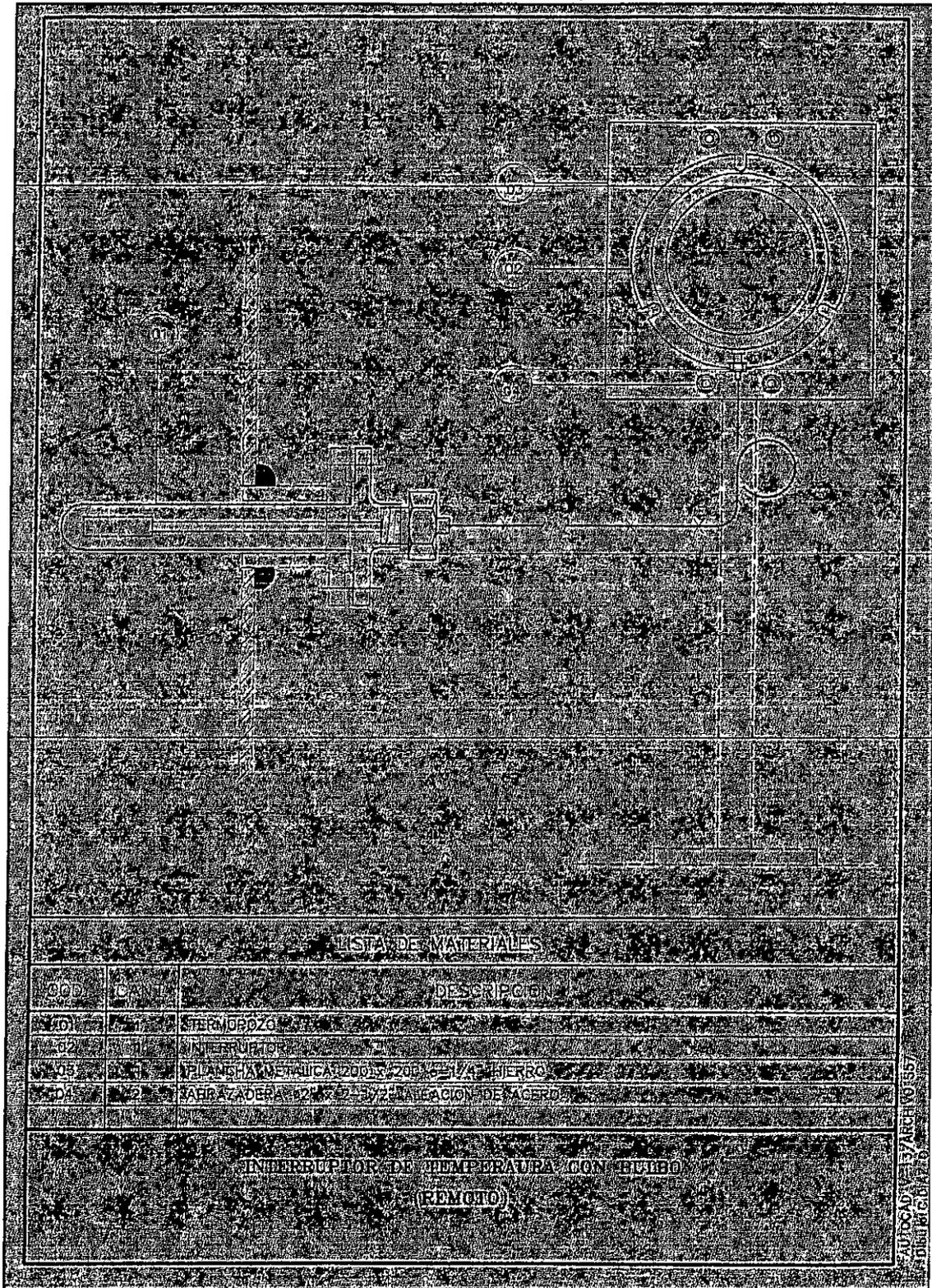
AUTOR: DR. LUIS AMENDOLA
DIBUJANTE: GIBRIZO

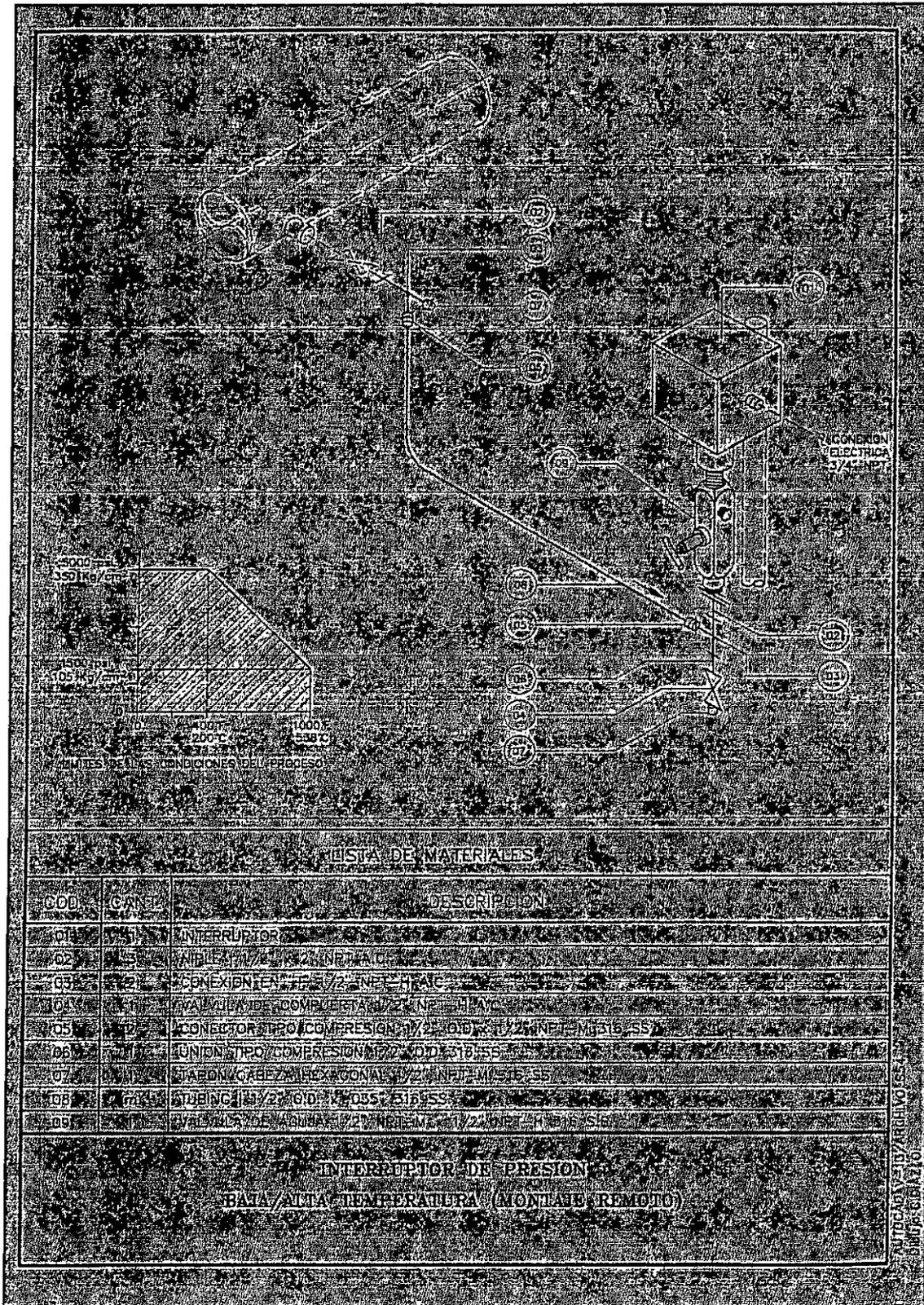










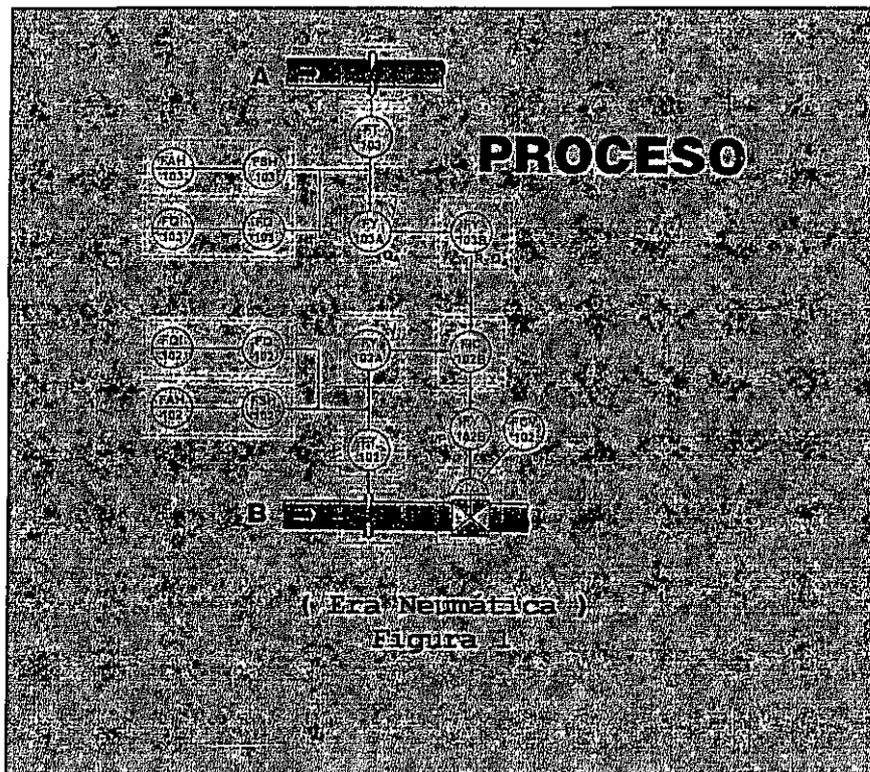


FIELDBUS ERA NEUMÁTICA

Como podemos observar en la Figura 1, los instrumentos neumáticos, una vez que fueron estandarizados en su faja de alimentación y de transmisión, experimentaron un gran desarrollo en lo que se refiere a la ejecución de funciones (como extracción de raíz cuadrada, multiplicación, etc), sin embargo, generalmente cada instrumento realizaba apenas una función.

Debemos destacar que estos instrumentos son de gran durabilidad, muchos funcionan y controlan plantas hasta hoy, son verdaderos retratos de la ingeniosidad de la ingeniería mecánica con sus fuelles, reles pilotos, engranajes, etc. Sin embargo, su tiempo de respuesta, su precisión, su tamaño físico, y principalmente la falta de un precio competitivo, en relación a las nuevas tecnologías (inicialmente la electrónica analógica), provocan la rápida pérdida de terreno de la instrumentación neumática en los nuevos proyectos.

En este esquema vale la pena destacar la simplicidad de la lectura y factibilidad, tanto de diagnóstico de problemas, como de partida de los sistemas. De hecho, para los nostálgicos, ésta es una característica que los sistemas modernos necesitan cada vez más mejorar.



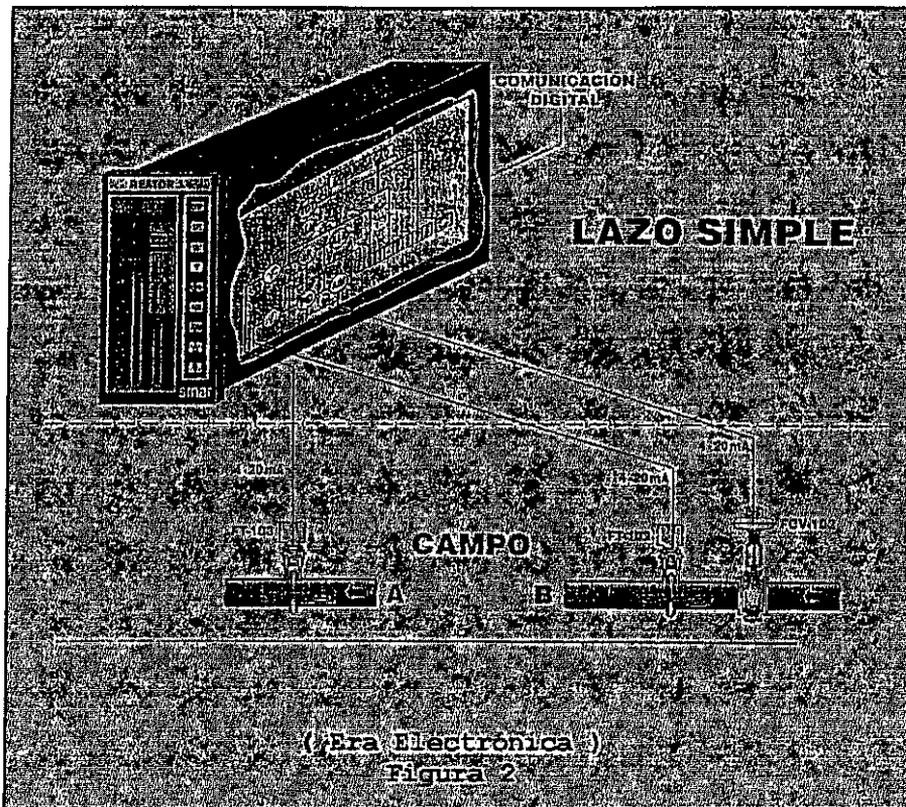
ERA ELECTRÓNICA

Con el desarrollo de los semiconductores, inicialmente los transistores y después los circuitos integrados, la electrónica comenzó a ofrecer para los proyectistas de equipos su bajo consumo y sus condiciones de costo/tamaño físico, cada vez más competitivos en relación a los instrumentos neumáticos. Para el usuario, el aumento de la confiabilidad en relación a la electrónica de válvulas, combinado con las características ya descritas de costo/tamaño físico, transformaron a la opción por electrónica incuestionablemente.

Con la llegada de los microprocesadores, obtuvimos la posibilidad de tener equipos programables, en realidad, verdaderos computadores llevados a la miniaturización extrema, y así a la posibilidad de tener varias funciones ejecutadas por un mismo instrumento. La relación costo/beneficio también cayó y el desarrollo de la tecnología de microprocesadores aumentó la factibilidad de configuración/programación que al inicio era un punto crítico.

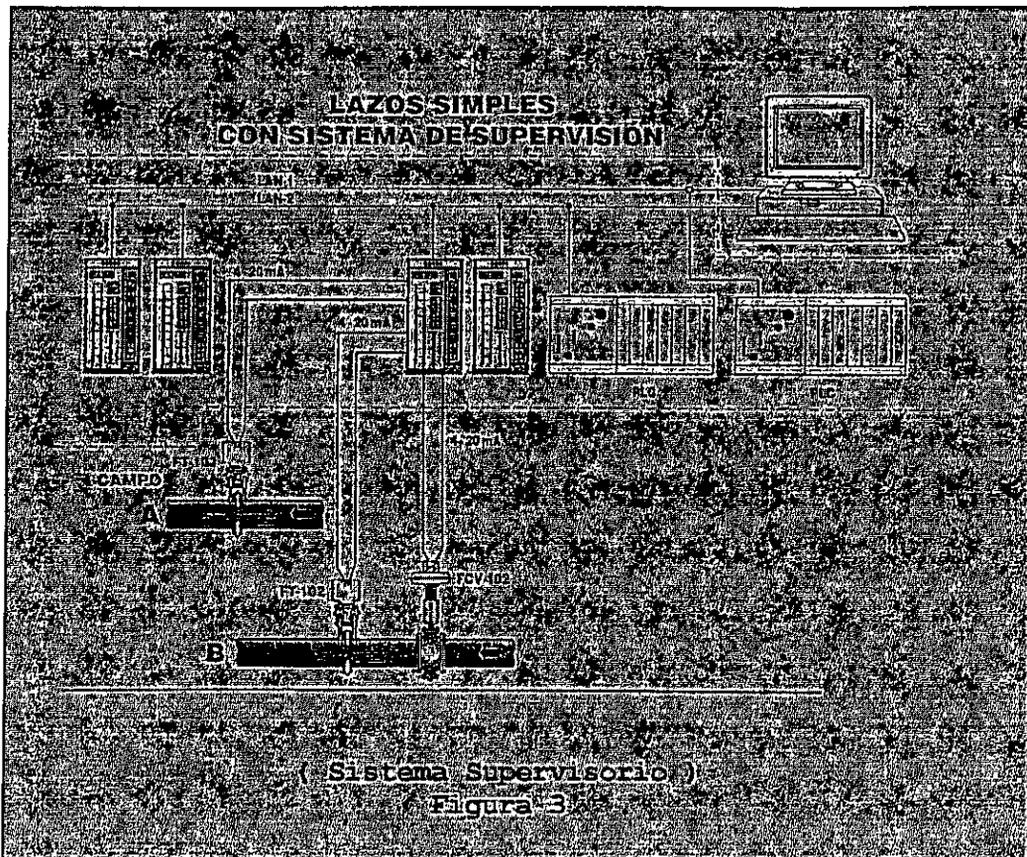
Podemos verificar en la figura 2, un controlador que, por ser microprocesador (tiene CPU, memorias, es programable), es un computador, comunicándose con un transmisor que siendo inteligente, también es un computador (tiene CPU, memorias y es programable). Tenemos, por lo tanto, dos computadores: uno en el campo en contacto con el proceso, enviando la información de una variable, ya debidamente tratada, y en la sala de control, el otro computador recibiendo la información del proceso, realizando una función de control y, finalmente enviando para el campo una variable manipulada, en un rango de 4 a 20 mA para , por ejemplo , posicionar una válvula de control.

Está claro que la explicación anterior no tiene ninguna novedad para quién es del ramo de Instrumentación y Control de procesos, pero tal vez un detalle haya pasado en blanco: los dos computadores, el controlador de proceso y el transmisor inteligente, conversan a través de un protocolo analógico (2 a 20 mA) que como, sabemos, no es el modo más eficaz para una comunicación entre computadores, además que , en este tipo de comunicaciones sólo se puede enviar una única información (del transmisor al controlador y viceversa) y en un único sentido de dirección.



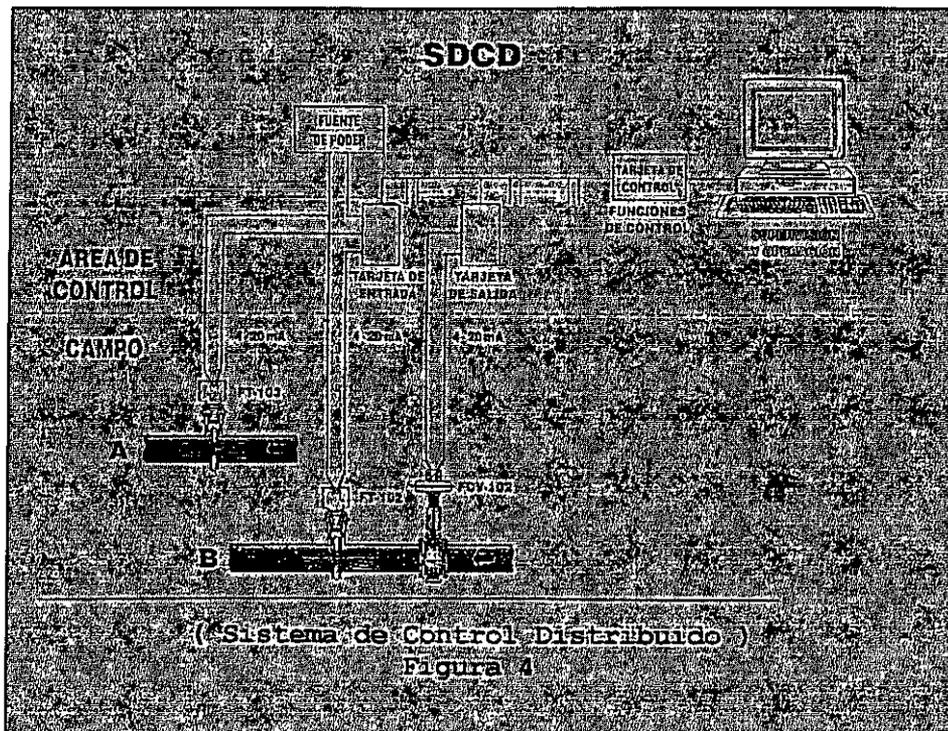
Durante toda esta era de la información aplicada al control de procesos, los fabricantes y usuarios, convivimos con esta limitación.

Con el suministro de los sistemas supervisorios pasamos a utilizar dos plataformas distintas de tecnología. La figura 3 nos muestra, en la parte de abajo, los transmisores inteligentes enviando sus informaciones para los controladores microprocesadores, a través de protocolo 4 a 20 mA. En la parte superior de la figura podemos observar el nivel moderno de la información, con una red de comunicaciones interconectando los computadores que son los controladores, los PLC's y los computadores clásicos (los que tienen pantalla, teclado, salida para impresora). En esta red nos encontramos en el mundo actual de los computadores, comunicándonos digitalmente, en forma bidireccional, conversando tipo pregunta / respuesta. En la parte inferior de la figura, tenemos todavía el protocolo de la era electrónica analógica, con los inconvenientes ya citados anteriormente.



Aún en los Sistemas Digitales de Control Distribuido (SDCD) o DCS's continuamos con esta convivencia. El sistema mostrado en la figura 4 tiene sus tarjetas de control interligadas por una red de comunicaciones digital (en caso, un protocolo propietario), pero la comunicación entre los transmisores y las tarjetas controladoras del SDCD, esta hecha con un protocolo analógico 4 a 20 mA.

Otro detalle muy importante debe ser destacado en los Sistemas Digitales de Control Distribuido. Aquí la palabra Distribuido se refiere a las diversas tarjetas de control que componen el sistema (prácticamente una tarjeta de control para cada lazo de control), pero en realidad, a pesar de la existencia de los transmisores inteligentes, algunos de ellos con capacidad de control, sus características no son explotadas, y por lo tanto, tenemos un sistema centralizado en la disposición de las tarjetas de control, pero no se utiliza la distribución de control en el campo.



FOUNDATION Fieldbus

Breve historia

En 1. 985, la Instrument Society of América a la que posteriormente se unió la International Electrochemical Commission comenzó a desarrollar un estándar para comunicaciones digitales multipunto en ambos sentidos, entre dispositivos de campo (instrumentos) y sistemas de control, para los mercados de control de procesos y de fabricación. En la actualidad, sólo se ha finalizado uno de los ocho componentes del estándar planificados, IEC 1158 - Parte 2: Fieldbus - Estándar de Nivel Físico, está disponible desde 1.993. entre tanto, la Parte 3. Fieldbus - Definición del Servicio de Enlace de Datos está a punto de ser finalizada. El resto de los componentes están retrasados y las predicciones más óptimas estiman que se finalizarán en 2 o 3 años.

Sin embargo, los proveedores y usuarios finales de la industria de control han visto cómo la revolución de las comunicaciones digitales está afectando a la mayoría de los

aspectos de su vida diaria y reconocen las oportunidades, ventajas y ahorros que podrían derivarse de adoptar esta tecnología para aplicaciones de medición y control de procesos. Con el retraso del estándar IEC, hay grupos de proveedores que han puesto en práctica iniciativas para empezar a usar los elementos del estándar IEC disponibles en la actualidad, asumiendo que las partes que faltan serán definidas de una forma determinada. Fieldbus Foundation ha aprovechado la base creada por estas iniciativas para desarrollar una organización con los principales proveedores de todo el mundo que están comprometidos con el mismo estándar Fieldbus. Desde su creación en 1.994, ha utilizado los recursos de las compañías asociadas para definir y probar el estándar de protocolo denominado FOUNDATION Fieldbus permitiendo que hubiesen productos disponibles en el mercado.

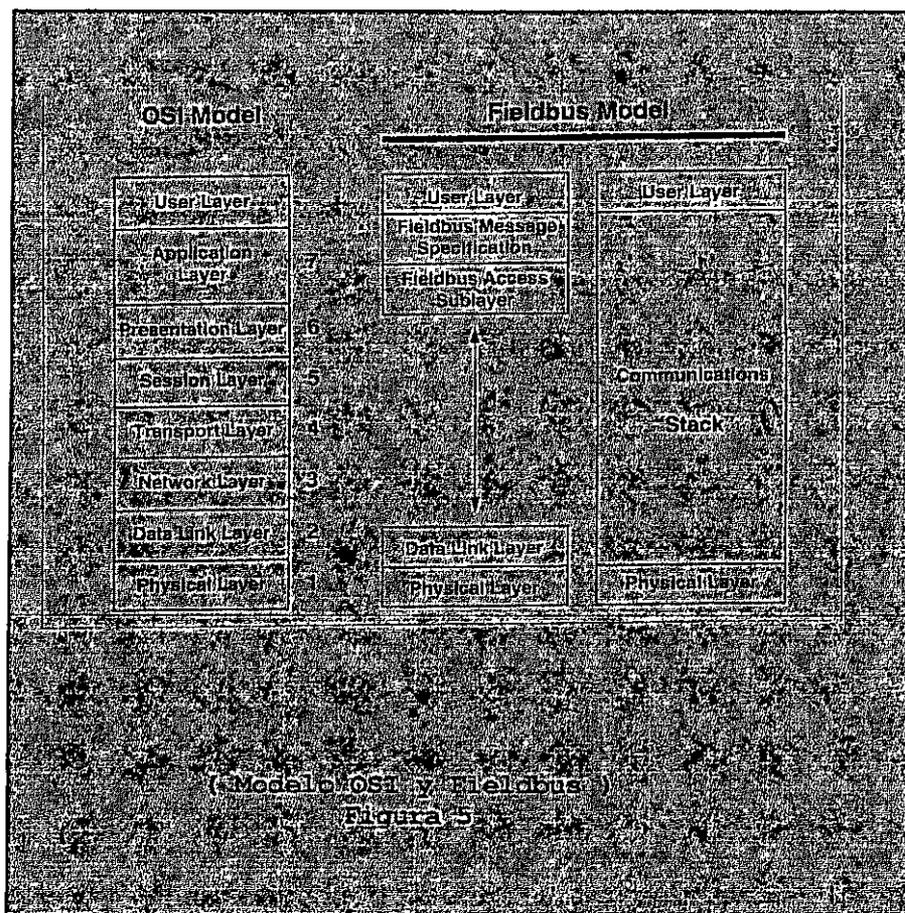
¿ Que es fieldbus?

Fieldbus es el nombre genérico con que se denominan los protocolos basados en el nuevo estándar IEC 1.158. Estos afrontan las necesidades de la industria de control en base a los actuales estándares de cableado, seguridad intrínseca, señal en dos hilos y alimentación a dispositivos situados al menos a 1500 metros de distancia con operación multipunto, un buen sistema de control de tiempos y a una transferencia de datos segura. Los distintos sectores del mercado exigen soluciones específicas. Los protocolos existentes como CAN, LON y SDS; están dirigidos a otros sectores del mercado con necesidades de interfaces de menor coste y menor seguridad y sincronización en las transferencias de datos.

EN50170 es el nuevo estándar CENELEC para protocolos fieldbus. Incluye tres estándares nacionales ya existentes. P - Net de Dinamarca, WoldFIP de Francia y Prbfibus (-FMS y DP, pero no PA) de Alemania. FOUNDATION Fieldbus, propuesto como Estándar Británico DD236, fue incluido como Parte 4 en este EN50170. Todavía debe cumplir varios de los criterios exigidos, principalmente en relación con los cambios editoriales, que probablemente estarán disponibles próximamente mediados de 1.997, después de la norma de los seis meses.

Niveles del FOUNDATION Fieldbus

Los protocolos de comunicaciones digitales suelen seguir el modelo del estándar de interconexión de sistemas abiertos, donde diversos niveles son responsables de codificar el mensaje que se transferirá a los niveles adyacentes. FOUNDATION Fieldbus sigue este enfoque, representado en la figura 5, que combina varias capas para mejorar la eficiencia de este relativamente sencillo protocolo. La mayoría de los detalles de estas capas sólo son de interés para quienes desarrollan los productos; deben ser transparentes para los usuarios finales. Las descripciones siguientes explican los aspectos que son importantes para los contratistas que diseñan sistemas fieldbus y para los usuarios finales que quieren saber qué les aporta su forma de operación básica.



Nivel Físico

El nivel físico sigue el estándar IEC y se ocupa del medio físico de transmisión/recepción de datos del Fieldbus, en términos de velocidades de comunicación codificación de la señal, duración de las conexiones, números de unidades en el bus, alimentación en el bus.

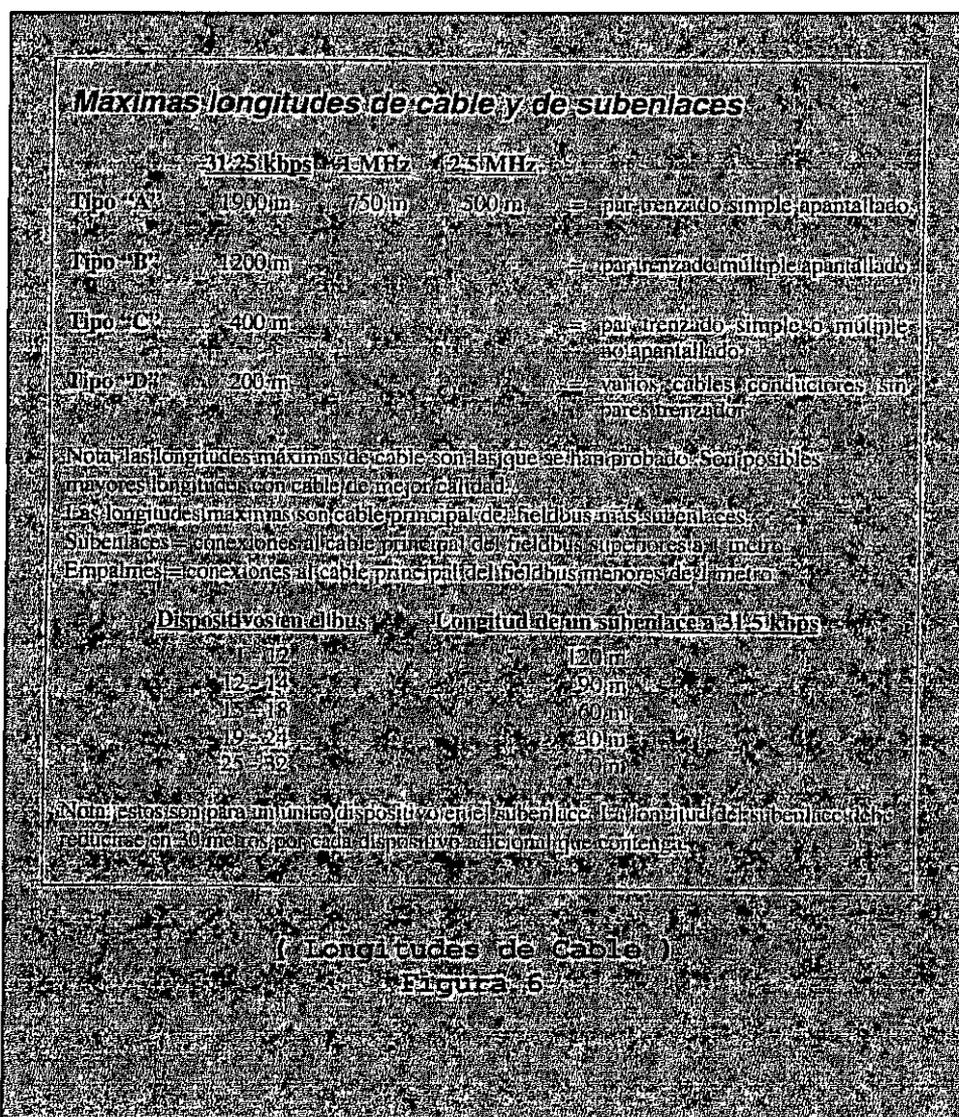
Inicialmente, FF se centro en un soporte de cable de cobre aunque actualmente se han añadido al estándar IEC la fibra óptica y las comunicaciones por radio. La longitud del bus de cable depende de la calidad del soporte físico. El cableado tipo de par trenzado apantallado es adecuado hasta 1900 metros, a la baja velocidad de comunicaciones de 31,25 Kbps, pero si el cableado es de baja calidad, esa cifra se puede reducir significativamente. De modo similar, el uso de las altas velocidades que se mencionan más adelante, reduce la longitud de cableado aceptable (Figura 6) . Las distancias cortas para conectar dispositivos al bus pueden ignorarse, aunque hay que incluir los ramales (conexiones de más de 1 metro) puesto que tienen reglas relativas a su longitud, dependiendo del número de dispositivos en el bus (figura 6).

El Fieldbus exige un terminador en cada extremo. Se trata de un componente de resistencia - capacidad para equilibrar la red de comunicaciones y evitar las distorsiones producidas por los ecos. Las velocidades de comunicaciones son de 31,25 Kbps, 1 Mbps y 2,5 Mbps. La velocidad de 31,25 Kbps soporta aplicaciones de seguridad intrínseca y, como esta es la velocidad prioritaria para FF y para proveedores, es la plataforma inicial para productos. Las velocidades más altas llegarán dentro de unos meses.

La señal utilizada para comunicaciones a través de Fieldbus se codifican con la técnica Manchester Biphase-L, que significa cada bit de datos en un ciclo completo y el '0' lógico por la mitad positiva del ciclo. Las ventajas de esta técnica tienen que ver con la seguridad de datos al estar indicados cada bit por un cambio de estado y por el control de tiempo del sistema.

El Estándar permite conectar 32 dispositivos a un bus, aunque con restricciones si estos están alimentados por el bus (a 12 unidades) y en instalaciones intrínsecamente seguras (a 6 unidades, de las cuales sólo 4 pueden estar en el área peligrosa) . Estas limitaciones en S.I. se deben en parte a la combinación de varios dispositivos de almacenamiento de

energía en un bus limitado por barrera y también a varios dispositivos reciben alimentación a través de una resistencia que limita la corriente. Los dispositivos requieren un voltaje mínimo de alimentación de 9 voltios, y la barrera de seguridad típica de Fieldbus tiene un dispositivo de limitación de corriente de 102 W. Por lo tanto, hay que sumar las necesidades de alimentación de cada dispositivo y calcular las caídas de voltaje a través de la barrera para asegurarse de que el lazo de Fieldbus puede operar. Los primeros dispositivos que estén disponibles es probable que exijan más que objetivo de 10 mA. La alimentación en el Fieldbus se especifica como de 9-30 voltios, siendo la mínima de 24 voltios. La fuente de alimentación tiene que ser especial para el Fieldbus, con filtros que garanticen que no aparece como cortocircuito en las comunicaciones Fieldbus.



Nivel de enlace de datos

El nivel de enlace de datos de FOUNDATION Fieldbus es un subconjunto del estándar emergente IEC Fieldbus: Parte 3. Su función es controlar la transmisión de mensajes hacia y desde el Fieldbus a través del nivel físico. Gestiona el acceso al Fieldbus a través de un programador determinista y centralizado del bus denominado Link Active Scheduler (programador de enlaces activo). La DLL reconoce sólo dos tipos de dispositivos: el básico y el Link Master. El Link Master contiene un LAS y muchas comunicaciones Fieldbus de control.

Los dispositivos básicos no lo llevan. Durante la configuración del Fieldbus, el LAS se suministra con una lista de todos los dispositivos del bus y con los datos que tienen que estar disponibles en un determinado momento. Cuando llega el momento en que un dispositivo tiene que dar sus datos, el LAS le dice que los emita (o "'publique') en el Fieldbus para uso de todos los dispositivos configurados para utilizar los datos (subscriptores) los recibirán simultáneamente. Los ejemplos que se incluyen en las figuras 7 y 8 ilustran este concepto.

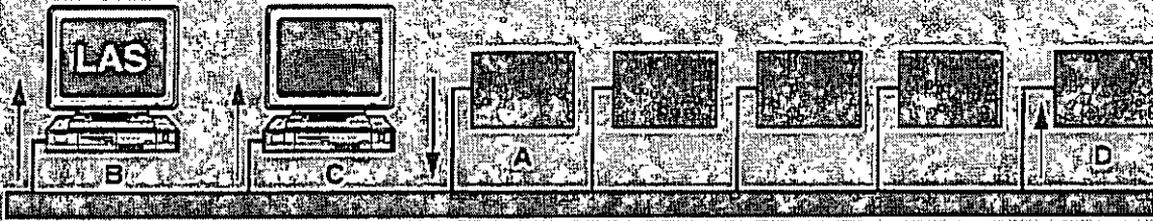
Eso cubre los mensajes programados, es decir los datos que se necesitan a intervalos periódicos y se pueden configurar en el sistema. El otro tipo de mensajes son los 'no programados', que cubren las solicitudes de datos (del operador o de las pantallas de tendencias) o mensajes generados por dispositivos (alarmas/eventos) . Al configurar el LAS, se debe controlar el tiempo asignado a los mensajes programados para garantizar que existe un tiempo libre suficiente para mensajes no planificados.

El nivel de enlace de datos también es responsable de mantener la hora en el Fieldbus a través del Time Master, para que todos los dispositivos la conozcan con una precisión de 1 milisegundo. Uno de los usos de esto será el análisis de fallos de primer defecto con tiempo de ocurrencia.

Se pueden incluir LAS y Time Masters redundantes en el Fieldbus para garantizar la continuidad de la operación en caso de fallo o de retirada del dispositivo principal.

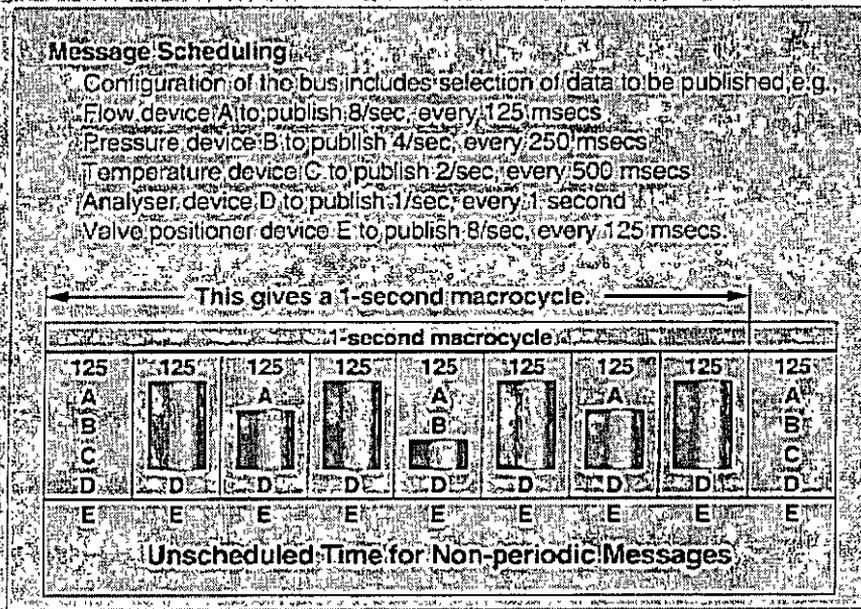
Function: Handles all the message transactions between devices to ensure they are secure and on schedule and spare time is available for unplanned messages.

Operation: Published data on the fieldbus is available for all connected devices (subscribers) to receive simultaneously.



e.g. LAS in device B instructs pressure transmitter Device A to publish its current measurement data on the bus; subscriber devices B, C and D all accept it. B uses it to update Operator Display. C holds it for possible maintenance requirements, and D uses it for PID control of the loop.

(Publicación de Datos en el Fieldbus)
Figura 7.



(Programación de Mensajes)
Figura 8.

Nivel de aplicación

El nivel de aplicación se divide en dos secciones - el Subnivel de Acceso al fieldbus y a la especificación de Mensajes Fieldbus - que se describen brevemente a continuación y luego se ignoran, ya que sólo son de interés para quienes desarrollan aplicaciones.

El FAS sustituye a los niveles OSI 3, 4, 5 y 6 como "IKN aglutinante" para posibilitar la transferencia de datos desde el nivel 2 (DLL) a la EMS en el Nivel 7.

EMS codifica y descodifica Mandatos del Nivel de Usuarios y se basa en la actividad de estándares del Nivel 7 de IEC. Contiene un 'diccionario de objetos' que permite el acceso a los datos del Fieldbus por número tag, así como por su 'índice" o dirección en el diccionario de objetos. Eso permite que las aplicaciones de los usuarios se comuniquen con los dispositivos remotos a través del fieldbus, utilizando una interfaz estándar.

Nivel de usuario

El nivel de usuario comprende tres funciones distintas:

Gestión de la red soporta la configuración del Link Active Scheduler y proporciona supervisión de rendimiento y detección de fallos, así como configuración de otras funciones de la "pila" de comunicaciones.

Gestión del sistema permite el acceso para asignar direcciones de dispositivos, sincronizar el reloj de las aplicaciones, localizar dispositivos por su número tag y programar operaciones de los bloques de funciones.

Aplicaciones de usuario se compone de bloques de función que se han desarrollado para soportar la interoperabilidad entre dispositivos y para hacer frente a las necesidades de aceptación en todo el mundo tanto por parte del sector de control de procesos como del de automatización de la fabricación. Los bloques de función están definidos en términos de conexiones de entrada y salida, de los parámetros del bloque y de la respuesta a los eventos y selecciones del modo de control.

Cada uno de estos elementos de datos se denominan 'objetos' y están referenciados en el 'diccionario de objetos" pudiendo

agruparse en cómodos paquetes de "'xxxxx objetos', como por ejemplo, objetos de bloques de función objetos de consulta y objetos de parámetros. El conjunto inicial de diez bloques de función cubre elementos que van desde entradas analógicas y digitales a estaciones de control y relación PID. Estos activan funciones de control, desde la simple Supervisión hasta Alteración Temporal y control de rango partido. El plan es que los bloques de funciones avanzadas cubran 20 operaciones adicionales, desde Generadores de Rampa a Compensación Dinámica.

Estos bloques de función se pueden integrar a voluntad en dispositivos Fieldbus para proporcionar las funciones requeridas. Por ejemplo, un simple transmisor de presión contendría un bloque de funciones de entrada analógica. Un posicionador de válvulas de control podría contener un bloque de funciones del lazo de control de presión o caudal.

Implantación del sistema fieldbus

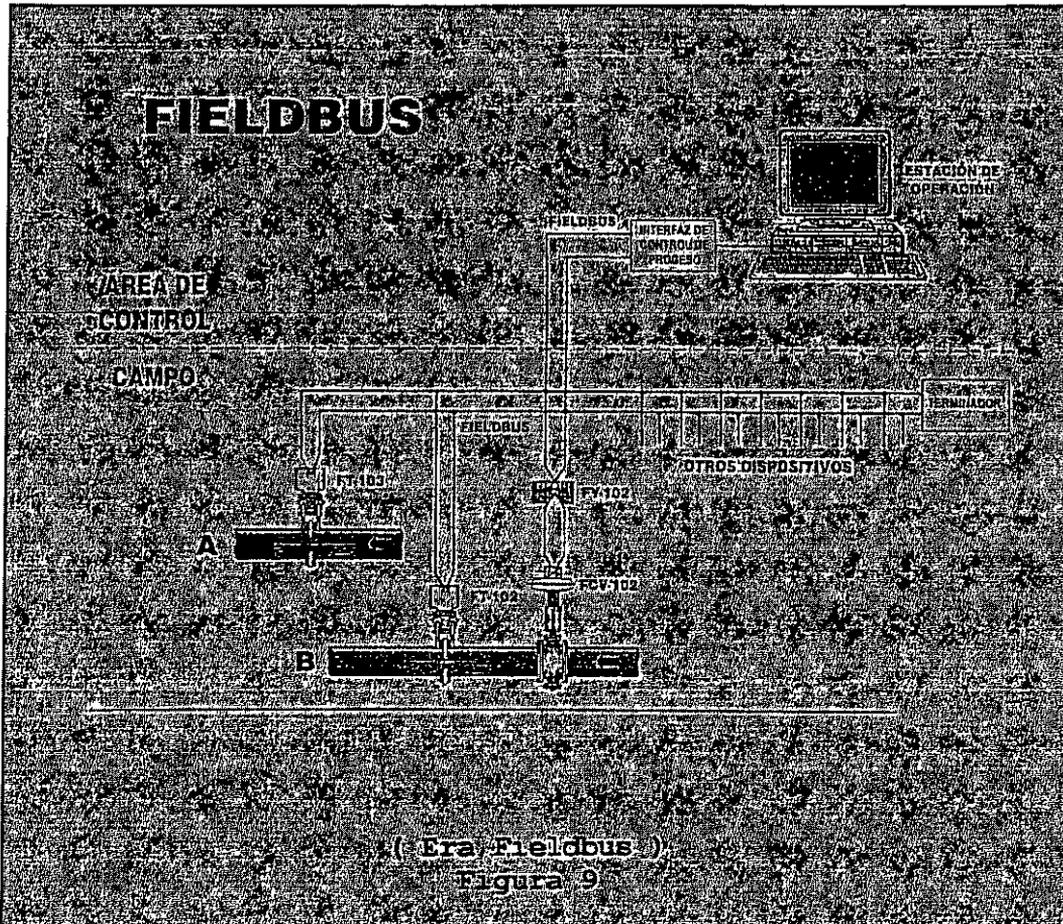
La implantación del sistema Fieldbus comprende dos fases, primero diseñar el sistema y luego configurar los dispositivos.

El diseño del sistema es una progresión lógica desde el actual esquema de sistemas de control distribuido, excepto que los dispositivos pueden ser multipunto, en lugar de punto a punto, y se pueden asignar más funciones al dispositivo remoto en campo. La estrategia de control necesaria se implementa con los proveedores actuales. Los dispositivos se pueden seleccionar en base a la funcionalidad necesaria y los dispositivos más adecuados.

La configuración del sistema exige conectar los bloques de función para ejecutar la estrategia de control. Habrá herramientas de configuración que faciliten la entrada a estas conexiones de bloques de función y a los demás elementos configurables, como por ejemplo nombres de dispositivos, dirección LAS, Tags no. y velocidad de ejecución. Después de introducir estos, la herramienta de configuración generará y descargará los datos específicos para cada dispositivo Fieldbus. El sistema estará entonces listo para el arranque.

En la era de la electrónica, microprocesadores, ya que podemos utilizar los instrumentos inteligentes y su capacidad de control y la tecnología de la red de comunicación entre

computadores. La figura 9 nos muestra un diagrama que pasaremos a analizar.



Vamos a comenzar destacando una ventaja del Fieldbus todavía no mencionada. En este ejemplo, con el uso de la comunicación solamente digital y de la tecnología de redes de computadores, necesitamos solamente un par de hilos interconectar los TRANSMISORES-CONTROLADORES FT-103, FT-102, el transductor FB/Presión de la válvula FCV-102 y el computador (de pantalla y teclado), también llamado MMI (Man/Machine Interface), Workstation o simplemente PC. Podemos notar ya en este momento la gran economía que se obtiene en los costos de cableado, bandejas y mano de obra de instalación de los Sistemas de Control Fieldbus frente a los sistemas más antiguos, que continúan utilizando protocolo 4 a 20 mA y un par de hilos para cada instrumento.

Es bueno destacar que el nivel 1 del Fieldbus, también llamado de Nivel Físico, que ya fue estandarizado hace más de dos años determina una serie características:

-. Podemos utilizar el mismo tipo de cableado del standard antiguo (4 a 20 mA), de preferencia blindado. Se ha previsto el uso de cable coaxiales y fibra óptica.

-. Para velocidad de transmisión de 31,25 Kbps, la distancia máxima es de 2 Km. Para 1 Mbps es de 750 mt, y para 2,5 Mbps de 500 mt.

-. En un mismo ramal, la limitación prevista hoy es de 12 instrumentos (si se está haciendo uso intensivo de algoritmos PID), o de 32 instrumentos cuando la característica del ramal sea la adquisición de datos

-. Para las áreas clasificadas podemos utilizar barreras de seguridad intrínseca. En este caso la limitación del número de instrumentos es algo en torno de 6, pero esto depende de los mismos cálculos que se efectúan hoy en día con el actual protocolo 4 a 20 mA.

Bien ; antes de continuar comentando acerca de los otros niveles de protocolo Fieldbus, vamos a analizar un poco más el diagrama de la Figura 3. Bajo el punto de vista de la instrumentación clásica, podríamos deducir que el transmisor/controlador FT-102 está ejecutando el control, actuando sobre la válvula FCV-102. Ahora , en la era del Fieldbus, no es más posible pensar solamente de esta manera, pues tenemos otras posibilidades de control.:

-. El transmisor/controlador FT-103 puede controlar la válvula FCV-102.

-. El transmisor/controlador FT-102 puede adquirir la información de caudal de tubo A, a través del transmisor FT-103 y, ejecutando un control de relación, actuar sobre la válvula FCV-102 que está en el tubo B.

-. El transductor FB/Presión, que también posee un algoritmo de control, puede adquirir las informaciones de los tubos A y B, a través de los transmisores FT-103 y FT-102 respectivamente, efectuando una relación y actuando sobre la válvula FCV-102.

Estas son algunas de las posibilidades, porque todavía podríamos explorar la capacidad de control de la placa controladora instalada en el PC y , en este caso ejecutar un algoritmo de control más completo, una optimización en otro computador en un nivel superior, o solamente utilizar el PC para ver lo que está sucediendo en el proceso a través del monitor.

Como hemos hablado de red de computadores, vamos a entrar un poco más en el detalle de gerenciamiento de la red Fieldbus. Aquí se ha visto que el primer maestro de la red sea siempre la placa de control instalada en el PC y que, actuando como HOT STAND BY, hasta 4 transmisores/controladores tengan la capacidad de asumir esta función en caso de falla del maestro.

Beneficios de Fieldbus

Hasta que haya plantas reales operando con equipos Fieldbus durante varios años, nadie sabrá realmente la cantidad de beneficios que puedan derivarse de la utilización del Fieldbus. Además, cualquier beneficio que se reconozca y se mida inicialmente, quedará desfasado rápidamente con los avances tecnológicos.

A continuación incluimos una breve descripción de algunos de los beneficios inmediatos:

Menor coste de los equipos instalados:

- conexión multipunto
- interfaces de E/S compartidas
- menos barreras de seguridad
- más funciones en los dispositivos de campo, por ejemplo PID, AI, Ao, etc.

Menores coste de mantenimiento:

- diagnóstico autogenerados
- capacidad/potencial para mantenimiento predictivo
- más fácil seguimiento de la calibración ISO 9000
- menos calibraciones rutinarias con dispositivos digitales

Ahorros operativos

- superior rendimiento/estabilidad de la planta con dispositivos digitales
- menores tiempos de parada o rechazos por calidad de materiales gracias a una repuesta más rápida a los problemas
- más datos de control para tomar decisiones sobre los mejores ajustes finos o acciones correctoras en caso de averías.

Conclusion

Tanto si es usted usuario final como un proveedor, FOUNDATION Fieldbus es la clave de su éxito. Fieldbus Foundation es una organización independiente que controla la tecnología Fieldbus, que está disponible para cualquier compañía y cubre chips de interfaz, software y formación para equipos de desarrollo. La tecnología está anunciada y hay productos en estado final de desarrollo en los principales proveedores mundiales.

Los usuarios finales pueden tener la confianza de que sus inversiones están seguras gracias a la naturaleza abierta del protocolo y a la competencia entre proveedores para optimizar las soluciones disponibles.

BIBLIOGRAFIA

- Industrial Process Control Design and Applications, Armando B. Corripio, Ph.D, Louisiana State University.
- Automatic Process Control, Carlos A. Smith, Ph.D , Chemical Engineering Department University of South Florida.
- Process Industrial Instruments and Controls Handbook, Douglas M. Considine, P.E, McGraw-hill, INC.
- Instrumentation Installation Project Management System, J.M. Bacon ISA International Society for Measurement and Control.



DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
CONTINUA Y A DISTANCIA

INSTRUMENTACION, CONTROL Y NORMAS PARA AUTOMATIZACION INDUSTRIAL

Del 26 al 30 de Noviembre de 2007

ANEXOS

CA - 425

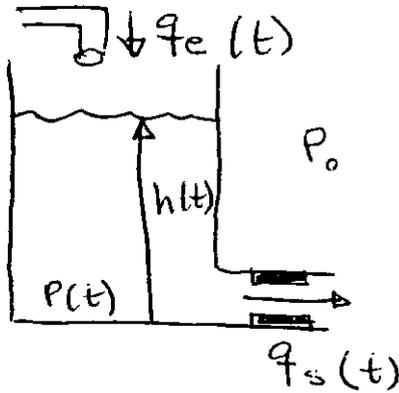
Instructor: Ing. Francisco Rodríguez
SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Noviembre de 2007

SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

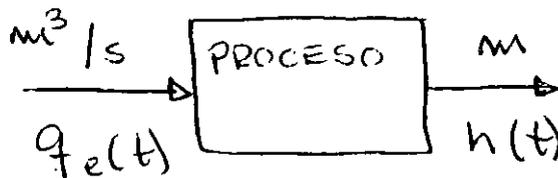
FRR-1

Proceso o planta (TANQUE ABIERTO)



Parámetros físicos y de diseño

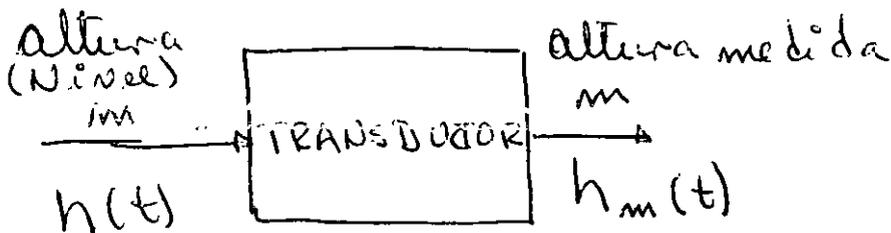
- * Altura tanque 4 m
- * Nivel de llenado máximo 3 m
- * Radio tanque 2 m
- * Capacidad tanque 37.68 m³
- * Posición del vástago de la válvula del proc 0-25 m
- * Señal de presión de entrada 0-6 bar
- * Tubo (resistencia) de salida 140 s



Transductor

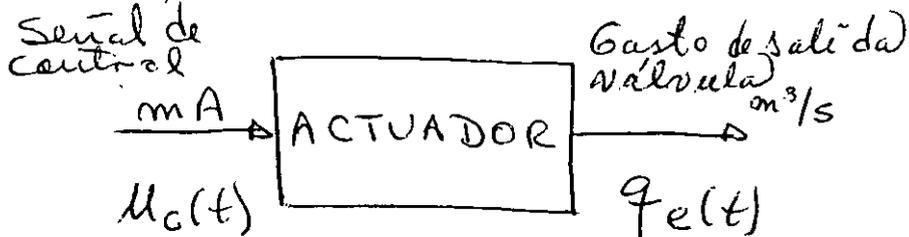
Mo se mide directamente el nivel (altura), se mide la presión en el fondo del tanque.

$$P = \rho g h$$

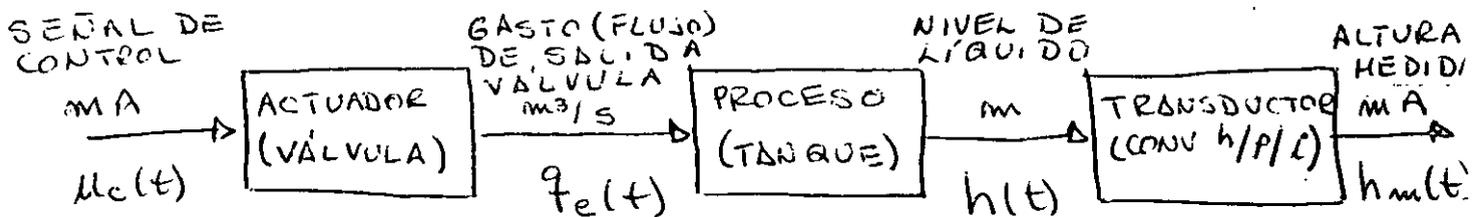


Actuador

Es una válvula que tiene como entrada la señal de control $u_c(t)$ que es una corriente en mA, y tiene como señal de salida un gasto (flujo) $q_e(t)$, en m^3/s .



Combinando los bloques anteriores, se tiene lo que se conoce como una planta instrumentada, esto es:



Modelo del proceso

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} = q_e(t) - q_s(t) - \text{①} \\ q_s(t) \propto h(t) \\ q_s(t) = \frac{1}{R} h(t) \end{aligned} \right\}$$

$V = Ah$ + Tanque cilíndrico (Sección recta $A = \text{constant}$)

Así, la ecuación ① se convierte en:

$$A \frac{dh}{dt} = q_e(t) - \frac{1}{R} h(t)$$

obien:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{1}{AR} h = \frac{1}{A} q_e$$

la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\tau \frac{dh}{dt} + h = R q_e, \text{ haciendo } R = K$$

entonces:

$$\textcircled{2} - \tau \frac{dh}{dt} + h = K q_e \left\{ \begin{array}{l} \text{donde: } \tau = AR \\ K = R \\ K = 140 \text{ s/m}^2 \\ \tau = 1758 \text{ s} = 29.3 \text{ min} \end{array} \right.$$

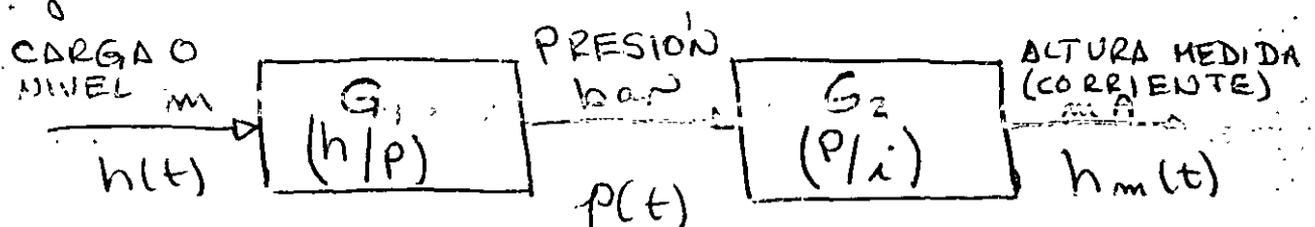
Si la ecuación ② se le aplica la transformada de Laplace y se considera que el tanque está vacío (condiciones iniciales nulas). De modo que la función de transferencia es:

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Donde: K es la ganancia estática
 τ es la constante de tiempo

Medidor (Transductor) → altura - Presión - Corriente

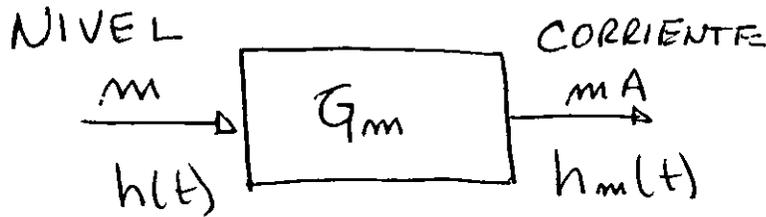
Este medidor se puede esquematizar de la forma siguiente:



o bien:

SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL
CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

FR-4



Obtención de G_1 (Convertidor Altura - Presión)

$$\left. \begin{aligned} P &= \rho g h \\ p(t) &= \rho g h(t) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \rho_{H_2O} &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$p(t) = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot h(t)$$

$$p(t) = 0.0981 h(t) \text{ [bar]}$$

de este modo:

$$p(t) = G_1 h(t)$$

donde:

$$G_1 = 0.0981 \text{ bar/m}$$

Obtención de G_2 (Convertidor Presión - Corriente)

ESPECIFICACIÓN	}	Señal de salida	$\sim -20 \text{ mA}$
FUNCIONAL		Alcance límite	130 kPa (1.3 bar)
		Intervalo límite	-100 a 130 kPa (-1, 1.3)

ESPECIFICACIÓN DE DESEMPEÑO	}	Alcance mayor que 10% de la escala completa	$\pm 0.1\%$ del alcance
		Efecto de temperatura	Contributo del error $\pm 0.5\%$. Efecto total $\pm 1\%$
		Respuesta escalón	$\tau = 0.25; \theta = 0.35$

SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL
CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

FR2-5

Así, el cálculo de la relación entre la presión y la corriente es:

intervalo de salida 4-20 mA
intervalo máximo de entrada 1.3 bar

Para nuestro ejemplo:

$$h(t) = \frac{p(t)}{\rho g} = \frac{1.3}{0.0981} = 13.3 \text{ m}$$

Hay por así de nuestro tanque.

Límite inferior 0 bar 4 mA

Límite superior $\left(\frac{1.3}{13.3}\right) \cdot 3 = 0.294 \text{ bar}$ 20 mA

Entrada / Salida	Var física	intervalo	Unidad
$u(t) = p(t)$	Presión	0-0.294	bar
$y(t) = h_m(t)$	Corriente	4-20	mA

De esta manera, G_2 se calcula como:

$$G_2 = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{h_m(t)}{p(t)} = \frac{20-4 \text{ mA}}{0.294-0 \text{ bar}} = 54.4 \text{ mA/bar}$$

Así,

$$h_m(t) = G_2 p(t) ; p(t) = G_1 h(t)$$

∴

$$h_m(t) = G_1 G_2 h(t)$$

SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL
CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

FRR-6

obien

$$G_1, G_2 = 0.0981 \times 54.4 = 5.34 \text{ mA/m}$$

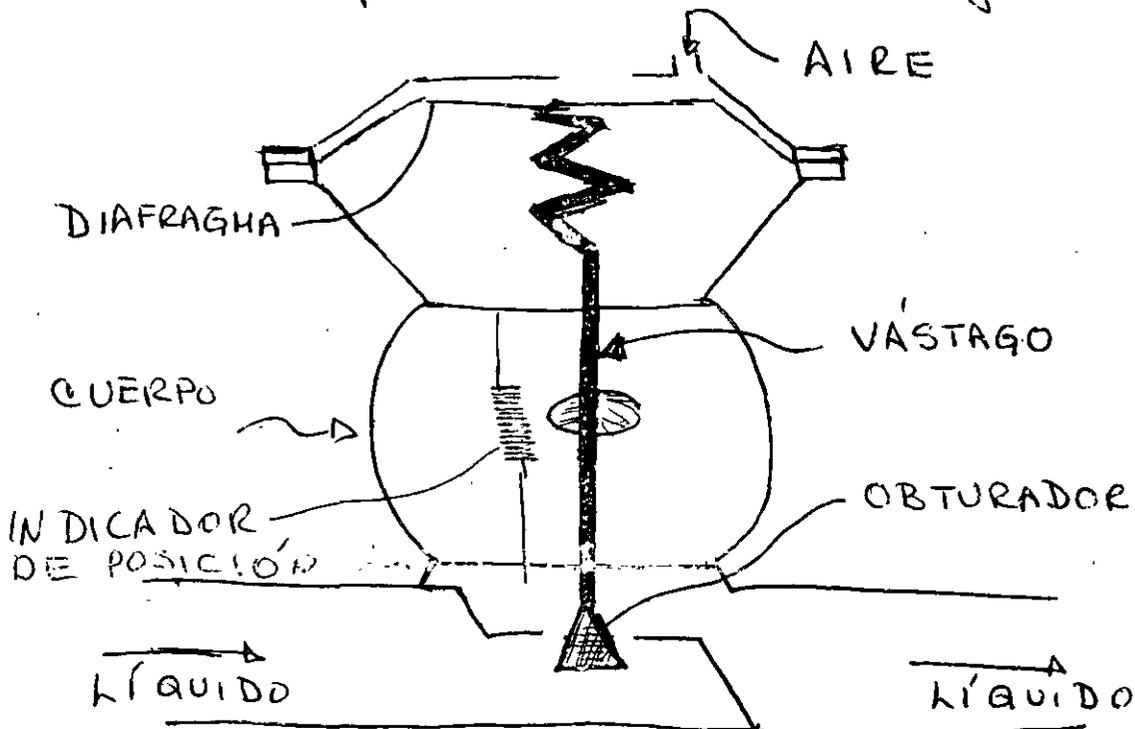
Por lo que,

$$G_m = G_1, G_2$$

$$G_m = 5.34 \text{ mA/m}$$

Actuador Válvula de control con convertidor
corriente - presión - posición - gasto

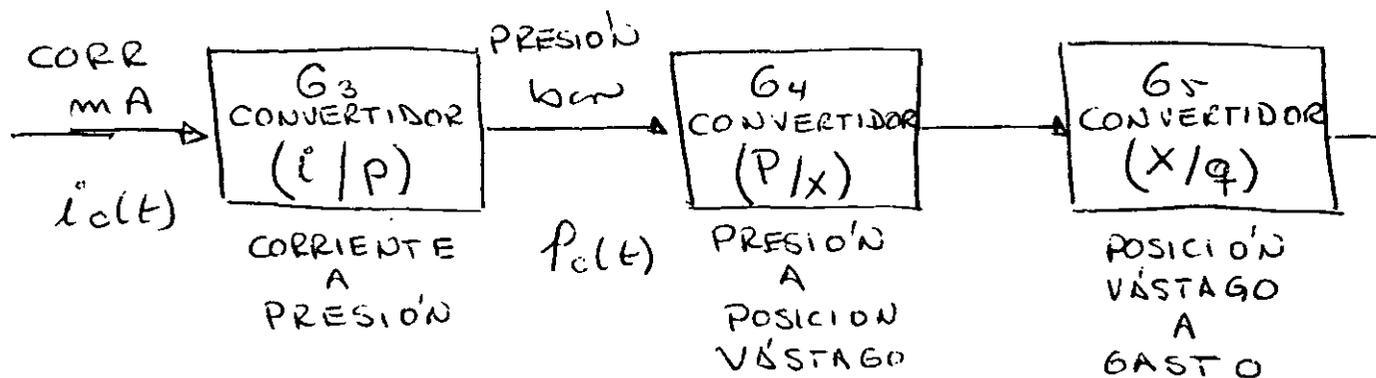
El principal actuador empleado en procesos, son la válvula de control (para regular flujo (gasto)) y la bomba (para inyectar materiales). En este caso se va a considerar una válvula, con actuador neumático (diafragma-resorte-vástago) como la que se muestra a continuación



SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

FRR-7

El diagrama de bloques del actuador consta de tres bloques y es como se muestra a seguir:



Los valores de G_3 , G_4 y G_5 representan las relaciones entre las variables (señales) corriente - presión - posición del vástago - gasto de salida de la válvula.

Primer bloque (G_3): Convertidor corriente - presión

Un convertidor típico i/p se especifica a través de la siguiente información: sobre los intervalos de las señales de entrada y salida

ENTRADA/SALIDA	VARIABLE FÍSICA	INTERVALO	UNIDADES
$u(t) = i_c(t)$	Corriente	4-20	mA
$y(t) = p(t)$	Presión	0-6	bar

El bloque G_3 (ganancia) está definido por el cociente:

$$G_3 = \frac{p_c(t)}{i_c(t)} = \frac{6 - 0}{20 - 4} = 0.375 \text{ bar/mA}$$

Segundo bloque (G_4): Relación entre la presión y la posición del vástago de la válvula

Se puede relacionar la presión sobre el diafragma a la posición del vástago de la válvula, al igualar las fuerzas en las dos caras (lados) del diafragma, esto es:

presión \times área diafragma = constante de rigidez del resorte \times el cambio en la posición del vástago

obtenemos:

$$P_c(t) A_d = K_s X(t)$$

de modo que:

$$X(t) = \frac{A_d}{K_s} P_c(t)$$

y por otro lado

$$X(t) = G_4 P_c(t)$$

y así:

$$G_4 = \frac{A_d}{K_s}$$

El diámetro del diafragma es 100 mm $\Rightarrow \phi_d = 0.1 \text{ m}$

y

$$A_d = \frac{\pi \phi_d^2}{4} = \frac{\pi (0.1)^2}{4} = 7.85398 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL
CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

FRR-9

$$K_s = 188\,400 \text{ kg/m}$$

por lo cual:

$$G_4 = \frac{7.8\,5398 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{188\,400 \text{ kg/m}} = 4.17 \times 10^{-8} \text{ m/Pa}$$

$$G_4 = 4.17 \text{ mm/bar}$$

Tercer bloque (G_5): Relación entre la posición del vástago de la válvula y el gasto de la misma.

El gasto $q_e(t)$, de salida de la válvula, que es el mismo que pasa a través de ésta (no se almacena líquido en la válvula) está dado por:

$$q_e(t) = \alpha(t) C_v \sqrt{\frac{\Delta p(t)}{\rho}}$$

donde:

$\alpha(t)$ es la apertura fraccional de la válvula (número en relación con el diseño de la válvula)

$\Delta p(t)$ es la caída de presión a través de la válvula

ρ es la densidad del líquido

Para una válvula lineal $\alpha(t)$ es la posición del vástago, $x(t)$. Si se supone que hay una caída de presión constante a través de la válvula

(lo que quería decir que el gasto tiene un efecto despreciable sobre la posición del vástago de la válvula) entonces el gasto está linealmente relacionado con la posición del vástago. Por lo tanto, el modelo de la válvula del proceso es:

$$Q_e(t) = G_s X(t)$$

donde

$$G_s = \frac{y}{u} = \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{mm}}$$

Para una válvula con una característica lineal sobre todo su intervalo de operación, el valor de la ganancia de la válvula es:

$$G_s = \frac{\text{Razón de gasto}}{100\% \text{ del cambio en la entrada}}$$

Por ejemplo, para una razón de gasto de

$$200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0.056 \text{ m}^3/\text{s}$$

entonces

$$G_s = 0.56 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{ para } 1\% \text{ de cambio en la entrada}$$

En nuestro ejemplo, la posición del vástago no está dada en porcentaje de cambio de la entrada sino que el cambio está en mm. Sabiendo que

SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL
CONTROL AUTOMÁTICO INDUSTRIAL

FRE-II

la carrera completa es de 0 a 25 mm se puede determinar la ganancia de la válvula para un cambio de 1 mm (4% del intervalo de entrada) en la posición del vástago, como:

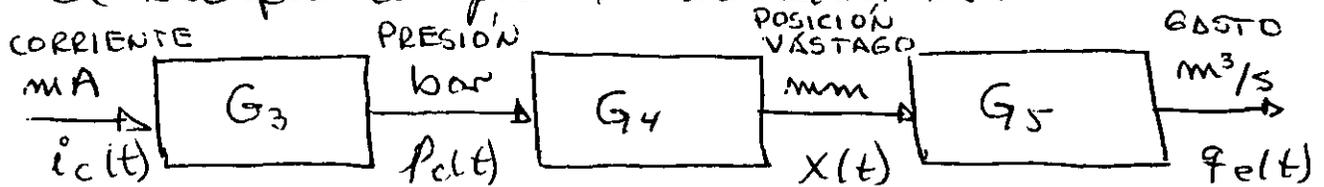
$$G_5 = 0.56 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} / \text{para } 1\% \text{ de cambio en la entrada}$$

obien:

$$G_5 = 2.24 \text{ m}^3/\text{s} / \text{para } 1 \text{ mm (4\%)} \text{ de cambio en la entrada}$$

$$G_5 = 0.00224 \text{ m}^3/\text{s} / \text{mm}$$

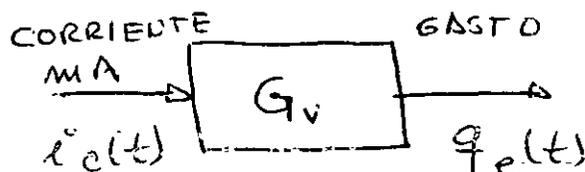
El bloque completo del actuador es:



con:

$$G_3 = 0.375 \frac{\text{bar}}{\text{mA}} ; G_4 = 4.17 \frac{\text{mm}}{\text{bar}} ; G_5 = 0.00224 \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{mm}}$$

obteniendo así:



$$G_v = G_3 \cdot G_4 \cdot G_5 = 0.0034 \text{ m}^3/\text{s} / \text{mA}$$

DISEÑO DE CONTROLADORES REDUNDANTES.

El objetivo aquí es obtener los mejores valores para los parámetros del controlador, de modo que se obtenga la mejor respuesta posible. El problema importante se puede establecer como:

- * La elección del tipo de controlador
- * La sintonización (ajuste) de los parámetros del controlador
- * El criterio de desempeño que se va a utilizar.

CRITERIO DE DESEMPEÑO

El papel del controlador en un sistema de control en lazo cerrado es que la respuesta del sistema presente características adecuadas tanto en estado transitorio como en estado estable

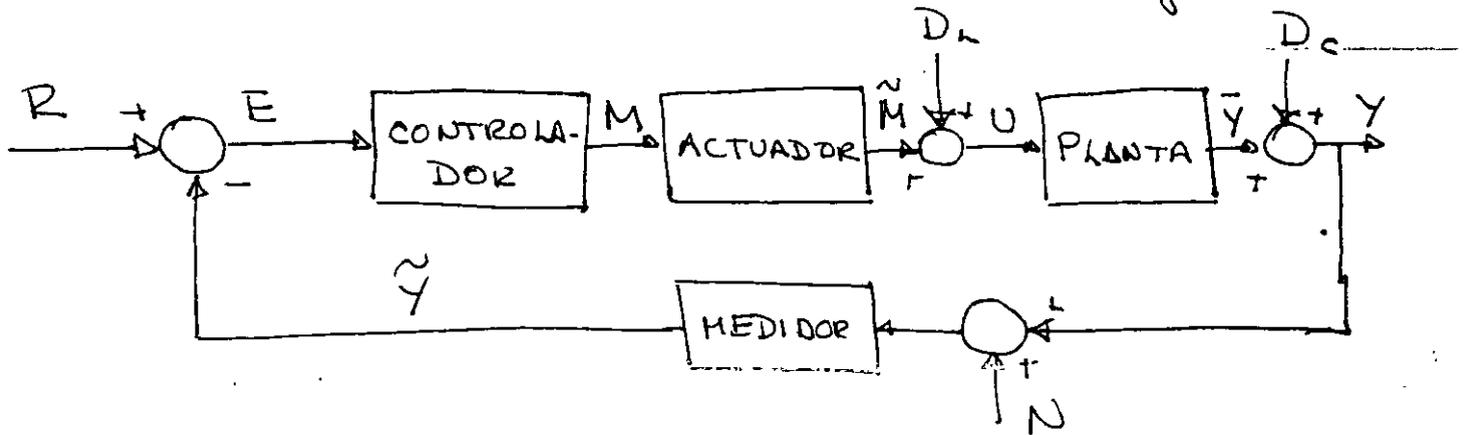
Los criterios por considerar son:

- * El controlador debe ser capaz de mantener a la variable controlada (variable de salida) en su punto de ajuste.
- * El sistema en lazo cerrado deberá ser asintóticamente estable y presentar un desempeño satisfactorio en un intervalo grande de frecuencias
- * Se debe minimizar la influencia

- de las perturbaciones
- * La respuesta ante variaciones del punto de ajuste deberán ser rápidas y suaves
 - * Se debe evitar un control excesivo (la señal de control u no debe experimentar de manera frecuente variaciones grandes y rápidas)
 - * El sistema de control debe ser robusto, es decir, debe ser insensible a variaciones en el proceso y a errores en el modelado.

En el caso real, no se pueden alcanzar todos estos objetivos simultáneamente y en el sistema de control se deben establecer compromisos. Para aplicaciones industriales la robustez es particularmente importante.

La topología típica de un sistema de control realimentado es como se muestra en seguida:



donde la planta, inevitablemente exhibe las características:

- * Incertidumbre en el modelo
- * Comportamiento no lineal
- * Dinámicas no modeladas

Los bloques de medición y actuación son muy importantes para la adecuada operación del sistema de control y su elección obedece al desempeño y no al costo. La elección del sistema de medición se puede hacer entre una variedad tanto de técnicas como dispositivos y se debe caracterizar cuidadosamente. Por otro lado, el actuador es un dispositivo que trabaja dentro de ciertos límites, lo cual requiere de un dimensionamiento cuidadoso y detallado; también hay que evitar que se sature, ya que tendrá una pérdida completa del control.

Las señales que aparecen en la figura son:

- R: Señal de entrada o referencia, en procesos industriales se conoce como punto de ajuste (su vocablo en inglés es SET POINT)
- E: Señal de error, ésta se genera a partir de otras dos señales, esto es:

$$E = R - Y$$

- Y: Es la señal que entrega el sistema de medición y es un estimado de la señal de salida, Y, la que se denomina variable controlada.
- M: Señal de salida del controlador (señal de corrección), normalmente es una señal

- de bajo nivel
- \tilde{M} : Es una señal transformada muchas veces en naturaleza o sencillamente se respalda desde el punto de vista energético, es una señal de fuerza.
- U : Es la señal de control, también conocida como variable manipulada y es un excelente indicador de la realizabilidad del sistema de control o del alcance de los objetivos de control.
- Y : Es la señal de salida del proceso cuando que no se ha modificado desde ningún punto de vista.
- D_1, D_2 : Son señales de perturbación, que precisamente perturban o alteran la operación del proceso. Éstas pueden ser perturbaciones de línea* (debidas a suministro energético), D_1 , o pueden ser perturbaciones de carga, D_2 , éstas debidas a cambios de carga en la operación del proceso. Cabe mencionar que ambas señales son de carácter aleatorio.
- N : Es una señal de ruido no deseada que se introduce inevitablemente en el proceso de medición.

Los criterios utilizados más frecuentemente son:

ESTADO TRANSITORIO:

- * El sobrepaso máximo
- * El tiempo de levantamiento

- * El tiempo de asentamiento
- * La razón de decaimiento
- * El tiempo pico
- * La frecuencia de oscilación

ESTADO PERMANENTE:

- * Los errores en estado estable
 - Posición
 - Velocidad
 - Aceleración

CARACTERÍSTICAS DE LA RESPUESTA TRANSITORIA

Las características de la respuesta transitoria dependen de la ubicación de los polos de la función de transferencia en lazo cerrado. Cuando se tienen sistemas de orden superior (orden tres o mayor) se emplean los polos dominantes, que son los polos más cercanos al eje imaginario, y se tiene una buena aproximación si la distancia relativa con el eje imaginario es de $1/4$ o $1/5$ parte de el resto de los polos. En este caso hace una aproximación con buen nivel de confianza a un sistema estándar de segundo orden, esto es:

$$G_p(s) = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\zeta\omega_m s + \omega_m^2}$$

cuando el polinomio característico asociado tiene raíces complejas (COMPORTAMIENTO SUBAMORTIGUADO), condición base para diseño, se puede expresar como:

$$\begin{aligned} P(s) &= s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \\ &= (s + \zeta\omega_n)^2 + (\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})^2 \\ &= (s + \alpha)^2 + \omega_d^2 \end{aligned}$$

de esta forma se pueden establecer cuatro características dinámicas:

ζ : Factor de amortiguamiento relativo

ω_n : Frecuencia natural no amortiguada

α : Factor de amortiguamiento real

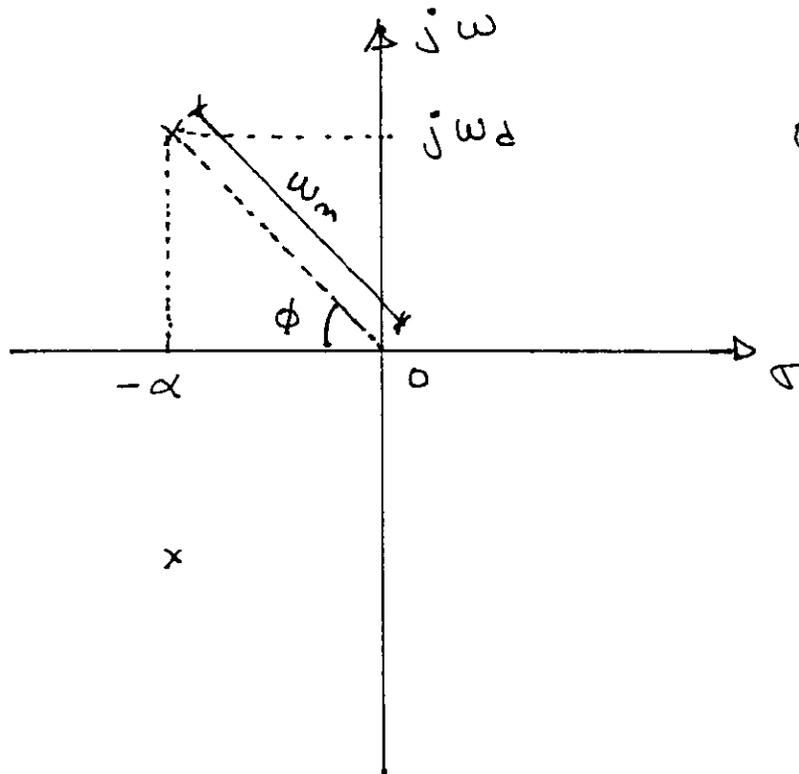
$$\alpha = \zeta\omega_n$$

ω_d : Frecuencia natural de oscilación

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

Estas características dinámicas tienen por un lado una interpretación geométrica en el plano de Gauss, y a la vez con los criterios de desempeño mencionados, de modo que se puede hacer uso de las características

en relación con los criterios (índices) de desempeño:



$$\phi = \cos^{-1} \zeta$$

Para los índices de desempeño, se tienen las siguientes expresiones:

SOBREPASO MÁXIMO $M_p = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$

TIEMPO DE LEVANTAMIENTO $t_{rl} = \frac{\pi - \phi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$

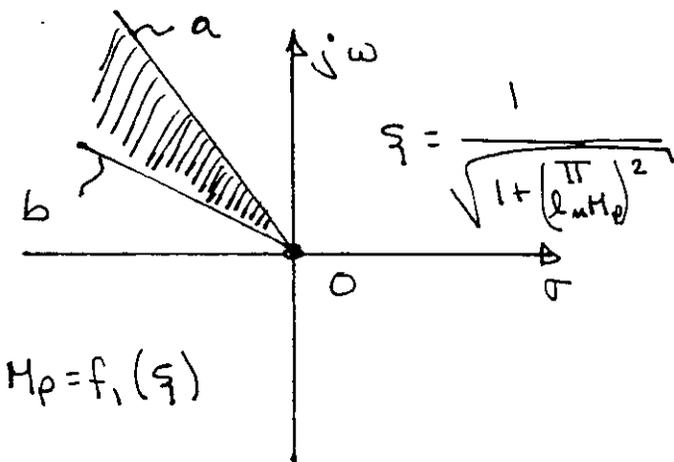
TIEMPO DE ASENTAMIENTO $t_a = \begin{cases} \frac{3}{\alpha} \pm 5\% \\ \frac{4}{\alpha} \pm 2\% \\ \frac{4.6}{\alpha} \pm 1\% \end{cases}$

TIEMPO PICO $t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$

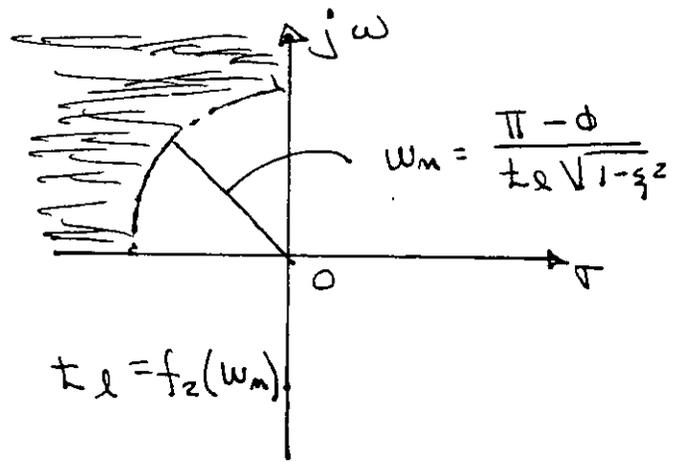
Con base en estas expresiones se pueden establecer regiones en el plano de Gauss donde se ubican los polos del sistema en lazo cerrado para satisfacer ciertos índices de desempeño:

Por ejemplo:

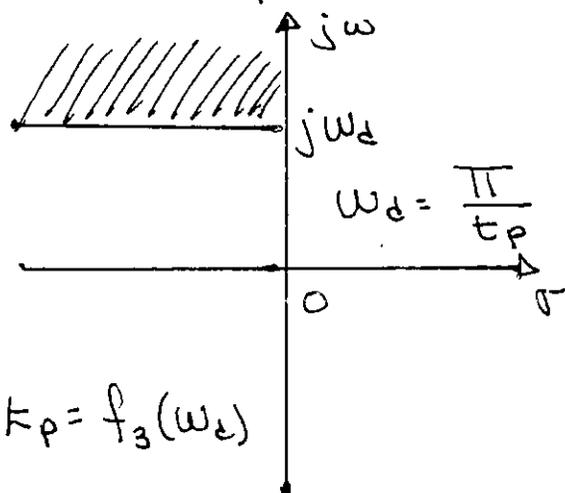
$a \leq M_p \leq b$



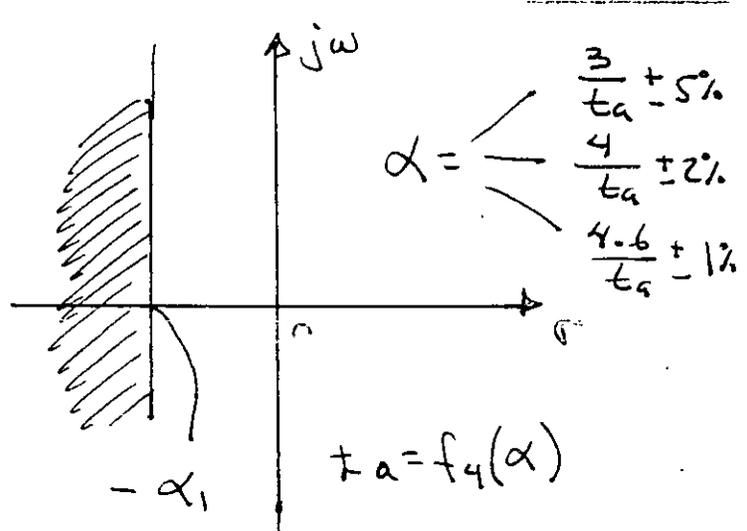
$t_d \leq c$



$t_p \leq d$

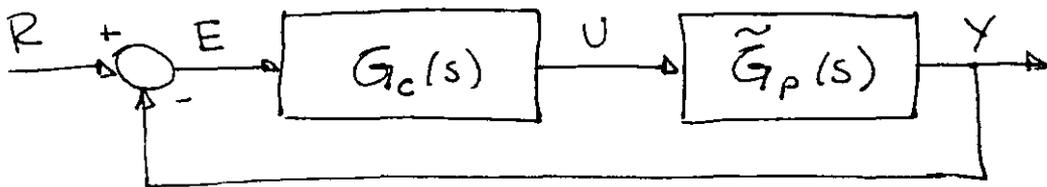


$t_a \leq e$



Características de la respuesta permanente

Una forma de medir el desempeño de la respuesta en estado permanente es a través de los errores en estado estable. Los errores se establecen a partir de la siguiente topología:



$\tilde{G}_p(s)$ es una función de transferencia que incluye las dinámicas del actuador ($G_a(s)$), de el medidor ($G_m(s)$) y de la planta ($G_p(s)$).

$G_c(s)$ es la función de transferencia del controlador

La función de error a partir del diagrama de bloques está dada por la expresión:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G_c(s)\tilde{G}_p(s)} \quad - \textcircled{A}$$

el error en estado estable está definido como:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

y a través del teorema del valor final se sabe que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

es claro que a partir de la expresión dada en la ecuación (A) el error depende de la entrada aplicada, por esta razón se definen tres tipos de errores para tres tipos de entradas; escalón, rampa y parábola, dando como resultado los errores de posición (e_p), velocidad (e_v) y aceleración (e_a), respectivamente. Los errores están definidos mediante las expresiones siguientes:

Error de posición (e_p), considerando $r(t) = \mathcal{U}_{-1}(t)$
(ESCALÓN)

$$e_p = \frac{1}{1 + K_p} \quad ; \quad K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s) \tilde{G}_p(s)$$

K_p es la constante de posición

Error de velocidad (e_v), considerando $r(t) = \mathcal{U}_{-2}(t)$
(RAMPA)

$$e_v = \frac{1}{K_v} \quad ; \quad K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_c(s) \tilde{G}_p(s)$$

K_v es la constante de velocidad

Error de aceleración (e_a), considerando $r(t) = \mathcal{U}_{-3}(t)$
(PARÁBOLA)

$$e_a = \frac{1}{K_a} \quad ; \quad K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G_c(s) \tilde{G}_p(s)$$

K_a es la constante de aceleración

Relacionado con los errores en estado estable, se define un concepto denominado TIPO DE SISTEMA que es igual al número de polos en el origen que tiene

el producto $G_c(s) \tilde{G}_p(s)$, a partir de este concepto se puede construir la siguiente tabla:

TIPO DE TIPO DE ERROR DE SISTEMA	POSICIÓN e_p	VELOCIDAD e_v	ACELERACIÓN e_a
"0"	$\frac{1}{1+K_p}$	∞	∞
"1"	0	$\frac{1}{K_v}$	∞
"2"	0	0	$\frac{1}{K_a}$
"3"	0	0	0

Es necesario mencionar que las características de la respuesta transitoria mencionadas se pueden utilizar como medidas de desempeño, así como, criterios de desempeño para diseño. Sin embargo, las características de la respuesta en estado permanente se utilizan más como medidas de desempeño que como criterios de diseño. Es posible establecer ~~con~~ criterios de desempeño para diseño a partir del error.

CRITERIOS DE DESEMPEÑO PARA DISEÑO

Si se define el error como la diferencia entre la

salida y el punto de ajuste

$$e(t) = y(t) - x(t)$$

así el criterio relacionado con la integral de la función de error toma en cuenta la naturaleza global de la respuesta del proceso. A saber existen varios criterios que se presentan enseguida:

* Integral del error elevado al cuadrado (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

* Integral del valor absoluto del error (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

* Integral del valor absoluto del error multiplicado (ponderado) por el tiempo (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

El problema es entonces elegir el tipo de controlador y sus parámetros de modo que minimice alguno de los criterios descritos. Los criterios se pueden ordenar con respecto a sus características propias, esto es:

- * El uso de IAE produce sistemas con buen amortiguamiento; para sistemas de segundo orden, el factor de amortiguamiento relativo resultante será alrededor de 0.7 muy cercano al producido por ITAE. Con ISE sería alrededor de 0.5. El criterio ISE no es muy sensible a la variación de los parámetros, en contraposición a ITAE el cual sí lo es.
- * Para suprimir errores grandes (mayores a 1), ISE es mejor que IAE, debido a que el término del error que se considera está elevado al cuadrado.
- * Para suprimir errores pequeños (menores a 1), IAE es mejor que ISE.
- * Para suprimir errores que persisten a lo largo de tiempos prolongados, el mejor criterio es ITAE ya que el término t amplifica muy poco los errores persistentes. Este criterio se prefiere con frecuencia ya que ofrece mayor seguridad. En general, produce sobrepasos y oscilaciones más pequeñas.

Graham y Lathrop en 1953 obtuvieron las mejores funciones de transferencia en lazo cerrado con respecto al criterio ITAE

- Cuando el numerador es una constante, la función de transferencia no tiene ceros,

esto corres ponde a un error de posición que es cero para una entrada escalón. El denominador tomara alguna de las formas de la primera parte de la tabla.

- Cuando el grado del numerador es 1, la función de transferencia tiene un cero. Esta será diseñada para asegurar un error de posición cero y un error de velocidad cero para una entrada rampa. El denominador tomara una de las formas de la segunda parte de la tabla.
- Cuando el grado del numerador es 2, la función de transferencia tiene dos ceros, Esto asegurará un error de aceleración cero para una entrada parábola. El denominador tomara una de las formas de la tercera parte de la tabla.

Denominator of transfer function G_{cl} optimal for ITAE
For a system with zero position error $G_{cl}(s) = \omega_0^n / (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + \omega_0^n)$
$s + \omega_0$ $s^2 + 1.4\omega_0s + \omega_0^2$ $s^3 + 1.75\omega_0s^2 + 2.15\omega_0^2s + \omega_0^3$ $s^4 + 2.1\omega_0s^3 + 3.4\omega_0^2s^2 + 2.7\omega_0^3s + \omega_0^4$ $s^5 + 2.8\omega_0s^4 + 5.0\omega_0^2s^3 + 5.5\omega_0^3s^2 + 3.4\omega_0^4s + \omega_0^5$ $s^6 + 3.25\omega_0s^5 + 6.6\omega_0^2s^4 + 8.6\omega_0^3s^3 + 7.45\omega_0^4s^2 + 3.95\omega_0^5s + \omega_0^6$
For a system with zero velocity error $G_{cl}(s) = (a_1s + \omega_0^n) / (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + \omega_0^n)$
$s^2 + 3.2\omega_0s + \omega_0^2$ $s^3 + 1.75\omega_0s^2 + 3.25\omega_0^2s + \omega_0^3$ $s^4 + 2.41\omega_0s^3 + 4.93\omega_0^2s^2 + 5.14\omega_0^3s + \omega_0^4$ $s^5 + 2.19\omega_0s^4 + 6.50\omega_0^2s^3 + 6.30\omega_0^3s^2 + 5.24\omega_0^4s + \omega_0^5$ $s^6 + 6.12\omega_0s^5 + 13.42\omega_0^2s^4 + 17.16\omega_0^3s^3 + 14.14\omega_0^4s^2 + 6.76\omega_0^5s + \omega_0^6$
For a system with zero acceleration error $G_{cl}(s) = (a_2s^2 + a_1s + \omega_0^n) / (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + \omega_0^n)$
$s^3 + 2.97\omega_0s^2 + 4.94\omega_0^2s + \omega_0^3$ $s^4 + 3.71\omega_0s^3 + 7.88\omega_0^2s^2 + 5.93\omega_0^3s + \omega_0^4$ $s^5 + 3.81\omega_0s^4 + 9.94\omega_0^2s^3 + 13.44\omega_0^3s^2 + 7.36\omega_0^4s + \omega_0^5$ $s^6 + 3.93\omega_0s^5 + 11.68\omega_0^2s^4 + 18.56\omega_0^3s^3 + 19.30\omega_0^4s^2 + 8.06\omega_0^5s + \omega_0^6$

ELECCIÓN DEL CONTROLADOR PID

Los efectos de los términos individuales que forman al controlador PID, se enuncian ~~de~~ brevemente a continuación:

* ACCIÓN PROPORCIONAL (P)

- Acelera la respuesta del proceso mediante el incremento de la ganancia
- Produce un error en estado estable excepto en procesos que tienen un integrador ($1/s$) en su función de transferencia. Esta desviación con respecto al punto de ajuste disminuye cuando la ganancia proporcional se incrementa

* ACCIÓN INTEGRAL (I)

- Elimina el error en estado estable
- Esta eliminación se logra en general a expensas de grandes sobrepasos
- La respuesta es lenta, con grandes oscilaciones.

- El incremento en la ganancia K hace que el comportamiento sea oscilatorio y puede conducir a inestabilidades.

* ACCIÓN DERIVATIVA (D)

- Se anticipa a errores futuros
- Introduce un efecto de estabilización en la respuesta en lazo cerrado, es decir, la suaviza.

RECOMENDACIONES DE USO DE CONTROLADORES PID

Reglas sencillas

- 1.- Si es posible, se debe usar un controlador proporcional (P); si ~~el~~ el error en estado estable es tolerable o si el proceso contiene un integrador. Se recomienda en control de presión de gases y en control de nivel.
- 2.- Si el controlador proporcional no es aceptable, se puede usar un proporcional-integral (PI); si el error en estado estable es muy grande. Se recomienda en control de flujo. En este caso, la respuesta es rápida y la lentitud inducida por la acción integral no es importante. Es recomendable utilizar un PI para procesos que tienen una dinámica de primer orden, por ejemplo, el control de nivel en un tanque.

3- En otros casos, utilizar un controlado proporcional-integral-derivativo (PID); la respuesta en lazo cerrado será más rápida y el controlador será más robusto. Se recomienda en control de temperatura, control de composición y procesos con capacidades en serie. De acuerdo con Åström y Hägglund recomiendan el uso de controladores PID para procesos con dinámicas de segundo orden, las cuales son difíciles de detectar, o que tienen constantes de tiempo de diferentes órdenes de magnitud. Debido a la acción derivativa, se puede limitar la ganancia.

4- A continuación se listan algunos sistemas típicos que presentan serios problemas para el controlador PID:

- * Sistemas con tiempo muerto
- * Sistemas con modos oscilatorios
- * Sistemas cuyos parámetros presentan grandes variaciones
- * Sistemas en los que se deberá controlar una variable de calidad

Por otra parte, para un estudio más detallado es posible proporcionar algunos consejos que sólo tendrían validez para casos en los que no se tiene un modelo del proceso; de ningún modo estos consejos no constituyen instrucciones de uso sin reservas, de modo que siempre se necesitará utilizarlos con CUIDADO.

CONTROL DE FLUJO. El control realimentado para flujo y presión de líquidos están caracterizados mediante respuestas rápidas de modo que los retardos, en general, se pueden despreciar. Los sensores y las líneas de transmisión neumáticas pueden introducir un retardo de tiempo. En general, las perturbaciones son ruido de alta frecuencia, lo cual hace que se inestabilice la acción derivativa. Con frecuencia en estos casos se utilizan controladores PI.

CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS. En situaciones como ésta si son tolerables pequeñas variaciones en el nivel (alrededor de 5%) no se necesita la acción integral. Si se usa la acción integral, se pueden elegir ganancias altas debido a la naturaleza integral del proceso. En términos generales, no se usa la acción derivativa. Por otro lado, en muchos casos, se utiliza un tanque amortiguador (BUFFER TANK) para evitar las fluctuaciones de nivel en la planta. En este caso, el flujo de salida del tanque deberá ser lo más estable posible y el controlador tendrá que sintonizarse cuidadosamente.

Cuando se presenta transferencia de calor en el tanque (RECALENTADORES, EVAPORADORES), su modelo operativo es mucho más complicado y el controlador será diferente.

CONTROL DE PRESIÓN DE GAS. Si el gas está en equilibrio con un líquido, entonces el control de presión del gas es muy difícil. Solamente se considerará

en este caso, únicamente gas. El tanque (o la tubería) se controla parcialmente por sí solo; si la presión en el interior del sistema se torna muy alta, el flujo de alimentación decrece, y viceversa. En general, se utilizan controladores PI con una acción integral pequeña (K_i debe ser grande). A menudo, los volúmenes de los tanques son pequeños de modo que los tiempos de residencia son ~~largo~~ cortos con respecto al resto del proceso y no es necesaria la acción derivativa.

CONTROL DE TEMPERATURA. Los problemas de control de temperatura en general son complicados y variados con respecto a los sistemas considerados. Con mucha frecuencia, esto se debe a que se presentan tiempos de retardo, con el fin de evitar inestabilidad la ganancia no debe ser muy grande. Se utilizan con frecuencia controladores PID en lugar de controladores PI, ya que los PID presentan respuestas más rápidas y estabilizan al proceso.

CONTROL DE COMPOSICIÓN. En este tipo de procesos, se tienen varios puntos en común con el control de temperatura, pero interviene en por de factores adicionales:

- * El ruido en la medición es mucho más importante.
- * El tiempo de retardo puede ser muy grande (por ejemplo, los cromatógrafos).