

J-90

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



---

**INSTRUMENTACION, CONTROL Y SU  
APLICACION A UNA PLANTA  
GENERADORA DE VAPOR**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P r e s e n t a n**

**ALBERTO LUQUE LUNA  
ANTONIO CASTILLO CADENA  
ROGELIO ARGUELLES ESTRELLA  
RUBEN DARIO OCHOA VIVANCO**

MEXICO, D. F.

1979



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## " I N D I C E "

## Introducción

I METROLOGIA

I.1	Introducción	1
I.2	Elementos propios de un Instrumento de Medición	1
I.3	Transmisores	2
I.4	Transductores	4
I.5	Mediciones de Presión	10
I.5.1	Introducción	
I.5.2	Dispositivos Empleados en la Medición de Presión	
I.5.3	Dispositivos de Calibración de Manómetros	
I.6	Medición de Flujo	19
I.6.1	Introducción	
I.6.2	Clasificación de los Medidores de Flujo	
A.-	Medidores de Relación	
a)	Ecuación General para el Cálculo del Elemento Primario	
b)	Elementos Primarios	
c)	Tubo de Pitot	
d)	Medición de Flujo con Elementos de Presión Diferencial	
e)	Medidores de Area Variable	
f)	Medidores de Flujo de Tipo Inferencial con Principio Eléctrico.	
B.-	Medidores de Cantidad	
I.7	Medición de Temperatura	40
I.7.1	Introducción	
I.7.2	Métodos de Medición de Temperatura	
a)	Termómetro de Líquido en Tubo de Vidrio	
b)	Termómetros a Presión de Fluidos	
c)	Termómetro a Presión de Líquidos	
d)	Termómetro a Presión de Gases	
e)	Termómetro a Presión de Vapor	
f)	Termómetro Bimetálico	

## II CONTROL INDUSTRIAL AUTOMATICO

II.1	Introducción	-102
II.2	Símbolos, Notación y Terminología Usados en Instrumentación y Control	-103
II.2.1	Introducción	
II.2.2	Símbolos y Notaciones	
	a) Identificaciones Generales	
	b) Identificaciones Específicas	
	c) Símbolos	
II.2.3	Terminología de los Elementos de un Sistema de Control	
	a) En el Proceso	
	b) En el Circuito de Control Automático	
II.2.4	Terminología de las Características de los Elementos de un Sistema de Control	
	a) Del Proceso	
	b) Del Control Automático	
II.3	Sistemas de Control Automático	-113
II.3.1	Introducción	
II.3.2	Sistemas de Control de Circuito Abierto	
II.3.3	Sistemas de Control de Circuito Cerrado	
II.3.4	Componentes de un Sistema de Control de Circuito Cerrado	
II.4	Sistema de Control Automático Sencillo de un Elemento	-117
II.4.1	Introducción	
II.4.2	El Controlador Automático	
II.4.3	Modos de Control Básicos	
	a) Modo Proporcional	
	b) Modo Integral	
	c) Modo Derivativo	
II.4.4	Modos de Control más Utilizados	
	a) De Dos Posiciones	
	b) Modo Proporcional + Integral	
	c) Modo Proporcional + Derivativo	
	d) Modo Proporcional + Integral + Derivativo	

## " I N D I C E "

## Introducción

I METROLOGIA

I.1	Introducción	1
I.2	Elementos propios de un Instrumento de Medición	1
I.3	Transmisores	2
I.4	Transductores	4
I.5	Mediciones de Presión	10
I.5.1	Introducción	
I.5.2	Dispositivos Empleados en la Medición de Presión	
I.5.3	Dispositivos de Calibración de Manómetros	
I.6	Medición de Flujo	19
I.6.1	Introducción	
I.6.2	Clasificación de los Medidores de Flujo	
A.-	Medidores de Relación	
a)	Ecuación General para el Cálculo del Elemento Primario	
b)	Elementos Primarios	
c)	Tubo de Pitot	
d)	Medición de Flujo con Elementos de Presión Diferencial	
e)	Medidores de Area Variable	
f)	Medidores de Flujo de Tipo Inferencial con Principio Eléctrico.	
B.-	Medidores de Cantidad	
I.7	Medición de Temperatura	40
I.7.1	Introducción	
I.7.2	Métodos de Medición de Temperatura	
a)	Termómetro de Líquido en Tubo de Vidrio	
b)	Termómetros a Presión de Fluidos	
c)	Termómetro a Presión de Líquidos	
d)	Termómetro a Presión de Gases	
e)	Termómetro a Presión de Vapor	
f)	Termómetro Bimetálico	

- g) Termómetro de Resistencia (RTD)
- h) Método del Puente Desequilibrado
- i) Termómetro de Termistancia
- j) Pirómetros de Radiación
- k) Termopares

## I.8 Medición de Nivel - . . . . . 61

### I.8.1 Introducción

### I.8.2 Métodos de Medición de Nivel

- A.- Mecanismo Tipo Flotador
- B.- Mecanismo Tipo Desplazamiento
- C.- Medidor Hidrostático
  - a) Sistema de Fuerza Balanceada
  - b) Sistema de Burbujeo
  - c) Sistemas de Presión Diferencial
- D.- Sistema de Efecto Térmico
  - a) Sistema de Tubo de Expansión
  - b) Sistema Termohidráulico
- E.- Elementos Eléctricos y Electrónicos Sensores para Medición de Nivel
  - a) Sensores que Utilizan Principios Eléctricos
  - b) Celda Foto-eléctrica para Determinación de Nivel
  - c) Detector Sónico
  - d) Sistema de Radiación

## I.9 Mediciones Eléctricas - . . . . . 84

### I.9.1 Introducción

### I.9.2 Sistemas de Medición

### I.9.3 Aparatos Indicadores

- a) Amperímetros
- b) Voltímetros
- c) Vatímetro
- d) Factor de Potencia
- e) Fasímetros
- f) Frecuencímetros

## II CONTROL INDUSTRIAL AUTOMÁTICO

II.1	Introducción	. . . . .	-102
II.2	Símbolos, Notación y Terminología Usados en Instrumentación y Control	. . . . .	-103
II.2.1	Introducción		
II.2.2	Símbolos y Notaciones		
	a) Identificaciones Generales		
	b) Identificaciones Específicas		
	c) Símbolos		
II.2.3	Terminología de los Elementos de un Sistema de Control		
	a) En el Proceso		
	b) En el Circuito de Control Automático		
II.2.4	Terminología de las Características de los Elementos de un Sistema de Control		
	a) Del Proceso		
	b) Del Control Automático		
II.3	Sistemas de Control Automático	. . . . .	-113
II.3.1	Introducción		
II.3.2	Sistemas de Control de Circuito Abierto		
II.3.3	Sistemas de Control de Circuito Cerrado		
II.3.4	Componentes de un Sistema de Control de Circuito Cerrado		
II.4	Sistema de Control Automático Sencillo de un Elemento	. . . . .	-117
II.4.1	Introducción		
II.4.2	El Controlador Automático		
II.4.3	Modos de Control Básicos		
	a) Modo Proporcional		
	b) Modo Integral		
	c) Modo Derivativo		
II.4.4	Modos de Control más Utilizados		
	a) De Dos Posiciones		
	b) Modo Proporcional + Integral		
	c) Modo Proporcional + Derivativo		
	d) Modo Proporcional + Integral + Derivativo		

- II.4.5 Modos de Control más Utilizados de acuerdo a las Características Dinámicas de los Procesos
  - a) Retraso de Capacitancia
  - b) Retraso de Medición
  - c) Respuesta Instantánea
  - d) Retraso de Velocidad - Distancia
- II.5 Sistema de Control Automático Compuesto . . . . .137
  - II.5.1 Introducción
  - II.5.2 Sistema de Control de Cascada
  - II.5.3 Sistema de Control de Relación
    - a) Con Estación de Relación
    - b) Parte a Total
    - c) De Cantidad Total
    - d) Entre Variables Diferentes
  - II.5.4 Sistema de Control de Impulso con Aviso de Señal
  - II.5.5 Sistema de Control de Rango Dividido
  - II.5.6 Sistema de Control de Predominio
  - II.5.7 Sistema de Control de Ciclo de Tiempo
  - II.5.8 Sistema de Control de Programa de Tiempo
  - II.5.9 Sistema de Control de Punto Final
- II.6 Elementos Finales de Control . . . . .161
  - II.6.1 Introducción
  - II.6.2 Características de Control
  - II.6.3 Tipos de Válvulas de Control
    - a) Válvulas Tipo Globo
    - b) Válvulas Tipo Mariposa
    - c) Válvulas Tipo Bola
    - d) Posicionadores
    - e) Válvulas de Diafragma



### III INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL EN UNA PLANTA GENERADORA DE VAPOR

III.1	Introducción . . . . .	172
III.2	Instrumentación	
	III.2.1 Introducción	
	III.2.2 Características de la Instrumentación Eléctrica	
	III.2.3 Características de la Instrumentación Neumática	
	III.2.4 Criterio de Selección	
III.3	Control en Calderas . . . . .	176
	III.3.1 Introducción	
	III.3.2 Requerimientos de un Sistema de Control de Calderas	
	III.3.3 Medición de las Variables en una Planta Generadora de Vapor	
	III.3.4 Control de las Variables en el Proceso de Generación de Vapor	
	A.- Control de Combustión	
	a) Sistema de Control de Relación de Flujo de Vapor - Flujo de Aire	
	b) Sistema de Control de Relación de Flujo de Combustible - Flujo de Aire	
	c) Sistema Analizador de Gases	
	d) Diagrama de un Sistema Básico de Control de Combustión	
	B.- Control de Agua de Alimentación	
	a) Control de Operación Intermitente	
	b) Control Auto Operado	
	c) Control de Dos Elementos	
	d) Control de Tres Elementos	
	C.- Sistema de Control Maestro	
	Conclusiones . . . . .	196
	Bibliografía . . . . .	198

## " I N T R O D U C C I O N "

La Política Económica de México ha motivado el desarrollo industrial, impulsando la tecnología de Instrumentación y Control para poder controlar los diferentes Procesos Industriales, aprovechando al máximo los recursos energéticos tan altamente apreciados.

Para el desarrollo económico del país, se necesita la Independencia Tecnológica y para lograrlo se requiere de Técnicos e Ingenieros Mexicanos capacitados adecuadamente para cubrir la rama de la Ingeniería dedicada a la Instrumentación y el Control.

Lo anterior ha dado pie a la elaboración de esta Tesis, cuyo objetivo es dar la metodología y criterios necesarios para la correcta selección de la Instrumentación y del Sistema de Control en Procesos Industriales.

Para seleccionar apropiadamente la Instrumentación y el Sistema de Control, se hace necesario estudiar los requerimientos del Proceso, la lógica que deben seguir las distintas señales y los instrumentos necesarios para detectar la situación exacta de cada una de las variables, su transmisión y computación analógica, con objeto de lograr la corrección más adecuada en el Elemento Final de Control.

En el Capítulo I se explican las diferentes formas de Medición de algunas de las Variables que pueden intervenir en un Proceso. Es importante que el Elemento Primario que esté en contacto con el medio a medir sea el apropiado, ya que de ello dependerá la buena información del estado del proceso y su correcto control. En la Medición de Flujo es particularmente importante el cálculo de dicho elemento.

Una vez ejecutada la medición, se obtiene una señal (Eléctrica o Neumática), por medio de un transductor y se envía hasta el Sistema de Control (Previamente seleccionado de acuerdo a las características del Proceso).

El estudio del comportamiento del Proceso y su respuesta a los cambios de las variables estará a cargo del Ingeniero Instrumentista.

En el Capítulo II se describen las Formas de Control Industrial, en focándose principalmente al Control Automático retroalimentado (Sencillo y Compuesto). Además, se tratan los Modos de Control del Controlador con especial cuidado ya que es el componente que proporciona la característica del Sistema de Control.

En el Capítulo III se aplican los estudios de Metrología y Control a una Planta Generadora de Vapor (Caldera) considerando como cajas negras las partes más elementales de la Caldera para lograr una mejor comprensión de los Sistemas de Control y su interacción.

Se deja abierta al lector la elección del Tipo de Sistema de Control de acuerdo a las características y necesidades de cada Proceso.

El enfoque objetivo de la aplicación a una Caldera de los conceptos de Metrología y Control hacen que el explicar el funcionamiento de la Cal dera esté fuera de nuestro panorama.

Esperamos que el presente trabajo sea útil a aquellas personas que de alguna forma se encuentran relacionadas con el área.

# C A P I T U L O I

## M E T R O L O G I A

### I.1 - Introducción.

La Metrología es la ciencia que se encarga de estudiar las formas - de cuantificación y medición de una variable, y los instrumentos disponibles para ello.

Medir es comparar una magnitud con otra que consideramos como unidad.

En la Industria, si se desea tener un adecuado control en un proceso, deberá presentarse la necesidad inherente de medir y cuantificar nuestra variable.

### I.2 - Elementos propios de un Instrumento de Medición.

Para medir cualquier variable, es necesario conocer los elementos - que constituyen un instrumento de medición, esto es:

#### Elemento Primario

Es la parte del mecanismo que está en contacto con el medio a medir.

#### Transductor

Dispositivo que recibe una señal de impulso y la transforma a otro tipo de señal proporcional al impulso de la variable.

#### Filtro

Elimina señales indeseables que vienen mezcladas con la señal de interés. Empleado unicamente en instrumentos electrónicos.

Amplificador

Aumenta los niveles de la señal del transductor para su mejor registro o transmisión.

Transmisor

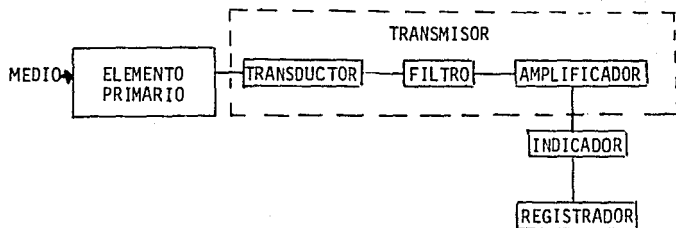
Dispositivo que contiene al transductor, al filtro y al amplificador. Recibe una señal de impulso y transmite otra señal proporcional a la variable.

Indicador

Recibe la señal del transmisor e indica la magnitud de la variable a través de un puntero sobre una escala.

Registrador

Recibe la señal del transmisor y grafica la variable sobre un papel al efecto.



## I.3 - Transmisores.

Las señales que se obtienen a través de los transmisores, pueden ser de tipo y rango de:

- #--#--#-- Señal neumática 3-15 psig. ó 3-27 psig.
- Señal eléctrica  $\pm 10$  vdc, 1 a 5 volts dc y 4 a 20 ma dc.
- ~~~~~ Señal electromagnética (Longitud de onda).
- t-t-t- Señal hidráulica 0 a 100 psig. (Generalmente).

Los transmisores que operan con señal neumática, señal eléctrica o electromagnética, deberán contar con una fuente de poder, esto es:

1) Si el sistema es de transmisión neumática, se deberá disponer de aire limpio y seco a la presión requerida para alimentar al transmisor.

Si la presión está en el rango de 3-15 psig., el aire de suministro deberá tener 18 psig. Si está en el rango de 3-27 psig., el aire de suministro deberá tener 30 psig.

2) Si los transmisores son del tipo eléctrico o electrónico, se deberá tener una fuente de poder, en este caso, un alimentador eléctrico que suministre corriente a los equipos. Algunos equipos recibirán alimentación en 115 vca o bien, si son de tipo estado sólido, habrá que alimentar a una fuente de poder para que reduzca y transforme la energía a un potencial de 24 volts generalmente y en corriente directa para poder alimentar a los circuitos de estado sólido.

3) Cuando la señal es hidráulica (0-100 psig), se dispondrá de estaciones de bombeo de aceite, que suministrarán la presión de aceite requerida para los transmisores o dispositivos de operación.

La razón del uso de transmisores para las señales de campo, se debe a que los tableros normalmente no aceptan señales vivas o directas del proceso, especialmente cuando se trata de presiones de fluidos que en un momento determinado pueden tener fugas en los registradores o indicadores, ocasionando problemas en la parte eléctrica de los tableros.

Es de considerarse también, que llevar una señal viva de proceso desde la fuente de medición hasta el tablero de control, reporta más gastos de montaje, por lo que es preferible llevar señales neumáticas o de tipo eléctrico desde el transmisor hasta el tablero para reducir los costos.

## I.4 - Transductores

Los Transductores, que transforman una señal de impulso a otra que posteriormente pasa por un amplificador y cuyo conjunto denominaremos en lo sucesivo transmisor, pueden ser:

### Transductor de Resistencia Variable: (Fig. I.4.1)

Un movimiento de un contacto sobre un cursor potenciométrico, hace variar la resistencia.

La señal de salida será voltaje o corriente dependiendo del circuito de conexión.

Se utilizan normalmente para medir desplazamientos.

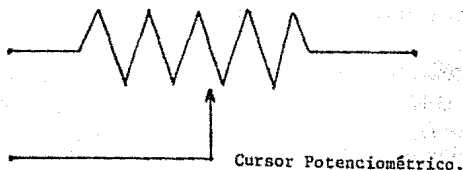


Fig.I.4.1 Diagrama de un transductor de resistencia variable.

### Transductor de Transformador Diferencial: (Fig. I.4.2)

Consiste en un transformador cuyo elemento primario normalmente está conectado a la fuente de alimentación, el secundario consiste de dos bobinados con el mismo número de vueltas, la mitad de ellas enrolladas en un sentido, la otra mitad en sentido contrario.

El transformador tiene la forma de un cilindro. En el centro del cilindro se encuentra desplazándose un núcleo que es posicionado por el elemento primario, esto es: cuando el núcleo se encuentra al centro del transformador, el voltaje en el secundario es cero. Cuando el núcleo se encuentra en el extremo superior, el voltaje es máximo con signo positivo; cuando el núcleo se encuentra en la parte inferior en su máxima carrera, el voltaje es máximo con signo negativo.

En esta forma el elemento primario accionará al núcleo que motivará una señal de voltaje a la salida del secundario. El elemento primario puede ser cualquier dispositivo; siempre y cuando se obtenga una transformación de la señal de impulso de la variable en un desplazamiento para que éste sea aprovechado por el núcleo, se posicione, y dé una señal de voltaje proporcional a la variable.

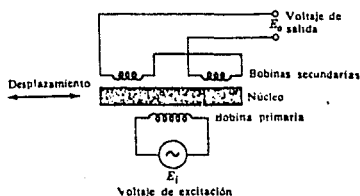


Fig I.4.2 Diagrama esquemático de un transductor de transformador Diferencial.

### Transductor Tipo Capacitivo: (Fig. I.4.3)

Su principio de funcionamiento está basado en las tres variables que intervienen en un condensador, dos de ellas se mantienen constantes y una tercera se hace variar. En esta forma el circuito receptor va a estar diseñado de tal modo que pueda recibir señales de capacitancia.

Se ha mencionado anteriormente que cualquiera de las tres variables puede ser afectada, y en éste caso, el elemento primario puede actuar para que cambie la distancia entre placas del condensador, el dieléctrico o el área; atendiendo a la fórmula mostrada en la figura, podemos apreciar que



Un de capacitancia puede ser directa e inversamente proporcionando de la variable afectada.

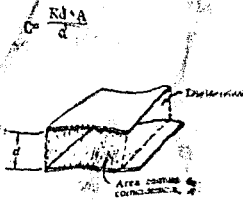


Fig.1.4.3 Esquema de un transductor capacitivo

#### Transductor de Efecto Piezoeléctrico: (Fig. 1.4.4)

Algunos cristales tienen por característica natural, (o pueden adquirirla bajo cierto tratamiento), el que cuando se les aplica una fuerza sobre sus caras, éstas producen un voltaje o viceversa; cuando se les aplica una diferencia de potencial a sus caras, sus cristales adquieren un movimiento vibratorio, es decir, obtendremos fuerza.

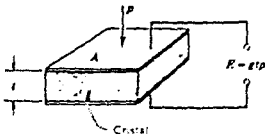


Fig. I.4.4 Esquema de un transductor de efecto piezoeléctrico

### Transductor Fotoconductor (Fig. I.4.5)

Si un haz de luz incide sobre un material semiconductor, como Silicio o Germanio, se producirá un decremento en su resistencia. Si este semiconductor es aplicado a un circuito electrónico, se obtendrá una variación de corriente en función de la mayor ó menor cantidad de luz que incide sobre el semiconductor.

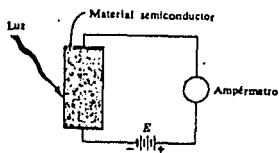


Fig.I.4.5 Diagrama esquemático de un transductor fotoconductor.

### Celdas Foto-Voltaicas: (Fig. I.4.6)

Consiste en un material semiconductor que se encuentra en contacto con una lámina metálica. La mayor o menor incidencia de luz en este semiconductor, ocasionará una diferencia de potencial entre la lámina metálica y la capa de material aislante que se encuentra en contacto con la otra cara del material semiconductor.

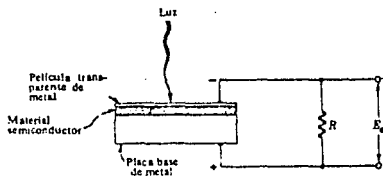


Fig.I.4.6 Esquema de un transductor de celda fotovoltaica.

### Transductor de Efecto Foto-Eléctrico: (Fig. I.4.7)

Consiste en un diodo, cátodo y ánodo, acoplados a un circuito. Al cátodo incide un haz de luz, ocasionando una emisión fría de electrones hacia el ánodo. A mayor incidencia de luz sobre el cátodo, corresponderá una mayor cantidad de electrones que son recibidos por el ánodo, produciéndose entonces una mayor corriente eléctrica que podrá ser detectada por el circuito.

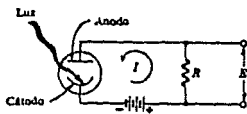


Fig.I.4.7 Diagrama esquemático de un transductor de efecto fotoeléctrico.

### Transductor de Efecto Hall: (Fig. I.4.8)

Sea una placa que lleva una corriente eléctrica. Al actuar sobre ella un campo magnético, se generará una diferencia de potencial en una dirección perpendicular tanto a la corriente como al campo magnético. A variaciones de campo magnético, corresponderán variaciones de voltaje.

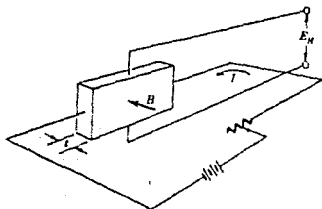


Fig.I.4.8 Esquema de un transductor de efecto Hall.

### Transductor de Bobina Magnetométrica (Fig. I.4.9)

Una variación respecto al tiempo del campo magnético, actuando sobre una bobina, generará una fuerza electromotriz proporcional a dicha variación.

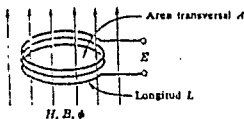


Fig. I.4.9 Esquema de un transductor de Bobina Magnética.

### Transductor Neumático (Fig. I.4.10)

El desplazamiento de un eslabón, producido por el movimiento de un tubo Bourdon, hace cambiar la distancia entre la tobera y la palometa, - entonces, la presión de aire cambiará en el diafragma del booster por la acción de un relevador, manteniéndose una señal neumática proporcional a la posición del indicador de la variable medida.

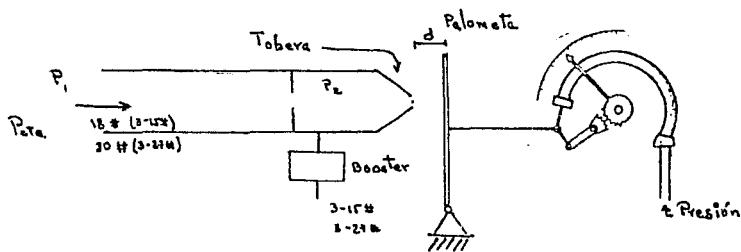


Fig. I.4.10 Esquema de un transductor Neumático.

De lo expuesto, se puede apreciar que se requiere de un elemento primario que responda en cierta forma al impulso de la señal para que se pueda acoplar al transductor más apropiado, éste a un amplificador de señal y en esta forma obtener un transmisor para la variable.

En la instrumentación de plantas de proceso y en nuestro caso en particular, se presenta en el capítulo correspondiente una discusión sobre sistemas de transmisión en base de señales neumáticas o eléctricas.

## I.5 - Mediciones de Presión.

### I.5.1 - Introducción.

La presión, dimensionalmente hablando, está dada por una fuerza sobre el cuadrado de la unidad de longitud. Actualmente la presión está definida como la altura de una columna de Mercurio referida a 68°F y a presión atmosférica normal de 14.696 psia. Tomando como densidad del mercurio 13.5951 g/cm<sup>3</sup>, esta altura será de 760 mm.

El Sistema Internacional de Unidades (SI) establece como unidad de presión al Kilopascal, que equivale a 1000 Newtons/metro<sup>2</sup>.

Para nuestros propósitos comentaremos única y exclusivamente la presión estática, que está definida como la presión ejercida por una fuerza sobre las paredes que contienen a determinado fluido, y que es transmitida perpendicularmente a las paredes del recipiente.

Estamos omitiendo definiciones de presión de velocidad y presión total dado que en las mediciones de presión en los procesos y para fines de control, la presión estática es la requerida.

La presión bajo los términos antes mencionados puede ser:

- Presión manométrica
- Presión absoluta
- Presión diferencial
- Presión de vacío
- Presión barométrica

La "Presión manométrica" es la directamente medida por el elemento sensor.

El concepto de "Presión absoluta" puede ser mejor ilustrado, observando la figura I.5.1, en la cual se tiene un nivel de cero absoluto y otro de presión barométrica local. En caso de tener una presión manométrica, la presión absoluta la obtendremos sumando la presión barométrica más la presión manométrica. Si la presión obtenida es de vacío, la presión absoluta será obtenida restando la presión de vacío a la presión barométrica.

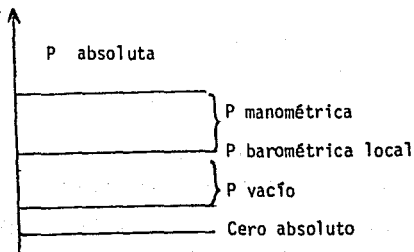


Fig. I.5.1

La "Presión diferencial" es una diferencia de dos presiones estáticas.

La "Presión de vacío" es la medida abajo de la presión barométrica y que por consecuencia no puede ser mayor que la presión barométrica, esto es, la presión barométrica menos la presión de vacío nos dará la presión absoluta, y ésta nunca podrá ser menor que la presión en el cero absoluto. (Ver Fig. I.5.1).

La "Presión barométrica" (Presión Atmosférica), es la producida por la fuerza elástica del aire sobre un punto dado de la atmósfera. Se le mide por medio del barómetro. La presión atmosférica varía con el lugar, la altura, la temperatura y los fenómenos meteorológicos.

### I.5.2 - Dispositivos Empleados en la Medición de Presión

Los dispositivos con los que se mide la presión son:

Columnas de líquidos

Elementos elásticos

Sistemas que utilizan propiedades eléctricas (inferenciales).

#### Columnas de Líquidos

Los manómetros de columnas de líquidos son por lo general ampliamente usados en bajos rangos de medición y especialmente para la medición de presiones de fluidos en condiciones relativamente de estado estático. - Son dispositivos usados en mediciones locales.

La columna "U" diferencial consiste en un tubo en forma de "U" - transparente, dentro del cual se encuentra un fluido de cierta gravedad específica.

Definamos como gravedad específica de una sustancia, la relación de peso de la sustancia sobre el peso de un volumen igual de agua a 68°F.

La medición de la presión en la columna puede lograrse conectando los extremos de la columna a dos fuentes diferentes de presión, en cuyo caso se obtendrá una diferencia de presiones o bien, conectando un punto de la columna a la toma de presión y dejando el otro punto abierto a la presión atmosférica se tendrá una medición de presión manométrica o de vacío. En cualquier caso, el líquido tendrá a desplazarse sobre la columna y la presión estará determinada en la mayoría de los casos por la diferencia de niveles provocada en el líquido.

Observando la figura I.5.2, al aplicar presión a una de las tomas de la columna, la presión diferencial estará dada por:

$$P = H \gamma$$

, en donde  $\gamma$  = Peso específico del fluido (lb/pie<sup>3</sup>) y  
 $H$  = Diferencia de niveles (pies).

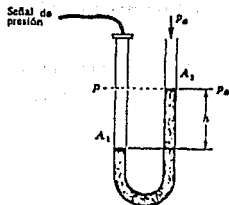


Fig. I.5.2 Manómetro de tubo en 'U'

Una modificación de la columna "U", es la columna inclinada, en cuyo caso la lectura es hecha sobre el lado inclinado de la columna; ya sea para medición de presión estática ó diferencial. Debido a la inclinación - de la columna, se puede obtener una mayor aproximación en la lectura.

La escala de la columna puede estar referida a pulgadas de agua utilizando un líquido de diferente gravedad específica. Normalmente las columnas comerciales utilizan mercurio o aceite ( $G_{Hg} = 13.6$  y  $G_{Ac} = 0.75$ ) y la escala referida a pulgadas o a milímetros de agua.

En esta forma, cuando se obtiene una lectura de una columna diferencial, la lectura será la diferencia de niveles  $H$ , y para obtener la presión en psf se multiplica la distancia  $H$  por el peso específico del líquido.

Los fundamentos del tubo "U" se pueden aplicar comercialmente a mecanismos de cierta robustez y disposición que utilizan como medio un líquido sobre el que actúan flotadores ó campanas invertidas.



Los instrumentos de este tipo son de bastante exactitud pero presentan el problema de que el líquido puede evaporarse o derramarse; por lo que la calibración de estos dispositivos es algo difícil.

Se puede generalizar el hecho de que las mediciones de presión con columna "U" son útiles y prácticas para lecturas instantáneas ó de comprobación para otro tipo de instrumentos.

### Elementos Elásticos

Las columnas "U" generalmente son reemplazadas por mecanismos de tipo diafragma que tienen limitación de rango de operación dependiendo de las características del material con que está hecho el diafragma.

El sistema de diafragma consiste en un recipiente dividido por una membrana elástica que se deforma en función de la presión que es aplicada al recipiente. Si la presión es aplicada a un solo lado del diafragma se rá una medición de presión estática, y si la presión es aplicada a ambos lados del diafragma se obtendrá una medición de presión diferencial. - - (Fig. I.5.3)

MEDICION DE PRESION

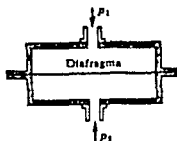


Fig.I.5.3 Esquema de un medidor de diafragma.

Los diafragmas pueden ser:

de placa metálica

encapsulados

corrugados

con alma metálica en el material flexible.

El movimiento del diafragma a través de algún sistema de mecanismos, es llevado al interior del recipiente y accionará a un puntero que se des-  
plaza sobre una escala.

Generalmente el diafragma es hecho de bronce o de acero inoxidable.

Cuando el elemento primario en una medición está en contacto con un fluido que se utiliza para proceso o alimentación, forzosamente deberá ser de acero inoxidable, según lo establecido en Códigos.

Cuando la medición de presión se realiza con algún dispositivo de -  
diafragmas y el mecanismo se encuentra en algún cuarto presurizado, debe-  
rá hacerse una corrección en la calibración del indicador de presión.

#### Tubo Bourdon (Fig. I.5.4)

A medida que el rango de operación aumenta, el mecanismo tipo dia-  
fragma dejará de ser útil, por lo que por condiciones de punto de opera-  
ción se utilizará el elemento elástico tipo tubo Bourdon.

El tubo Bourdon consiste en un tubo de cierto espesor y material de  
acuerdo con los rangos de operación y medio a medir, el cual se pasa a -  
través de unos rollos con objeto de aplanarlo e inferirle la forma de una  
elipse. Posteriormente se dobla en forma de semi-circunferencia con un  
arco de aproximadamente 270°. Uno de sus extremos se cierra y el otro se  
acopla a un block terminal.

El extremo del tubo que se encuentra cerrado se acopla a un sistema  
de cremallera conectada a un puntero que se desplaza sobre una escala.

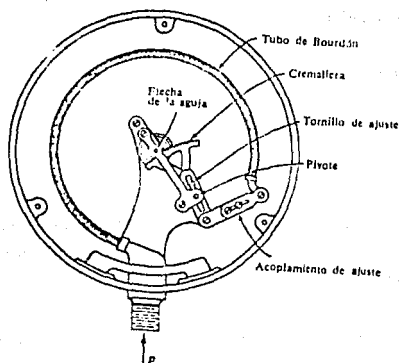


Fig.I.5.4 Esquema de un manómetro de tubo de Bourdon.

Al aplicar la presión el tubo tiende a deformarse, es decir, a recuperar su forma original. La deformación es transmitida por el movimiento de cremallera al puntero que indica sobre la escala, la magnitud de la presión.

El tubo Bourdon es posiblemente el dispositivo más comunmente usado para medir presiones.

Al tubo Bourdon puede dársele la forma de hélice o de espiral y el principio de operación es el mismo.

#### Sistemas que Utilizan Propiedades Eléctricas (Fig. I.5.5)

El medidor Pirani es un sistema de medición de tipo termal que se utiliza para hacer mediciones al alto vacío. Consiste en un hilo de resistencia de sección pequeña, calentado por corriente eléctrica. Este elemento sensor es colocado en el espacio bajo medición.

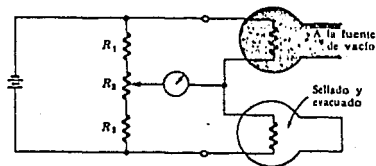


Fig. I.5.5 Medidor Pirani con compensador para cambios de temperatura.

Cuando la presión en el gas aumenta, la cantidad de moléculas que chocan con el hilo será mayor y la temperatura del elemento disminuirá, - ésto da por resultado que la resistencia eléctrica del hilo disminuya, al aumentar la presión en el gas.

Caso contrario, si la presión en el gas disminuye, la temperatura en el hilo aumentará, así como su resistencia.

Conectando entonces el hilo a un puente de Wheatstone, se obtendrá en éste una indicación del vacío existente en el espacio de medición.

Para compensar los cambios de temperatura del medio, se coloca en - éste un segundo hilo encerrado herméticamente dentro de un tubo al vacío y se conecta a otra rama del puente. Este tubo responderá como el primer hilo a los cambios de temperatura, compensando las variaciones de temperatura en la cámara.

### I.5.3 - Dispositivos de Calibración de Manómetros

El tubo Bourdon es un manómetro que se puede calibrar por medio de una balanza de pesos muertos.

Para la calibración de mecanismos de medición de tipo diafragma, que hacen mediciones de presión de bajo nivel, se pueden emplear las columnas de mercurio o las columnas de agua.

En la instalación de manómetros deberá considerarse:

La altura estática de la columna desde el punto de toma hasta el lugar del manómetro, para la protección de los manómetros.

El tipo de fluido en las líneas. Para líneas de vapor deberá instalarse cierto número de sifones. Para líneas de petróleo o chapopote - - (fluido viscoso), deberán instalarse cámaras separadoras utilizando un - líquido de interfase o un diafragma metálico de interfase.

## I.6 - Medición de Flujo.

### I.6.1 - Introducción.

La medición de flujo es un aspecto cuantitativo y de gran necesidad en la industria, puesto que en base a él se hacen los costeos de la operación del proceso. Además, se pueden obtener señales de esas mediciones que son aprovechadas por el sistema de control.

La precisión de las mediciones dependerá de las repercusiones que ésta tenga sobre el estado financiero de la compañía, o bien, sobre los resultados que se puedan obtener en investigaciones en caso de hacerlas.

### I.6.2 - Clasificación de los Medidores de Flujo.

Los medidores de flujo se pueden clasificar en:

**Medidores de Relación.**- Son aquellos por los que el fluido pasa en forma de un flujo continuo a través de su elemento primario. El paso de la corriente del fluido se aprovecha por el elemento secundario directa o indirectamente, para hacer la medición.

**Medidores de Cantidad.**- Son aquellos en que el paso del fluido a través de su elemento primario se efectúa en cantidades sucesivas y aisladas por peso o volumen, para llenar y vaciar alternativamente recipientes de capacidades conocidas.

#### A.- Medidores de Relación.

Para el estudio de medidores de relación aplicables a un flujo dentro de un ducto cerrado, debemos tener como referencia algunos principios básicos de hidráulica.

El flujo debe ser normalmente turbulento, el cual se define como aquel fluido que no está afectado por cambios de dirección, reducciones - ampliaciones de área. Por lo general ésto se consigue colocando un tramo recto de tubería (antes del elemento primario), de una longitud aproximada -

a: 30 diámetros y un tramo recto después del elemento primario de una longitud de 6 diámetros.

Los requerimientos de tramo recto varían en función a la disposición y configuración de la tubería.

En algunos casos, dado a las condiciones de instrumentación, se aplican enderezadores de flujo que acortan la longitud del tramo recto requerido antes del elemento primario.

Enfocaremos nuestra atención al cálculo del elemento primario utilizado en la medición de flujo.

a) Ecuación General para el Cálculo del Elemento Primario:

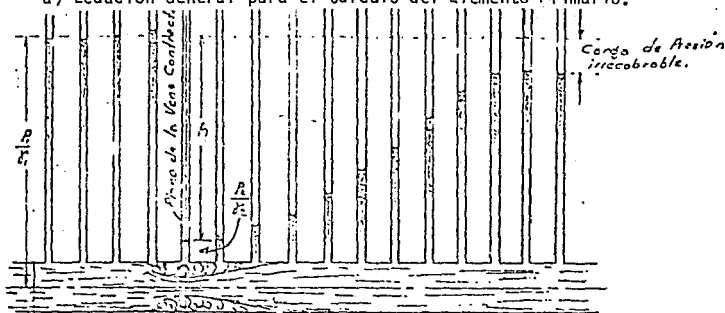


Fig.I.6.1 Distribución de cargas a lo largo de una tubería con un elemento primario.

Se ha considerado de la ecuación general de la energía que:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Como hay un plano horizontal de referencia,  $Z_1 = Z_2$ , por tanto:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g}$$

además, de la Figura I.6.1 observamos que:

$$\frac{P_1}{\gamma_1} - \frac{P_2}{\gamma_2} = h$$

entonces:

$$h = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}$$

o sea,

$$2hg = V_2^2 - V_1^2 \quad (1)$$

Tomando en cuenta la ecuación de continuidad de flujo:

$$q = A_1V_1 = A_2V_2;$$

$$V_1 = \frac{A_2V_2}{A_1}$$

substituyendo en (1) este valor, queda:

$$2gh = V_2^2 - \left(\frac{A_2V_2}{A_1}\right)^2$$

o sea:

$$2gh = V_2^2 \left(1 - A_2^2/A_1^2\right).$$

despejando la velocidad  $V_2$  :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - A_2^2/A_1^2}} = \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{1}{1 - A_2^2/A_1^2}} \quad (2)$$

Considerando que el ducto es de sección circular, tendremos:

$$A_1 = \pi D^2/4 = 0.785 D^2 \quad (D = \text{Diámetro interior de la tubería, en ft})$$

$$A_2 = \pi d^2/4 = 0.785 d^2 \quad (d = \text{Diámetro del círculo del área restringida, en ft})$$



Substituyendo los valores de  $A_1$  y  $A_2$  en (2), se encuentra:

$$V_2 = \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{1}{1 - d^4/D^4}}$$

Si llamamos a la relación  $d/D = B$  (relación de diámetros):

$$V_2 = \sqrt{2hg} \sqrt{\frac{1}{1 - B^4}}$$

y recordando que:

$$q = A_1V_1 = A_2V_2;$$

entonces:

$$q = A_2V_2 = A_2 \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{1}{1 - B^4}}$$

como además:

$$q = w/\gamma;$$

( $q$  = gasto en función del volumen,  
ft<sup>3</sup>/s)

$$w = \gamma q;$$

( $w$  = gasto en función del peso,  
lbs/seg)

tendremos:

$$w = \gamma A_2 \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{1}{1 - B^4}}$$

Aplicaremos algunos coeficientes prácticos a la ecuación básica del cálculo del elemento primario:

Si llamamos  $C$  al coeficiente de descarga

$$C = \frac{\text{Gasto real}}{\text{Gasto teórico}};$$

se tendrá:

$$q = CA_2V_2 = CA_2 \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{1}{1 - B^4}};$$

$$w = C \delta q = C \delta \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{1}{1 - B^4}}$$

Se ha considerado el flujo  $w$  en lbs/seg, y por lo tanto, si la medición se hace en lbs/hr,  $w$  será:

$$w = \frac{wh}{3600}$$

El área (pies<sup>2</sup>) del elemento primario, puede expresarse en función del diámetro 'd' expresado en pulgadas:

$$\text{Area (ft}^2\text{)} = \frac{\pi d^2}{4 \times 144}$$

La diferencial  $h$  (pies), siempre está referida a una columna de agua (en pulgadas), a una temperatura de 68°F y con un peso específico de 62.317 lbs/ft<sup>3</sup>

Entonces:

$$\delta_1 h = \frac{\delta_1 whw}{12}; \quad (\delta_1 = \text{peso específico del fluido a la entrada del elemento primario, lbs/pie}^3)$$

$$h = \frac{\delta_1 whw}{12 \delta_1}; \quad (\delta_w = \text{peso específico del fluido en la columna de agua a 68°F, 62.317 lbs/pie}^3)$$

substituyendo valores:

$$h = \frac{hw}{12} \frac{62.317}{\delta_1}; \quad (hw/12 = \text{diferencial dada en pulgadas})$$

con estos factores dimensionados, la ecuación toma la forma:

$$q = CA_2 V^2 = CA_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - B^4}}$$

$$w = \delta q = \delta CA_2 \sqrt{\frac{2gh}{1 - B^4}}$$

$$\frac{wh}{3600} = C \frac{\pi d^2}{4 \times 144} \gamma_1 \sqrt{2g} \sqrt{hw/12} \sqrt{62.317/\gamma_1} \sqrt{\frac{1}{1-B^4}}$$

$$wh = 359 C d^2 \sqrt{\frac{hw \gamma_1}{1-B^4}},$$

como el cociente de diámetros es constante, podemos llamar a

$$F = \sqrt{\frac{1}{1-B^4}};$$

por lo que se tendrá:

$$wh = 359 C d^2 F \sqrt{hw \gamma_1}$$

Además, como:

$$B = \frac{d}{D}; \quad d = B D$$

substituyendo,

$$wh = 359 C F B^2 D^2 \sqrt{hw \gamma_1}$$

haciendo:

$$E = 359 C B^2 F; \quad (E = \text{Factor de capacidad})$$

$$wh = E D^2 \sqrt{hw \gamma_1};$$

por tanto:

$$E = \frac{wh}{D^2 \sqrt{hw \gamma_1}}; \quad (\text{Para líquidos}).$$

Las expresiones para líquidos y vapor de agua son las que se presentan. Para gases, la ecuación estará afectada por otros factores. Al momento, para interpretación y cálculo del elemento primario se dan las tres fórmulas fundamentales:

$$E = \frac{wh}{D^2 \sqrt{hw\delta}} ; \quad (\text{Para líquidos})$$

$$E = \frac{wh}{D^2 \sqrt{hw/vol}} ; \quad (\text{Para vapor de agua})$$

$$E = \frac{Q \sqrt{G(T + 460)}}{21.5 D^2 \sqrt{hw P}} ; \quad (\text{Para gases})$$

En donde:

wh = gasto en función del peso, lbs/hr.

Q = gasto en función del volumen, ft<sup>3</sup>/hr.

D = diámetro interior de la tubería, pulgadas

d = diámetro del elemento primario, pulgadas.

hw = diferencial en pulgadas de agua, referida a 68°F

$\delta$  = peso específico del fluido, lbs/ft<sup>3</sup>

G = gravedad específica del gas

P = presión absoluta, Psia

T = Temperatura del fluido, °F

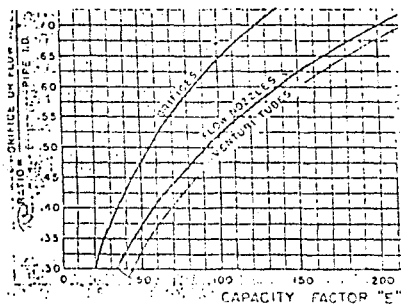
Vol = Volumen específico, ft<sup>3</sup>/lbs

Con el factor de capacidad E obtenido, acudimos a la figura I.6.2, - donde trazaremos una línea vertical que pase por el valor de E hasta cortar la curva de orificio o tobera, donde obtendremos un punto cuya ordenada se rá el valor de Beta 'B'.

Obtenido el valor de B se despeja el diámetro interior del elemento primario:

$$d = B D ;$$

Fig. I.6.2 Valores de Beta en función del factor de capacidad 'E'



Esta es una forma práctica para la obtención del diámetro del elemento primario, pero estrictamente se deberían medir los factores que a continuación se mencionan:

- Factor de expansión térmica de los elementos primarios ( $F_a$ )
- Factor de corrección por el número de Reynolds ( $CR$ )
- Factor de expansión del fluido ( $Y$ )
- Factor de corrección por vena contracta ( $C_{VC}$ )
- Factor de supercompresibilidad ( $S$ )

En la práctica, estos factores se obtienen en base a tablas y gráficas hechas por compañías que se dedican a hacer estos cálculos.

En nuestro caso, nos sujetaremos única y exclusivamente al uso de las gráficas sin considerar los factores antes mencionados.

Utilizando la gráfica (Fig. I.6.2) debidamente, obtendremos una aproximación bastante adecuada de Beta ( $B$ ) para nuestros propósitos.

#### b) Elementos Primarios

Los Elementos Primarios pueden ser de tipo:

- Orificio: Orificio concéntrico
- Orificio excéntrico
- Orificio segmental

Tobera

Tubo Venturi.

La placa de orificio consiste en una placa de acero inoxidable con espesor aproximado de 1/8 de pulgada.

Esta placa va fija entre bridas que están montadas en la tubería.

Generalmente la placa de orificio de tipo concéntrico, es utilizada para fluidos libres de materia en suspensión al igual que la excéntrica. - La placa de orificio segmental es utilizada en fluidos con materia en suspensión.

La placa de orificio tiene limitaciones de presión (no mayor de - - 1000 psig) y temperatura (750°F). Cualquiera de los dos límites que se so brepase será suficiente para que la placa de orificio no se pueda usar.

El valor de Beta para el uso de placas de orificio debe estar comprendido entre ciertos valores, para nuestro caso utilizaremos un mínimo - de 0.25 y un máximo de 0.80. En la práctica las limitaciones de Beta van de acuerdo con el tipo de bridas que se utiliza y el diámetro de la tubería.

Para el uso de toberas consideraremos los límites de Beta iguales - que los empleados para la placa de orificio.

Debido a la forma de la tobera, ésta puede operar a mayor presión y temperatura.

Las toberas pueden ser de: Montaje entre bridas  
Anillo de montaje  
Soldadura a la tubería.

Para tuberías con diámetro menor a 3 pulgadas, pueden existir ensam - bles de tubo-bridas-elemento primario, ya sea orificio, tobera o tubo Venturi.

El tubo Venturi consiste en dos secciones cónicas unidas a un tramo recto.

Para obtener Beta, se considera el diámetro de la sección recta 'd' - y el diámetro interior de la tubería 'D'.

## Venturis

Pequeña pérdida de presión  
Susceptible de usarse en flujos con materia en suspensión.

Usualmente utilizado en tuberías de gran diámetro y - flujo.

Disponibles en diferentes tipos de material.

Mayor exactitud.

Alto Costo

Usualmente usado en tuberías de 6" (diámetro) en adelante.

## Ensamble Tubería Orificio

a) Pequeña pérdida de presión  
Ensamble más chico y facilidad de instalación que el venturi.

Mayor costo que el orificio y tobera.

Limitación en tamaños.

Las salidas en suspensión tienen a taponarse.

## Tubo Dall

Mínimas pérdidas

Condiciones de operación suficientemente investigadas.

Necesitan menos tramo recto en instalación.

Disponibles en varios tamaños.

Costo apreciable.

## c) Tubo de Pitot.

Un tipo de elemento primario que es frecuentemente utilizado en fluidos a baja presión y temperatura y que no necesita cálculo de B, es el tubo de Pitot, en este caso la máxima diferencial es fijada por las condiciones del fluido y las características del tubo Pitot.

El tubo de Pitot es el tubo de sonda de presión típico que se utiliza para hacer mediciones exactas de velocidad.

Una aguja de cristal o una aguja hipodérmica doblada en ángulo recto se emplea para la medida de la velocidad  $V$  en un canal abierto, como se muestra en la figura I.6.3.

La abertura del tubo está dirigida aguas arriba, de modo que el fluido penetre dentro de la abertura y suba por el tubo hasta que la presión aumente lo suficiente dentro del mismo y equilibre el impacto producido por la velocidad. Enfrente mismo de la abertura el fluido está en reposo. La línea de corriente que pasa por el punto 1, llega al punto 2, llamado punto de estancamiento, donde el fluido está en reposo, allí se divide y pasa a lo largo del exterior del tubo. La presión en el punto 2 viene dada por la altura de la columna de líquido en el tubo.



Fig. I.6.3 Tubo de Pitot simple.



Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = h_0 + \Delta h$$

Como ambos puntos están a la misma altura, y además  $P_1/\gamma = h$ , la ecuación se reduce a:

$$\frac{v^2}{2g} = \Delta h ;$$

ó sea:

$$v = \sqrt{2g\Delta h}$$

El tubo de Pitot mide la presión de estancamiento, a la que también se le llama presión total. Esta presión total se compone de dos partes, la presión estática  $h_0$  y la presión dinámica  $\Delta h$ , expresada en altura de la columna del fluido. Si medimos la presión estática y la presión total cada una con un aparato distinto y conectamos los extremos a los de un manómetro diferencial, obtendremos la presión dinámica, como se muestra en la figura I.6.4:

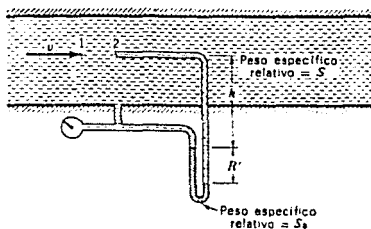


Fig.I.6.4 Utilización del tubo de Pitot y del orificio piezométrico para la medida de la velocidad.

La ecuación de Bernoulli aplicada desde el punto 1 al punto 2 da:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} \quad (3)$$

La ecuación de las presiones a través del manómetro, en metros de agua es:

$$\frac{P_1}{\gamma} S + KS + R'S_0 - (K + R') S = \frac{P_2}{\gamma} S ;$$

simplificando:

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = R' \left( \frac{S_0}{S} - 1 \right)$$

∴ substituyendo  $(P_2 - P_1)/\gamma$  en la ecuación 3 y despejando 'V', obtenemos:

$$V = \sqrt{2gR'(S_0/S - 1)} ;$$

Existen tubos de Pitot empleados en la medición de velocidad que miden a la vez la presión estática y la presión total, además, las dos salidas del tubo de Pitot son conectadas a un manómetro diferencial (Fig. - I.6.5).

La abertura de la cara frontal de la sonda detecta la presión de estancamiento (presión total), mientras que los pequeños orificios periféricos detectan la presión estática.

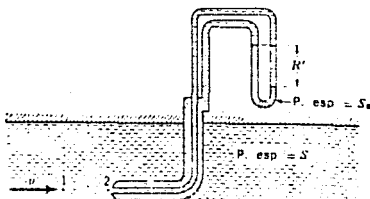


Fig. I.6.5 Tubo de Pitot estático.

Se leerá directamente en la escala del manómetro diferencial, la velocidad del fluido, el gasto, o en su defecto la presión diferencial, dependiendo del tipo de escala que se emplee.

#### d) Medición de Flujo con Elementos de Presión Diferencial.

La medición de flujo se puede realizar utilizando elementos de presión diferencial, y puede ser:

- 1) Medición de presión diferencial con columna de mercurio.
- 2) Medición de presión diferencial con celda de presión diferencial o tipo seco.

La medición de presión diferencial con columna de mercurio, se puede hacer por medio de dos cámaras de aire unidas, formando una columna en "U". Dentro de estas cámaras se encuentra el mercurio y, en una de ellas se encuentra un flotador que acoplado a un mecanismo transmite la posición del mercurio al interior del dispositivo. Se acciona algún transductor - para mandar una señal proporcional al desplazamiento del flotador ocasionado por la presión diferencial del fluido a través del elemento primario.

La señal de salida del transductor será de tipo no lineal, esto es, un incremento del desplazamiento del flotador no corresponde a igual incremento de variación de flujo, (si el flotador se desplaza un 10% de su carrera no equivale a una variación de flujo del 10%).

Para efectos de control, habrá necesidad de acoplar un extractor de raíz cuadrada. El extractor de raíz cuadrada recibe la señal del transmisor y extrae la raíz cuadrada de la señal, proporcionando a la salida una señal de característica lineal.

La columna de tipo diferencial con flotador de mercurio, puede ser substituída por un medidor de tipo campana (Ledoux Bell), que consiste - en una campana suspendida en mercurio y que tiene un perfil parabólico en su interior. Al existir una presión diferencial, la campana tiende a posicionarse en el mercurio y este movimiento es transmitido al exterior - por algún dispositivo. En este caso tendremos una señal de característica lineal debido al perfil parabólico de la campana.

Cuando las divisiones en la escala no son iguales se estará utilizando un transmisor de presión diferencial de tipo mercurio con flotador. Cuando las divisiones sean iguales en la escala, se considerará que el medidor está extrayendo la raíz cuadrada.

La segunda clasificación que hemos mencionado (medición de presión diferencial con celda de presión diferencial), consiste básicamente en una cámara separada por un diafragma que se expande en función de la diferencia de presiones ocasionada por el elemento primario. Mediante algún mecanismo la expansión del diafragma es transmitida al exterior del aparato obteniéndose una señal de tipo diferencial de medición. Generalmente a estos aparatos se les denomina : "Celdas de Presión Diferencial".

#### e) Medidores de Area Variable.

En el tipo de medidores de área variable, el principio de operación se fundamenta en el hecho de que el área varía, manteniéndose una presión diferencial constante en el medidor.

Los medidores de área variable se subdividen en:

##### 1) Medidor de Pistón.

El Medidor de pistón (Area variable) consta de dos piezas, una fija y una móvil, la pieza móvil entra (como en un telescopio) a la pieza fija. La parte fija tiene ranuras que son puertos por donde pasa el fluido a medida que la parte móvil se desplaza al exterior, de tal forma que cuando la parte móvil se encuentra totalmente dentro de la pieza fija, el flujo es cero. A medida que la pieza móvil se va desplazando, se descubren los puertos por donde pasa el fluido, y en esta forma cuando la pieza móvil se encuentra totalmente desplazada el flujo es máximo.

Debido a las características de corte de los puertos de la pieza fija, se puede considerar que a un incremento de desplazamiento de la pieza móvil, corresponde un mismo incremento de flujo.

## 2) Rotámetros.

Los rotámetros son equipos de medición de flujo para gas o aire y - consisten en un tubo de vidrio de cierto perfil dentro del cual se encuen - tra un flotador. El fluido pasa en dirección vertical de abajo hacia - arriba y desplaza al flotador, que se posicionará en función de la canti - dad de fluido que pase.

El principio de funcionamiento del rotámetro se basa en el hecho de que la fuerza de empuje vertical del fluido (de abajo hacia arriba) posi - ciona al flotador del tubo de tal forma que variará el área anular que - existe entre el área interior del tubo y el área del flotador. En esta - forma, al variar el área se mantiene una presión diferencial constante.

El rotámetro deberá instalarse en posición vertical y la conexión - de entrada del fluido será por la parte inferior, y la conexión de salida por la parte superior.

Los rotámetros comercialmente están limitados a tamaño máximo de 3" y su uso es limitado, dependiendo del espesor del cristal.

Son normalmente utilizados para fluidos tales como gas, aire y agua a bajas presiones y temperaturas, puesto que el espesor del cristal es el que marca el límite de las condiciones de operación.

Las ventajas de este tipo de medidores son:

Bajo costo

Algunos pueden ser utilizados en flujos corrosivos.

Recomendables para flujos pequeños.

Al igual que el de tipo pistón no requiere tramo recto para su insta - lación.

#### f) Medidores de Flujo de Tipo Inferencial con Principio Eléctrico.

Se clasifican en:

Medidores tipo magnético

Medidores tipo propela

Medidores tipo impacto.

##### Medidores Tipo Magnético.

Este tipo de medidor consiste en un carrete de material no conductivo en el que se encuentran montadas en su sección transversal bobinas que producen un campo magnético. Perpendicularmente a este campo magnético - existen dos electrodos conectados a un amplificador.

Su principio de operación se fundamenta en el hecho de que el campo magnético es cortado por las partículas conductoras del fluido y en esta forma a través de los electrodos se origina una fuerza electromotriz proporcional al flujo.

En este caso el fluido puede pasar de derecha a izquierda o de izquierda a derecha y el efecto se sigue obteniendo, no requiriendo tramo - recto para su instalación.

El fluido debe cumplir con ciertas características tales como una - adecuada conductividad, una velocidad que pueda ser detectada por el medi - dor y, ciertas condiciones de presión y temperatura dependiendo de lo que pueda soportar el cuerpo del medidor.

##### Medidor Tipo Propela.

Consiste en un carrete de cierto material que puede soportar altas presiones y temperaturas y, dentro de este carrete se encuentra una propela cuyo movimiento de rotación es llevado al exterior a un conductor - que se encuentra localizado entre un campo magnético. El fluido al pasar por la propela tiende a darle un movimiento de rotación que se transmite al exterior en donde el conductor al cubrir el campo magnético origina una fuerza electromotriz.

El fluido tendrá que pasar en una sola dirección para que actúe a la propela.

En este caso y en el anteriormente descrito, de las señales de salida a través de amplificadores podrá obtenerse una característica lineal de flujo.

#### Medidor Tipo Impacto.

Consiste en un carrete de cierto espesor en donde se encuentra un disco en un arreglo similar a una válvula de mariposa. Al pasar el fluido el disco se posiciona en cierto ángulo. El ángulo de posición es detectado por algún transductor y se relaciona con el flujo.

#### B.- Medidores de Cantidad.

En este renglón podríamos colocar una gran variedad de medidores que utilizan principios diferentes pero que siempre estarán cumpliendo con la definición dada anteriormente de que el fluido pasa en forma intermitente llenando o vaciando recipientes de capacidades conocidas.

Los principales tipos comerciales son:

- Medidores de disco nutante
- Medidores de álabes rotatorios
- Medidores de impulsor lobulado
- Medidores de pistón oscilante
- Medidores de pistón alternativo.

Este tipo de medidores son utilizados frecuentemente para hacer lecturas locales. No son transmisores, y dan una respuesta lineal. No requieren tramo recto para su instalación y son útiles para fluidos con baja presión y temperatura, tales como aire, gas, líquidos básicos, agua, etc. Tiene un diámetro comercial máximo de 2".

### Medidor de Disco Nutante.

Un disco montado excéntricamente cabeceará (nutará) forzado por la circulación de agua, dentro de la cámara de medición. La flecha del disco conectada a un mecanismo registrador, dará una indicación directa del volumen que ha pasado a través del medidor.

### Medidor de Alabes Rotatorios.

Los álabes montados en resortes sobre un tambor excéntrico mantendrán contacto continuo con la caja del medidor. Al girar el tambor quedará atrapada una cantidad fija de fluido entre cada par de álabes; el fluido es expulsado en forma simultánea.

Un mecanismo registrador conectado a la flecha del tambor indicará el volumen del fluido desplazado.

### Medidor de Impulsor Lobulado.

Los impulsores y la carcasa mantienen un ajuste exacto. El fluido que entra es atrapado entre los rotores y conducido a la salida como resultado de su rotación.

El gasto volumétrico se mide directamente a partir del número de revoluciones de los rotores.

### Medidor de Pistón Oscilante.

El pistón en este caso es un anillo que se mueve alrededor de la superficie interior de la cámara. Este anillo al desplazarse cortará determinados espacios dentro de la cámara. El fluido entrará por unos espacios y saldrá por otros, haciendo girar al pistón.

El número de revoluciones del pistón es proporcional al volumen desplazado.



### Medidor de Pistón Alternativo.

Su funcionamiento es similar al de las bombas de pistón, con la diferencia de que en este caso, el fluido moverá a los pistones. El movimiento alternativo de los pistones será una indicación del gasto.

## I.7 - Medición de Temperatura.

### I.7.1 - Introducción.

Para la mayor parte de la gente, temperatura es un concepto intuitivo el cual dice si un cuerpo está caliente o frío.

La temperatura es un potencial térmico de la misma forma que el voltaje es un potencial eléctrico. La temperatura se determina comparativamente con la de cuerpos a condiciones que sirven de referencia.

La unidad de temperatura es el grado Celsius llamado también Grado Centígrado o Centesimal ( $^{\circ}\text{C}$ ) y, es la variación de temperatura que produce la centésima parte del aumento de presión de un gas perfecto a volumen constante cuando pasa de la temperatura de fusión del hielo ( $^{\circ}\text{C}$ ) a la ebullición del agua a la presión de 760 Torr ( $100^{\circ}\text{C}$ ).

En los países de habla inglesa, se emplea el grado Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ), los  $32^{\circ}\text{F}$  corresponden a la temperatura de fusión del hielo, o sea a  $0^{\circ}\text{C}$ ; y la de  $212^{\circ}\text{F}$  corresponde a la de ebullición del agua. En este sistema, la diferencia de temperatura en grados Fahrenheit entre el punto de fusión del hielo y el de ebullición del agua es de  $212-32 = 180^{\circ}\text{F}$  que corresponde a  $100^{\circ}\text{C}$ .

El origen de la temperatura es el cero absoluto, situado a  $273.16^{\circ}\text{C}$  más abajo la de la fusión del hielo, es el origen de las temperaturas termodinámicas, las cuales se miden en grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ).

El cero absoluto es la temperatura más baja que teóricamente se puede alcanzar. A esta temperatura,  $-273.16^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{K}$  no existe ningún movimiento molecular, no existen ni gases, ni líquidos. Todos los cuerpos son sólidos.

El grado Rankin corresponde al grado Fahrenheit, su origen es el cero absoluto.

La siguiente tabla (Fig. I.7.1) muestra la relación entre las escalas de temperatura.

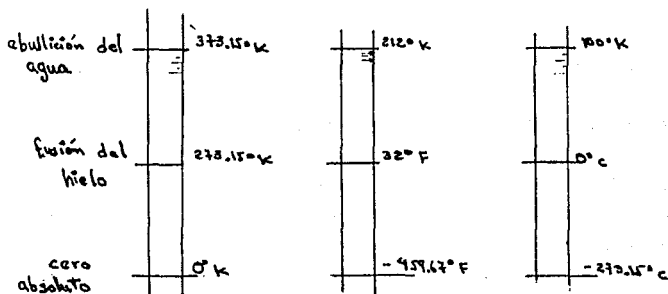


Fig. 1.7.1 Relación de Temperaturas

Para conversión de una determinada escala a otra utilizamos las siguientes relaciones:

Para obtener °C conociendo los °F hacemos  $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) (5/9)$  y viceversa para obtener °F conociendo °C hacemos  $^{\circ}\text{F} = 32 + 95/5 ^{\circ}\text{C}$ .

De igual manera que en los casos anteriores, tenemos las conversiones a las otras escalas por la siguiente relación.

$$^{\circ}\text{R} = 9/5^{\circ}\text{K}; \quad ^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad ^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{K} - 273$$

En 1960 la Escala Internacional de Temperatura fué sustituida por la Escala Internacional Práctica de Temperaturas, la cuál está basada en una serie de puntos fijos (puntos de congelación y puntos de ebullición) a los cuales se les han asignado valores específicos y en el empleo de medios instrumentales específicos de interpolaciones y extrapolaciones, estos puntos fijos figuran en la siguiente tabla.

VALORES DE LA ESCALA INTERNACIONAL  
PRACTICA DE TEMPERATURA

PUNTO FIJO	PUNTOS PRIMARIOS °C	ASIGNADOS °F
Punto de ebullición del Oxígeno	-182.470	-297.346
Punto triple del agua	+0.0100	+ 32.0180
Punto de ebullición del agua	+ 100	+ 212
Punto de ebullición del azufre	+444.600	+832.280
Punto de congelación de la plata	+960.8	+1761.4
Punto de congelación del oro	+1063.0	+1945.4

Esta Escala Internacional Práctica de Temperatura, utiliza el punto de congelación de 0°C, (el cuál se encuentra a 0.01°C por debajo del punto triple del agua) como uno de los puntos fijos. Aunque el punto triple del agua es más exacto, no suele utilizarse más que cuando se necesita una gran precisión.

En sí el punto triple del agua es el estado donde coexisten las tres fases del agua (sólido, líquido y vapor) a una presión de 0.00621 Kg/cm<sup>2</sup> abs. y una temperatura de 0.01°C se dice que la sustancia es invariable en este punto porque no hay cambios de fase.

#### I.7.2 - Métodos de Medición de Temperatura.

##### a) Termómetro de Líquido en Tubo de Vidrio (Fig. I.7.2).

El termómetro de líquido en tubo de vidrio, se compone de un tubo capilar de vidrio de sección rigurosamente uniforme, terminado en su parte inferior por un depósito lleno de líquido y cerrado en su extremidad superior.

Su funcionamiento descansa en la relación existente entre la temperatura y la dilatación térmica de un líquido.

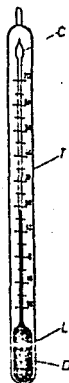


Fig. 1.7.2 Termómetro de Mercurio

El líquido se dilata desplazándose linealmente en el tubo T, indicando así la temperatura en el lugar en el cual se detiene. Cuanto más - pequeña sea la sección interior del tubo respecto a la capacidad del depósito D, más sensible será el termómetro. Por este motivo, se emplean tubos capilares muy finos para la construcción de ciertos termómetros sensibles. La forma alargada del depósito es preferible a la esférica, favorece la transmisión de calor por su mayor superficie.

En la mayoría de los termómetros, el tubo capilar se cierra dejando una pequeña cavidad en su extremo superior C, que sirve para recibir el - líquido durante su expansión, en caso de que el termómetro sea sometido a temperaturas superiores a las que puede medir, y así evitar su deterioro por rotura del tubo.

La relación entre el volumen del líquido y la temperatura es:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t)$$

$V_0$  = Volumen del líquido en su estado inicial 0°C

$V_t$  = Volumen del líquido a la temperatura

$\alpha$  = Coeficiente de dilatación del líquido

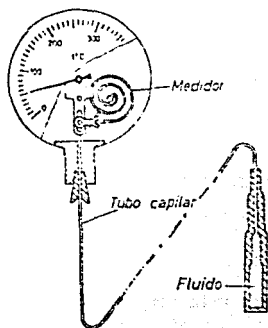
$t$  = Temperatura del líquido en °C

El termómetro más corriente es el de mercurio en tubo capilar de vidrio, es también el más sencillo, permite una extensión de lectura entre límites amplios con una exactitud de 1 a 1.5%.

## b) Termómetros a Presión de Fluidos (Fig. 1.7.3)

Estos termómetros están constituidos por un depósito que contiene un fluido, un indicador de presión y un tubo capilar. Al variar la temperatura en el depósito, la presión de todo el sistema varía, el tubo elástico del indicador se deforma arrastrando la aguja delante de la esfera graduada en °C. En estos aparatos, el indicador de presión es, en general, un manómetro de tubo elástico espiral o un fuelle. Estos termómetros son sensibles a las condiciones de ambiente a lo largo del tubo capilar, por este motivo deben ser compensados, en general, por un elemento bimetalítico actuando sobre el muelle medidor.

Tipos de termómetros a presión de fluidos



El termómetro de presión de líquidos

El termómetro de presión de gases

El termómetro de presión de vapor

Fig. 1.7.3 Termómetro a Presión de Fluido

## c) Termómetro a Presión de Líquidos (Fig. 1.7.4)

Los Termómetros para presión de líquidos, en general contienen mercurio o hidrocarburos, y obedecen a la ley de la dilatación volumétrica.

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t)$$

donde:

$V_t$  = Volumen a la temperatura  $t^\circ\text{C}$

$V_0$  = Volumen a la temperatura inicial

$t$  = Diferencial de temperaturas ( $T_2 - T_1$ )

$\alpha$  = Coeficiente de dilatación.

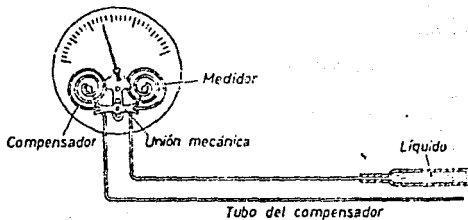


Fig. 1.7.4 Termómetro a Presión de Líquidos

En el termómetro de mercurio, todos los órganos son de acero, el mercurio se introduce a la presión de 150 atm. después de la evacuación del aire. El error provocado por la variación de temperatura del tubo capilar es proporcional a su longitud y puede alcanzar  $0.04^{\circ}\text{C}$  por metro de tubo y grado centígrado. La compensación más eficaz y correcta es la del tubo capilar compensador, que consiste en un segundo sistema indicador de tubo elástico acoplado en oposición con el primero y conectado a un tubo capilar sin depósito. Tiene una buena compensación hasta una longitud de tubo capilar de 60m. Para distancias más cortas hasta 3m. puede bastar la compensación mediante un elemento bimetalico actuando sobre el tubo elástico del medidor.

d) Termómetro a Presión de Gases (Fig. 1.7.5).

En los termómetros de presión de gas se emplea un gas seco sin humedad, que se aproxima tanto como es posible a un gas perfecto. Para ello, se emplea Helio, Nitrógeno o Anhídrido carbónico. En estas condiciones el gas obedece aproximadamente a la ley de Gay-Lussac-Mariotte.

En esta relación:

$P$  = Presión absoluta del gas

$V$  = Volumen del gas

$T$  = Temperatura absoluta del gas

$R$  = Constante del Gas

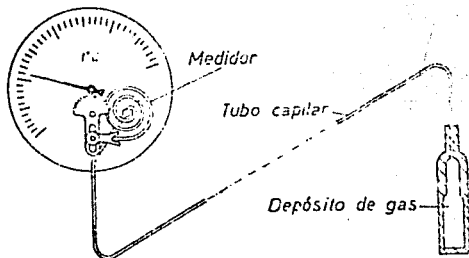


Fig. 1.7.5 Termómetro a Presión de Gases

Como la constante del gas no puede variar, y el volumen tampoco, la presión es proporcional a la temperatura.

Este termómetro es sensible también a los cambios de temperatura a lo largo del tubo capilar. Se le suele compensar con los mismos procedimientos descritos anteriormente para los termómetros de presión de líquidos. Estos termómetros de presión de gas con depósitos grandes suelen dar resultados satisfactorios entre  $-90$  y  $+450^{\circ}\text{C}$  por una longitud de tubo capilar que puede alcanzar 50m. El error máximo es de 2% sobre el valor más alto de la escala.

e) Termómetro a Presión de Vapor (Fig. I.7.6)

Los termómetros a presión de vapor están, como los precedentes, compuestos de un tubo elástico medidor, de un tubo capilar y de un depósito para el líquido evaporable. Se emplean: el cloruro de Metilo, éter, benceno, tolueno, butano, propano, hexano, etc. El depósito está en parte lleno por el líquido y en parte por sus vapores. A cada temperatura del depósito corresponde una tensión de vapor determinada, (equilibrio entre líquido y vapor).



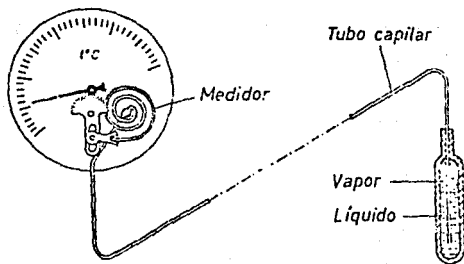


Fig. 1.7.6 Termómetro a Presión de Vapor

La tensión de vapor se mide con el tubo elástico medidor, como si fuese un manómetro, cuya esfera es directamente graduada en grados centígrados. La relación entre temperatura y presión no es lineal, depende de las propiedades termodinámicas del líquido, lo que implica la relación de sigal de la esfera. Este tipo de termómetro permite mediciones de temperaturas de +60 a +300°C, según el líquido evaporable utilizado. La longitud del tubo capilar puede alcanzar los 100 metros.

El depósito debe estar siempre a una temperatura superior a la del ambiente, o sea a la del tubo capilar y a la del medidor, por este motivo su extensión de mediciones no puede ser inferior a +50°C.

Para evitar este inconveniente, se utiliza el termómetro de tensión de vapor de doble relleno, en el cual el líquido evaporable o sus vapores no tienen acceso ni al tubo elástico medidor ni al tubo capilar. Estos últimos están llenos de un líquido auxiliar, no volátil, insoluble y no miscible en el líquido termométrico, tal como la glicerina o una solución pobre de cloruro de calcio. El líquido auxiliar sirve únicamente para la transmisión hidráulica de la presión de vapor desde el depósito. Este termómetro puede medir temperaturas superiores o inferiores a la temperatura ambiente, sin que la dilatación del líquido auxiliar contenido en el tubo capilar influya en la exactitud de la medición.

La escala de temperatura es determinada por la curva de tensión de vapor del líquido termométrico.

Este tipo de termómetro permite mediciones entre  $-30$  y  $+400^{\circ}\text{C}$ .

f) Termómetro Bimetálico (Fig. 1.7.7).

El termómetro de lámina bimetálica, llamado también termómetro metálico, está basado en la diferencia de dilatación de dos metales. El órgano sensible a las variaciones de temperatura es la lámina bimetálica constituida por dos láminas delgadas de metales de distintos coeficientes de dilatación, soldadas de plano la una contra la otra. Tiene la propiedad de encorvarse bajo los efectos de los cambios de temperatura.

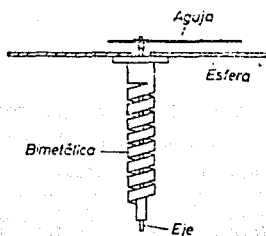


Fig. 1.7.7 Termómetro Bimetálico

Prácticamente, la lámina bimetálica es enrollada en forma espiral plana, o en hélice; ciertos constructores emplean la doble hélice concéntrica. Uno de los extremos de la lámina bimetálica es fijo, mientras que en el otro, libre de movimiento, va afinada la aguja. Si el metal de mayor coeficiente de dilatación se encuentra al exterior, la doble lámina se encorvará al aumentar la temperatura y se desencorvará al enfriarse. Usualmente uno de los metales usados para el bimetálico es el INVAR (aleación de Níquel y hierro con coeficiente de dilatación bajo).

Los termómetros de lámina bimetalica presentan una gran variedad de formas con inexactitud de  $\pm .5\%$  para los de laboratorio y de  $\pm 1.5\%$  del máximo de la escala para los termómetros industriales. Son muy estables, tienen un tiempo de respuesta bastante largo y pueden emplearse en servicio permanente desde  $-70$  hasta  $+500^{\circ}\text{C}$ .

g) Termómetro de Resistencia (RTD) (Fig. 1.7.8).

Los termómetros de resistencia son aparatos eléctricos basados en el principio de la variación de resistencia óhmica con el cambio de temperatura, en un conductor metálico.

La resistencia óhmica de un conductor depende de su longitud, de su sección y de su resistividad, la cuál es propiedad inherente de la materia.

$$R_0 = P_0 \frac{l}{S}$$

donde:  $P_0$  = Resistividad  $\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$  a  $0^{\circ}\text{C}$

$R_0$  = Resistividad óhmica  $\Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$

$S$  = Sección  $\text{cm}^2$

$l$  = Longitud  $\text{cm}$ .

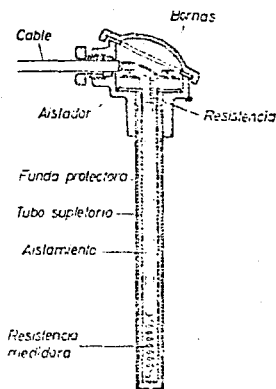


Fig. 1.7.8 Termómetro de Resistencia RTD

La resistividad depende de la temperatura, y a su vez, la resistencia varía con ella. Esta variación no es lineal, sin embargo, en un espacio prudencial de temperatura, su valor medio puede representarse bajo la forma general:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

$R_t$  = Resistencia óhmica a  $t^\circ\text{C}$

$t$  = Temperatura  $t^\circ\text{C}$

$\alpha$  = Coeficiente de Resistividad Térmica

La relación existente entre la temperatura y la resistencia óhmica es lo suficientemente constante para que a todas las temperaturas le corresponda una resistencia óhmica determinada.

Se utiliza el platino, el níquel y el cobre para los espacios de temperatura siguientes:

de - 220 a + 550°C el platino

de - 60 a + 180°C el níquel

de - 200 a + 150°C el cobre

h) Método del Puente Desequilibrado. (Fig. 1.7.9).

Es el método del puente de Wheatstone desequilibrado:

Las tres resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  se construyen de un hilo de metal de coeficiente de temperatura baja, tal como la mangarina.

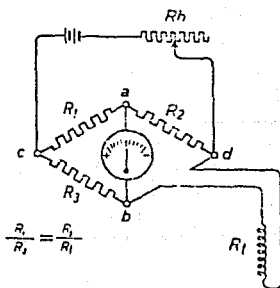


Fig. 1.7.9 Termómetro de Resistencia RTD, Método del Puente Desequilibrado.

Las tres resistencias y la de la sonda deben tener la misma magnitud óhmica a la mínima temperatura que debe indicar el termómetro. La tensión aplicada al puente en los puntos c y d debe ser bien determinada y constante, puede regularse con el reóstato Ph. La regulación del puente se hace a base de equilibrar una resistencia conocida actuando sobre el reóstato y luego controlar el desvío del galvanómetro por otra resistencia conocida.

Método del Puente equilibrado o del cero: (Fig. I.7.10)

Este método es más exacto, pero tiene el inconveniente de necesitar la intervención del operador para girar el dial de la resistencia variable  $R_3$ , antes de poder utilizar la lectura.

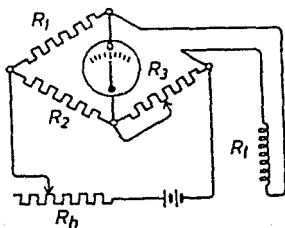


Fig. 1.7.10 Método del Puente Equilibrado o del Cero

El puente tiene los mismos elementos que el puente desequilibrado, con la única diferencia que la resistencia  $R_3$  es variable y posee un dial de regulación graduada en ohmios o en grados de temperatura  $t^{\circ}\text{C}$ .

Se hace girar el dial hasta que el galvanómetro marque el cero. La resistencia de la línea debe tomarse en cuenta porque el puente la mide, provocando un error de 2 a  $60^{\circ}\text{C}$ , por cada ohmio de resistencia de la línea, cuando se utiliza una resistencia termométrica de  $100 \Omega$ .

Para calibrar automáticamente estos aparatos se utiliza un dispositivo medidor potenciométrico accionado mecánicamente.

Un puente de Wheatstone establece el equilibrio entre la resistencia termométrica  $R_t$  y la resistencia de comparación  $R_3$ . El galvanómetro del cero es reemplazado por un sistema electrónico amplificador que manda corriente a un servomotor reversible, el cual provoca el desplazamiento del cursor de un potenciómetro hasta que el equilibrio se restablece y se para el motor. (Fig. I.7.11).

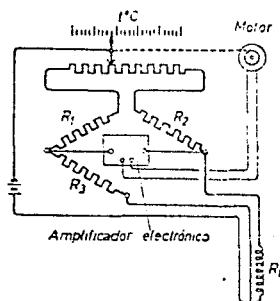


Fig. 1.7.11 Método del Puente Accionado Mecánicamente

El rango de medición de los termómetros de resistencia está entre  $-180^{\circ}\text{C}$  hasta  $600^{\circ}\text{C}$ .

i) Termómetro de Termistancia. (Fig. I.7.12).

En la tecnología electrónica, los semiconductores termosensibles, cuya conductividad aumenta con la temperatura, se designan bajo la denominación de termistancias. Son verdaderas resistencias de coeficiente de temperatura negativo, constituidas por aglomerados de óxidos metálicos sintetizados a alta temperatura cuya resistividad está comprendida entre  $10^{-1}$  y  $10^{-10} \Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$  a la temperatura ambiente.

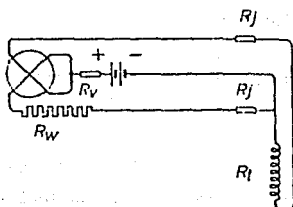


Fig. 1.7.12 Termómetro de Termistancia

Las termistancias se comportan como semiconductores electrónicos, - no presentan fenómenos de polarización y pueden ser atravesados indistintamente por corriente continua o corriente alterna.

Una termistancia se define eléctricamente por el valor de su resistencia óhmica y de su coeficiente térmico a una temperatura de comparación dada, en general 20°C ó 24°C.

La relación entre la resistencia óhmica y la temperatura se expresa por:

$$R_t = R_0 e^{b/\Delta t}; \text{ en la cual:}$$

$R_t$  = resistencia óhmica a  $t^\circ\text{K}$

$R_0$  = resistencia óhmica a la temperatura de referencia

$e$  = base de logaritmos neperianos = 2.718

$b$  = constante característica de la termistancia

$T$  = temperatura absoluta  $^\circ\text{K}$

$T_0$  = temperatura de referencia  $^\circ\text{K}$

$t$  = diferencia de temperatura  $T - T_0$

El coeficiente de temperatura toma la forma:  $a = - b/T^2$

Las termistancias son mucho más sensibles a bajas que a elevadas - temperaturas.

## j) Pirómetros de Radiación.

A temperaturas altas, superiores a los 1000°C, los termómetros no pueden aplicarse.

Para mediciones de servicio continuo a más de 1000°C se pueden utilizar a costa de su duración, los pares termoeléctricos, no pudiéndose utilizar para temperaturas superiores a 1200°C, sin mermar considerablemente las posibilidades de duración.

Para estas altas temperaturas se emplean los pirómetros de radiación, que tienen como fundamento la determinación de la temperatura por medio de la energía radiante de los cuerpos calientes.

Cuando se calienta un objeto, éste emite en primer lugar, radiaciones de longitud de onda, a medida que la temperatura se eleva. Esta emisión de radiación se hace energética y de longitud de onda siempre más corta, hasta llegar a la temperatura final de su calentamiento, en donde alcanza su máxima intensidad de radiación.

Este fenómeno se aplica en metalurgia para medir la temperatura por el color, mediante una escala arbitraria que, según Pouillet, corresponde a:

Rojo naciente .....	523°C
Rojo sombrío .....	700°C
Rojo claro .....	1000°C
Anaranjado claro .....	1200°C
Blanco .....	1300°C
Blanco incandescente .....	1500-1600°C

Por consiguiente, desde antiguos tiempos, se utilizó el ojo humano para evaluar temperaturas dándoles una magnitud.



Algo semejante pasa en los pirómetros ópticos fundados sobre la medición de radiación parcial, comparando por una cierta longitud de onda - la intensidad lumínica del cuerpo caliente con un filamento calentado - eléctricamente.

Otro procedimiento de medición de altas temperaturas es el pirómetro de radiación total, que mide la energía total radiante transmitida entre el cuerpo caliente y el pirómetro, ambos a distintas temperaturas. - El valor de la energía así transmitida es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, según lo que nos enseña la ley de Stefan-Boltzmann, siempre y cuando el objeto caliente se comporte como un cuerpo negro. Se entiende por cuerpo negro el que absorbe todas las radiaciones incidentes y no refleja ni transmite ninguna; radia solamente en proporción a su temperatura.

El cuerpo negro, es un cuerpo cuyo factor de absorción es igual a - la unidad para cada longitud de onda cualquiera que sea su temperatura - absoluta ( $T^{\circ}K$ ). El factor de absorción total  $E_t$  se define conociendo la relación entre la energía absorbida y la energía radiante.

El cuerpo que más se aproxima al cuerpo negro teórico, es el negro de humo cuyo coeficiente de absorción total es de 98%.

#### Pirómetro de Radiación Total: (Figura I.7.13).

El pirómetro de radiación total utiliza la energía radiada del cuerpo en observación para calentar un par termoeléctrico que desarrolle una - fuerza electromotriz proporcional a la temperatura.

En el pirómetro de radiación total, las radiaciones emitidas por el cuerpo caliente son concentradas sobre una superficie receptora que las - absorbe. La energía de las radiaciones visibles e invisibles produce una elevación de temperatura de la superficie receptora que se mide mediante un par termoeléctrico.

Esta elevación de temperatura es una magnitud con la cual se puede determinar la temperatura que se quiere conocer. La fuerza electromotriz desarrollada en el par termoelectrico es proporcional a la temperatura de la superficie receptora y, por consiguiente, proporcional a la temperatura del objeto.

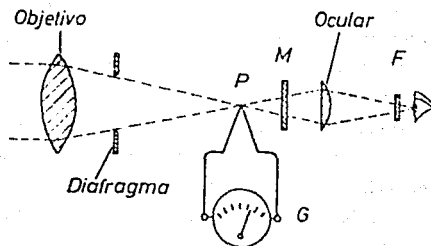


Fig. 1.7.13 Pirómetro de Radiación Total

Las radiaciones del cuerpo caliente son concentradas por el lente - objetivo y el diafragma sobre una plaquita, en general, de platino negro, soldada al par termoelectrico P. El galvanómetro G graduado directamente en grados centígrados está conectado a los bornes del par termoelectrico.

Para dirigir correctamente al pirómetro se utiliza un visor instalado detrás del par termoelectrico utilizando para ello la lente ocular y - un filtro F. En caso de una intensidad exagerada de la luz, se interpone delante de la lente ocular

Las lentes suelen ser de Pyrex para temperaturas altas  $\lambda = 0.3 - 2.7\mu$  la lente de sílice fundida para temperaturas media  $\lambda = 9.3 - 3.8\mu$  y de fluoruro de calcio para las bajas temperaturas.

Pirómetro a Radiación Parcial a Desaparición del Filamento: (Fig. - 1.7.14).

El pirómetro de radiación parcial monocromático compara la energía de las radiaciones monocromáticas del cuerpo radiante con la energía de igual longitud de onda emitida por una fuente luminosa patrón.

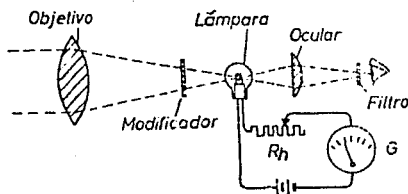


Fig. 1.7.14 Pirómetro a Radiación Parcial a Desaparición de Filamento

En el pirómetro a desaparición de filamento, la luz que procede del cuerpo radiante penetra en el aparato por la lente convergente. Entre la lente objetivo y la del ocular, está intercalado el filamento de una lámpara de incandescencia.

Para obtener la luz monocromática necesaria, se interpone entre la lente ocular y el ojo del observador un filtro de color rojo que deja pasar solamente las radiaciones de  $0.65 \mu$ , que corresponden al color del filtro.

El filamento de la lámpara está conectado en serie con una resistencia variable  $R_h$ , un miliamperímetro  $G$  y una pila.

Al proceder a una determinación de temperatura, se enfoca el objeto cuya temperatura se quiere medir, se regulan las lentes de manera que se vean perfectamente enfocadas las imágenes del filamento obscuro y el objeto caliente. Cuando se alimenta la lámpara con la corriente de la pila, el filamento se calentará y se le verá destacar menos oscuro sobre el fondo claro, hasta que actuando sobre la resistencia variable  $R_h$ , se da la -

corriente exacta para que desaparezca la imagen del filamento. Esta se confundirá con la del objeto caliente, el brillo del filamento es función de la corriente que lo atraviesa. Por consiguiente, la corriente representa una magnitud para determinar la temperatura. El miliamperímetro puede graduarse directamente en grados de temperatura.

#### k) Termopares:

El dispositivo que mide la temperatura por la fuerza electromotriz se llama Termopar. Funciona en virtud del fenómeno que se produce cuando dos alambres de material diferente se juntan en sus extremos y hay temperaturas distintas en las dos juntas. En esta condición existe una f.e.m. que es función de la diferencia de temperaturas entre las dos juntas, fenómeno que se le llama efecto Seebeck. El potenciómetro que mide la f.e.m. puede tener una escala en que se lean o marquen directamente temperaturas. Una junta del termopar se mantiene a una temperatura de referencia. Conviene que la relación entre la fuerza electromotriz y la diferencia de temperatura sea prácticamente lineal. Por este motivo, se utilizan unas uniones de metales o aleaciones que cumplen tanto como sea posible esta condición en los límites de temperatura deseados.

#### Termopares más usuales

Designación	t°C
Cobre (+)-Constantan(-) Cu-Const.	-150 a + 400
Hierro(+)-Constantan(-) Fe-Const.	-100 a + 900
Níquel Cromo (+) Níquel(-) NiCr-Ni	0 a + 1100
Cromel (+)-Alumel(-) NiCr-NiAl	0 a + 1100
Platino Rodio 10% (+)-Platino(-) RtRh-Pt	-600 a + 1500
Platino Rodio 13% (+)-Platino(-) RtRh-Pt	-300 a + 1700

Las condiciones principales para establecer un termopar son:

Que tenga larga duración sin deteriorarse bajo los efectos del calor.

Que desarrolle una fuerza electromotriz elevada e invariable.

Que sea función lineal de la temperatura y que pueda cambiarse fácilmente.

En general, se puede afirmar que cuanto más grueso es el alambre, - más duración tendrá.

Existen ya termopares distintos a los clásicos ya indicados y a con tinuación citaremos unos cuantos de ellos.

El par iridium aleación iridium rodium de 40 a 50% de rodium cuya - f.e.m. es aproximadamente 10 mV a 2000°C, tensión de comparación 0 mV, a 0°C, puede utilizarse normalmente hasta temperaturas de 2000°C.

Los pares a base de Wolframio alcanzan altas temperaturas.

El wolframio molibdeno desarrolla 5.3mV a 2000°C, es muy estable.

Se han construído pares a base de elementos no metálicos y metáli- cos, tal como el par carbono de Silicio Kanthal que da una f.e.m. muy ele- vada de 180mV a 1600°C.

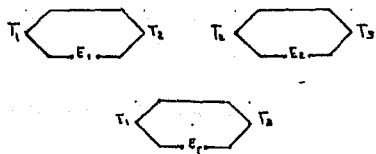
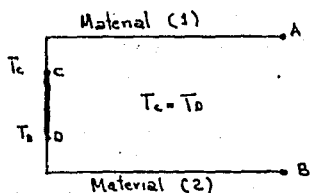
El par carburo de boro-grafito es utilizable hasta 2500°C a cuya - temperatura desarrolla 700 mV.

Hay dos leyes fundamentales en los termopares para análisis de cir- cuitos termoeléctricos que son:

1) Si un tercer metal es conectado en el circuito como se muestra - en la figura I.7.15, la f.e.m. del circuito no es afectada por la lon- gitud porque la nueva conexión está a la misma temperatura.

Esta exposición puede ser probada con la ayuda de la segunda ley de la termodinámica y es conocida como la ley de Los Metales Intermedios.

2) Considerando los arreglos en la figura I.7.15, el simple circuito termopar está construido del mismo material, pero opera entre diferentes límites de temperatura. Circuito a) se desarrolla en una f.e.m. de  $E_1$  entre temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ ; circuito b) se desarrolla en una f.e.m. de  $E_2$  entre temperaturas  $T_2$  y  $T_3$ . La Ley de Temperaturas Intermedias establece que si este mismo circuito se desarrollara con una f.e.m. de  $E_3 = E_1 + E_2$  cuando opera entre temperaturas  $T_1$  y  $T_3$  como lo muestra la figura.



- 1) Sus puntos de fusión son altos en un valor mayor que el de la temperatura a que van a trabajar.
- 2) Su temperatura es de suficiente amplitud para ser medida con exactitud.
- 3) La temperatura incrementa continuamente en una forma lineal respecto al voltaje producido.
- 4) Deben ser resistentes a la oxidación y corrosión del medio a que se encuentran expuestos.
- 5) Deben ser homogéneos.

## I.8 - Medición de Nivel.

### I.8.1 - Introducción.

La medición de nivel posiblemente fué la primera variable con que - el hombre se enfrentó en una forma directa o indirecta. En la actualidad es de gran importancia en la industria, ya que la mayoría de las veces el combustible y materia prima necesarios para mantener un proceso en operación determinado tiempo son cuantificados por algún método de medición de nivel.

Medir el nivel de un líquido significa cuantificar la altura a la - que llega, con respecto a un plano de referencia.

La medición de nivel, puede ser aplicada en recipientes de contención que pueden ser tanques abiertos o cerrados, considerando que en un - tanque abierto la presión interior es igual a la exterior y en un tanque cerrado la presión interior es diferente a la exterior.

### I.8.2 - Métodos de Medición de Nivel.

A fin de discutir los métodos de medición de nivel, se han agrupado en diferentes categorías desde el punto de vista comercial.

#### A.- Mecanismo Tipo Flotador.

Este mecanismo trabaja fundamentalmente mediante un cuerpo llamado flotador que se mantiene semi-sumergido en el espejo del líquido y se des - plaza con las variaciones del nivel.

El flotador debe ser de un material compatible con el líquido en - contacto, se debe mantener sobre la superficie del líquido y además debe garantizar una larga vida de uso.

Los mecanismos tipo Flotador pueden usarse en recipientes abiertos o cerrados, y prácticamente son los más sencillos. Se subdividen en una - infinidad de tipos, variando la forma del flotador, el mecanismo de trans - misión de movimiento de éste y la forma o característica del transductor

que nos da las variaciones de nivel.

El mecanismo tipo flotador más común y sencillo es el medidor de nivel de flotador con transmisión mecánica (Fig. 1.8.1). Consiste en un flotador colocado en el depósito, solidario de una cadena o cable que pasa por un juego de poleas. Un contrapeso fijo en el otro extremo de la cadena equilibra el peso del flotador, al mismo tiempo que se desliza en sus guías, delante de una escala graduada en metros de altura o en volumen de líquido. Este es el clásico indicador de nivel en los depósitos de agua.

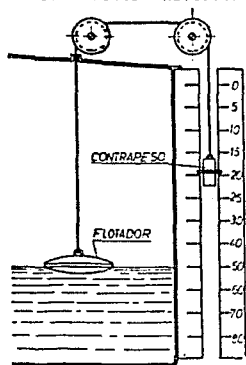


Fig. 1.8.1. Mecanismo Tipo Flotador

Cuando la escala debe graduarse en  $m^3$ , se calcula la altura del depósito que corresponde a cada nivel del volumen. Siendo  $V$  la unidad de volumen en  $m^3$  y  $D$  el diámetro del depósito en metros, la altura  $H$  que corresponde a este volumen será:

$$H = \frac{4 V}{\pi D^2} = 1.27 \frac{V}{D^2}$$

Estos indicadores de nivel de flotador son utilizables en líquidos de viscosidad normal; no son aptos para medir niveles de líquidos muy viscosos o de materiales pulverizantes.



### B.- Mecanismo Tipo Desplazamiento.

El sistema consiste en un flotador, normalmente en forma de un cilindro hueco, recto semi-sumergido en el líquido; el flotador está ligado a un mecanismo de tubo en par, o de fuerza balanceada en donde se indica, controla o transmite la indicación de señal de nivel.

Un punto importante es que el flotador debe ser siempre más pesado que el líquido en donde se desplaza para obtener la operación.

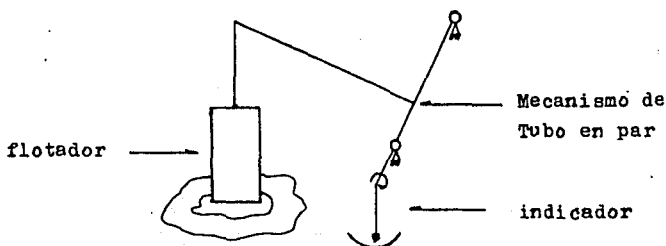


Fig. 1.8.2. Mecanismo Tipo Desplazamiento

El flotador opera bajo el principio de Arquímedes que establece: - El cuerpo semi-sumergido en un líquido experimenta un empuje vertical de abajo hacia arriba con una fuerza igual al peso del líquido desalojado, o sea que cuando el cuerpo es sumergido en un líquido, está perdiendo peso igual al peso del líquido desalojado.

El flotador en su movimiento vertical, actúa a un mecanismo de tubo en par, el cual transmite el movimiento vertical a un movimiento de rotación de una flecha, este movimiento es acoplado a un transductor que nos dará una indicación de nivel, como vemos en la figura 1.8.2.

El flotador puede estar, ya sea en una caja de interconectado al recipiente que puede ser del tipo abierto o cerrado, o bien el flotador puede estar en la parte superior del tanque que opera en la misma forma como se describió anteriormente.

El rango de medición en este caso será la longitud del flotador.

### C.- Medidor Hidrostático.

El sistema se basa en la presión hidrostática desarrollada por la altura de la columna del líquido a un plano de referencia.

Este sistema puede utilizarse en recipientes cerrados o abiertos bajo ciertas consideraciones.

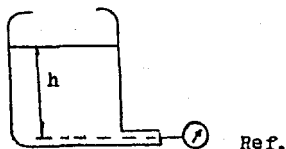


Fig. 1.8.3. Descripción de Presión como Nivel

Si observamos la figura I.8.3, podemos considerar que la siguiente igualdad es válida:

$$P = h \cdot \gamma \quad (\text{psf})$$

$$h = \frac{P}{\gamma}$$

En donde

$P$  = presión columna estática (psf)

$\gamma$  = peso específico (lbs/ft<sup>3</sup>)

$h$  = altura del tirante (ft)

En este caso la presión será interpretada como nivel, considerando que, si la presión es mínima, el nivel es mínimo, y si la presión es máxima, el nivel es máximo.

Los Medidores Hidrostáticos más usuales son:

a) Sistema de Fuerza Balanceada.

El sistema de operación es el más sencillo y simple. La presión desarrollada por la columna de agua medida entre el espejo del nivel y la toma inferior (Distancia  $h$ ) ocasiona que un elemento elástico tienda a deformarse, esta deformación es contrarrestada por un resorte que ejerce una fuerza colineal que nos dará el nivel del líquido en el recipiente en función de la columna estática desarrollada por el nivel como vemos en la figura 1.8.4.

La aplicación de este sistema es para tanques abiertos.

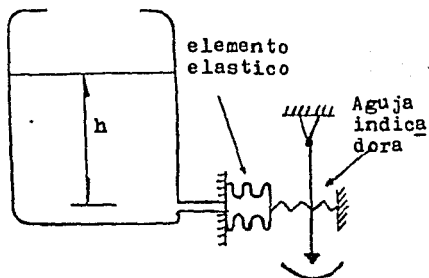


Fig. 1.8.4. Mecanismo de Fuerza Balanceada

b) Sistema de Burbujeo.

El sistema consta de un regulador de flujo de aire con manómetro, un tubo de profundidad y un elemento receptor del tipo elástico (bourdon o fuelle) graduado en términos de nivel.

Cuando la presión en el tubo de profundidad aumenta, pasará menor cantidad de aire a través de él, aumentándose la presión en el elemento elástico que al deformarse moverá la aguja sobre la escala de medición indicando el nivel del líquido (Fig. 1.8.5).

Se ajusta el regulador y filtro de aire para que se permita un paso de flujo a una presión la cual, en la parte del tubo que se encuentra sumergido, empiece a formarse un burbujeo, ésto es, que la presión del aire sea ligeramente mayor a la presión estática ocasionada por la columna del fluido, en estas condiciones el elemento elástico se deformará y nos dará una indicación de nivel en función de la presión.

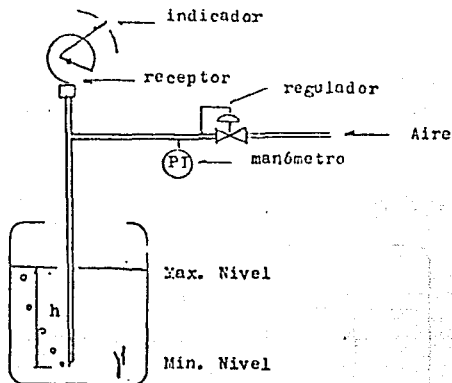


Fig. 1.8.5. Mecanismo de Burbujeo

Se utiliza principalmente en líquidos corrosivos, viscosos y en recipientes con salidas como albercas o cisternas.

Los cambios de viscosidad no lo afectan. El gasto de aire es mínimo y el receptor puede encontrarse localizado en algún lugar remoto.

### c) Sistemas de Presión Diferencial.

La medición de presión diferencial en recipientes abiertos o cerrados se puede hacer mediante el sistema de celda de presión diferencial. - En tanques cerrados se utiliza también el sistema de medición de presión diferencial con columna de mercurio. Ambos casos tiene limitaciones debido a la diferencial de presión que se obtenga.

En tanques cerrados se tienen 2 fases, una líquida y otra fase vapor y gases (condensables o no condensables); en el caso de que se tenga vapor que sea condensable, se necesitará una cámara de condensación, a fin de tener una columna de referencia considerable y libre de pulsaciones.

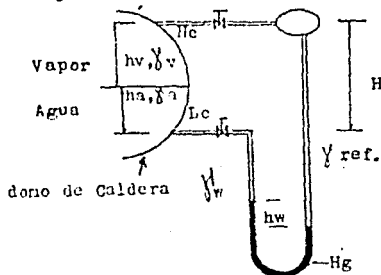
### 1) Sistema de Presión Diferencial con Columna de Mercurio.

Si la diferencial es medida con columna de mercurio, se tendrá un flotador que se desplaza en función de la presión diferencial; el flotador opera a un mecanismo que transmite su posición hacia el exterior, en donde se acopla a algún transductor y en este caso se toma una señal de salida proporcional a las variaciones del nivel.

La presión diferencial se desarrolla en la siguiente forma:

Para una mejor interpretación, consideramos un domo de una caldera en donde se tiene una fase líquida y una fase vapor con sus conexiones respectivas.

En las conexiones de vapor, se dispone de una cámara de condensación con el objeto de condensar el vapor, y tener una columna de referencia constante. Considérese que se aplica una columna "U" con mercurio que recibe señal por un lado de la fase de agua, y por otro lado de la fase vapor a través de la cámara de condensación, como se muestra en la figura I.8.6.



- hv Altura del nivel normal a la toma de vapor (Hc) ( " )
- ha Altura del nivel normal a la toma de agua (Lc) ( " )
- $\gamma_v$  Peso específico en fase vapor (lbs/ft<sup>3</sup>)
- $\gamma_a$  Peso específico en fase agua (lbs/ft<sup>3</sup>)
- H Distancia entre tomas fase vapor líquido ( " )
- hw Diferencial " H<sub>2</sub>O a 68 °F
- $\gamma_w$  Peso específico columna de agua referido a 68°F (lbs/ft<sup>3</sup>)
- $\gamma_{ref}$  Peso específico del agua en las columna (lbs/ft<sup>3</sup>).

Fig. 1.8.6. Mecanismo de Presión Diferencial con Columna de Mercurio.

$h_v$ . = Altura del nivel normal a la toma de vapor (hc) (plg)

$h_a$ . = Altura del nivel normal de la toma de agua (lc) (plg)

$\gamma_v$ . = Peso específico del vapor (lbs/ft<sup>3</sup>)

$\gamma_a$ . = Peso específico del agua (lbs/ft<sup>3</sup>)

H. = Distancia entre tomas de vapor y líquido (plg)

$h_w$ . = Diferencial en pulgadas de H<sub>2</sub>O a 68°F

$\gamma_w$ . = Peso específico columna de agua referido a 68°F (lbs/ft<sup>3</sup>)

$\gamma_{ref}$ . = Peso específico del agua en las columnas de referencia (lbs/ft<sup>3</sup>)

Si analizamos la columna "U" de mercurio, veremos que está afectada por:

En el lado de la toma de la fase líquida, la presión del recipiente, más el peso del líquido en la columna más los pesos correspondientes de la columna  $h_v$  y  $h_a$ .

En el lado de la fase de vapor, se tendrá la presión del recipiente más el peso de la columna del líquido de referencia de longitud H.

Con lo anterior y manteniendo fija la columna del lado de la fase de vapor por la cámara de condensación, se pueden obtener las variaciones de nivel.

Transcribiendo lo anterior a términos numéricos, se obtiene la siguiente expresión:

$$h_v \gamma_v + h_a \gamma_a + h_w \gamma_w = H \gamma_{ref}$$

$$h_w = \frac{H \gamma_{ref} - (h_v \gamma_v + h_a \gamma_a)}{\gamma_w}$$

Considerando que en el recipiente la fase líquida llegue hasta la toma de vapor, la ecuación tomará la forma:

$$h_w = \frac{H \gamma_{ref} - h_a \gamma_a}{\gamma_w} \quad (\text{Recipiente lleno de agua}).$$

Si por el contrario, el nivel en la fase líquida es cero, la ecuación tomará la forma:

$$h_w = \frac{H \delta_{ref} - h_v \delta_v}{\delta_w}$$

## 2) Con Celda de Presión Diferencial.

La presión diferencial desarrollada por las variaciones de nivel - ha quedado expuesta anteriormente.

### Medición en Tanque Abierto.

La presión que se aplica al diafragma de la celda es debido a la - columna estática.

Deberá conectarse el lado de alta a la fase líquida y el lado de ba - ja abierto a la atmósfera. El rango del instrumento depende del rango de nivel a medir y el peso específico del fluido (Fig. 1.8.7).

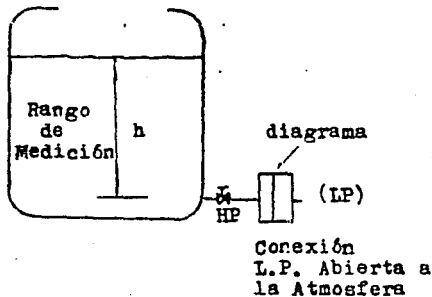


Fig. 1.8.7. Mecanismo de Tanque Abierto

Una variante de esta medición es cuando la celda se encuentra colo - cado a un nivel inferior de la toma inferior del tanque, en este caso, el diafragma tendrá una presión adicional correspondiente a la altura de una

columna de líquido de la toma inferior del tanque a la celda, entonces el diafragma tendrá un ajuste interno de supresión el cual anula a la columna hidrostática constante (Fig. 1.8.8).

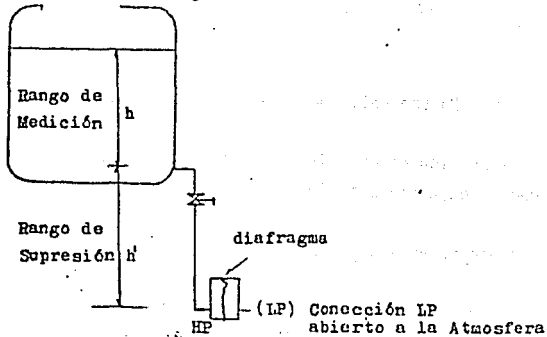


Fig. 1.8.8. Mecanismo de Tanque Abierto con Ajuste Interno de Supresión.

La supresión máxima que puede obtenerse, es igual a la diferencial máxima de la celda.

#### Medición en Tanque Cerrado con Fluido no Condensable.

En este caso, cuando el recipiente es cerrado con fluidos no condensables, en la conexión del lado de baja de la calda se aplica siempre la presión estática dentro del tanque y en el lado de alta se aplica la misma presión estática más la de la columna estática del fluido, dando como resultado que la presión diferencial es igual a la presión hidrostática, debido al nivel del fluido. (Fig. 1.8.9).

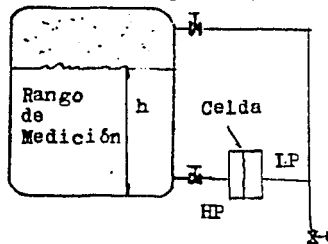


Fig. 1.8.9. Mecanismo de Tanque Cerrado con Fluido no Condensable.



La conexión en la fase vapor deberá hacerse en un plano más arriba del nivel máximo del fluido.

Cuando la celda de presión diferencial se instale a un nivel más bajo de la toma inferior del tanque, deberá usarse un rango de supresión a fin de anular la carga hidrostática adicional.

#### Medición en Tanque Cerrado con Fluido Condensable (Vapor de agua).

En este tipo de medición, cuando el fluido es condensable, se llena de condensado la línea de la conexión superior. En este caso la celda - puede colocarse a un nivel inferior de la conexión de la fase líquida, de acuerdo con ésto la diferencial aplicada es igual a la altura de la columna, desde el punto de la toma superior al nivel mínimo, menos la altura del nivel en fase líquida y la altura de la fase vapor (Fig. I.8.10).

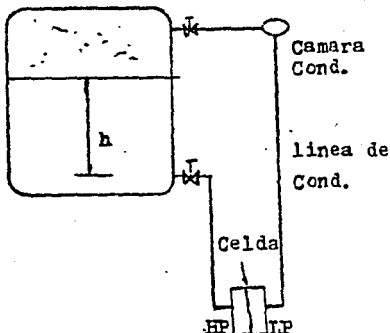


Fig. 1.8.10. Mecanismo de Tanque Cerrado con Fluido Condensable

La columna exterior llena de condensado aplica sobre la celda una presión siempre superior a la presión provocada por el líquido y el vapor dentro del recipiente, por lo tanto, el lado de alta de la celda se conecta a la pierna de referencia, de tal forma que al aumentar el nivel disminuye la presión diferencial.

Es de considerarse que en mediciones de nivel con celdas diferenciales, en la toma superior no se instala cámara de condensación debido a que no hay desplazamiento como ocurre en las columnas diferenciales con mercurio, pero sí se puede pensar en el uso de una cámara para mantener siempre una columna con condensado y así mejorar la columna del tubo únicamente.

#### D.- Sistema de Efecto Térmico.

En este tipo de sistemas se aprovecha la diferencia de temperaturas entre la fase vapor y la fase líquida. Es muy utilizado en calentadores y calderas.

Son dos los tipos básicos:

##### a) Sistema de Tubo de Expansión.

Observando la figura I.8.11, vemos que el tubo de expansión tiene un extremo fijo y otro libre, en este último se acopla el mecanismo de indicación o de control directo a una válvula. En el interior del tubo se tiene el nivel de la fase líquida, de modo que cuando este nivel disminuye se produce un incremento en la temperatura en el tubo y por lo tanto, un incremento en la longitud del tubo y viceversa. Hay que tener la precaución de aislar la tubería de la fase vapor a fin de obtener respuestas más rápidas, sobre todo cuando el tubo de expansión se encuentre a una distancia mayor de un metro del recipiente de presión. Este sistema es muy utilizado en calderas hasta de 10,000 kgs de vapor por hora.

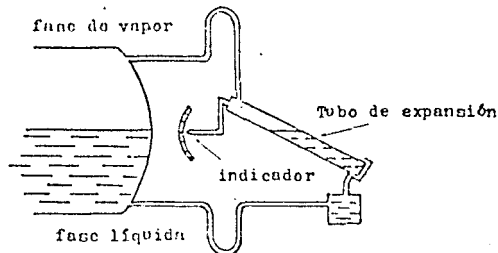


Fig. 1.8.11. Mecanismo Tipo Tubo de Expansión

### b) Sistema Termohidráulico.

Este sistema es aplicado generalmente a control de nivel en calderas. En la figura I.8.12 se muestran las componentes y su operación es - como sigue: Las tomas de fase vapor y fase líquido corren por el interior de una chaqueta de agua llamada generador de vapor, este generador se comunica con un fuelle de bronce, el cual forma parte de la válvula de control, funcionando como motor.

Al disminuir el nivel, el vapor ocupa mayor área de calentamiento - en el generador y por lo tanto se incrementa la temperatura. Debido a lo anterior, se genera mayor cantidad de vapor en la chaqueta incrementándose la presión, la cual se aplica al fuelle de la válvula, aumentando el paso del agua hacia el recipiente o caldera.

Como en el caso del tubo de expansión, también debe aislarse la tubería de la fase de vapor, para adquirir mayor velocidad de respuesta. - Cuando el nivel sube, el enfriamiento de la chaqueta se acelera con los - cientos de pequeñas aletas que rodean a la misma.

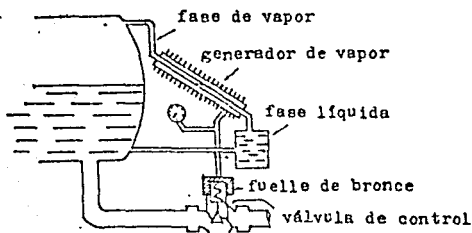


Fig. 1.8.12. Mecanismo Tipo Termo Hidráulico

### E.- Elementos Eléctricos y Electrónicos sensores para Medición de Nivel.

Analicemos en forma general los siguientes tipos eléctricos básicos:

a) Sensores que Utilizan Principios Eléctricos.

1) Medición de Nivel por Medio de Electrodo.

Este sistema puede ser utilizado para recipientes a presión o abiertos, y como condición para que opere el sistema, el líquido debe tener conductividad y no ser flamable.

El mecanismo de operación es simple y consiste en un recipiente en donde se encuentran unos electrodos debidamente aislados y sumergidos en el líquido.

La medición se efectúa por medio de una corriente de bajo voltaje - que circula de electrodo a electrodo, sirviendo el líquido como conductor.

Al tenerse continuidad de un electrodo a otro se tendrá algún circuito de relevadores o transformadores energizado y se tendrá alguna luz piloto o contacto actuado que nos representará una señal de que el nivel se encuentra a un cierto límite, normalmente en estos sistemas y especialmente en su aplicación para calderas tienen un electrodo común y tres - - electrodos de indicación que son para alto nivel, bajo nivel y protección por bajo nivel. (Fig. I.8.13).

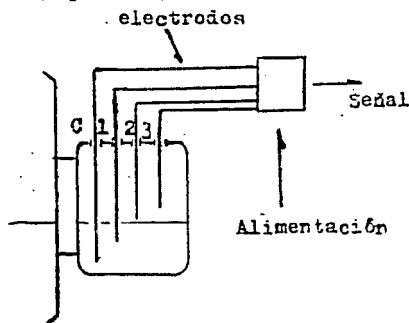


Fig. 1.8.13. Mecanismo Tipo Electrodo

De su mecanismo de operación se puede apreciar que las indicaciones de nivel estarán comprendidas por la posición de los electrodos, la continuidad en los electrodos puede ser aprovechada para una indicación de nivel digital.

## 2) Medición de Nivel por Capacitancia.

La aplicación de un capacitor como sensor en la medición de nivel tiene muchas ventajas puesto que se reducen las partes móviles y por lo mismo será fácil dar mantenimiento al equipo. El elemento sensor es acoplado a un sistema eléctrico receptor donde las variaciones de capacitancia estarán en términos de nivel.

El sensor es un capacitor en el cual intervienen tres factores que pueden hacer variar su capacitancia. Si mantenemos dos de ellos fijos y variamos el tercero, se tendrá una variación de capacitancia; sin embargo, se presente un problema, cuando el líquido es dieléctrico la medición puede ser afectada con los cambios del líquido que está sirviendo como dieléctrico.

El sistema sensor es en principio un capacitor acoplado a un circuito receptor. El elemento sensor debe estar dispuesto para trabajar en líquidos no conductivos, (conductividad menor que  $0.1 \mu\text{mho/cm}$ ) o bien en líquidos conductivos. En ambos casos la instalación y características del sensor varían.

Para líquidos del tipo dieléctrico (no conductivos) el elemento sensor consiste en las dos placas del capacitor y el líquido entre ellas, de tal forma que al variar el nivel del líquido varía el valor del dieléctrico teniendo así una variación de capacitancia.

Una aplicación del detector de nivel por medio de variación de capacitancia para líquidos que actúan como dieléctricos, se puede apreciar en la figura I.8.14 en donde un electrodo es sumergido en un tanque y aislado de éste.

El tanque es conectado a tierra, de tal forma que electrodo y tanque forman el capacitor cuyo dieléctrico es el mismo líquido. Como el valor del dieléctrico del gas, aire o vapor del espejo es aproximadamente igual a uno, mientras que el valor del dieléctrico del líquido es completamente igual a uno, entonces la capacitancia variará en función de la variación del dieléctrico que depende del nivel  $h$ .

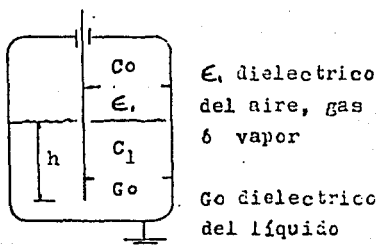


Fig. 1.8 14. Mecanismo de Capacitancia

A máximo nivel, la capacitancia será de máximo valor, ya que se tendrá una máxima resistividad entre electrodos a través del líquido.

Puede ser posible que el dieléctrico que se encuentra arriba del espejo del líquido varíe mucho en función de la presión y/o temperatura y -ésto origine errores en la medición.

### 3) Medición de Nivel por Medio de Resistencias.

Observando la figura 1.8.15, se puede apreciar que una serie de elementos de resistencia están acoplados al tanque a distintas alturas, éstos se encuentran cubiertos por el líquido. Los elementos estarán acoplados - a un circuito receptor (puente). Cuando el elemento se encuentra cubierto por el fluido su resistencia eléctrica cambia, y el galvanómetro del puente indicará un desequilibrio proporcional al nivel del fluido.

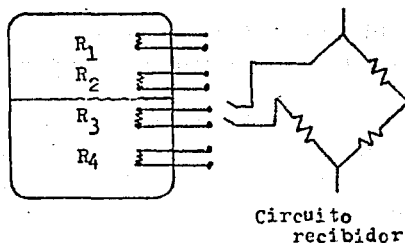


Fig. 1.8.15. Mecanismo de Resistencia

#### 4) Medición de Nivel por Medio del Transformador de Núcleo Variable.

En este sistema el flotador actúa a un transductor del tipo transformador de núcleo variable, en el cual la variación de voltaje en el secundario del transformador será indicación del nivel (Fig. 1.8.16).

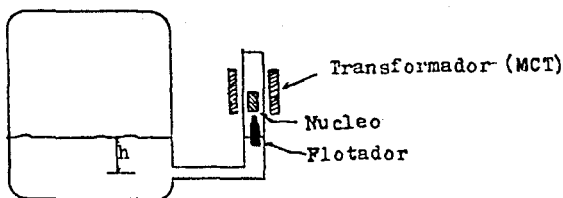


Fig. 1.8.16. Mecanismo de Transformador Variable

#### 5) Medición de Nivel Utilizando Líquidos Conductivos.

El elemento sensor será un capacitor formado por un electrodo aislado por medio de un recubrimiento de barniz, actuando el propio líquido como segundo electrodo; el barniz del electrodo es con objeto de prevenir un corto circuito debido a la resistencia del líquido.

La medición del nivel se efectúa en una forma continua, el cambio de capacitancia es en forma proporcional al cambio de nivel.

El circuito secundario será un receptor eléctrico que detecte las variaciones de capacitancia y las relacione a la posición del nivel. El costo de estos sistemas es alto en comparación a los sistemas operados con flotadores y transductores tipo neumático, con la ventaja de que tiene partes fácilmente desmontables para su limpieza e instalación, además son útiles para líquidos de difícil manejo.

#### b) Celda Foto-eléctrica para Determinación de Nivel.

Básicamente el sistema consiste en una columna de nivel y un juego de celdas fotoeléctricas (con sus celdas emisoras y receptoras). Cuando el nivel varía, las celdas fotoeléctricas activarán o desactivarán elementos de un circuito receptor que dará la indicación de nivel del líquido - (Figura I.8.17).

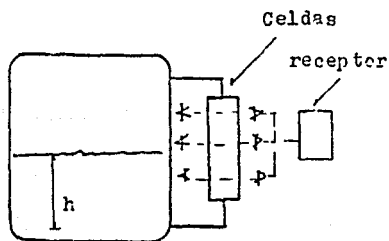


Fig. 1.8.17. Mecanismo de Celda Fotoeléctrica

Este sistema tiene la desventaja de que la mayor o menor turbidez del líquido ocasione una mayor o menor recepción luminosa en la celda para un mismo nivel.



La solución para medir el nivel de líquidos turbios, sería colocando un juego de celdas fotoeléctricas como se muestra en la figura I.8.18. La mayor o menor incidencia de luz sobre la celda receptora será captada por el circuito receptor, que como en el caso anterior nos dará una indicación del nivel del líquido.

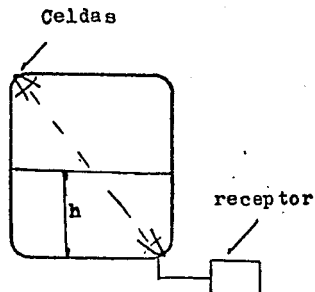


Fig. 1.8.18. Mecanismo de Celdas Fotoeléctricas

### c) Detector Sónico.

Esta basado en el sistema de radar, en el cual una fuente emite una onda sonora que se refleja en el espejo del líquido y vuelve a su lugar de origen. El tiempo que tarda la señal en el recorrido, estará en función del nivel.

El detector sónico es de tipo electrónico. Opera con una señal a un nivel mayor de 20 KHz (no audible al oído humano).

Existen dos sistemas:

#### 1) Diseño en Fase Líquida.

Un transmisor localizado en el fondo del recipiente dirige impulsos de onda ultrasónica desde el fondo hacia el espejo del líquido. Dichos impulsos rebotan en el espejo del líquido y regresan al transmisor (Figura I.8.19).

El tiempo que tarda la onda en dar el rebote en la superficie estará en función del nivel del líquido.

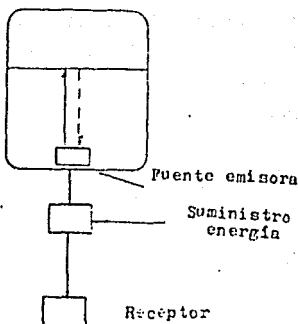


Fig. 1.8.19. Mecanismo Detector Sónico en Fase Líquida

La señal de tiempo es convertida a términos de nivel y es indicada o registrada en el receptor.

## 2) Diseño en Fase Vapor.

El principio es similar al anterior con la excepción de que la onda se transmite desde un punto de referencia arriba del nivel o sea de arriba hacia abajo y no como el caso anterior de abajo hacia arriba.

Si las distancias son grandes se corrige por densidad y temperatura del medio gaseoso.

Estos sistemas pueden ser usados en recipientes abiertos o cerrados (vacío o presión) es particularmente adaptable en pozos de petróleo.

## d) Sistema de Radiación.

Los sistemas de radiación pueden ser utilizados por la determinación de nivel de líquidos o sólidos, estos sistemas por lo general no son muy populares sino para ciertos usos.

El principio básico de medición de nivel por radiación consiste en convertir el valor de la radiación de alguna fuente emisora en valores de nivel.

Los sistemas de radiación operan bajo la condición de que la intensidad de la radiación varíe en proporción al espesor del material que se interpone con la fuente receptora, o de que la intensidad de la radiación varíe en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre la fuente emisora y receptora.

Para la medición de nivel en líquidos o sólidos, la fuente emisora de radiación puede estar localizada en un lugar fijo de referencia abajo del nivel del líquido o bien colocado sobre un flotador, en cualquier caso el elemento receptor de radiación se encuentra en un lugar fijo arriba del nivel.

Considerando el primer caso en el cual el elemento de radiación está localizado en un punto de referencia abajo del nivel, a medida que el nivel aumenta, la intensidad de la radiación que llega a la fuente receptora disminuye puesto que hay más líquido que sirve de absorbente entre la fuente emisora y receptora, el caso contrario es válido.

La interfase que pueda ocasionar la absorción de las paredes del recipiente y la absorción de aire o gases en la fase vapor, se considera despreciable y relacionada a una constante.

El contador GEIGER convierte el valor de la radiación recibida en impulsos eléctricos que serán amplificados en los receptores o indicadores en función de términos de nivel.

El líquido es la fuente amortiguadora de la radiación (Fig. I.8.20).

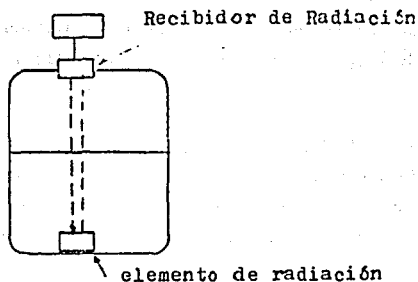


Fig. 1.8.20. Mecanismo de Radiación Amortiguada por Líquido

En el segundo caso en que la fuente de radiación esté montada en un flotador, se aplicará el segundo principio en el cual la radiación varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia (Figura I.8.21).

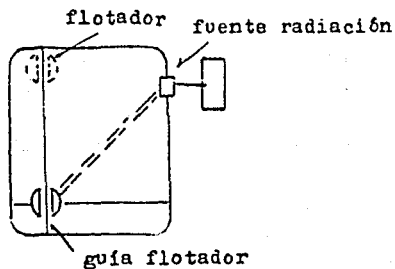


Fig. 1.8.21. Mecanismo de Radiación en Flotador

En cualquiera de los casos anteriores, el uso de la fuente emisora (sal de radio activa) eleva el precio de dicho equipo, además de pequeños cuidados especiales en el manejo.

Una variación y aplicación típicos puede verse en las figuras.

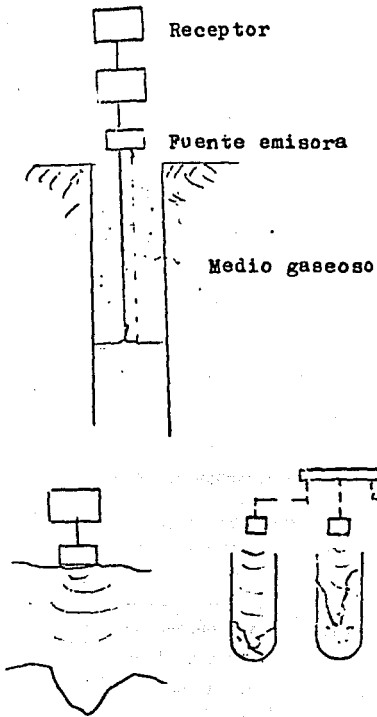


Fig. 1.8.22. Aplicaciones Típicas de los Mecanismos de Flotador

## I.9 - Mediciones Eléctricas.

### I.9.1 - Introducción.

Dentro de la industria eléctrica de media tensión de uso industrial es necesario conocer las siguientes magnitudes eléctricas:

- 1) Intensidad de corriente que circula por la línea de distribución y de mando.
- 2) Tensiones de servicio en las diferentes partes de la instalación.
- 3) Frecuencia de servicio.
- 4) Factor de potencia a que trabajan las máquinas eléctricas.
- 5) Potencia activa y reactiva.

Para realizar estas mediciones se precisa de diversos aparatos los cuales se tratarán a continuación.

### I.9.2 - Sistemas de Medición.

Las distintas clases de sistemas de medida se diferencian por su estructura y modo de funcionamiento; éste se basa en el efecto electromagnético, electrodinámico, electrotérmico o electrostático. A continuación se habla de las características constructivas de las clases más usuales:

#### Sistema de Medida de Bobina Móvil o de Bobina Giratoria.

Consta de un imán permanente fijo y una o varias bobinas giratorias que son desviadas por efecto electromagnético durante el paso de la corriente (Fig. I.9.1). Sólo se utilizan para corriente continua. Aplicación: amperímetro voltímetro, ohmetro.

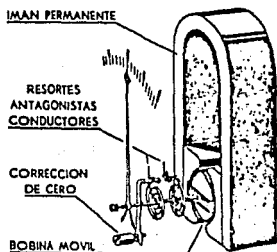


Fig. I.9.1 Sistema de medida de bobina móvil

### Sistema de Medida de Hierro Móvil o de Hierro Giratorio.

Está constituido por uno o varios órganos giratorios de hierro, en el interior de una bobina de campo fija y que son desviados por efecto - electromagnético al pasar la corriente por la bobina (Fig. 1.9.2). Se - utilizan para corriente continua y alterna. Aplicaciones: amperímetro, - voltímetro.

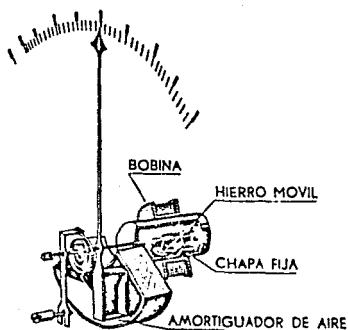


Fig. I.9.2 Sistema de medida de hierro móvil

### Sistema de Medida Electrodinámico.

Consta de una o más bobinas fijas, con núcleo de aire, y una o más bobinas giratorias, que son desviadas por efecto electrodinámico, al pasar la corriente por las bobinas fijas (Fig. I.9.3a). Una variante de éste es el sistema de medida ferrodinámico, en el campo magnético se halla principalmente en el hierro (Fig. I.9.3b). Se utilizan para corriente - continua y alterna. Aplicaciones: vatímetros.

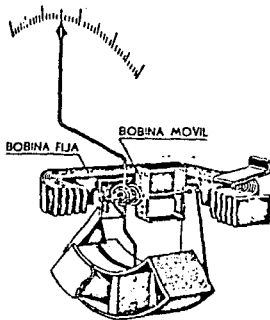


Fig.I.9.3a Sistema de medida electrodinámico

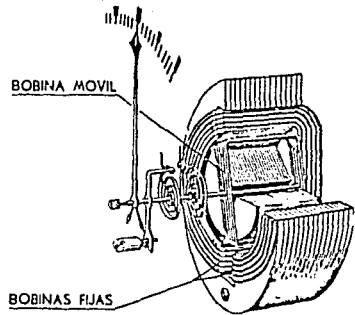


Fig.I.9.3b Sistema de medida ferrodinámico

### Sistema de Medida Térmico o Bimetálico.

Consta esencialmente de un órgano bimetálico, que es calentado por la corriente a medir. La deformación que experimenta dicho órgano, se aprovecha para la medición (Fig. I.9.4). Se puede utilizar para corriente continua y para corriente alterna. Aplicaciones: preferentemente como amperímetro.

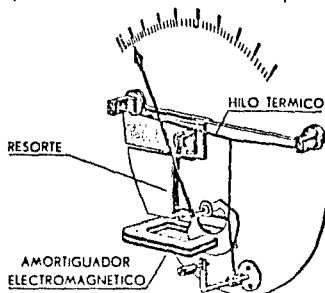


Fig.I.9.4 Sistema de medida térmico



### Sistema de Medida Electrostático.

Consta de electrodos fijos y uno o más contraelectrodos móviles que al aplicar la tensión son desviados electrostáticamente (Fig. I.9.5). - - Pueden utilizarse para corriente continua y para corriente alterna. - - Aplicaciones: como voltímetro.

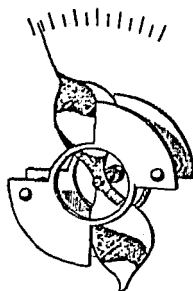


Fig. I.9.5 Sistema de medida electrostático

### Sistema de Medida de Vibración.

Tiene órganos vibratorios que, por efecto electromagnético o, en otros casos, electrostático, producen vibraciones de resonancia (Fig. - - I.9.6). Solamente pueden utilizarse con corriente alterna. Aplicaciones: preferentemente, como frecuencímetro.

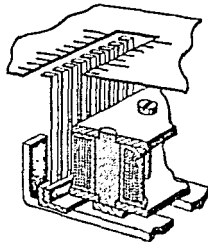


Fig. I.9.6 Sistema de medida de vibración

### Sistema de Medida de Cociente.

Consta de dos vías de corriente o de tensión, permitiendo obtener - la relación entre dos magnitudes eléctricas. Para corriente continua y - corriente alterna. Aplicaciones: como ohmetro y como fasímetro.

### Sistema de Medida con Rectificador.

Consta de un sistema de medida de bobina móvil al que se ha añadido un dispositivo rectificador para la rectificación de la corriente alterna que se ha de medir. Utilizable solamente para corriente alterna. Aplicaciones: como amperímetro y como voltímetro.

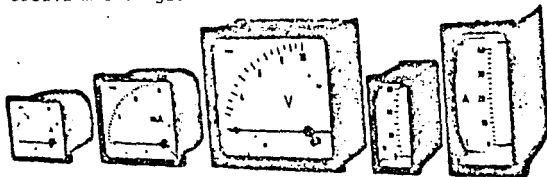
### Sistema de Medida con par Termoeléctrico Incorporado.

No debe confundirse con el sistema de medida térmico citado anteriormente. Esta vez, se trata de un sistema de bobina móvil al que se ha incorporado un par termoeléctrico para convertir la corriente alterna a - medir en corriente continua. Puede utilizarse para corriente continua y para corriente alterna. Aplicaciones: como amperímetro y como voltímetro, incluso en medidas para alta frecuencia.

### 1.9.3 - Aparatos Indicadores.

Actualmente, los aparatos indicadores para tableros de control, casi siempre de montaje empotrado. En la figura 1.9.7 se muestran algunos de estos aparatos, se utiliza el modelo cuadrado con preferencia al modelo circular por el mejor aprovechamiento del espacio; las agujas de cuadrante admiten una escala más larga.

Fig. I.9.7



## a) Amperímetros.

Para los amperímetros se emplean normalmente aparatos de hierro móvil, tanto para corriente continua como para corriente alterna, por que son robustos y económicos. La escala es prácticamente lineal (Fig. 1.9.8) aunque, en casos especiales (por ejemplo circuito de motores) se emplea también la escala de sobrecarga (Fig. 1.9.9), con zona de indicación hasta el doble de su valor nominal.



Fig. I.9.8



Fig. I.9.9

Los amperímetros de hierro móvil pueden medir directamente corrientes comprendidas entre 40 mA y 100 A. Para intensidades mayores de 100 A se utilizan aparatos de 5 A, conectados a través de un transformador de intensidad, tal como indica la figura 1.9.10, y cuya indicación de escala corresponde a la corriente que realmente circula por el primario del transformador.

De acuerdo con lo que se ha dicho anteriormente, los amperímetros de bobina móvil sólo son utilizables para corriente continua. Sus ventajas residen en su escaso consumo propio y su gran sensibilidad, con campo de medida comprendido entre 10 A y 100 A: para intensidades mayores, se utilizan resistencias en derivación o shunts (véase Fig. 1.9.11). Al contrario que en los aparatos de hierro móvil, la desviación de los aparatos

de bobina móvil depende del sentido de la corriente; por esta razón, estos instrumentos pueden construirse con cero central, cuya aguja se desvía rá hacia la derecha o hacia la izquierda según sea el sentido de la corriente.

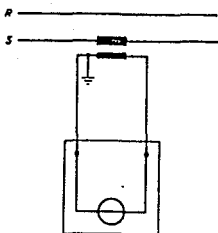


Fig. I.9.10

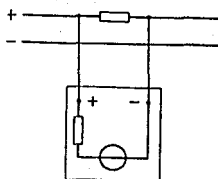


Fig. I.9.11

Con objeto de aprovechar también en mediciones de corriente alterna las ventajas de los aparatos de bobina móvil y poder determinar además - corrientes inferiores a 40 mA, se intercalan delante de la bobina móvil, unos rectificadores secos de selenio, óxido de cobre o germanio. En la - figura I.9.12 se expresan algunos montajes típicos: para bajas intensidades, se utilizan la conexión Graetz (Fig. I.9.12a), con lo que se consigue que la corriente de medida sea conducida, en ambos semiperíodos, en - el mismo sentido a través del aparato de medida; para mayores intensidades pueden utilizarse una conexión Graetz con resistencia en derivación - - (Fig. I.9.12b); para lograr consumos propios muy reducidos se utiliza el montaje con transformador de intensidad y conexión en el punto central - (Fig. I.9.12c); con el montaje de esta figura, solamente se necesitan dos rectificadores para conseguir una rectificación de ambas semiondas. Los amperímetros con rectificador tienen zonas de medida desde 1 mA a 5 A, - para frecuencias hasta de 10,000 Hz siendo la escala prácticamente lineal.

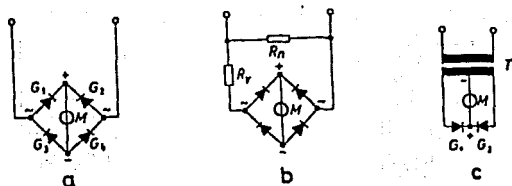


Fig. I.9.12

## b) Voltímetros.

Para los voltímetros se utilizan sobre todo, los aparatos de hierro móvil. En conexión directa se emplea para campos de medida comprendida entre 10 V y 600 V. Para mayores tensiones alternas, se utilizan aparatos con un alcance de medida de 100 V y transformador de tensión (Fig. I.9.13): los aparatos están rotulados según las tensiones primarias del transformador.

Los voltímetros de bobina móvil solamente se pueden utilizar para mediciones de corriente continua, con un alcance de medida directo comprendido entre 60 mV y 600 V. Para mayores tensiones se emplean resistencias conectadas en serie con el voltímetro. A causa del curso lineal de la escala, los voltímetros de bobina móvil son muy indicados para el control de tensiones que oscilan entre cero y el valor extremo del alcance de medida. Estos instrumentos también se pueden construir con el cero en el centro de la escala.

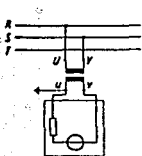


Fig. I.9.13

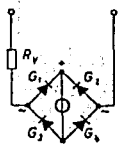


Fig. I.9.14

Para la medición de corriente alterna dentro del alcance de medidas de los aparatos de bobina móvil, con un consumo propio muy pequeño, suelen utilizarse estos aparatos con un equipo rectificador, generalmente en conexión Graetz. En la figura I.9.14 se muestra la conexión de un voltímetro con rectificador, con resistencia reductora  $R_v$  incorporada. Respecto a las características de estos aparatos son aplicables las ya indicadas para los amperímetros; pueden utilizarse para frecuencias hasta - - 10,000 Hz.

La lectura de las tensiones entre fases de un sistema trifásico exige la instalación de tres voltímetros, pero ésto puede evitarse mediante la instalación de un conmutador de tres posiciones, denominado conmutador de voltímetro y que se ha representado esquemáticamente en la figura - - I.9.15, que consta de dos contactos circulares y 6 plots. Una palanca aislada, que se hace girar por medio de una manivela, lleva sendas escobillas en sus extremos para conectar eléctricamente cada uno de los sectores con el plot correspondiente; de esta forma se pueden leer sucesivamente las tensiones entre las fases R-S, R-T y S-T. La instalación de un - conmutador de voltímetro es muy usual en tableros de control.

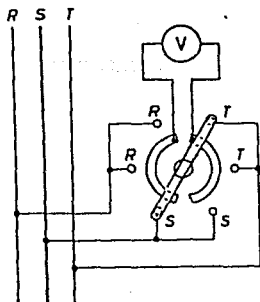


Fig. I.9.15 Conexión de un conmutador de voltímetro

### c) Vatímetros.

Los vatímetros empleados en tableros de control están constituidos, casi siempre, por un sistema de medida ferrodinámico, cuyas características esenciales se han descrito anteriormente. Se construyen para corriente alterna monofásica y trifásica con fases equilibradas o desequilibradas, para corrientes hasta 5 A y tensiones hasta 500 V; para corrientes y tensiones mayores, la conexión de los vatímetros se realiza a través de los correspondientes transformadores de medida. Para mediciones de potencia en corriente continua, se precisa una ejecución especial con resistencias en derivación en el circuito de intensidad.

Los vatímetros pueden medir potencias activas y reactivas.

Para determinar la potencia activa de una corriente monofásica, se conecta la bobina de intensidad del aparato a uno de los conductores y la bobina de tensión a ambos conductores (Fig. I.9.16). Para corrientes mayores de 5 A y tensiones a 500 V, se emplea, respectivamente, un transformador de intensidad y un transformador de tensión (Fig. I.9.17); en estos casos el circuito de intensidad del aparato es para 5 A (a veces, 1 A) y el de tensión para 100 V.

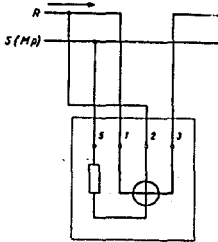


Fig. I.9.16

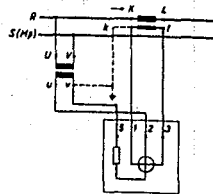


Fig. I.9.17

Para la medición de la potencia activa en corriente trifásica con - fases equilibradas es suficiente medir la potencia de una fase; la escala del aparato está rotulada de forma que indique la potencia total. Cuando se trata de una instalación con neutro accesible (por ejemplo, una red de 4 conductores, conectados directamente en estrella), esquema en la figura I.9.18; hay que procurar que la bobina de tensión no esté conectada a dos fases, sino siempre al neutro y a una fase. Cuando se trata de un neutro inaccesible (por ejemplo, una red de 3 conductores o consumidores conecta dos directamente en delta), hay que preparar un neutro artificial, con ayuda de una resistencia dividida en 3 partes, es decir, la denominada re sistencia de punto neutro (Fig. I.9.19).

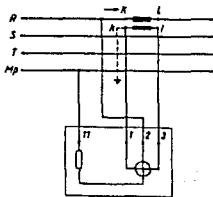


Fig. I.9.18

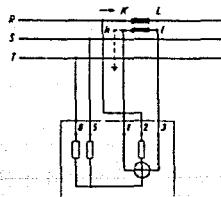


Fig. I.9.19



En las instalaciones trifásicas con carga desequilibrada, sin conductor neutro, la potencia activa se mide con dos vatímetros, con la denominada conexión Aron (Fig. I.9.20); ambos sistemas de medida están reunidos en una caja común y sus pares de giro actúan sobre un eje común: por consiguiente, es automática la suma de las potencias parciales medidas en ambos sistemas. La conexión Aron solamente proporciona resultados correctos cuando la suma de la corriente es cero y, por lo tanto, no es aplicable a cargas desequilibradas con 4 conductores: por esta razón, se utilizan algunas veces sistemas triples de medida, aunque este procedimiento resulta costoso.

La potencia reactiva de las redes monofásicas se calcula generalmente partiendo de la medición de la potencia activa  $P$ , de la tensión  $V$  y de la corriente  $I$ , mediante la fórmula:

$$P_r = \sqrt{V^2 I^2 - P^2}$$

Es poco frecuente la medición directa de la potencia reactiva mediante vatímetros, ya que debe provocarse un defasamiento artificial de  $90^\circ$  en el circuito de tensión del aparato.

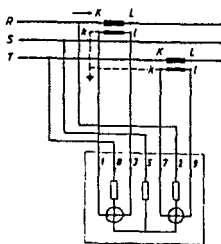


Fig. I.9.20

En las redes trifásicas, la medición de la potencia reactiva puede realizarse directamente, sin ninguna dificultad, ya que se dispone de tensiones mutuamente defasadas  $90^\circ$ . Por ejemplo, en el vatímetro reactivo - para una red de cargas equilibradas (Fig. I.9.21), se sustituye la tensión en estrella  $V_r$ , utilizada para la medición de la potencia activa, - por la tensión en delta  $V_{st}$ , para lo cual, como es natural, el circuito de tensión ha de considerarse de forma diferente debido a la distinta magnitud de las tensiones en estrella y en delta. Para cada conexión de potencia activa existe una conexión correspondiente de potencia reactiva; - de acuerdo con esto, la conexión de un vatímetro reactivo para instalaciones trifásicas con 3 conductores y cargas desequilibradas se representa en la figura I.9.22, y la figura I.9.23 expresa la conexión de un vatímetro reactivo para redes trifásicas de 4 conductores y cargas también desequilibradas.

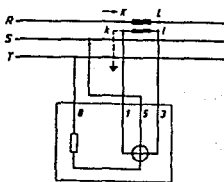


Fig. I.9.21

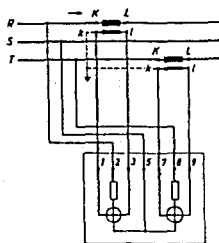


Fig. I.9.22

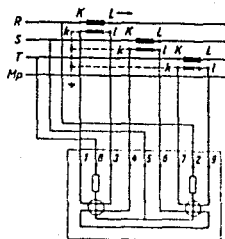


Fig. I.9.23

#### d) Factor de potencia

Para determinar el factor de potencia de una instalación se utilizan tres procedimientos:

- 1) Por medio de amperímetro, voltímetro y vatímetro
- 2) Por indicación directa (fasímetros)
- 3) Por medio de vatímetro de potencia activa y de vatímetro de potencia reactiva.

Cuando no es necesario vigilar permanentemente el factor de potencia, considerándose suficiente una periódica comprobación de su valor, éste puede comprobarse a partir de los datos suministrados por amperímetros, voltímetros y vatímetros, de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\text{Para corriente monofásica: } \cos \varphi = \frac{P}{V I}$$

$$\text{Para corriente trifásica: } \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V I}$$

La lectura de los tres instrumentos de medida, ha de realizarse simultáneamente. Este sistema es bastante exacto, únicamente en el caso de cargas equilibradas; si las cargas fuesen desequilibradas, puede producir errores inadmisibles.

#### e) Fasímetros

Los instrumentos de indicación directa para la medición del factor de potencia, se denominan fasímetros y su empleo está recomendado sobre todo, en las instalaciones donde debe vigilarse permanentemente dicho factor de potencia. Sin embargo, debe tenerse presente que, en las instalaciones de corriente trifásica, el fasímetro indica solamente el factor de potencia de la fase a la cual está conectada la bobina de intensidad.

El fasímetro, tal como se expresa en la figura I.9.24, se construye con un sistema de medida de cocientes, electrodinámico en caja de hierro. Un anillo de hierro encierra el circuito magnético y envuelve concéntricamente a un núcleo de hierro, constituyéndose de esta forma un entrehierro circular. El anillo lleva dos bobinas fijas, a través de las cuales circula una corriente proporcional a la corriente de la red. El campo magnético creado por la corriente de la bobina es también proporcional a la corriente de la red.

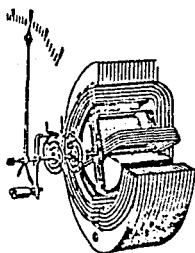


Fig.I.9.24 Sistema de medida de cociente



Fig.I.9.25 Escala de medida de un fasímetro

En el entrehierro están situadas dos pares de bobinas móviles, con eje común y defasadas  $90^\circ$  entre sí; las corrientes que atraviesan estas bobinas son proporcionales a la tensión de la red.

Las corrientes de las bobinas proporcionales a las tensiones, generan junto con el campo de la bobina de corriente, pares de giro de orientación opuesta y hacen girar el sistema hasta lograr el equilibrio. El ajuste depende solamente del ángulo de fase y la escala está dividida en valores de  $\cos \varphi$  (Fig. I.9.25). En casos especiales se construye el aparato de forma que la aguja tenga una desviación de  $360^\circ$  y que la zona de medida permita la medición de la energía suministrada y recibida, con carga inductiva o con carga capacitiva.

En la figura 1.9.26 se observa el esquema de conexiones de un fasímetro en un circuito trifásico, con un transformador de intensidad y dos transformadores monofásicos de tensión, derivando a tierra los secundarios.

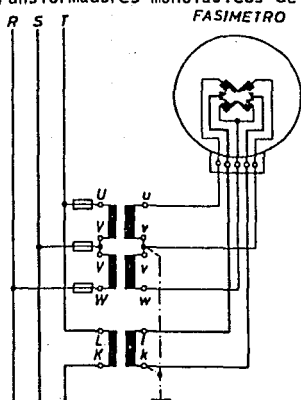
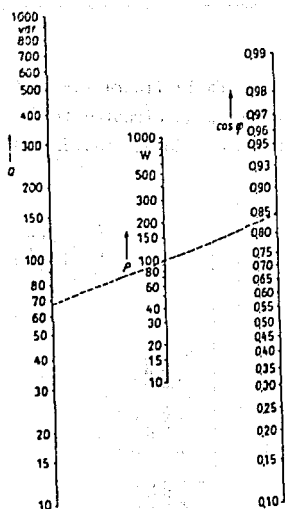


Fig. I.9.26 Conexión de un circuito de corriente alterna trifásica con transformadores de tensión y de intensidad.

Si hay que determinar con la mayor exactitud posible el factor de potencia total de una instalación de corriente trifásica con cargas desequilibradas en las tres fases, puede determinarse midiendo las potencias activas y reactivas por medio de los correspondientes vatímetros y realizando después los cálculos pertinentes. Para ello, puede utilizarse el ábaco representado en la figura 1.9.27: basta con buscar en la escala correspondiente, los valores de las potencias activa (escala P) y reactiva (escala Q), medidas con los vatímetros, unir estos valores con una recta cuya intersección con la escala de  $\cos \varphi$  dará directamente el valor del factor de potencia. Este valor será inductivo cuando P y Q tienen el mismo signo, y capacitivo si sus signos son diferentes.

Fig. I.9.27 Abaco para el cálculo del factor de potencia a partir de la potencia activa  $P$  y la potencia reactiva  $Q$ .



#### f) Frecuencímetros.

Para medir la frecuencia de los sistemas eléctricos, se utilizan - frecuencímetros; los más empleados son los denominados frecuencímetros de lengüeta (Fig. I.9.28) que consta de un sistema de medida de vibración - constituido por una serie de lengüetas de acero tensadas, excitadas por - un electroimán. Las lengüetas, cuyo número de oscilaciones propio es - próximo a la frecuencia a medir, entran en resonancia e indican el valor de la frecuencia (Fig. I.9.29). La exactitud de la indicación no depende prácticamente de la tensión aplicada aunque, no obstante, determina la amplitud de la desviación de las lengüetas. Para obtener una buena lectura en estos instrumentos, la tensión de medición no ha de ser inferior a 15% de la tensión nominal de éstos ya que, en caso contrario, la indicación - de los valores intermedios, con los cuales oscilan varias lengüetas, resultaría confusa y su lectura no sería posible a cierta distancia del aparato de medición.

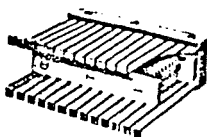


Fig. I.9.28 Sistema de medida de vibración de un frecuencímetro de lengüeta.

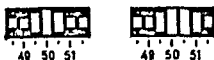


Fig.I.9.29 Escala de medida de un frecuencímetro de lengüeta. Izquierda: lectura 50,0Hz. Derecha: lectura 50.25 Hz.

Algunas veces, los fasímetros se fabrican con dos escalas, con lo que pueden apreciarse las frecuencias existentes en dos líneas que proceden de distinta fuente de energía.

C A P I T U L O   I ICONTROL INDUSTRIAL AUTOMATICO

## II.1 - Introducción.

Los aparatos automáticos para medir y controlar constituyen el sistema nervioso de los modernos procesos industriales, ya que pueden detectar condiciones y tomar acciones de control con alto grado de confiabilidad y rapidez.

Debido a los requerimientos de velocidad y a la complejidad de las plantas modernas, los controladores automáticos desplazan más cada día al operador humano.

Desde el punto de vista del control automático lo que interesa del proceso son sus características dinámicas, o relacionadas con el tiempo y entre éstas se pueden citar los retrasos: de capacitancia, de medición - y tiempo muerto; y las perturbaciones y cambios de carga.

De acuerdo a las características dinámicas del proceso a controlar se establecen los MODOS DE CONTROL, los que pueden ser definidos como la forma matemática en que el controlador manejará el error, para producir la corrección a través del ELEMENTO FINAL DE CONTROL, de forma que la variable controlada quede dentro de los límites preestablecidos. (Figura - II.1.1).



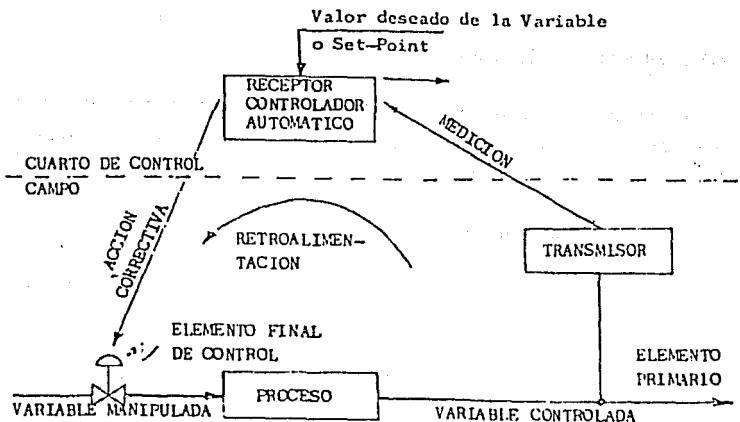


Fig. II.1.1.1 Diagrama de bloques de un sistema de control automático

## II.2 - Símbolos, Notación y Terminología Usados en Instrumentación y Control.

### II.2.1 - Introducción.

En Instrumentación y Control se emplea un Sistema especial de símbolos, con el objeto de transmitir más efectivamente tanto sus ideas como su información. Esto es indispensable en el diseño, selección, operación y mantenimiento de Sistemas de control.

Debido a que los Ingenieros y Técnicos a menudo usan varios términos para referirse a un fenómeno, se hace necesario conocer la normalización de la Terminología de Control.

A continuación mencionamos los conceptos anteriores en forma sintetizada.

## II.2.2 - Símbolos y Notaciones

Un Sistema de Símbolos ha sido estandarizado por la I.S.A. (Sociedad de Instrumentistas de América), el cual se da a continuación en forma condensada.

La identificación de un Instrumento será entonces:

Identificación general, cuando se use una combinación de letras para establecer su propósito y funciones.

Identificación específica, cuando a la combinación de letras acompañe un número que sirve para identificar al Instrumento más detalladamente.

Estas identificaciones se usan para designar a todo tipo de Instrumentación en trabajos escritos y se pueden combinar con símbolos dibujados en las representaciones en diagramas y planos en general.

### a) Indicaciones Generales.

Las identificaciones generales consisten en las letras mostradas en la tabla 1, con el significado de cada una de ellas y la posición o posiciones permitidas, en las cuales pueden combinarse.

En el uso de estas letras, y sus combinaciones, se deben aplicar las siguientes reglas o instrucciones.

1) Las letras de identificación se escribirán en todos los casos como mayúsculas. Las únicas excepciones lo son el uso de "d", "r" y "p" (Esta última en la combinación ph únicamente).

2) Cada letra tendrá un solo significado al usarse como primera letra en cualquier combinación, definiendo la variable del proceso.

TABLA 1 LETRAS PARA IDENTIFICACIONES

LETRAS MAYUS- CULAS	DEFINICIONES Y POSICIONES PERMITIDAS EN CUALQUIER COMBINACION		
	1a. LETRA VARIABLE DE PROCESO	2a. LETRA TIPO DE REGISTRO U OTRA FUNCION	3a. LETRA FUNCION ADICIONAL
A	-	Alarma o Analizador	Alarma
C	Conductividad	Control	Control
D	Densidad	-	-
E	-	Elemento (primario)	-
F	Flujo	Relacionador	-
G	-	Cristal (no mide)	-
H	Manual (actuante)	-	-
I	-	Indicador	-
L	Nivel	-	-
M	Humedad	-	-
P	Presión	-	-
R	-	Registro (registrador)	-
S	Rapidez	Seguridad o interruptor	-
T	Temperatura	Transmisor	Transmisor
V	Viscosidad	-	Válvula
W	Peso	Pozo	-
Y	-	Convertidor	-

3) Igualmente, cada letra tendrá un solo significado cuando se use como segunda o tercera letra en una combinación al definir el tipo de servicio.

4) Lo anterior es particularmente importante al formar combinaciones de letras.

5) No pueden usarse letras o combinaciones de letras intermedias.

#### b) Indicaciones Específicas

En la mayoría de los casos será necesario agregar a la identificación general de un Instrumento, un sistema numérico para establecer asimismo su identificación específica. Cualquier sistema de números en serie puede ser usado y pueden pertenecer a un solo proceso unitario, o bien pueden ser todo un sistema completo de números seriados para una planta, o un grupo de plantas que formen una organización.

En cualquier caso, la serie de números consecutivos deberá ser apropiada para usarse en las identificaciones generales.

En un trabajo escrito, el número va inmediatamente después de las letras y separado de éstas por medio de un guión. Ejemplo: El Control y registro de Temperatura número uno se representará por TRC-1.

#### c) Símbolos

Los símbolos se usan para indicar la posición y tipo de cada Instrumento en los diagramas y se ilustran más adelante.

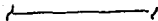

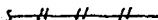
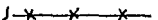








Se dan a continuación las siguientes notas con el objeto de que se usen los símbolos pertinentemente.

1) El círculo, que debe ser aproximadamente de 7/16 de pulgada (de diámetro), se emplea para localizar la posición de cada Instrumento propiamente dicho.

2) Generalmente es innecesario repetir la identificación para el transmisor, válvula de control, elemento primario, etc., los cuales - son nombrados de acuerdo con el Instrumento principal al cual están conectados.

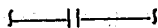
3) Si se considera necesario, puede agregarse una pequeña nota junto al símbolo para aclarar la función o propósito de cualquier componente del circuito de medición o control, ya que una pequeña nota evita el aplicar o usar una gran variedad de símbolos complicados.

#### LISTA DE SIMBOLOS MAS UTILIZADOS EN INSTRUMENTACION

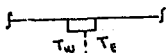
	Línea de proceso.
	Señal eléctrica.
	Señal neumática.
	Señal de sistema termal lleno.
	Suministro de aire.
	Suministro de energía eléctrica.
	Instrumento localizado en el campo.
	Instrumento localizado en el tablero local.
	Instrumento localizado en el tablero principal.
	Instrumento localizado en la parte posterior del tablero principal.
	Transmisor de señal.
	Transductor de señal eléctrica a señal neumática. (mA/psi).



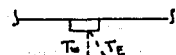
Convertidor de señal de termopar a señal eléctrica (mV/mA).



Elemento primario de medición de flujo - (Placa de orificio).



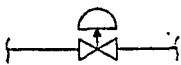
Elemento primario de medición de temperatura (termopar) sencillo con termopozo.



Elemento primario de medición de temperatura (termopar) dúplex con termopozo.



Válvula automática de control con actuador de diafragma, cierra a falla de aire.



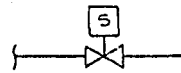
Válvula automática de control con actuador de diafragma, abre a falla de aire.



Válvula automática de control con actuador de diafragma con posicionador.



Válvula automática de control con actuador de diafragma con volante manual.



Válvula solenoide de tres vías con reposición manual.

### II.2.3 - Terminología de los Elementos de un Sistema de Control.

Existen varios intentos de normas, pero las normas "ASME STANDAR - 105", ("Terminología de Control Automático") han sido publicados por la "División de Instrumentos y Reguladores" de la "Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME)". La Terminología de esta publicación que se aplica a la instrumentación y control, se enlista a continuación, teniendo asociado su concepto o definición.

#### a) En el Proceso:

**EL PROCESO.-** El proceso comprende las funciones colectivas realizadas en y por el equipo en el cual la variable va a ser controlada. "El equipo" que es lo que se encubre en esta definición debe entenderse que no incluye el equipo de control. El proceso puede también referirse como el sistema controlado, como por ejemplo: La producción de gasolina es un proceso que consiste de un número determinado de componentes o sub-procesos; y el proceso completo se controla, controlando estos sub-procesos.

**LA VARIABLE CONTROLADA.-** Es aquella cantidad o condición que es medida y controlada.

**EL MEDIO CONTROLADO.-** Es aquella energía o material del proceso en el cual la variable es controlada.

La variable controlada es una condición o característica del medio controlado, como por ejemplo, cuando la temperatura del agua en un tanque es automáticamente controlada, la variable controlada es la temperatura - y el medio controlado es el agua.

**LA VARIABLE MANIPULADA.-** Es aquella cantidad o condición que es variada por el Controlador Automático, de modo que afecta el valor de la Variable Controlada.

**EL AGENTE DE CONTROL.**- Es aquella energía o material del proceso en el cual la Variable Manipulada es una condición o característica.

La variable manipulada es una condición o característica del agente de control; y por ejemplo: Cuando un elemento final de control (válvula de control), cambia el flujo del gas combustible a un quemador, la variable manipulada es el flujo, el agente de control es el gas.

b) En el Circuito de Control Automático:

**CONTROLADOR AUTOMATICO.**- Es un dispositivo que mide una cantidad o condición variable, y opera para corregir o limitar la desviación de este valor medido, de una referencia seleccionada (SET-POINT).

Simplemente establecido, el controlador automático opera para corregir o limitar la cantidad que la medición actual de la variable controlada difiere de la medición deseada, o valor de estado estacionario de esa variable.

**SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO.**- Un sistema de control automático es cualquier arreglo operable, de uno o más controladores automáticos, conectados en circuitos cerrados, con uno o más procesos.

**MEDIOS DE MEDICION.**- Consisten de aquellos elementos de un Controlador Automático que están involucrados en la determinación y comunicación a los medios de control del valor de la Variable Controlada.

Es el sistema de medición en un Controlador Automático.

**ELEMENTO PRIMARIO.**- Es la porción de los medios de medición que primero utiliza o transforma energía del medio controlado para producir un efecto que es una función del cambio en el valor de la Variable Controlada.



El efecto producido por el Elemento Primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, potencial eléctrico o resistencia.

**MEDIOS DE CONTROL.**- Son aquellos elementos de un Controlador Automático que producen la acción correctiva.

**ELEMENTO FINAL DE CONTROL.**- Es aquella porción de los medios de control que cambia directamente el valor de la variable manipulada.

Este puede ser una válvula de control, un amortiguador, u otra forma de restrictor variable y ajustable, que pueda cambiar el flujo del Agente de Control.

#### II.2.4 - Terminología de las Características de los Elementos de un Sistema de Control.

##### a) Del Proceso:

Todo proceso tiene ciertas características que influyen en la calidad del control.

**CAPACIDAD.**- Es la cantidad máxima de energía o material que puede ser almacenada por el proceso.

**CAPACITANCIA.**- Es el cambio de capacidad contenida por unidad de cambio en una variable de referencia.

**RESISTENCIA.**- Es la oposición al flujo de materia o energía.

**RETRASOS.**- Es cualquier retardo entre dos acciones relacionadas.

**TIEMPO MUERTO.**- Es el retraso de tiempo que existe entre un cambio de la variable controlada y el momento en que el elemento primario de medición detecta totalmente ese cambio.

**CAMBIO DE CARGA.-** Es un cambio de la variable manipulada, no provocado por el elemento final de control (válvula automática), sino por un cambio de propiedades físicas o de energía del agente de control.

**AUTO-REGULACION.-** Es una acción constante y propia del proceso que ayuda o se opone a llegar al equilibrio.

b) Del Control Automático:

**OSCILACION O CICLAJE.-** Es un cambio periódico de la variable controlada, de un valor a otro.

**EL PUNTO DE CONTROL.-** Es el valor de la variable controlada, al cual, bajo cualquier condición de ajuste fijado, el control automático opera para mantenerlo.

**EL PUNTO DE AJUSTE, (SET-POINT).-** Es la posición a la cual se fija el mecanismo de control, para servir como señal de referencia.

**SENSIBILIDAD.-** Es la rapidez de respuesta en la señal de salida con respecto a un cambio específico de la señal de entrada.

Este término puede aplicarse a cualquier elemento en el circuito de control.

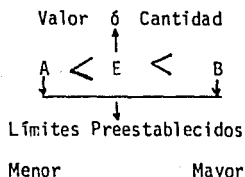
**DESVIACION.-** Es la diferencia entre el valor instantáneo de la variable controlada y el valor de la variable controlada de acuerdo con el punto de ajuste.

## II.3 - Sistemas de Control Automático.

### II.3.1 - Introducción

En la introducción del capítulo, se describió en una forma somera - lo que es un sistema de control, aunque con un enfoque al circuito cerrado basado en la retroalimentación; sin embargo, abarca un aspecto más amplio y puede definirse como: Un sistema dentro del cual un cierto valor o cantidad debe ser mantenido dentro de límites preestablecidos.

Matemáticamente:



Existen varias formas de implementar estos sistemas desde el punto de vista de la Instrumentación. (Neumática o Eléctrica).

Los sistemas de control pueden dividirse en sistemas de control de circuito abierto y de circuito cerrado; y ambos serán ampliamente descritos a continuación.

### II.3.2 - Sistemas de Control de Circuito Abierto.

El sistema de control de circuito abierto simplemente involucra la realización de un estimado de la forma o cantidad de acción necesaria para obtener un objetivo deseado, y su base radica en la predicción. No se hace una comprobación para determinar si la acción correctiva ha cumplido con el objetivo deseado. (Fig. II.3.1).

Un buen ejemplo de un sistema de control abierto es el de una máquina lavadora automática. En este caso la persona que opera la máquina tiene un objetivo (el lavar una carga de ropa sucia), y lo compara con un nivel de referencia (el nivel preestablecido u obtener ropa limpia), y hace una predicción (ajustando el tiempo de lavado y agregado del jabón).

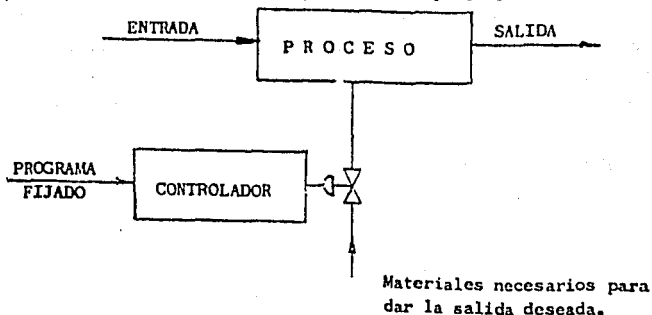


Figura II,3,1 Sistema de Control de Circuito Abierto

El operador arranca la máquina y espera (dedicándose inclusive a otros quehaceres), en la suposición de que la predicción hecha conseguirá el objetivo deseado. Si la predicción fué correcta en todos sus aspectos (cantidad de jabón, cantidad de agua fría y caliente, ciclo de tiempo, - cantidad de mugre en la ropa, etc.), la ropa quedará absolutamente limpia; y por lo tanto el sistema es capaz de un control perfecto. Sin embargo, si cualquiera de las variables que afectan lo deseado se desvía de la calidad o cantidad sobre la que se hizo la predicción, el sistema de control de circuito abierto no da un control perfecto (la ropa no queda perfectamente limpia).

Dado que la máquina no hace una comparación final entre el resultado actual (el grado de limpieza de la ropa obtenido) y el resultado deseado (ropa perfectamente limpia), cualquier error en la predicción (el programa fijado y los materiales necesarios), produce una diferencia entre resultados.

En nuestro sistema de control estudiado antes, hemos supuesto que la predicción se hace automáticamente a través de un dispositivo que llamamos controlador y una válvula (de control); pero dicha válvula se puede mover también a mano por el operador, y ésto nos lleva a la segunda gran división de los sistemas de control de lo que también ya habíamos hablado antes: Automáticos y manuales.

### II.3.3 - Sistemas de Control de Circuito Cerrado.

La diferencia entre un sistema de control de circuito abierto y un sistema de control de circuito cerrado estriba en que en este último sí - existe una comparación final y continua entre los resultados deseados y - actual y si no son iguales (se produce un error), el controlador opera pa - ra corregir a través de un elemento final de control (normalmente una vál - vula de control pero puede ser también un interruptor eléctrico), el - - error.

La figura II.3.2 es una buena representación gráfica de lo expresado anteriormente.

En el área de los procesos industriales, la mayoría de las veces de tipo continuo, los sistemas de control de circuito abierto prácticamente no tienen aplicación, por lo que de aquí en adelante trataremos únicamente con los sistemas de control automático de circuito cerrado.

### II.3.4 - Componentes de un Sistema de Control de Circuito Cerrado.

Por lo expresado anteriormente y de las figuras II.1.1 y II.3.2, se puede inferir que un sistema de control automático sencillo consta de las siguientes partes:

- 1) El proceso, o sea el o los equipos en los cuales la variable va a ser controlada.

- 2) Una sección sensible que mide el valor actual de la variable controlada y la transmite al controlador automático.

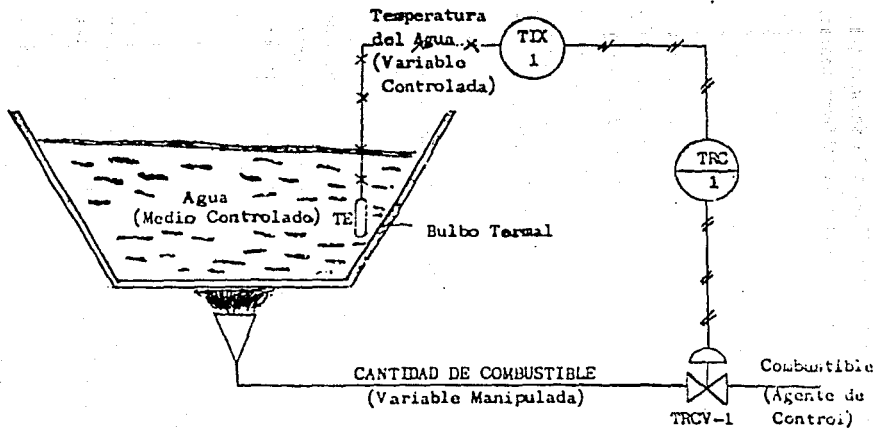


Figura 11.3,2

Ejemplo de un Sistema de Control Automático Sencillo

- 3) Una fuente de referencia que suministra e indica el valor deseado de la variable.
- 4) El controlador automático que opera para corregir si la variable controlada no está dentro de los límites prefijados por el valor deseado.
- 5) El elemento final de control que ajusta la variable manipulada de acuerdo a la acción correctiva del controlador automático.

De las cinco partes enumeradas anteriormente, la primera, el proceso, no es un instrumento, y lo que interesa de él son sus características dinámicas.

Las partes 2, 3 y 4 sí son instrumentos y pueden existir como una sola unidad (un instrumento), o por separado, pero cuando se interconectan entre sí, forman un circuito de instrumentación.

La parte cinco, el elemento final de control es normalmente una válvula automática operada por aire, aunque en otros casos puede operar hidráulica o eléctricamente.

El elemento final de control puede también ser en algunas ocasiones un actuador especial, un interruptor o una resistencia variable eléctricos.

## II.4 - Sistema de Control Automático de un Elemento.

### II.4.1 - Introducción.

Los Sistemas de control automático de un elemento (controlador), son las herramientas básicas para el control de procesos. El controlador maneja una sola variable.

A continuación trataremos el controlador automático y sus modos de control básicos debido a que es el corazón de todo sistema de control automático.

#### II.4.2 - El Controlador Automático.

El controlador automático de todo sistema de control puede definirse como un dispositivo que maneja una entrada (desviación o error), (Fig. II.4.1) para producir una salida que es función de la forma matemática en que ha sido programado.

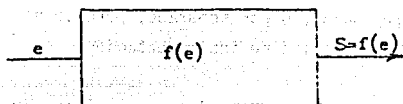


Figura II.4.1

#### EL CONTROLADOR AUTOMATICO

Clasificaremos los controladores automáticos en función al origen de la energía con que acciona al elemento final de control:

#### Controlador Auto-operado.

Es aquel controlador en que toda la energía para accionar el elemento final de control es tomada del medio controlado del proceso, a través del elemento primario y medios de medición. (Fig. II.4.2).



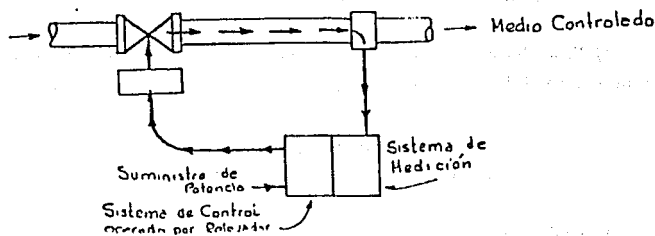


Fig:II.4.2 Controlador auto-operado

### Controlador Operado por Relevador.

Un controlador operado por relevador, es aquel en el cual la energía transmitida a través del elemento primario es suplementada o amplificada para accionar al elemento final de control, empleando una nueva fuente de energía. Este tipo de controlador automático puede contener:

- 1) Un sistema de medición auto-operado y un sistema de control accionado por relevador.
- 2) Un sistema de medición accionado por relevador y un sistema de control auto-operado.
- 3) Un sistema de medición y un sistema de control, ambos operados por relevadores.

La forma matemática en que el controlador maneja la entrada es mejor conocida como modo de control, y de estos existen varios que serán explicados a continuación.

### II.4.3 - Modos de Control Básicos

a) Modo Proporcional.- Un modo de control proporcional es aquel en que la salida del controlador es proporcional a la entrada, o sea:

$$S \propto e : \text{ por lo que:} \\ S = Ge + C \dots \dots \dots (1)$$

En donde G es la constante de proporcionalidad, en este caso la ganancia del controlador 'e' es el error y está dado por la expresión:

$$e = E - P$$

siendo E el valor de la variable controlada, P el valor de referencia o set-point, y C es una constante que depende de la calibración del controlador.

El rango de operación en el que se ejerce la acción de este controlador es la denominada "banda proporcional", que es un porcentaje del rango total de la escala del dispositivo medidor.

La banda proporcional se puede expresar matemáticamente en función de la ganancia como:

$$\text{B.P.} = \frac{100}{G} \% \dots \dots \dots (2)$$

O sea que es el porcentaje de escala completa a través del cual la variable controlada produce una variación completa de la señal de salida. Observando esta ecuación se tiene que a mayor ganancia la banda proporcional es más estrecha y viceversa. Este efecto se ve en la figura II.4.3.

En el caso de la figura II.4.3 se tiene que la constante de calibración del controlador está al 50% de la escala y es también el set-point, ya que cuando el error es cero el controlador está al 50% de la escala, y dependiendo del valor del error sube o baja.

En la figura II.4.4. se ve la acción del control proporcional de acción tanto directa como inversa al haber una variación de la variable controlada.

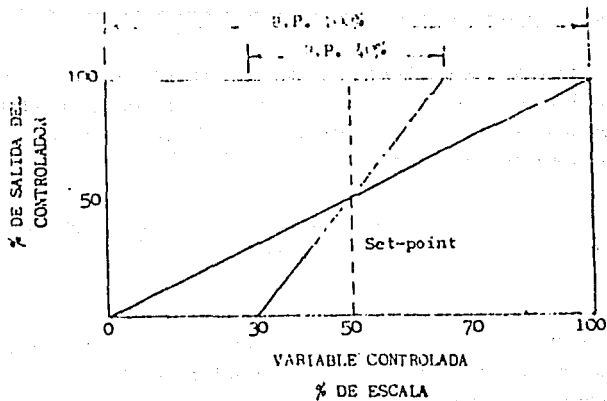


Figura II,4,3

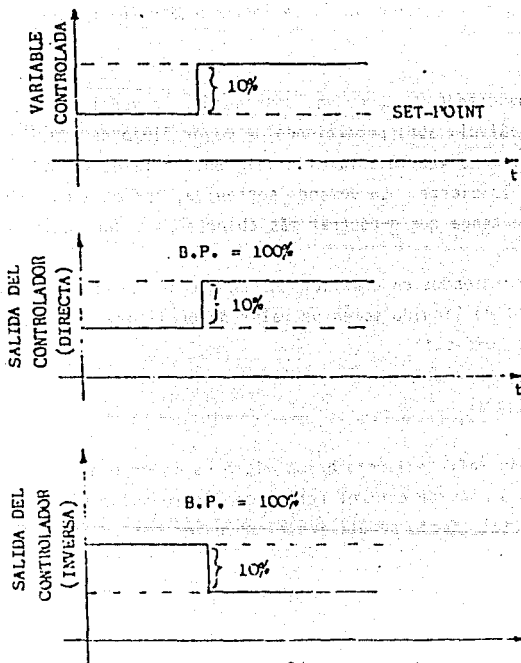


Figura II.4.4

CONTROLADORES DE ACCIONES DIRECTA E INVERSA

El controlador de acción directa es aquel que responde en el mismo sentido que las variaciones de la variable controlada; en cambio el de acción inversa es el que tiene una acción contraria al sentido de la desviación de la variable controlada.

Considérese el sistema de la figura II.4.5 y supóngase que el líquido del tanque se está usando para un consumo.

Las condiciones iniciales son tales que para la demanda específica la válvula permite el paso de líquido, suficiente para mantener el nivel en el tanque en forma tal que la entrada y la salida de líquido por unidad de tiempo son las mismas.

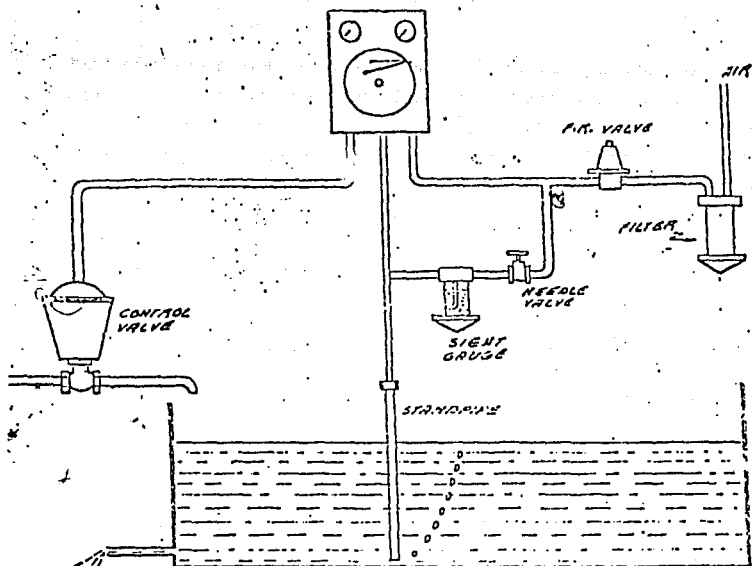
Supóngase que la demanda ahora se incrementa y se sostiene al valor incrementado.

El nivel desciende y ocurre una desviación, la señal del controlador hace que la válvula abra permitiendo un mayor flujo de líquido al recipiente, lo cual a su vez levanta el nivel, reduce la desviación y .... hace que la válvula cierre. La demanda sostenida, por otra parte hace que la válvula se tenga que encontrar más abierta para ser satisfecha.

Estos requerimientos en conflicto hacen que la variable controlada, en este caso nivel de líquido tomen un valor de equilibrio pero, desviado del valor deseado "off-set".

#### b) Modo Integral.

La desviación (off-set) como hemos visto es inherente al control proporcional y otro modo de control deberá ser introducido si se desea eliminarlo. Para tal efecto se utiliza el modo integral.



SIMPLE AUTOMATIC CONTROL SCHEME - LIQUID LEVEL CONTROL

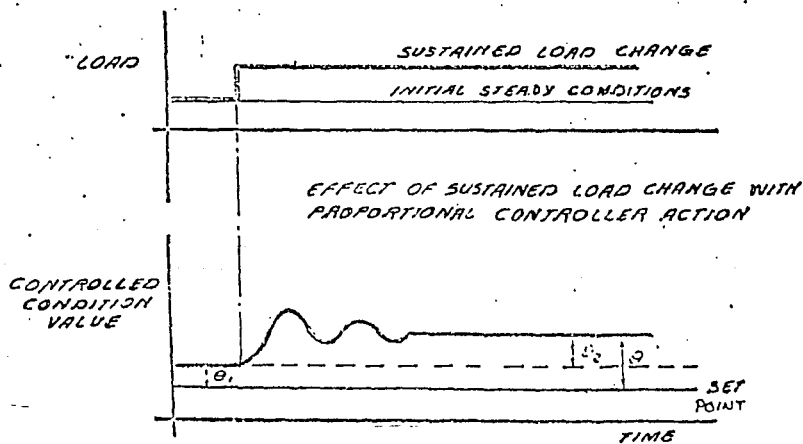


Fig.II.4.5

En este modo el elemento final de control se mueve a una velocidad proporcional a la desviación y continuará haciéndolo mientras esta exista en forma tal que no habrá "off-set", pero, este tipo de control por sí mismo llevará demasiado tiempo en restaurar la variable a su punto de ajuste.

$$\frac{ds}{dt} \propto e \quad \text{y por lo tanto:}$$

$$\frac{ds}{dt} = F \cdot e, \text{ integrando:}$$

$$s = F \int e dt + c_1 \dots \dots \dots (3)$$

En esta ecuación  $F$  es la constante de la acción flotante, y  $c_1$  es la constante de integración.

En un controlador integral típico la acción flotante es afectada por dos factores

- 1) La desviación de la variable controlada y,
- 2) La duración de esta desviación.

Mientras mayor sea la desviación y más tiempo dure, mayor será la acción de velocidad proporcional.

La acción del control integral se ve en la figura II.4.6 para un cambio brusco en la variable controlada.

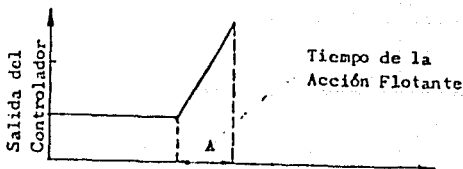


Figura II.4.6

Controlador Flotante de Acción Directa

## c) Modo Derivativo.

Este es un modo de control en el cual la salida del controlador es proporcional a la derivada del error; o lo que es lo mismo:

$$S \propto \frac{de}{dt} \quad y:$$

$$S = K \frac{de}{dt} \quad \dots \dots \dots (4)$$

En esta ecuación K es la constante de proporcionalidad de la acción de derivada. La salida es dependiente de la variación del error con respecto al Tiempo.

Mientras más rápido sea el cambio en la variable controlada, mayor será la acción aplicada por el controlador. Este controlador corrige el retraso en tiempo del sistema, o sea, adelanta en tiempo dicha respuesta.

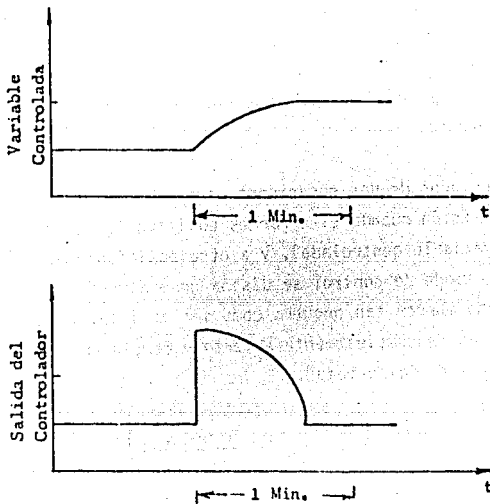


Figura II, 4, 7

CONTROLADOR DE ACCION DE DERIVADA

Este controlador puede ser visualizado como un amortiguador ya que tiene una fuerza de restitución grande, correspondiente a una razón de - cambio también grande en el desplazamiento y por lo tanto evita la oscilación. Sus efectos pueden verse en la figura II.4.7.

#### II.4.4 - Modos de Control más Utilizados.

Entre los modos de control más comunmente utilizados en los procesos industriales se encuentra en primer lugar el proporcional, el cual - ya fue ampliamente descrito en párrafos anteriores, aunque ofrece también dos modalidades que serán explicadas en lo que sigue.

##### a) De Dos Posiciones:

Si en la ecuación (1) se hace que la ganancia tienda a infinito - - ( $G \rightarrow \infty$ ), se tiene que la banda proporcional tiende a cero (B.P.  $\rightarrow 0$ ), - de acuerdo a la ecuación (2), y la salida (S) del controlador tenderá a - más o menos infinito ( $S \pm \infty$ ) según el signo aritmético del error (e) y - en cualquier error de éste por pequeño que sea. De esta forma la salida del controlador será máxima o mínima, que es la condición de un controlador abierto-cerrado.

El controlador de dos posiciones es meramente un "switch" que se - mueve a una posición cuando el error es positivo (señal de set-Point menor que la de la variable controlada), y a otra posición cuando el error es - negativo. Este modo de control se diseña generalmente para operar con - una zona o banda muerta tan pequeña como sea posible, y cuando las posi- ciones no son las de completamente abierto o completamente cerrado, se co- noce como control de "alto-bajo".

##### Control de Dos Posiciones con Abertura Diferencial.

Este es una modificación al control de abierto-cerrado, pero la "ac- ción de switcheo" ocurre sólo después de que el error de entrada pasa a través de una abertura o zona diferencial. Si, por ejemplo, el error fué



previamente negativo y regresa a cero, no hay switcheo del controlador - hasta que el error alcanza algún valor positivo. Entonces, si el error - de nuevo decrementa, debe caer a algún valor negativo como se requirió en el lado positivo.

La abertura diferencial entre estos dos puntos de switcheo debe - ser ajustable, y el set-point está en el punto medio de dicha abertura. La figura II.4.8 muestra las diferencias principales entre los controladores de dos posiciones, simple y con abertura diferencial.

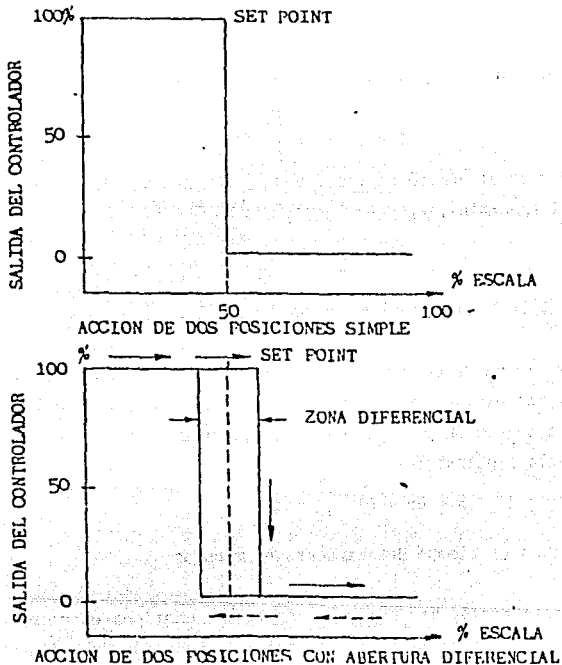


Figura II.4.8

DIFERENCIAS PRINCIPALES EN LAS ACCIONES DE LOS CONTROLADORES DE DOS POSICIONES SIMPLE Y CON ABERTURA DIFERENCIAL

## b) Modo Proporcional + Integral.

Con objeto de eliminar el efecto de error o desviación permanente (off-set), que se tiene en la acción proporcional, se adiciona la acción flotante que automáticamente efectúa la acción de reposición y la característica de desviación permanente (off-set) es superada.

El factor más importante en esta acción que por sus características se denomina proporcional + integral, es que se puede obtener un control sin error (off-set) bajo todas las condiciones de carga, pero la acción de reposición por sí misma no contribuye a la estabilidad del sistema de control.

Este modo se puede expresar matemáticamente:

$$S = Ge + Gr \int edt + K_1$$

en donde r es el número de veces por minuto que se repite la acción proporcional (rep/min), y,

$$K_1 = c \pm c_1$$

## c) Modo Proporcional + Derivativo.

Otra forma de combinación de acciones de modo de control es la proporcional más derivativo en la que se obtiene una salida del controlador que consta de acción proporcional más acción de derivada y que da una ecuación como la siguiente:

$$S = Ge + GT \frac{de}{dt} + c$$

en donde T es el tiempo de respuesta en minutos.

En esta acción hay una relación lineal continua entre el coeficiente de cambio de la variable controlada y la posición del elemento final de control. En otras palabras, el accionamiento del elemento final de control es proporcional a la velocidad de cambio de la variable controlada.

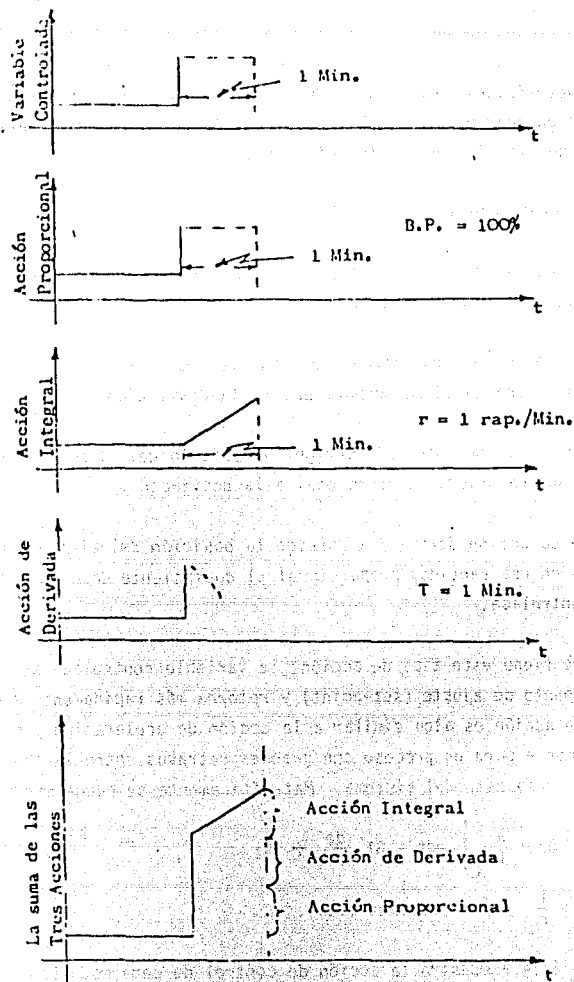


Figura II.4.9

La acción de un controlador con modo proporcional  
más integral más derivada

La característica de este tipo de acción es que por oponerse a todo cambio, tiene un gran efecto estabilizador en el control, pero no elimina el efecto de desviación permanente (off-set).

d) Modo Proporcional + Integral + Derivativo.

Las acciones previamente descritas, pueden combinarse en una sola, para aprovechar todas sus ventajas.

1) La acción proporcional corrige la posición del elemento final de control en una cantidad proporcional a la desviación.

2) La acción integral corrige la posición del elemento final de control en un coeficiente proporcional a la desviación.

3) La acción derivativa corrige la posición del elemento final de control en una cantidad proporcional al coeficiente de cambio de la variable controlada.

Cuando se tiene este tipo de acción, la variable controlada se desvía menos del punto de ajuste (set-point) y retorna más rápidamente a este valor. Esta acción es algo similar a la acción de aceleración y se emplea principalmente para un proceso con grandes retrasos entre la señal de entrada y la respuesta del sistema. Matemáticamente se puede expresar:

$$s = Ge + \frac{G}{Tr} \int edt + GT \frac{de}{dt} + K_1$$

en donde  $Tr = \frac{1}{r}$  (minutos/repetición).

La figura II.4.9 muestra la acción de control de cada modo básico - por separado y finalmente la suma total.

#### II.4.5 - Modos de Control más Utilizados de acuerdo a las Características Dinámicas de los Procesos.

La selección de un modo de control está basada en la naturaleza dinámica y estática del elemento final de control, el proceso controlado, - las perturbancias y los elementos de medición. Generalmente el comportamiento de válvulas y elementos de medición es mucho más rápido que el proceso en sí mismo, de modo que sólo es necesario considerar a este último. Algunos tipos típicos de comportamiento dinámico de proceso, se describen en los párrafos que siguen:

##### a) Retraso de Capacitancia.

Este comportamiento se caracteriza por un efecto de amortiguamiento causado por el almacenamiento de fluido o energía en el proceso. Si la variable controlada es el nivel de un tanque con tiempo de almacenamiento relativamente grande, es claro que ningún cambio en el flujo de entrada - puede ser causa de un cambio brusco en el nivel.

Si la respuesta a un cambio en la entrada se muestra gráficamente - aparecerá como en la figura II.4.10.

Nótese que el retraso en la capacitancia produce una respuesta inmediata pero inicialmente pequeña, y que cuando se analiza resulta una - curva exponencial de primer orden. Tal proceso puede ser controlado fácilmente por controladores de abierto-cerrado (banda proporcional muy estrecha) donde no es necesario el reajuste automático.

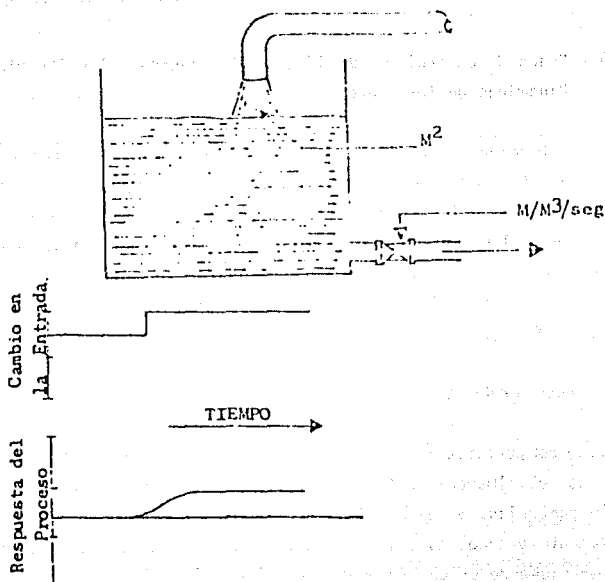


Figura II.4.10

COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO CON RETRASO DE CAPACITANCIA.

b) Retraso de Medición (Fig. II.4.11)

Este tipo de respuesta produce una contestación a un cambio en la entrada como se muestra en la figura, inicialmente solo hay un cambio pequeño, pero ocurre un incremento posterior hasta que se alcanza una pendiente máxima, decreciendo posteriormente en una forma similar a la curva para el retraso de la capacitancia. La mayor respuesta viene mucho más diferida en un sistema con retraso de medición, por lo que es una buena selección, generalmente, un controlador con acción proporcional más derivativa.

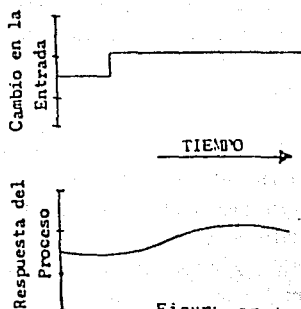


Figura II.4.11

## COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO CON RETRASO DE MEDICION

La acción derivativa no puede ser empleada si la señal del proceso es errática y "ruidosa", debido a que exagera su respuesta a cambios bruscos y amplifica grandemente la componente de ruido de la señal; pero los sistemas con retraso de medición son por lo general circuitos de control que involucran cambios de calor, y la señal de temperatura es plana y libre de ruido. La acción derivativa siente la pendiente de la curva de respuesta y provee una corrección adicional a la válvula mucho más rápida, que la que puede ser alcanzada con la acción proporcional solamente.

Dependiendo de las condiciones particulares del tamaño de la válvula, rango de temperatura y capacidades de calor, el tamaño de la banda proporcional requerido para buena estabilidad puede ser de 10 por ciento más; y si este es el caso, debe agregarse modo integral para evitar la desviación asociada con ajustes de banda proporcional ancha; por lo que el controlador tendrá tres modos: Proporcional, integral y derivativo.

c) Respuesta Instantánea.

En control de flujo y la mayor parte de las formas de control de presión de líquidos, la variable controlada contesta a la variable manipulada inmediatamente (ver figura II.4.12). Por lo tanto, el único retraso remanente en el circuito es el debido a la válvula, medios de medición y elementos de transmisión; y aunque estos tienen respuesta rápida, pueden ser causa de que el circuito se comporte en forma inestable si las bandas proporcionales son menores que 125 por ciento. Tales sistemas, de este modo, siempre requerirán reajuste automático para evitar las grandes desviaciones que pueden ocurrir con tales bandas proporcionales tan amplias; por lo que los controladores proporcionales con reajuste automático son lo mejor que se puede seleccionar para control de flujo y presión de líquidos en tuberías.

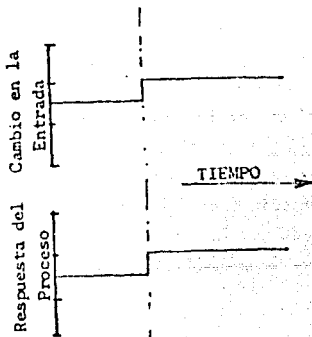


Figura II.4.12

COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO  
CON RESPUESTA INSTANTANEA



#### d) Retraso de Velocidad-Distancia

Como se muestra en la figura 4.II.13, la respuesta del proceso puede consistir meramente de un desplazamiento en tiempo; y tales condiciones pueden ser causadas porque el elemento de medición ha sido localizado a alguna distancia flujo abajo del punto de efecto de la variable manipulada; teniendo el fluido que gastar una cierta cantidad de tiempo en alcanzar el elemento de medición. A menudo el último puede relocalizarse para evitar el retraso velocidad-distancia (o tiempo muerto); y otras veces es necesario usar bandas proporcionales amplias y largos tiempos de reajuste.

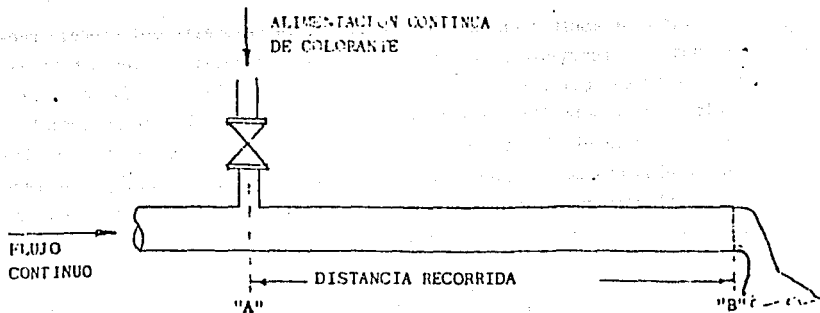
El rate no es una acción buena para procesos con respuesta de tiempo muerto; y más bien, en ciertos casos, un control integral puro (reajuste), se ha encontrado apropiado; pero la cosa importante que debe enfatizarse es que no hay un buen esquema de control para este tipo de proceso. Una perturbancia nunca empezará a corregirse mientras no transcurra el tiempo muerto y lo mejor que puede hacerse es evitar las perturbaciones mayores y abruptas si es posible.

**A PARTIR DE**

**ESTA PAGINA**

**FALLA  
DE**

**ORIGEN**



$$\text{RETRASO} = \text{DISTANCIA RECORRIDA} / \text{VELOCIDAD DEL FLUIDO}$$

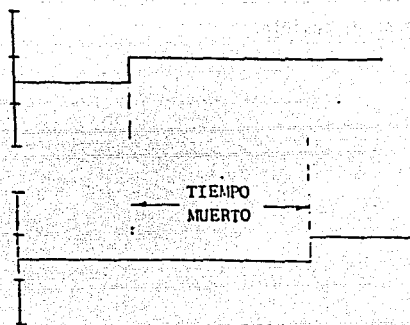


Figura II.4.13

Comportamiento dinámico de un proceso con retraso  
de velocidad-distancia

## II.5 - Sistemas de Control Automático Compuestos.

### II.5.1 - Introducción

Hasta este punto hemos analizado en forma más o menos amplia lo que son los sistemas de control automático sencillos, los cuales forman la herramienta básica de la instrumentación de todos los procesos industriales pero, sin embargo, existen ocasiones en que es necesario utilizar esquemas más complejos con el objeto de incrementar y mejorar la estabilidad del sistema y de estos esquemas trataremos en esta parte de nuestro estudio.

### II.5.2 - Sistema de Control de Cascada

Para ilustrar la necesidad de este sistema de control compuesto analizemos el ejemplo simple que aparece en la figura II.5.1, que no es sino un control de temperatura de un recipiente calentado a vapor. Aquí el elemento sensible a la temperatura (un bulbo de un sistema termal), se muestra en la descarga del calentador continuo, aunque podría estar sumergido en el líquido en el recipiente; pero en cualquier caso existe un circuito cerrado debido a que el controlador continuamente mide el resultado de su acción de control, la compara con el valor deseado (set-point), y después hace las correcciones que dependen de si existe error, como se muestra en el diagrama de bloques.

Aquí podemos observar que la estabilidad de este sistema de control de temperatura dependerá principalmente de las siguientes cosas: (1) la constancia en la carga de vapor que puede verse afectada por la demanda de otros procesos dentro de la misma línea de servicios auxiliares; y (2) el tiempo que transcurra para que el bulbo (elemento sensor) pueda detectar totalmente el cambio de temperatura como consecuencia de un cambio de carga, o de alguna otra disturbancia (retraso de medición).

Ahora bien, aunque el controlador pudiera corregir los retrasos en la medición por medio de la acción de derivada (control anticipatorio), -

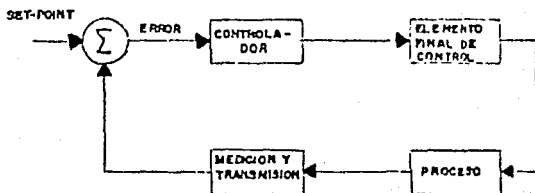
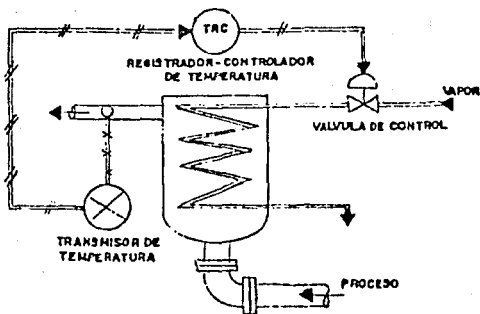


Figura 11.5.1

SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DIRECTO EN  
UN CALENTADOR DE VAPORES

no podría hacerlo por las variaciones en la demanda de vapor; y si éstas persisten el resultado será una oscilación en la variable controlada que pudiera eventualmente (en caso de ser de amplitud constante), ser tolerada en algunos casos, pero no en otros, existiendo inclusive el riesgo de que la oscilación se pudiera convertir en divergente (la condición ideal es la convergente), y el sistema se saliera totalmente de estabilidad.

Una de las técnicas para incrementar la estabilidad de un sistema de control como el descrito en los párrafos inmediatos anteriores es el de una cascada, la cual reduce el efecto de los cambios de carga próximos a su fuente, y mejora por otro lado por reducción del efecto de retraso de tiempo.

El sistema en cascada consta básicamente de un arreglo primario-secundario (o maestro-esclavo), y como en el ejemplo de la figura II.5.2 - los cambios locales en el flujo de vapor son inmediatamente compensados - por el circuito controlador de flujo secundario, mientras los retrasos de medición se neutralizan por la acción de control anticipatorio (o de derivada), en el controlador de temperatura.

Un control en cascada es realmente un circuito de retroalimentación (flujo de vapor) dentro de otro circuito (la temperatura del producto), y como en el ejemplo de la figura II.5.2, un sistema de respuesta lenta es conectado en cascada con otro de respuesta rápida.

Los sistemas de control en cascada pueden ser de un solo controlador "maestro", ajustando los set-points de varios controladores "esclavos"

### II.5.3 - Sistema de Control de Relación.

Los sistemas de control de relación incluyen varios tipos, encontrándose entre los más relevantes los siguientes:

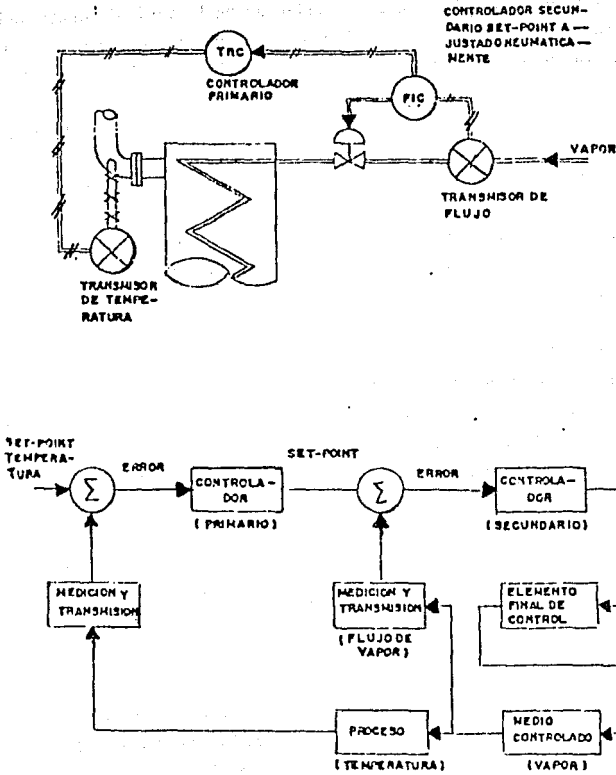


Figura II.5.2

SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA

TEMPERATURA-FLUJO

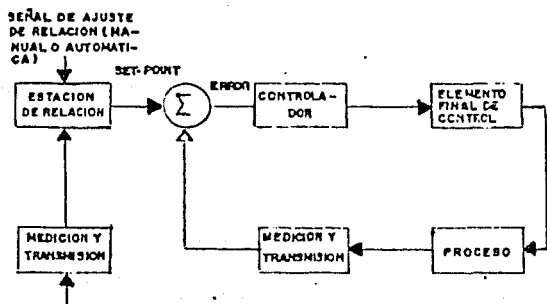
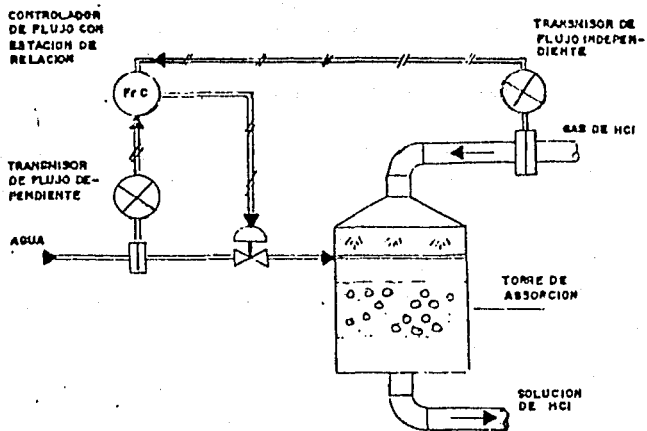


Figura II.5.3

SISTEMA DE CONTROL CON ESTACION DE RELACION EN  
 UNA TORRE DE ABSORCION PARA PRODUCIR UNA SOLU-  
 CION DE HCl CONSTANTE



### a) Con Estación de Relación.

En este sistema una variable dependiente va a ser controlada en una relación directa con otra variable independiente, y la figura II.5.3 muestra un ejemplo de esto. El caso trata de la fabricación de ácido clorhídrico de una concentración constante, por la absorción de cloruro de hidrógeno anhidrico en agua. El gas es el flujo independiente y el agua el flujo dependiente. El agua se introduce en la torre de absorción en forma de rocío y se mezcla íntimamente con el gas que entra por la parte superior de la torre. Para cualquier variación en el flujo de gas, existe una cantidad equivalente exacta de agregado de agua.

La unidad de control de relación es a menudo una componente separada (Estación de Relación), aunque puede integrarse en un instrumento de caja grande. La señal del transmisor independiente es relacionada (o multiplicada) por un factor que se ajusta en la estación de relación ya sea manual o automáticamente, y este valor se convierte en el set-point del controlador dependiente. Este último controla la válvula para seguir exactamente la demanda relacionada del transmisor independiente.

El ajuste del relevador de relación es una función de los rangos relativos de los transmisores, y la fórmula para calcular dicho ajuste es:

$$\text{Lectura del dial de relación} = \frac{(R_c) (C_v)}{(R_v) (C_e)}$$

en donde:

$R_c$  = Flujo controlado (o dependiente)

$R_v$  = Flujo no controlado (o independiente)

$C_v$  = Capacidad máxima del transmisor de proceso no controlado

$C_e$  = Capacidad máxima del transmisor de proceso controlado.

Como un ejemplo se puede considerar el caso de que el flujo del transmisor independiente tiene el doble del rango del dependiente, y que se desea que el flujo dependiente sea exactamente el 25% del flujo independiente para cualquier ocasión. Entonces:

$$\text{Lectura del dial de relación} = \frac{R_c C_v}{R_v C_e} = \frac{1 \times 2}{4 \times 1} = 0.5$$

Existen tres limitaciones para el uso de controles con estación de relación: (1) ambas señales deben tener las mismas unidades ( $M^3/Hr.$ ,  $kg/Hr.$  etc.); (2) deben tener las mismas características (de raíz cuadrada o lineales); y (3) la gamabilidad del transmisor (lo que significa la habilidad para medir precisamente, como por ejemplo flujos de 1 unidad a 5 - unidades).

Las dos primeras limitaciones son relativamente fáciles de cumplir, la primera por razones obvias y la segunda porque las unidades comerciales se fabrican bajo esta condición; pero, en cambio, la tercera si puede - crear algunos problemas.

Si en el problema que ejemplificamos anteriormente suponemos señales de raíz cuadrada y la señal del transmisor independiente cae abajo - del 50%, el set-point del controlador secundario será menos del 25%, lo - que creará problemas para mantener dentro de este valor la variable controlada debido a las limitaciones inherentes de precisión del medidor.

En el caso de los controles con estación de relación el transmisor independiente puede relacionar varias componentes dependientes con el uso de también varias estaciones de relación, (Fig. II.5.4) lo que permite la solución a problemas como del tipo de mezclado de gasolinas de varias componentes.

La relación puede ser ajustada automáticamente en muchos circuitos de proceso, siendo un caso tipo el control flujo de aire-flujo de combustible en una caldera.

b) Parte a Total.

Este sistema es una variante del "con estación de relación" y se usa en dos situaciones principalmente:

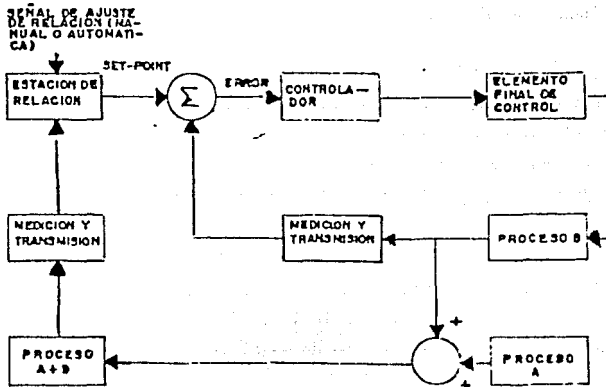
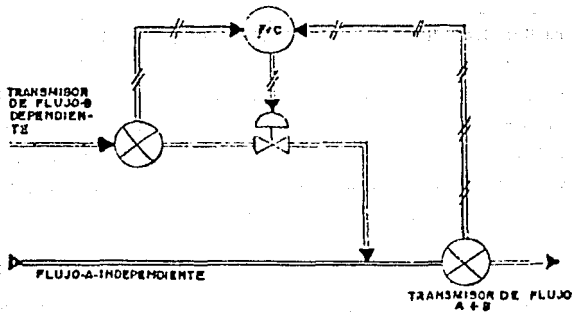


Figura II.5.4

SISTEMA DE CONTROL DE RELACION PARTE-A-TOTAL DE DOS PRODUCTOS INTERMEDIOS PARA FORMAR UNO FINAL

1) Cuando es imposible medir el flujo independiente antes de la adición del dependiente, lo que puede ocurrir por las siguientes causas:

La línea de flujo puede estar inaccesible;

Alta viscosidad puede hacer imposible medir el flujo conveniente (pero después de la dilución la viscosidad puede disminuir lo suficiente para que se pueda usar un medidor de flujo) y

El flujo puede ser altamente corrosivo (pero una vez que ha sido agregado a la línea principal la solución resultante puede ser neutral y más adecuada para su medición).

2) Cuando se desea agregar el líquido de mezcla a una relación determinada del total, lo cual es conveniente en algunos procesos químicos donde se desea medir y registrar el flujo total y también conocer qué tanto de este flujo total contiene un cierto porcentaje de la componente deseada.

El porcentaje exacto se relaciona directamente al ajuste de la estación de relación, y es común la utilización de un registrador de dos plumas para mostrar tanto la componente agregada como el flujo total.

### c) De Cantidad Total.

En este sistema, una cierta cantidad total de un material controlado (dependiente) que se agrega durante cierto tiempo, es manipulada en una relación directa a otra cantidad total independiente. La cantidad de este flujo dependiente es más precisamente controlada por este sistema que con el que usa flujos instantáneos.

En el sistema de control de relación simple, las correcciones se hacen en el flujo secundario después de que los cambios han ocurrido, y sin ninguna corrección por errores que existen en la detección del cambio y la corrección final de la variable controlada. Sin embargo, la totaliza-

ción de flujos y su comparación obliga al sistema a ajustar apropiadamente para asegurar que el porcentaje de las componentes en la mezcla total es precisa.

Este sistema de control encuentra uso en mezclado continuo en tuberías donde la operación en corridas largas requiere de un control preciso de los ingredientes. La figura II.5.5 muestra una operación de mezclado típica que consiste de: Dispositivos de relación, ajuste de relación y un circuito de control. Se pueden agregar varias líneas por la simple adición de los correspondientes dispositivos de relación y circuitos de control. Se han empleado medidores de turbina y otros instrumentos generadores de pulsos en tales sistemas, con transmisión y control eléctricos. - (Se pueden utilizar transductores electro-neumáticos hacia la válvula).

#### d) Entre Variables Diferentes.

Este sistema de control de relación se diferencia de los demás de su familia por poder mantener una relación arbitraria entre dos o más variables diferentes tales como: Temperatura y presión o presión y flujo, - etc.

Por ejemplo, existe una zona típica de operación para un compresor de aire, axial, en la que cuando el flujo de aire es muy bajo o la compresión muy alta, el compresor no opera de una manera estable. Este fenómeno de inestabilidad es conocido como "surge" y la instrumentación del sistema debe mantener el compresor fuera de la zona de inestabilidad por relevo de algo de su descarga, incrementando de ese modo el flujo de aire a través del compresor para evitar el "surge" (o inestabilidad por flujo - mínimo).

Un compresor con succión atmosférica se muestra en la figura II.5.6 y en éste, el flujo es medido en la entrada y la presión en la salida, como una función directa de la relación de compresión dado que la presión de entrada es constante. La señal de presión de descarga se ajusta de forma de dar un set-point adecuado para la relación específica.

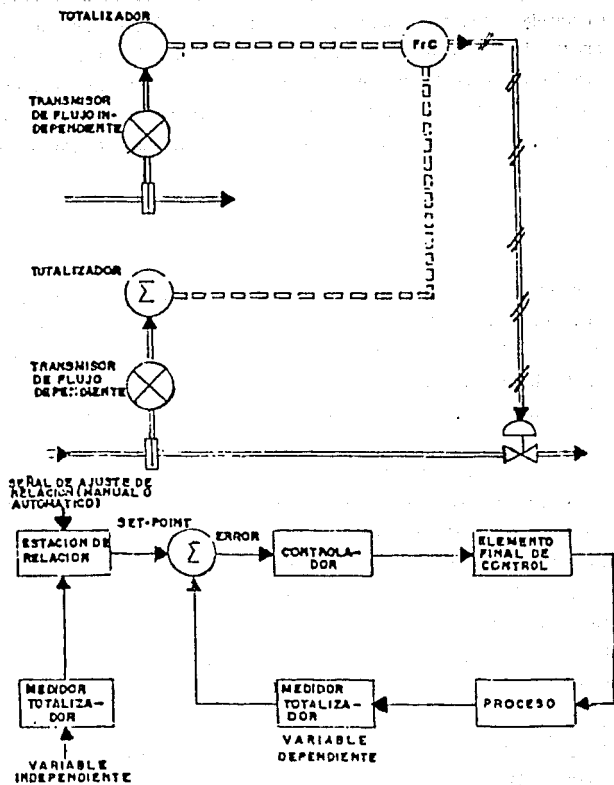


Figura II.5.5

SISTEMA DE CONTROL DE RELACION DE  
CANTIDAD TOTAL PARA MEZCLADO

Cada vez que las condiciones de operación determinen un punto a la derecha de la línea mostrada en la figura II.5.6, la válvula de relevo - permanece cerrada. Si, sin embargo, el punto de operación se aproxima y trata de cruzar la línea hacia la izquierda, el controlador abre la válvula de relevo lo suficiente para evitar el "surge" y mantener el sistema - en estabilidad. Es concebible, que algunas condiciones reclamarán de algún relevo y el sistema permanecería en la línea aún durante una operación "normal".

#### II.5.4 - Sistema de Control de Impulso con Aviso de Señal.

Los sistemas que tienen largos tiempos de retraso sufren de la desventaja de que el controlador trabaja con una señal de proceso que no representa la condición real de éste. Los cambios de carga no son detectados contra-actualmente y por lo tanto la corrección es retrasada, a menudo ocurriendo cuando ya no se necesita, debido a que el cambio de carga ha sido eliminado.

Un calentador de fuego directo (ver figura II.5.7), a menudo tiene el problema de que el flujo que viene de un proceso previo puede variar - considerablemente, y los largos tiempos de retraso debidos a la longitud de los serpentines hacen que el control de temperatura nunca sea preciso. La temperatura que está siendo detectada en la salida de un serpentín, no da una indicación real del posible cambio de temperatura que puede desarrollarse en el siguiente instante debido a un cambio de carga.

En el calentador, la temperatura de salida del producto es regulada por un controlador en la salida de la línea de carga; y si el flujo decre - menta debido a un cambio en la operación del proceso previo, habrá algún tiempo antes que el decremento en flujo resulte en un aumento en la tempe - ratura del producto. Cuando el controlador de temperatura finalmente comienza a corregir cortando el combustible, el flujo puede haberse resta - blecido de modo que se necesite más calor que el actual en dicho punto. - El proceso por lo tanto, podría tender a fluctuar y nunca se mantendría - el valor correcto. Un "relevador de impulso" (que suministra acción de -

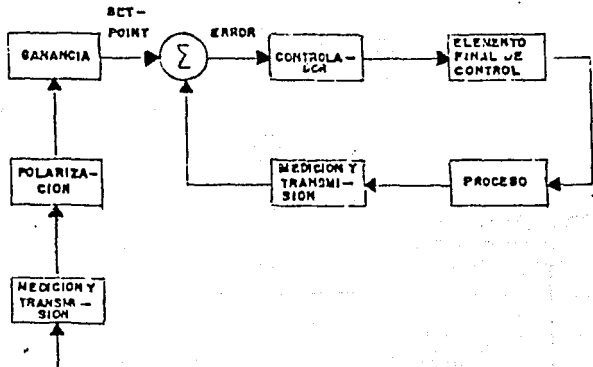
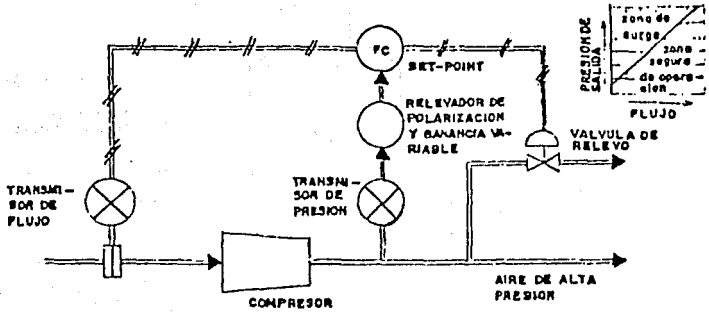


Figura II.5.6

SISTEMA DE CONTROL DE RELACION DE PRESION Y FLUJO A TRAVES DE UN COMPRESOR PARA EVITAR EL FENOMENO DEL "SURGE"



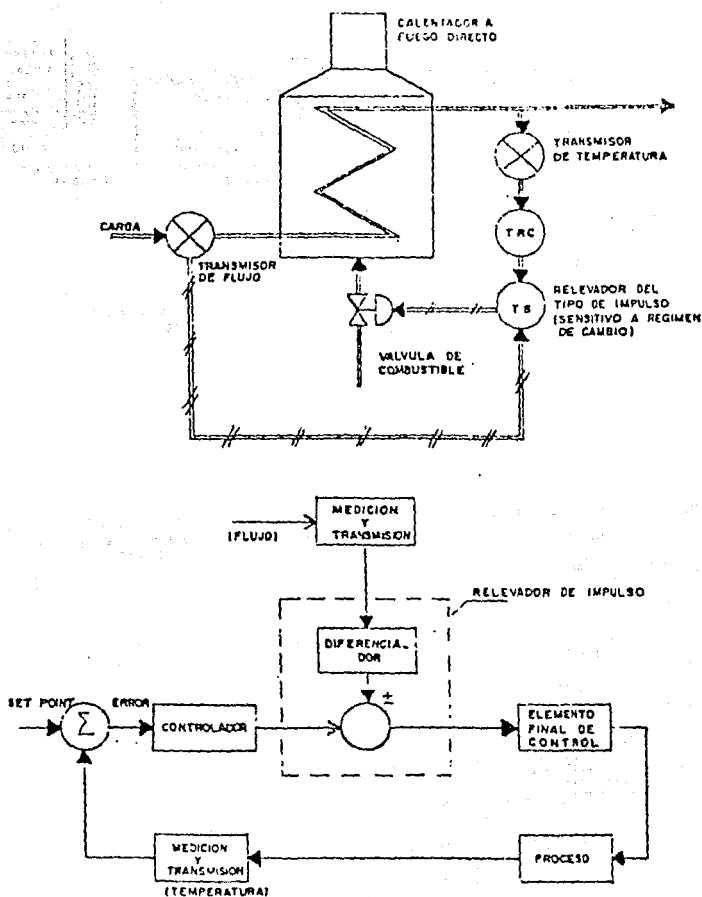


Figura II.5.7

SISTEMA DE CONTROL DE IMPULSO CON AVISO DE SEÑAL DE UN CALENTADOR A FUEGO DIRECTO CONTROLADO EN TEMPERATURA Y CARGA

derivada o anticipatoria), suministra una acción de control de aviso (aviso de señal), que continuamente monitorea, la señal de temperatura a la válvula de control. Si el flujo es constante, la señal de temperatura es pasada a través del relevador sin cambio; pero si hay variaciones en dicho flujo, éstas son detectadas y sumadas o restadas de la señal de control de temperatura. De esta forma, los cambios de carga en el flujo son detectados y actúan inmediatamente sobre el elemento final de control para compensar por anticipado por cambios en la carga.

Es importante señalar aquí que este sistema compuesto de control se aplica debido a que la carga al calentador es variable; pero si éste no fuera el caso, y la carga fuera constante (como por ejemplo con un control de flujo en la carga), sería más conveniente la utilización, dependiendo el caso, de un control en cascada.

#### II.5.5 - Sistema de Control de Rango Dividido.

Este es un sistema de control en el cual se realizan una serie de eventos definidos, para que una cierta variable manipulada pueda tener primero preferencia para el control de un proceso.

Lo anterior se ilustra en la figura II.5.8 en la que el sistema selecciona la mejor fuente de agua para un calentador de agua de alimentación. A medida que el nivel en el calentador comienza a disminuir, agua caliente del tanque correspondiente se empieza a agregar para permitir cambios de nivel normales. El uso de agua caliente evita desajustes de temperatura en el sistema de deareación que pueden causar dificultades en el proceso.

Sin embargo, si la demanda de agua deareada pudiera persistir y el nivel continuara fallando, la línea de agua caliente no sería la adecuada por más tiempo; y en este punto se deberá agregar agua fría a la línea de servicios auxiliares.

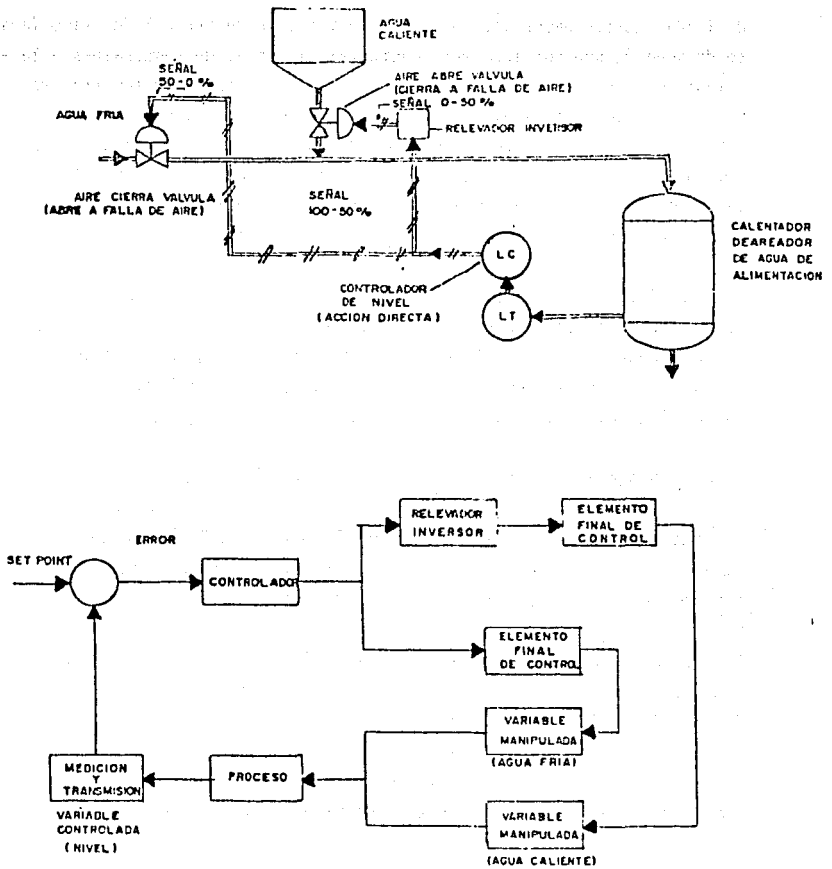


Figura II.5.8

SISTEMA DE CONTROL EN RANGO DIVIDIDO QUE SELECCIONA LA MEJOR FUENTE DE AGUA PARA UN CALENTADOR DEAREADOR DE AGUA DE ALIMENTACION

En el caso de una falla de la señal de control, la válvula de agua caliente deberá cerrarse y la válvula de agua fría deberá abrirse al mismo tiempo, para evitar un daño en el calentador. En esta forma, el contenido más valioso de agua caliente del tanque de reserva no será desperdiciado.

Este sistema involucra la utilización de un rango de válvula de media escala y un relevador inversor. También, la acción de la válvula se selecciona de modo de proteger contra una falla de la señal de control.

Cuando el nivel en el calentador deareador está en el tope del - - transmisor de nivel, resulta una salida de 100%, que mantiene la válvula de agua fría cerrada. El relevador invierte la señal de modo que ésta se vuelve mínima, y se mantiene cerrada también la válvula de agua caliente.

Cuando el nivel llega a media escala (50% de salida), la válvula de agua fría permanece cerrada, y la válvula cambia a "completamente abierta" dado que recibe una señal que va de 0 a 50% debido al relevador inversor. Si la cantidad de agua caliente fuera inadecuada para mantener el nivel - arriba del punto medio en el tanque, la válvula de agua fría abriría hasta que la señal del transmisor de nivel vaya de 50 a 0%. En algún nivel mínimo en el calentador, ambas válvulas estarán ampliamente abiertas.

Una falla en la fuente de potencia (electricidad, aire, etc.), dará por resultado que el sistema de agua caliente cierre su válvula para ahorrar su contenido. La válvula de agua fría será abierta para prevenir daños en el calentador por sobrecalentamiento.

#### II.5.6 - Sistema de Control de Predominio.

Algunas veces es necesario limitar el valor de una cierta variable (valor alto o bajo), para evitar daños en el proceso o el producto, y en estos casos se impone el uso de un sistema de control de predominio.

Ejemplos de esto pueden encontrarse en estaciones de bombeo donde a menudo el requerimiento es mantener dentro de límites seguros tanto la presión en la succión como también en la descarga de la bomba, como puede verse en la figura II.5.9.

El sistema trabaja de modo que existe un circuito de control operando normalmente en una de las posibles variables, y continúa de esta forma hasta que la otra variable llega a un cierto valor crítico. En este punto, ésta última variable se convierte en el factor de control hasta que las condiciones críticas son remediadas. En la figura II.5.9, las salidas de los dos controladores de presión están conectadas a un selector de baja señal, estando el set-point del controlador de succión abajo de la presión de operación normal; y su señal de salida estará a un máximo debido al error positivo con respecto al set-point.

El controlador en la descarga es una unidad de acción invertida y tiene su set-point a la presión de salida deseada. Consecuentemente su salida está normalmente abajo de la del controlador de succión.

Como las dos señales de salida de los controladores van a un relevador selector de baja señal, este último dejará pasar la más baja (en este caso la de la presión de descarga), bajo condiciones de operación normal. Sin embargo, si la presión de succión cayera abajo de su set-point, la salida de su controlador de presión decrementaría, llegando a un valor menor que la señal de descarga. Consecuentemente, el controlador de presión de la succión tomaría la acción sobre la válvula y mantendría la operación satisfactoria.

El sistema descrito anteriormente puede lograrse tanto con instrumentación neumática (como en la figura II.5.9), como con instrumentación electrónica; pero sin embargo con instrumentación neumática puede lograrse una variante, y es la de que la salida del controlador de predominio, se usa como aire de alimentación al controlador predominado.

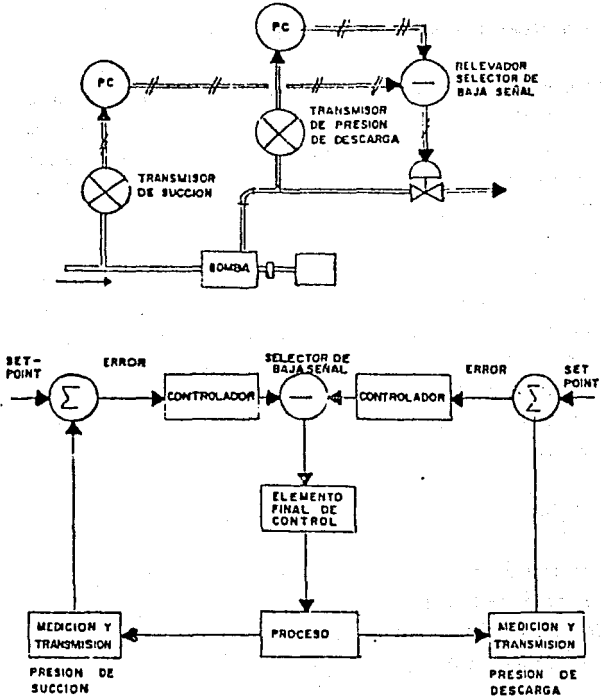


Figura II.5.9

SISTEMA DE CONTROL DE PREDOMINIO PARA EL  
CONTROL DE UNA BOMBA

### II.5.7 - Sistema de Control de Ciclo de Tiempo

El sistema de control de ciclo de tiempo es un sistema que abre y cierra uno o más circuitos durante intervalos regulados en tiempo. Los circuitos pueden ser operados neumática o eléctricamente, y pueden incluir operaciones de funciones simples como la activación de una válvula de abierto-cerrado, u operaciones más complejas.

Dentro de los usos de este sistema se incluye el control de prensas de moldeo para llantas, discos para fonógrafo y artículos de hule. También se incluye, la secuencia y control en tiempo del arranque de motores grandes, de operación de series de máquinas, secuencia de temperatura en reactores, regeneración de camas de intercambio iónico y reformación de camas fijas catalíticas. La figura II.5.10 muestra el ejemplo de control de una prensa.

### II.5.8 - Sistema de Control de Programa de Tiempo

Este sistema es una variante del de ciclo de tiempo, pero en el cual el set-point del controlador es variado automáticamente sobre un cierto período, e incluye aplicaciones típicas tales como ablandamiento de acero, reacciones intermitentes para polimerización, procesamiento de hule y esterificación.

Una situación típica puede involucrar instrumentación en donde tanto el régimen de cambio del proceso como la duración de cualquier valor del set-point deban ser precisamente controlados; y un uso muy popular de este sistema de control se muestra en la figura II.5.11 en la cual la instrumentación consiste de un circuito de retroalimentación completo con un control de set-point con aviso, actuando para guiar la variable del proceso.

En tal sistema, sólo el controlador del circuito de retroalimentación contiene los modos de control, y el set-point desarrolla una señal predeterminada en proporción al valor deseado de la variable del proceso

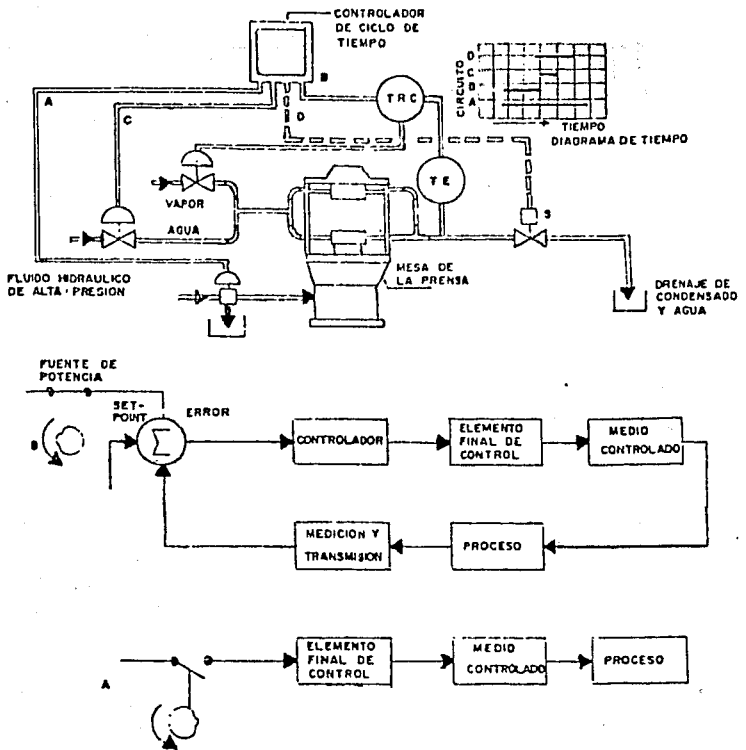


Figura 11.5.10

SISTEMA DE CONTROL DE CICLO DE TIEMPO  
PARA UNA PRENSA DE MOLDEO



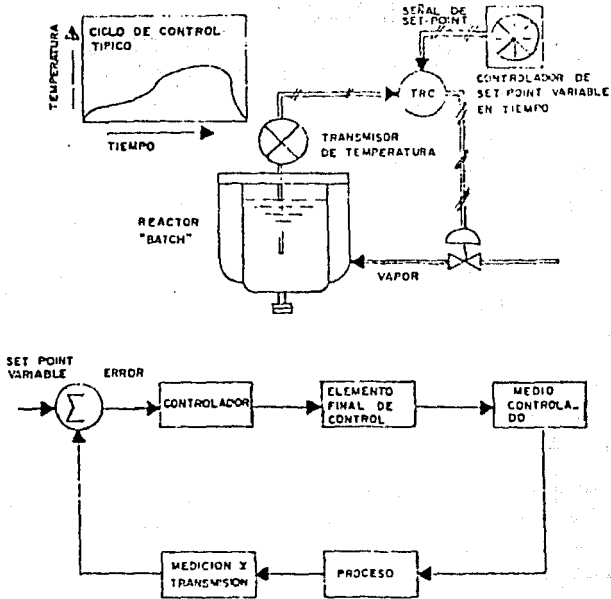


Figura II.5.11

SISTEMA DE CONTROL DE PROGRAMA DE TIEMPO PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA INTERMITENTE (BATCH)

para todas las porciones del programa de tiempo. En algunas unidades el generador de la función y el controlador pueden estar contenidos en la misma caja. Se deberá notar la utilización de un controlador registrador para tener un registro de la operación para propósitos de control de calidad.

#### II.5.9 - Sistema de Control de Punto Final

El control de punto final es una combinación de sistemas en cascada y de relación, con lo que se logra que la relación de la variable dependiente (o controlada), a la variable independiente (o no controlada), sea automáticamente ajustada por la variable final del proceso.

Una aplicación típica se muestra en la figura II.5.12, y aquí un analizador de punto final se usa para medir y controlar los dos ingredientes que formarán el producto que se quiere mezclar. El proceso involucra la neutralización de una corriente ácida por medio de otra corriente básica bajo control del pH.

Cuando con el análisis del producto final se detectan cambios en el set-point, la salida del controlador ajusta la relación automáticamente, de modo que los dos flujos son relacionados correctamente. Aquí, la variable dependiente está bajo control con su set-point determinado por el relevador de relación.

Otra aplicación común es el control de la relación aire-combustible en un horno, por la medición del contenido de oxígeno en los gases de salida.

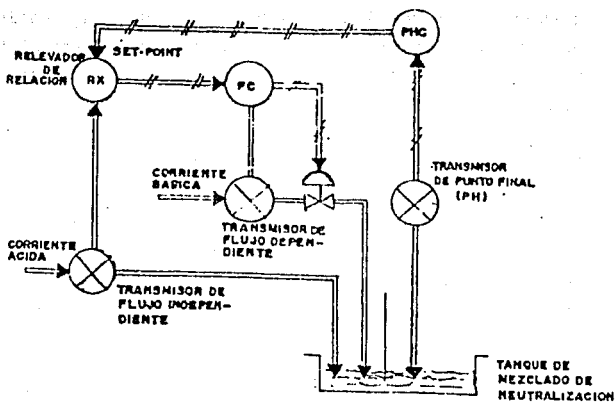
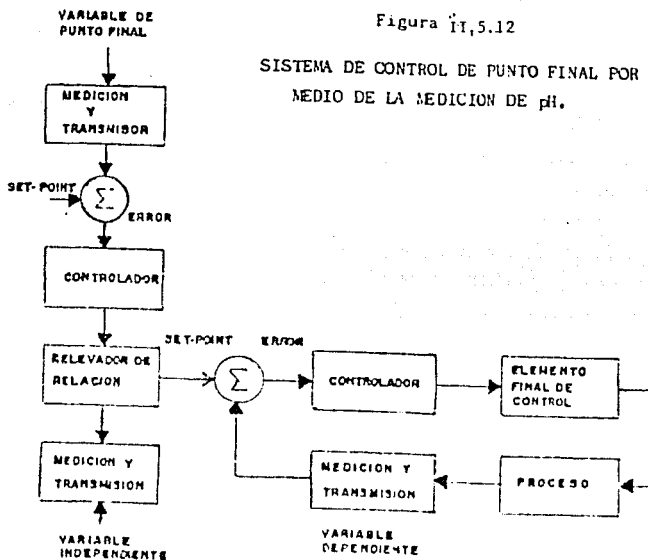


Figura II,5.12

SISTEMA DE CONTROL DE PUNTO FINAL POR MEDIO DE LA MEDICION DE pH.



## II.6 - Elementos Finales de Control

### II.6.1 - Introducción

En todos los procesos industriales modernos, los elementos finales de control tienen un papel muy importante en las operaciones de automatización que se llevan a cabo, ya que de ellas depende la correcta distribución y control de fluidos.

Los elementos finales de control pueden ser considerados los músculos de un sistema de control automático, dado que los mismos proporcionan la energía necesaria, para mantener su función de control de fluidos, a partir de un bajo nivel de energía proveniente del controlador.

Paradójicamente, dichos elementos de los sistemas de control, son los que reciben menos atención, a pesar de estar sujetos a severas condiciones de temperatura, presión, corrosión y contaminación que otros componentes, sin embargo cumplen satisfactoriamente su función de manipulación de los fluidos de procesos.

Considerando el número de aplicaciones que tiene la válvula de control en las plantas modernas, estas notas dirigen a un estudio de las mismas; sin que se descuide la posibilidad de aplicación de otros dispositivos que cumplen satisfactoriamente la función de un elemento final de control.

Fundamentalmente una válvula de control está constituida por el CUERPO y por el ACTUADOR. El fluido pasa a través del cuerpo y es obstaculizado por una apertura variable entre una parte móvil llamada tapón y otra fija llamada asiento. El tapón está unido al actuador por un vástago, y es el actuador el que produce el movimiento del tapón, dependiendo de la señal de control recibida.

Generalmente el actuador recibe una señal de 3-15 lb/pulg<sup>2</sup> y la convierte mediante un diafragma (o en ocasiones con un pistón) en una fuerza que actúa al tapón.

El actuador de diafragma es el más empleado aún cuando se trate de instrumentación electrónica. En este caso se utiliza un convertidor de corriente eléctrica a presión.

Existen varias configuraciones en cuanto al cuerpo de las válvulas de control cuya selección depende de las condiciones de operación y de las características del fluido entre otras cosas. Los tipos de cuerpo más comunes son el de GLOBO, MARIPOSA, BOLA y el tipo SAUNDERS. Las válvulas tipo globo son las más comunes, y actualmente una variación de éstas la globo tipo caja, es la más popular.

#### II.6.2 - Características de Control

Por característica de una válvula de control se entiende como la función que relaciona la apertura de la válvula con el porcentaje de flujo que pasa por ella.

Las distintas relaciones entre el porcentaje de flujo y la apertura se logran mediante la forma dada al tapón y al asiento en su maquinación.

Las características usuales en las válvulas son la LINEAL la IGUAL PORCENTAJE, la APERTURA RAPIDA y la PARABOLICA, siendo ésta última muy poco usual actualmente.

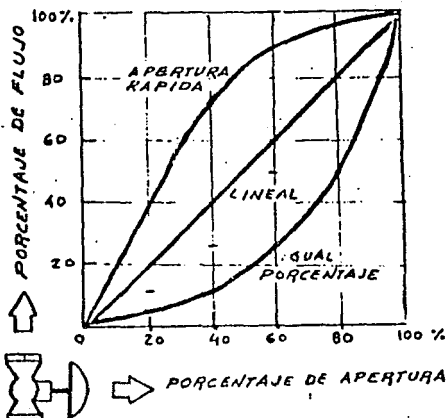
En la figura II.6.1 se muestran las características inherentes de las válvulas de control, en estas curvas se considera que la caída de presión a través de la válvula permanece constante.

La característica de apertura rápida permite grandes flujos desde el principio de la carrera del vástago, como se ve es posible tener un 70% de flujo con sólo el 40% de apertura. Esta característica es empleada generalmente en sistemas de control ON-OFF.

En la característica lineal se pretende que para cada porcentaje de apertura se tenga el mismo porcentaje de flujo, la característica de igual porcentaje presenta una curva en la que para incrementos iguales de apertura se tengan cambios iguales en PROPORCIÓN del flujo. En la figura se puede observar que el cambio de flujo entre el 40 y 60% de apertura es - aproximadamente del doble que el cambio de flujo entre el 20 y 40% de - apertura, y así en los siguientes incrementos de 20% de apertura el flujo se duplica aproximadamente. Con ésto, cuando la válvula está relativamen- te cerrada, los cambios en flujo son pequeños. Para aberturas mayores, - los cambios de flujo son grandes.

Aparentemente la válvula de característica lineal sería la mejor pa- ra los sistemas de control, pero su comportamiento deja de ser lineal si la caída de presión aumenta al disminuir la apertura. Al aumentar la caí- da de presión el flujo tiende a aumentar. Esta deformación de la caracte- rística lineal se ve compensada por la curva de igual porcentaje, por lo que es recomendable en los casos donde la caída de presión varíe con la - apertura de la válvula.

Fig. II.6.1



#### Relación Gama:

Se acostumbra definir como relación gama de una válvula (Rangeabili- dad) al cociente entre los extremos máximo y mínimo del rango de flujo - controlable. Se entiende como rango de flujo controlable al intervalo de flujo que sigue una característica bien definida.

### II.6.3 - Tipos de Válvulas de Control

#### a) Válvulas Tipo Globo

Las válvulas tipo globo son las más utilizadas, están constituidas fundamentalmente por el cuerpo que guía al fluido y sostiene el asiento, un tapón de movimiento longitudinal permite el mayor o menor paso del fluido al separarse del asiento. A la pareja formada por el asiento y el tapón se le llama puerto. Existen válvulas de globo de puerto sencillo - (Fig. II.6.2) y de doble puerto (Fig. II.6.3).

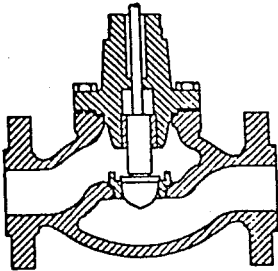
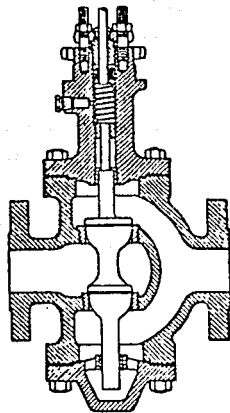


Fig. II.6.2

Fig. II.6.3



Las válvulas de puerto sencillo se utilizan cuando se requiere de un cierre hermético, pero requieren de actuadores poderosos por presentar un desbalance de fuerzas sobre el tapón.

Las válvulas de doble puerto presentan una capacidad de flujo mayor y tienen la ventaja de presentar fuerzas balanceadas sobre el tapón. Estas válvulas aún estando cerradas, pueden permitir algo de flujo, debido a que los dos tapones no pueden asentar perfectamente.

La característica de control de las válvulas de globo se logra con la forma del tapón. Existen distintos tipos de tapones como se muestra en la Fig. II.6.4.

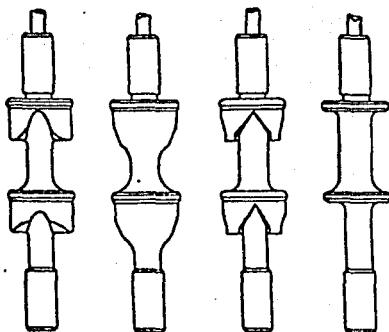


Fig. II.6.4

Los cuerpos pueden ser de conexiones bridadas, roscadas, entre bridas o soldables, cuya selección depende de las especificaciones de la tubería en donde sean montadas y del tamaño de la válvula.

Las válvulas bridadas van desde 3/4" hasta 12" aunque su tamaño se limita generalmente a 6" por razones de costo.

Cuando la temperatura del proceso es extremosa, se pueden considerar bonetes de extensión con aletas de radiación, para evitar daños en el actuador (Fig. II.6.5).

Una variación en la constitución del puerto de las válvulas de globo, es el tapón tipo JAULA o CAJA.

Actualmente es el tipo más utilizado en válvulas de control en tamaños de 3/4" a 6".

En este tipo de válvulas el tapón es un pistón que desliza sobre una caja cilíndrica con aberturas, cuya forma dan la característica de control de la válvula (Fig. II.6.6).



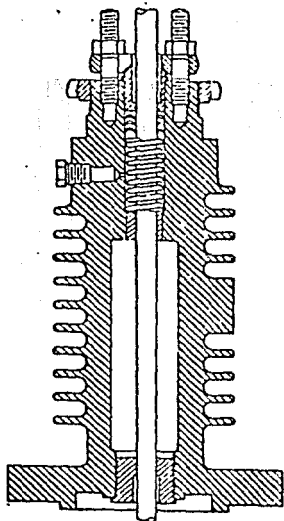


Fig.II.6.5

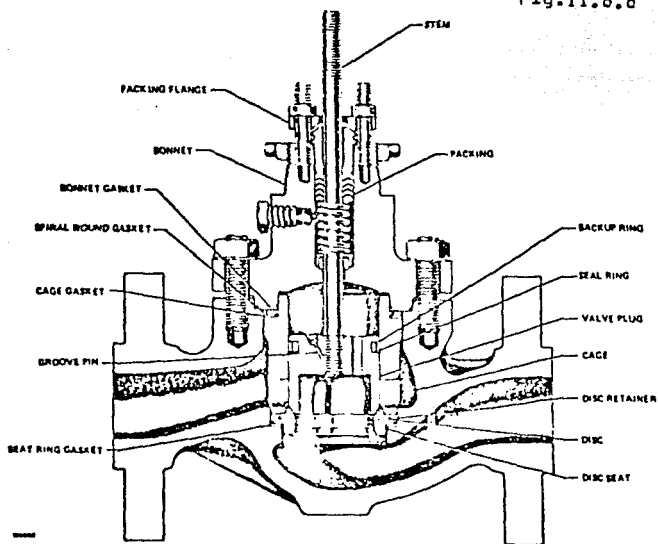


Fig.II.6.6

Las válvulas de globo tipo jaula pueden ser balanceadas o desbalanceadas. Una válvula balanceada tiene una comunicación del fluido entre su cara inferior del pistón y la superior, con objeto de igualar las presiones. La válvula desbalanceada tiene un cierre más hermético que la balanceada.

#### b) Válvulas Tipo Mariposa

Es una válvula de tipo rotatorio, se aplican generalmente cuando se requiere una gran capacidad de flujo, su tamaño va desde 2" hasta 36", su construcción es muy sencilla, su costo bajo, sus dimensiones y peso son pequeños. Están limitadas a caídas de presión pequeñas.

La válvula de mariposa consta de un cuerpo muy sencillo de forma anular del tamaño de la tubería, su instalación es entre bridas (wafer).

La parte móvil es un disco, cuyo diámetro coincide con el diámetro interno del cuerpo, el disco es girado desde 0° a 90° por una flecha conectada al actuador.

El par requerido para mover el disco varía considerablemente, debido a que el disco produce una velocidad más grande en un lado que en el otro y ésto da como resultado, un par que tiende a cerrar la válvula.

El par requerido para mantener una posición del disco es NULO para 0° y para 90°, pero tiene un máximo para 70° aproximadamente.

El par producido por un disco convencional es muy grande por lo que las válvulas de mariposa con un disco así, se limitan a una apertura máxima de 60°.

Para evitar esta limitación, se han desarrollado discos con contornos hidrodinámicos, llamados discos de bajo par.

La característica de flujo de las válvulas de mariposa se acerca mucho a la de igual porcentaje, su relación gama es típicamente de 33/1 en discos convencionales, y de 100/1 para el disco de bajo par (tipo cola de pescado).

Cuando se requiere de un cierre hermético, las válvulas de mariposa pueden ser recubiertas con un material elastómero como BUNA-N o VITON.

### c) Válvulas Tipo Bola

Aunque este tipo de válvulas tienen mucho tiempo de haber sido desarrolladas, no fue sino hasta la década de 1960 en que fueron impulsadas como válvulas de control automático.

Su impulso se debió al desarrollo de materiales elastómeros y de los fluorocarbonos, en particular TEFLON, que dan a las válvulas de bola un cierre hermético excelente. Son de mucha aplicación en industrias como la del papel y la azucarera, por su capacidad de manejar líquidos con fibras.

Los tamaños de estas válvulas van desde 1" hasta 24" comunmente, pueden ser instaladas en forma bridada, roscada o entre bridas, y pueden ser construidas en una gran variedad de aleaciones.

En las válvulas de bola el cuerpo contiene una esfera giratoria con un corte tal que al girar, produce la modulación del flujo.

La esfera puede ser completa, o solamente ser segmento esférico, conectado por una flecha a un mecanismo movido por el actuador.

La forma del corte de la esfera segmental puede variar, según la característica del flujo requerido, Fig. II.6.7.

En el caso de esfera completa donde la esfera tiene dos orificios opuestos, éstos son comúnmente circulares, lo que da una característica parecida a una de igual porcentaje.

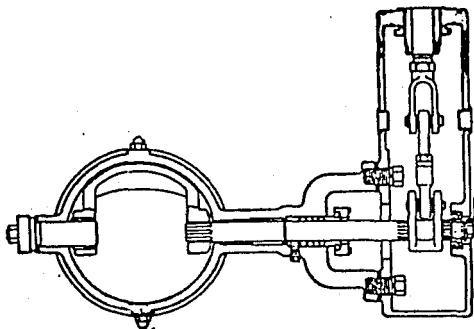


Fig.II.6.7

d) Posicionadores

El posicionador es un complemento de los actuadores muy utilizado en los controles modulantes.

Es un dispositivo el cual recibe la señal de control y una medición de la posición del vástago del actuador, las compara y manda al actuador la señal de corrección, hasta que éste tenga exactamente la posición requerida por la señal de control.

Su función es confirmar que el actuador llega precisamente a la posición deseada evitando así errores generados por histéresis, fricciones, o por no linealidades propias del diafragma. También reduce el tiempo de respuesta del actuador, y en determinadas aplicaciones puede también amplificar la señal de presión cuando se requieren fuerzas relativamente grandes.

En el caso de válvulas de control se aplican comúnmente para los siguientes casos:

- Válvulas de control de temperatura
- Válvulas de globo balanceadas de 6" o más
- Válvulas de globo desbalanceadas de 3" o más
- Válvulas de mariposa
- Válvulas de diafragma
- Caídas de presión de 100 lb/pulg<sup>2</sup> o más
- Líneas de transmisión neumática de 200 pies o más
- Sistemas de control en cascada o controles múltiples
- Sistemas de rango dividido
- Cuando un controlador maneja 2 válvulas o más
- Cuando se requiere mayor presión sobre el actuador.

En las válvulas de bola el par requerido para vencer la fricción - entre el asiento y la esfera llega a ser considerablemente grande sobre - todo en válvulas grandes, sujetas a caídas de presión grandes, por lo que es común que los actuadores usados en estas válvulas sean de pistón en - vez de diafragma.

La presencia de materiales elastómeros para proporcionar el cierre hermético puede acarrear una limitación en las temperaturas de operación de las válvulas de bola.

#### e) Válvulas de Diafragma

En casos en donde el fluido es estrechamente corrosivo es común - - aplicar las válvulas de diafragma. En las que sólo el cuerpo de la válvula y un diafragma de material elastómero, se están en contacto con el - - fluido.

El diafragma cierra el paso del fluido asentando sobre una ceja delineada en el cuerpo de la válvula. El movimiento (diafragmal) es conseguido por una pieza opresora conectada al actuador.

El cuerpo de la válvula puede ser recubierto fácilmente con un material resistente a la corrosión, siendo ésta su principal ventaja.

Como desventajas se pueden considerar: la fuerza necesaria para cerrar la válvula, es muy grande por lo que muchas veces se requiere un actuador de pistón, y por esta misma razón este tipo de válvulas se limita a 8" máximo. La característica de control no es muy buena puesto que es aproximadamente de apertura rápida.

## C A P I T U L O   I I I

### INSTRUMENTACION Y CONTROL EN UNA PLANTA GENERADORA DE VAPOR

#### III.1 - Introducción.

Para controlar una planta generadora de vapor eficientemente y con alto grado de seguridad y confiabilidad, es necesario colocar previamente los dispositivos de medición de las variables principales en los puntos - de interés. Se requiere, además, que las señales provenientes de estos - aparatos interactúen de acuerdo a determinada lógica y requerimientos para obtener señales que accionen determinados servomecanismos, que a su - vez, abrirán o cerrarán válvulas o compuertas para controlar las varia- - bles y así poder controlar el proceso.

#### III.2 - Instrumentación

##### III.2.1 - Introducción.

La instrumentación es el conjunto de aparatos que tienen por finali-  
dad la medición y el control de las variables de un proceso.

Para controlar el proceso se puede recurrir a la instrumentación -  
eléctrica o a la instrumentación neumática, ya que son las más confiables  
y económicas.

En cualquier caso la lógica del sistema de instrumentación es la -  
misma, aunque tienen características propias.

##### III.2.2 - Características de la Instrumentación Eléctrica.

Consideraremos el tipo de sistema de instrumentación centralizado -  
en una sala de control, con instrumentos miniatura, resolviendo en muchos  
casos problemas de espacio.

La señal de corriente es de 4-20 mA y la distancia a la que puede transmitirse sin atenuación ni retraso significativo es de 2 a 3 km.

Requiere una fuente de alimentación de C.D.

Cuando se desea instalar en una área peligrosa, se debe instalar a prueba de explosión todo el sistema o únicamente la interfase área peligrosa - área segura.

Los sistemas eléctricos tienen gran flexibilidad y exactitud cuando se requiere de funciones de computación analógica, tales como sumas, restas, multiplicaciones, divisiones, extracción de raíz cuadrada, cuenta - pulsos, etc. Además puede informar a una computadora y recibir órdenes - de la misma.

La frecuencia de mantenimiento para este tipo de sistemas es muy baja y, el personal requerido para ello es personal técnico entrenado en - la fábrica; ésto es debido a la sencillez de su construcción que se basa en módulos de tarjetas de circuitos impresos.

Las compañías en México que surten instrumentación electrónica, no tienen existencias confiables en refacciones, por lo que deberá pensarse en tener refacciones disponibles en almacén para garantizar la continua - operación del sistema.

### III.2.3 - Características de la Instrumentación Neumática.

Requiere de una instalación de aire comprimido, limpio y seco.

La señal neumática puede transmitirse hasta una distancia de 100 m. sin problemas. Cuando la distancia es mayor de 100 m. pero menor a 350 - m., las líneas de transmisión neumática pueden introducir retrasos significativos que pueden afectar al control de variables rápidas así como el flujo, de tal forma que obtendríamos un circuito de control inestable. -



En cambio, si lo que se controla es una variable lenta como temperatura - la misma distancia y el mismo retraso pudieran no tener efecto sobre ella. Este retraso se podría corregir con el uso de tubos más anchos o el uso de boosters en la línea.

Cuando el área está clasificada como explosiva, los sistemas neumáticos no requieren de ninguna protección especial, ya que están hechos a prueba de explosión.

La flexibilidad y exactitud para la computación analógica, no es tan buena como en el caso de la instrumentación eléctrica.

El sistema neumático puede tener interfase con computadoras, haciendo uso de transductores que cambien la señal neumática por una eléctrica.

Las refacciones para instrumentos neumáticos se pueden conseguir fácilmente, debido a que se fabrican en México.

La frecuencia de mantenimiento es baja y se puede realizar con herramienta de fácil acceso.

#### III.2.4 - Criterio de Selección.

Hará falta hacer un estudio económico, de las características de los dos tipos de instrumentación mencionados. Es importante, además, tomar en cuenta el futuro desarrollo de ambas tecnologías y su congruencia con los demás controles a fin de seleccionar la más adecuada.

Un resumen, de los factores que hay que considerar para la selección entre la tecnología eléctrica o la tecnología neumática se muestra a continuación:

FACTORES	ELECTRICA	NEUMATICA
Velocidad de respuesta	Muy rápida - alrededor de 15 cps. Respuesta necesaria sólo en aplicaciones especiales.	Muy baja - alrededor de 1 cps. Respuesta suficientemente rápida para aplicaciones convencionales.
Velocidad de transmisión	No hay retraso.	Relativamente baja. El límite para control cerrado es 400 ft, y para medición 1000 ft.
Flexibilidad funcional.	Buena.	Buena.
Precisión	+ 5%	+ 5%
Pre-calibración y chequeo.	Práctica normal	Generalmente no se puede aplicar.
Facilidad de ajuste.	La práctica es algo más difícil.	Más difícil.
Mantenimiento	Escaso	Escaso.
Localización de fallas.	Fácil debido a la presentación modular.	Difícil puesto que es necesario revisar todo el sistema.
Integridad	Requiere control de las condiciones del ambiente, a un máximo de 100°F y - 70% de humedad. Para equipo electrónico de estado sólido la integridad es muy alta.	Virtualmente igual - sobre sistemas básicos.
Unidades de Poder.	Corriente continua ininterrumpida.	Unidad ininterrumpida de poder y unidad productora de aire - comprimido, limpio y seco.
Aceptación del cliente.	La mayor parte unidades arriba de 250 MW	Casi todas las unidades abajo de 200 MW.
Costos de instalación.	Ligeramente mas bajo. El cableado ayuda.	Ligeramente más alto.
Precio del equipo.	Resulta caro debido a que se importa.	Existe de producción nacional y resulta económico.

### III.3 - Control en Calderas.

#### III.3.1 - Introducción.

El control de modernas unidades generadoras de vapor, no varía grandemente de una unidad a otra, con respecto al equipo esencial requerido para ponerlo en operación automática. Las unidades mayores representan considerablemente una mayor inversión y se pueden justificar sistemas de control más refinados.

La generación de vapor es un proceso en el cual interactúan muchas variables, y si alguna de ellas cambia las demás no podrán mantenerse - constantes. De aquí la gran importancia que tiene un adecuado sistema de control.

#### III.3.2 - Requerimientos de un Sistema de Control de Calderas.

Para que un sistema de control de calderas sea efectivo, es necesario que cubra los siguientes requerimientos:

1) Cantidad de calor liberado, proporcional a la demanda de vapor.

Un sistema de control requiere liberar una cantidad de calor de acuerdo con la demanda de vapor.

Se deberá determinar un índice para que indique los cambios de demanda. La medición más común la cual es representativa del balance de calor o relación de entrada contra salida de energía, es la presión de vapor de la caldera. Esta medición reflejará cambios en casi todas las variables del sistema de control. Por ejemplo, un aumento en la carga causará una caída de presión; así como un aumento en el flujo de agua de alimentación causará una caída en la temperatura del vapor y, como resultado frecuentemente una caída de presión. Relaciones excesivas de combustión a cargas dadas, también podrían afectar la presión de vapor, aumentándola.

En casi todas las generadoras de vapor, el índice de presión de vapor es suficiente para detectar las desviaciones o desbalances entre el calor que entra y el que sale.

Algunas veces, sin embargo, cuando las generadoras de vapor están - destinadas a responder a variaciones de carga muy rápidas o debido al tipo de demanda de vapor, deberá aumentarse o disminuirse la relación de - combustión continuamente. Frecuentemente en situaciones semejantes, se - aplica un sistema de medición de dos o tres elementos para determinar las variaciones en el balance de calor. El flujo de vapor es generalmente - el segundo elemento y, cuando se requieren tres elementos, la elección - del tercero dependerá de la utilización de vapor producido; si se trata - de una caldera acoplada a un turbo-generador, el tercer elemento será la demanda eléctrica del generador.

El resultado de esta medición, es una señal que llega al sistema de control el cual, a su vez, controlará la cantidad de aire y de combustible necesarios para la combustión.

## 2) Regulación del agua de suministro a la unidad.

Cualquier variación de la regulación de agua de suministro, afectará al sistema de control de combustión completamente.

## 3) Capacidad para dividir la carga entre varias calderas.

La unidad generadora de vapor, debe ser siempre capaz de dividir la carga o flujo entre varias unidades auxiliares de una instalación, si se encuentran en paralelo. El objetivo, es obtener la mayor eficiencia y - confiabilidad.

## 4) Control de Combustión.

El control de combustión, es el aspecto más importante y prácticamente de él depende el funcionamiento de la caldera.

Se busca una relación económica de combustible - aire para obtener una máxima eficiencia en la combustión. Una insuficiencia en el suministro de aire dará por resultado que el combustible no se queme completamente. Un exceso de aire, por el contrario, aumentará las pérdidas a través de la chimenea innecesariamente y hará que el consumo de energía en el ventilador aumente, ocasionando una eficiencia total menor a la de operación.

### III.3.3 - Medición de las Variables en una Planta Generadora de Vapor.

Para detectar la magnitud de las variables durante el proceso de generación de vapor, se puede hacer uso de registradores, indicadores y alarmas.

A continuación se enlistan los dispositivos anteriores, las variables que miden y el lugar donde se efectúa la medición de cada variable.

#### Registradores:

Grafican continuamente una o más variables del proceso.

- 1) Presión de vapor en el cabezal de descarga.
- 2) Flujo de vapor (demanda).
- 3) Flujo de combustible de alimentación.
- 4) Flujo de aire de alimentación.
- 5) Temperatura de vapor en el cabezal de descarga.
- 6) Temperatura de agua de alimentación.
- 7) Análisis de gases en el tiro de descarga (% de O<sub>2</sub> y % de combustible no quemado).

#### Indicadores:

Continuamente indican la magnitud de la variable a través de un puntero sobre una escala.

- 1) Presión de vapor en el cabezal de descarga.
- 2) Presión de agua de alimentación.
- 3) Presión de combustible de alimentación.
- 4) Presión de aire de alimentación.
- 5) Presión de aire en los instrumentos (si el sistema es neumático).
- 6) Flujo de vapor en el cabezal de descarga.
- 7) Flujo de agua de alimentación.
- 8) Flujo de combustible de alimentación.
- 9) Flujo de purga continua.
- 10) Flujo de aire de alimentación.
- 11) Temperatura de vapor en el cabezal de descarga.
- 12) Temperatura de aire de alimentación.
- 13) Temperatura del combustible de alimentación.
- 14) Nivel de agua en el domo.
- 15) Nivel de combustible en el tanque de almacenamiento.
- 16) Voltaje de alimentación a los motores (ventilador, bombas)
- 17) Corriente eléctrica de alimentación.
- 18) Potencia eléctrica consumida.
- 19) Posición del controlador de aire.
- 20) Posición de la válvula de alimentación de combustible.
- 21) Indicador de encendido y apagado de cada uno de los motores.
- 22) % de oxígeno de los gases de salida (en el tiro).
- 23) % de combustible no quemado.

En el caso que la caldera alimente a una turbina acoplada a un generador hará falta conocer además:

- 24) Voltaje de salida.
- 25) Corriente de salida
- 26) Potencia activa y reactiva.
- 27) Factor de potencia de consumo.
- 28) Frecuencia de generación.
- 29) Velocidad de la turbina.

Alarmas:

Este dispositivo indica solamente estados críticos de las variables (máximos o mínimos), utilizando para ello señales luminosas o acústicas.

- 1) Alta y baja presión de vapor en el cabezal de descarga.
- 2) Alta y baja presión del combustible de alimentación.
- 3) Baja presión del agua de alimentación.
- 4) Alta y baja temperatura del vapor en el cabezal de descarga.
- 5) Alta y baja temperatura del combustible de alimentación.
- 6) Bajo nivel en el tanque de almacenamiento de combustible.
- 7) Alto y bajo nivel en el domo.
- 8) Falla de C.A. de alimentación general.
- 9) Falla de C.A. de alimentación de emergencia.
- 10) Falla C.C.

Estas son las principales mediciones que se deben hacer para controlar una caldera, pudiendo variar según su capacidad y la importancia que tenga dentro del proceso.

Los registradores, indicadores y alarmas se encontrarán en el tablero central de control, y para determinadas variables será necesario colocar algunos en el tablero local (al pie de la caldera).

Si en lugar de una caldera existieran varias en la planta, las lecturas que se deberían hacer serían las mismas.

La figura III.3.1 muestra un diagrama de flujo para la generación de vapor en una caldera; indicando el tipo de dispositivo a emplear, las variables que miden y el lugar donde se efectúa cada medición.

Las mismas indicaciones que en el caso anterior se hacen en el diagrama esquemático de una caldera mostrado en la figura III.3.2.







### III.3.4 - Control de las Variables en el Proceso de Generación de Vapor.

En las unidades generadoras de vapor, se requiere un sistema de control capaz de hacer operar la unidad en una forma eficiente y segura.

Para controlar una caldera se deben cumplir básicamente dos condiciones: La primera, es que se debe suministrar la cantidad de combustible necesaria para satisfacer la demanda y mantener el vapor generado a una presión y una temperatura constantes. La segunda condición, es que se debe mantener una relación óptima de combustible - aire, para obtener una combustión adecuada en el hogar de la caldera. Esto quiere decir, que el control de la caldera se reduce elementalmente al control de la combustión.

Intimamente relacionados al control de combustión y de igual importancia se encuentran: El control de agua de alimentación, el control de temperatura del combustible de alimentación, el control de atomización del combustible en los quemadores y algunos más de menor importancia.

Analicemos brevemente la respuesta de una caldera al aumentar la demanda de vapor (Fig. III.3.3). Considerando que antes del tiempo ( $t_1$ ) se tiene una demanda constante, existirán condiciones estables en todas las variables integrantes del proceso. En el tiempo ( $t_1$ ) se registra un aumento en la demanda de vapor, lo que ocasiona una disminución en la presión del vapor en el cabezal de descarga, ocasionando que aumente la cantidad de combustible para recobrar la presión de operación en el cabezal. Al haber un incremento de combustible será necesario aumentar el suministro de flujo de aire para optimizar la combustión.

El incremento de vapor origina una nueva demanda de flujo de agua para mantener constante el nivel de agua en el domo.

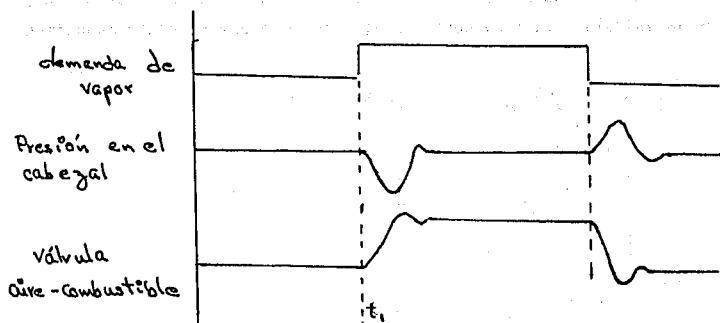


Fig. III.3.3

Lo anteriormente descrito sucede si la carga aumenta, y sucederá to do lo contrario si la carga disminuye.

En el capítulo anterior se analizó el sistema de control y sus componentes, uno de los cuales (El modo de control) tiene vital importancia debido a que dependiendo de sus características será el tipo de respuesta que obtengamos.

Apliquemos al control de calderas los conceptos discutidos sobre mo dos de control.

#### Modo Proporcional.

El controlador cambia la posición del elemento final (válvula) en proporción a la variación registrada. Puede ejecutar correcciones exactas para solamente ciertas condiciones de carga, en la mayoría de los casos existe alguna deficiencia. Este error es llamado "offset" y es una característica inherente del modo proporcional.

Así, en la figura III.3.4, se muestra un 10% de error, aún después de que la válvula haya sido controlada; esto se puede corregir manualmente.

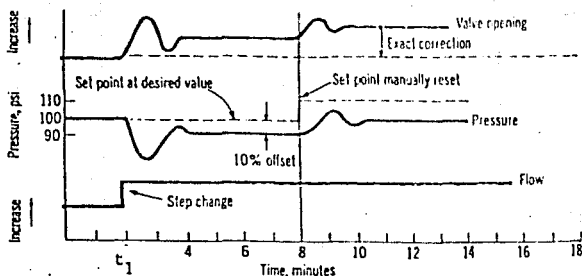


Fig. III.3.4 Modo Proporcional.

### Modo Proporcional + Integral

Cuando el proceso requiere de una corrección exacta para su respuesta en un lapso corto, se utiliza este modo.

La variación de la posición de la válvula es proporcional al cambio de la demanda; además, la presión se ajusta exactamente al punto de operación debido al modo integral como se muestra en la figura III.3.5.

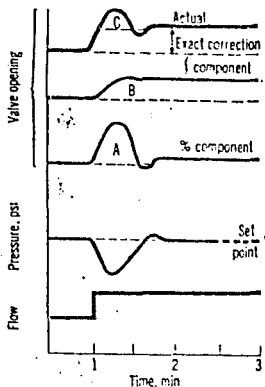


Fig. III.3.5 Modo Proporcional+Integral.

### Modo Proporcional + Derivativo

Cuando el proceso es afectado por el transitorio de la respuesta y no es necesaria una corrección exacta, la utilización de este modo es el apropiado.

El modo derivativo contrarresta la oscilación y el modo proporcional posiciona la válvula en función del cambio de demanda.

Su tipo de respuesta se observa en la figura III.3.6.

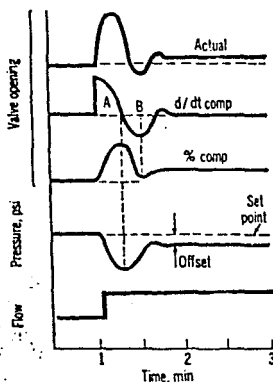


Fig.III.3.6 Modo Proporcional+Derivativo.

### Modo Proporcional + Integral + Derivativo

En procesos que requieren en su respuesta una corrección exacta, es table, y rápida, la selección de este tipo de control es la adecuada.

En la figura III.3.7 se puede observar la conjunción de los 3 tipos de modos de control (proporcional, más integral, más derivativo), que dan una respuesta de gran estabilidad y precisión.

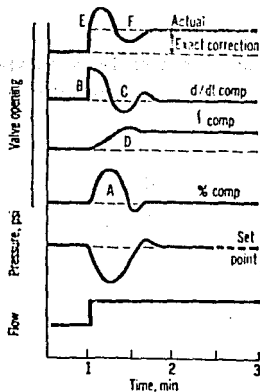


Fig. III.3.7 Modo Proporcional +Integral+Derivativo.

#### A.- Control de Combustión.

Existen tres métodos básicos para la medición y control de la combustión: El más común es el método de medición y control de la relación - flujo de vapor - flujo de aire. Con este método constantemente se supervisa el flujo de vapor y se indica el cambio relativo al flujo de aire. - Además, se compara la cantidad de energía térmica que se está liberando - en el horno con la cantidad de aire que se está suministrando para la - combustión.

El segundo método es el de medición y control de la relación flujo de combustible - flujo de aire, con el cual constantemente se supervisa - la cantidad de combustible que se consume y la cantidad de aire que se su ministra controlando su relación.

Para aplicar el tercer método se requiere de un analizador de gases que revise constantemente el porcentaje o cantidad de oxígeno en los gases de combustión y ajuste la cantidad de aire que debe suministrarse para obtener una combinación correcta en la combustión.

a) Sistema de Control de Relación Flujo de Vapor - Flujo de Aire.

Refiriéndonos a la figura III.3.3 en el tiempo ( $t_1$ ) se registra un incremento en la demanda, lo que hará que la presión de vapor disminuya momentáneamente, y el sistema de control a través del impulso que ha detectado hará que aumente el flujo tanto de combustible como de aire.

Cuando la caldera está operando por debajo de la presión normal deseada, es necesario tener una relación de combustión que no únicamente satisfaga la nueva condición de carga, sino también que restaure la presión del vapor. El medidor de flujo de vapor, no detectará este cambio sino que indicará únicamente una liberación de calor para mantener la carga de vapor. Pero no para aumentar la presión. Necesitará un largo tiempo para restablecer esta nueva presión.

Este sistema tratará de mantener la relación flujo de aire - flujo de vapor, constante, de aquí que disminuya la cantidad de aire cuando baja el consumo de vapor, ésto dará como resultado una deficiencia de aire durante el período en el que la presión es restaurada. Un aumento en la carga dará por resultado el efecto opuesto y momentáneamente se tendrá un exceso de aire. Esta es una de las razones por lo que la utilización de un controlador flujo de vapor - flujo de aire, debe ser en un sistema de reajuste lento, de tal forma que no disminuya o aumente el exceso de aire antes de que la presión de vapor sea restaurada.

b) Sistema de Control de Relación de Flujo de Combustible - Flujo de Aire.

Este sistema relaciona la cantidad de aire suministrada, con la cantidad de combustible que se está quemando.

Cada combustible antes de quemarse tiene un cierto porcentaje de Carbono e Hidrógeno y su relación frecuentemente se refiere al índice Carbono-Hidrógeno. Si este índice cambia apreciablemente, el poder calorífico del combustible cambiará proporcionalmente. Esto se debe principalmente al hecho de que el Hidrógeno tiene un poder calorífico más alto:

De 60,000 Btus por libra comparado con el del Carbono, el cual tiene - - aproximadamente 14,500 Btus por libra. Siendo así, en una caldera que - opera a carga estable, la cantidad de combustible necesario para mantener esta carga puede cambiar y la cantidad de aire se mantiene constante, independientemente del combustible que se esté quemando. Entonces, si este controlador se estuviera empleando y la cantidad de combustible cambiara, pudiera también cambiar la cantidad de aire sin que fuera la estrictamente necesaria; ésto causará un exceso o una deficiencia de aire, dependiendo de la dirección en que se efectúe el cambio térmico del combustible.

#### c) Sistema Analizador de Gases.

El problema principal de este tipo de sistema, es el de determinar - una muestra de gas típica. Como los ductos por los que pasan los gases - calientes son más bien largos, es posible que se pudiera tomar un limitado número de puntos de muestreo, debiéndose tener sumo cuidado para estar seguros de que las muestras obtenidas sean representativas de la operación de la unidad en cualquier instante. Los gases calientes frecuentemente contienen componentes corrosivos y sucios, los cuales hacen que el problema se dificulte desde el punto de vista de mantenimiento del sistema analizador y de muestreo.

Resumiendo, cada uno de estos métodos tienen ciertas ventajas y des ventajas y frecuentemente se usan en combinación en una sola unidad. Una evaluación de cada una de las instalaciones anteriores se hace necesaria antes de seleccionar cualquier combinación.

#### d) Diagrama de un Sistema Básico de Control de Combustión.

Aunque casi cada sistema de control de combustión que se proyecta - es diferente, todos ellos tienen una base común alrededor de la cual se - hacen las modificaciones y los refinamientos necesarios para cada unidad individual.



En la figura III.3.8 se muestra el diagrama de flujo de un sistema básico de control de combustión. Generalmente tendrá un sistema de control en paralelo lo que significa que cualquier cambio en la presión de vapor inmediata y automáticamente hará variar la cantidad de combustible, la cantidad de aire y la posición de la compuerta del tiro inducido. El sistema de control de combustión, supervisará posteriormente las nuevas condiciones de eficiencia en la combustión y reajustará, si es necesario, ya sea la cantidad de combustible o la cantidad de aire que se está suministrando.

Las características de los bloques del diagrama de la figura - - - III.3.8, variarán dependiendo del sistema de control que haya sido elegido, y éste a su vez, variará de acuerdo a los requerimientos del proceso.

#### B.- Control de Agua de Alimentación.

Es necesario un adecuado sistema de control de agua de alimentación, como sistema complementario de control en una generadora de vapor.

El nivel de agua en el domo debe mantenerse en un cierto punto (fijado por el fabricante de la caldera). Un nivel demasiado alto produciría arrastres. Un nivel bajo produciría un incremento peligroso en la temperatura del domo.

Independientemente de lo anterior, es necesario mantener un nivel constante en el domo que no dependa de la variación de la carga, a fin de obtener una adecuada combustión.

A continuación examinaremos los sistemas más conocidos de control de agua de alimentación:

##### a) Control de Operación Intermitente.

La operación intermitente es básicamente arrancar y parar la bomba de alimentación de agua del domo de la caldera. Opera con interruptores

## SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTION

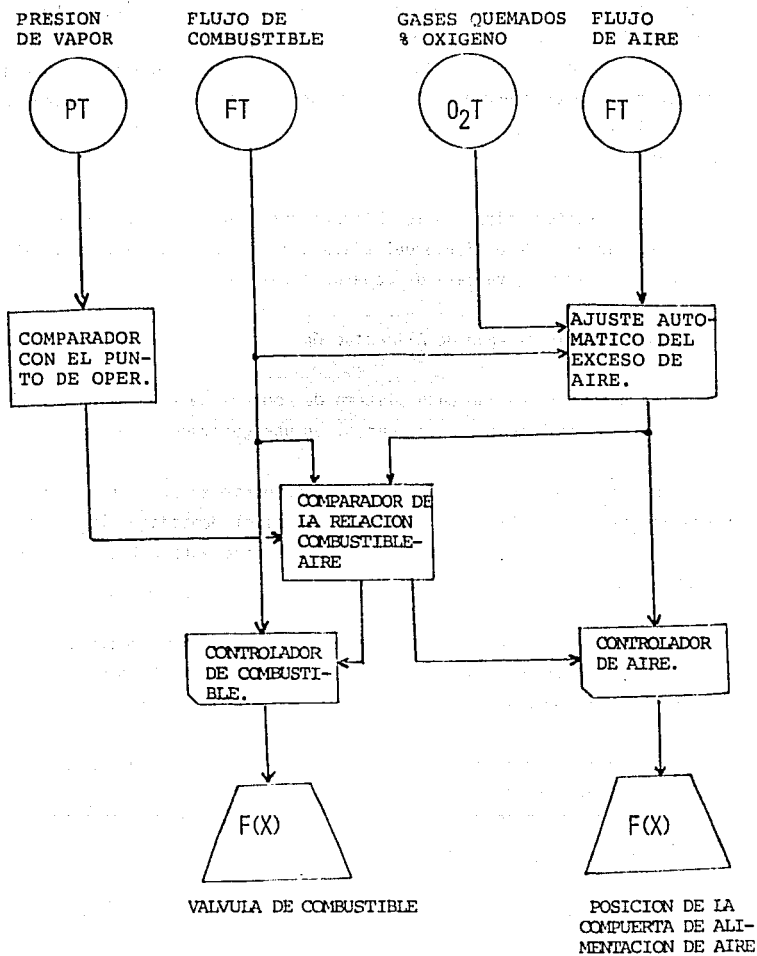


Figura III.3.8

de nivel que darán señales de arranque y paro de la bomba. Habrá dos interruptores, uno de los cuales indicará el nivel máximo y ordenará parar la bomba, el otro señalará el nivel mínimo y ordenará el arranque de la bomba. Este sistema se aplica en calderas pequeñas con tubos de humo y capacidad máxima de 300 HP.

b) Control Auto Operado.

El control auto operado se aplica en calderas de tubos de agua. La bomba trabaja continuamente y la regulación de agua en el domo estará a cargo del elemento final de control. El dispositivo sensor como se vió en sistemas de medición de nivel actúa sobre el elemento final de control o sea la válvula.

c) Control de Dos Elementos

En el sistema de dos elementos serán necesarias dos señales: Flujo de vapor y nivel en el domo. Las dos señales accionan un módulo cuya salida a través de una selectora hará actuar al elemento final de control.

En la figura III.3.9 observamos el diagrama de flujo de este sistema. La señal primaria será el flujo de vapor y será proporcional a la demanda. El sistema a través del posicionador actúa sobre la válvula para que regule el flujo de agua con respecto a la demanda de vapor.

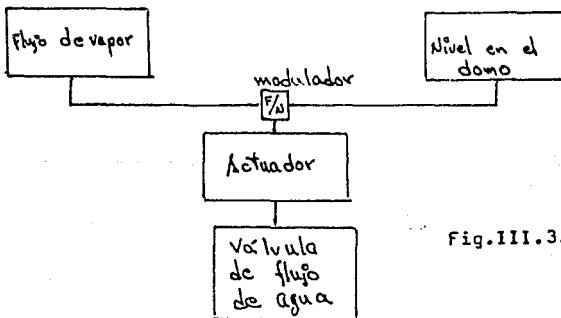


Fig. III.3.9

En el caso de que esta relación no sea suficiente, actuará la señal de nivel a través del controlador proporcional.

d) Control de Tres Elementos.

El sistema consiste de tres elementos, uno de los cuales es el flujo de agua.

En este caso se tendrá una relación de flujo de vapor contra flujo de agua. Este valor se relacionará con el nivel de agua para hacer un reajuste. La figura III.3.10 nos muestra la lógica de este sistema.

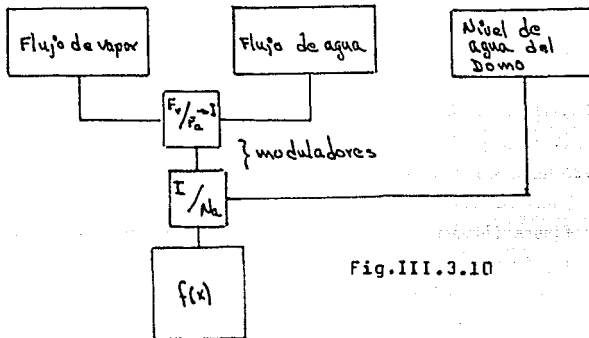


Fig.III.3.10

C.- Sistema de Control Maestro.

En plantas termoeléctricas el arreglo de interconexión entre generador de vapor y turbo-generador es directo, formando grupos individuales. En plantas en donde se tiene necesidad de vapor para el proceso y para el turbo-generador, se prefiere tener un juego de calderas descargando a un cabezal común para que alimente vapor al proceso y a los turbo-generadores. En algunos casos se tienen estaciones reductoras de presión y desobrecalentadores de vapor que transforman el vapor a las condiciones para proceso. El vapor de baja presión y temperatura se puede obtener a la salida de la turbina. La ventaja de tener desobrecalentadores es que a -

pesar de que la turbina salga de servicio es posible obtener vapor para - proceso.

El arreglo del control maestro puede ser de tres tipos:

- 1) Sistema seguidor de turbina.
- 2) Sistema seguidor caldera.
- 3) Sistema combinado.

En el primer caso la demanda de vapor está en función de los requerimientos de la turbina y/o proceso, es decir, para cualquier demanda la caldera o juego de ellas tendrán que suministrar vapor a una presión constante. Generalmente este sistema es el más aplicable.

En el sistema seguidor de caldera, la caldera marca sus límites de generación y el proceso tendrá vapor en función a lo que la caldera pueda suministrar. Un ejemplo sería una caldera de operación super-crítica en la que el vapor a la turbina estaría limitado a la capacidad de generación de la caldera.

El sistema combinado es un sistema que cuenta con las dos características.

De acuerdo con el planteamiento de operación de la planta, es conveniente tener un sistema maestro de control de presión de las calderas en base de un sistema seguidor de turbina. En este caso, se deberá tener un sensor transmisor de presión de vapor localizado en el cabezal general de descarga. El cabezal mandará una señal proporcional a la presión de vapor hacia un controlador tipo P + I cuya salida alimenta una estación de operación manual-automático con ajuste de vapor (set-point). La lógica de control estaría representada en un diagrama de bloques como se muestra en la figura III.3.11.

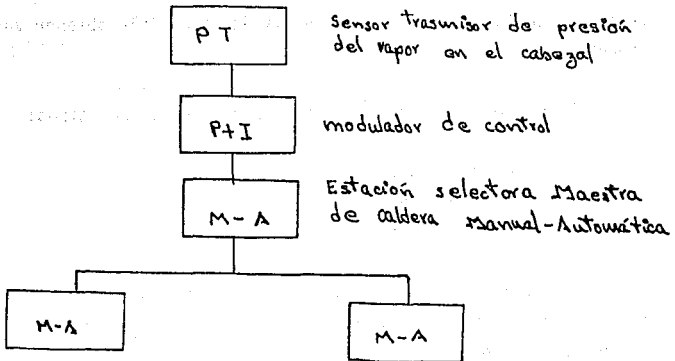


Fig. III. 3.11

La señal de salida del controlador maestro de la caldera alimentará a la estación selectora maestra (selección de operación manual o automática), individual para cada caldera por medio de una ramificación "Bias", con objeto de dar mayor o menor señal adicional de control a la demanda maestra. Esto último se supone si la demanda es máxima y considerando que la carga se reparte en dos unidades. Cada una de las unidades tendría que suministrar 50% de la demanda. Con la acción "Bias", se podría lograr que una unidad suministrara 10% de la demanda y la otra el 90% restante, sujeta a la capacidad propia de cada caldera.

La selección de la capacidad de cada caldera está en función de la confiabilidad e importancia del proceso al cual alimenta.

La señal de control maestro acciona con un impulso a los módulos de control individual de cada caldera.

Las señales obtenidas de las mediciones de cada caldera convergen en el sistema de control maestro, el cual, mandará señales procesadas (de acuerdo a los requerimientos del proceso) a los elementos finales de control.

## " C O N C L U S I O N E S "

La finalidad del presente trabajo es la de proporcionar la metodología y criterio para la correcta selección de la instrumentación y del sistema de control para cualquier proceso industrial. Se concluye que los pasos a seguir por un Ingeniero Instrumentista para dicha selección son:

- 1o. Conocer el proceso al cual se desea controlar.
- 2o. Dictaminar las variables a medir y a controlar.
- 3o. Definir la forma correcta para la medición de dichas variables, así como el cálculo de los elementos primarios y la selección de los elementos necesarios para lograr la medición.
- 4o. Seleccionar el sistema de control de acuerdo a los requerimientos y características implícitas del proceso, prestando especial atención a la relación Controlador - Elemento Final de Control - Proceso.
- 5o. Elaborar un diagrama lógico en bloques del sistema de control.
- 6o. Implementar el diagrama mencionado en el paso anterior, ya sea con instrumentación eléctrica o neumática.
- 7o. Decidir la utilización de un microprocesador de acuerdo a la complejidad del proceso.

De la aplicación de la Instrumentación y Control a calderas podemos concluir que:

- La adecuada selección del sistema de control básico y sus variantes, dependerá de las condiciones de trabajo en las que se utilice la caldera.
- Deberá suministrarse un reajuste manual a la cantidad de aire necesaria para la combustión, si es que no se tiene un control de Oxígeno en los gases de combustión.

- El control de Oxígeno en los gases de combustión deberá aplicarse cuando el poder calorífico de los combustibles varíe en un rango muy amplio.

Además, el presente trabajo puede servir como complemento para:

- Los alumnos que cursan las materias de Metrología y Control o materias similares.
- El ramo industrial en general que requiera de este tipo de estudio.



## " B I B L I O G R A F I A "

1. - Alworth, A. R.  
"Boiler Control Via Process Control Techniques"  
I. S. A Conference and Exhibit  
Houston Texas 1973.
2. - Bailey, Medidores S. A.  
"Principios de Mecánica de Fluidos"  
México D. F.
3. - Casillas, Arcadia  
"Tecnología de la Medición"  
Madrid España, Máquinas 1958.
4. - Choffat, Denys  
"Tratado Práctico de Mediciones Industriales"  
Editores Técnicos Asociados S. A.  
Barcelona, España, 1966.
5. - Considine, Douglas (ed)  
"Handbook of applied Instrumentation"  
Section 14.1 Automatic Combustion Control  
Systems for Boilers  
McGraw Hill Co. U. S. A.
6. - Considine, Douglas (ed)  
"Process Instrumente and Control Handbook"  
2a. edición McGraw Hill. 1975. U.S.A.
7. - Holman, Y. P.  
"Métodos experimentales para Ingenieros"  
McGraw Hill  
México D. F. 1978.
8. - Holzbock, Werner  
"Automatic Control and Principles and Practice"  
Rein Hold Publishing Corporation  
New York, U. S. A. 1958.
9. - Holzbock, Werner  
"Instrumentos para Medición y Control"  
CECSA  
México, D. F. 1977.

10. - Hutchison, Y. W. (ed)  
"ISA Handbook of Control Valves"  
2a. Edición 1976. U.S. A.
11. - Kallen, Howard  
"Handbook of Instrumentation and Control"  
Section 9, Boilers Instrumentation and Control System.  
McGraw Hill Co. U.S. A.
12. - Liptak, Bela (ed)  
"Instrumentation in the Processing Industries"  
Section 106, Control of Steam Boilers. U.S. A.
13. - Liptak, Bela (ed)  
"Instrument Engineer's Handbook"  
1a. Edición, Chilton Book Co. 1970. U.S. A.
14. - Ogata, Katsuhiko  
"Modern Control Engineering"  
Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs.  
New York, U.S. A. 1970.
15. - Ramírez, José  
"Estaciones de Transformación y Distribución"  
CEAC  
Barcelona España, 1971.
16. - "Size and Selection Data"  
Catálogo N° 10  
Fisher Controls. U.S. A.
17. - Streeter, Victor  
"Mecánica de los Fluidos"  
McGraw Hill  
México, D. F. 1976.
18. - Tucker, G.K. and Wills, D.M.  
"A Simplified Technique of Control System Engineering"  
Honeywell Inc. Industrial Division.  
Washington, Pennsylvania U.S. A. 1962.
19. - Warnock. J.D.  
"How Pneumatic Tubing Influences Controllability"  
Article published issue of "Instrumentation Technology"  
1967. U.S. A.