



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGON"

SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMATICO PARA LA  
INDUSTRIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

PRESENTA

ARTURO PEÑA CORNEJO

MEXICO, D. F.

1982



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

## CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1	Instrumentación y sus Beneficios en la Industria . . . . .	1
1.2	Simbología y Notaciones usadas en Instrumentación y Control . . . . .	4
1.3	Diagramas de Tuberías e Instrumentación, Simbología, Aplicaciones y Usos . . . . .	8
1.4	Terminología del Control Automático . . . . .	18

## CAPITULO 2: TEORIA DEL CONTROL AUTOMATICO

2.1	Sistemas de Control. . . . .	24
2.2	Sistemas de Control de Circuitos Abiertos . . . . .	24
2.3	Sistemas de Control Circuito Cerrado . . . . .	26

## CAPITULO 3: CONTROL AUTOMATICO SENCILLO

3.1	Circuito de Control Automático Sencillo. . . . .	32
3.2	Modos de Control . . . . .	40
3.3	Modos de Control: Aplicaciones de acuerdo a las características dinámicas de los procesos . . . . .	57

## CAPITULO 4: CONTROL AUTOMATICO COMPUESTO

4.1	Sistemas de Control Automático Compuesto . . . . .	63
4.2	Control de Cascada . . . . .	64
4.3	Control de Relación . . . . .	66
4.4	Predominio . . . . .	74

## CAPITULO 5: SELECCION Y USOS DE INSTRUMENTOS SEGUN LA VARIABLE CONTROLADA

5.1	Flujo . . . . .	77
-----	-----------------	----

5.2	Presión . . . . .	94
5.3	Nivel . . . . .	99
5.4	Temperatura . . . . .	106
5.5	Otras variables . . . . .	119
5.6	Elementos Finales de Control . . . . .	119
	CONCLUSIONES . . . . .	132
	BIBLIOGRAFIA . . . . .	133

P R O L O G O  
= = = = =

La Ingeniería Mecánica es la rama del conocimiento humano que nos lleva a transformar los recursos naturales para el uso y el beneficio del hombre. Hoy en día el avance tecnológico es tan grande que la precisión en el manejo de los procesos industriales nos lleva a diseñar sistemas de control cada vez más sofisticados y complejos.

El presente trabajo pretende hacer un análisis desde el punto de vista práctico de lo que hoy en día se llama Ingeniería de Control, este enfoque que se dió es con el objeto que el alumno de Ingeniería pueda comprender en un lenguaje sencillo y claro los diferentes aspectos que hay que contemplar para diseñar un sistema de control ya sea manual, semi automático o automático, así como las características y parámetros de los elementos que pueden componer dicho sistema.

A pesar del hecho de que la industria no cuenta todavía con grandes precisiones en la medición y la regulación de ciertas condiciones físicas, la mayor parte de la instrumentación que se usa hoy en día tiene complejidad y costos muy elevados con respecto a los requerimientos reales.

El problema radica, por supuesto, en la identificación y especificación de dichos requerimientos para cumplir con las especificaciones del producto, tal como existen tanto en el presente como en el futuro inmediato.

A T E N T A M E N T E

ING. FEDERIQUE JAUREGUI RENAUD.

## INTRODUCCION

Con el auge que existe actualmente de industrialización en México, se requiere de una gran cantidad de ingenieros especializados en las diversas ramas como son: la mecánica, que ve todo lo relacionado con bombas, turbinas, compresores, etc., eléctrica, que ve subestación, centros de control de motores, alumbrados, etc., instrumentación, que ve todo lo relacionado con el control de la planta, válvulas, controladores, tableros de control, etc.

Esta tesis se enfoca en especial al área de instrumentación, en la cual se da un panorama general de lo que es, ya que es un tema muy extenso y complejo.

Espero que esta tesis pueda servir para empezar a conocer lo que es la instrumentación y el control industrial, pues es el sistema nervioso de cualquier planta industrial, y de ahí su importancia, para poder tener cualquier proceso industrial -- sin peligro, con máxima eficiencia, calidad de producto y --- cuidando que los costos estén dentro de los límites de cada - industria.

Se han desglosado en tal forma los temas, que pueda servir como libro de consulta para principios básicos de instrumenta--ción; se le dió un enfoque práctico basado en la bibliografía utilizada y en la poca experiencia que se tiene en esta especialidad, tratando de evitar al máximo cálculos y desarrollo

de teorías, pero sí enfatizando, cómo se utilizan en la industria y cuales deben ser sus características, dependiendo del tipo de proceso y describiendo en una forma básica, los principios de funcionamiento de algunos instrumentos, con sus características más importantes.

## CAPITULO 1

### SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO PARA LA INDUSTRIA

#### 1.1 Instrumentación y sus Beneficios en la Industria.

En la actualidad, donde todo tipo de industria tiende a la automatización, la instrumentación tiene una gran importancia, constituye los nervios y el cerebro de los modernos procesos industriales, en los cuales controlar la calidad del producto, mantener las condiciones requeridas del proceso con seguridad y eficiencia, son las metas prioritarias a seguir dentro del cualquier tipo de industria.

Sin automatización para medir y controlar, muchos de estos procesos sería imposible llevarlos a cabo, dado que los instrumentos pueden detectar condiciones y tomar acciones de control más rápido y con más exactitud que un operador humano, pues la complejidad de las plantas modernas es tal, que el hombre no podría ser capaz de controlarlas y darse abasto.

La utilización de la automatización reditúa beneficios económicos, no solamente porque ahorra trabajo, pues una planta automatizada utiliza un mínimo de personal, sino también porque a través de un control de calidad del producto, se reducen desperdicios, y se permite que el proceso opere en punto de muy buenas eficiencias, evitando así a los operarios arduas tareas, que en algunos casos son altamente peligrosas.

Una de las grandes ventajas que presenta la automatización, es que el valor o cantidad (la variable controlada que puede ser flujo, presión, temperatura, etc.) está siendo continuamente medida y comparada con otro valor (el valor deseado de la variable) y si existe alguna desviación (error), se produce una corrección para



llevar a la variable controlada a los límites preestablecidos.

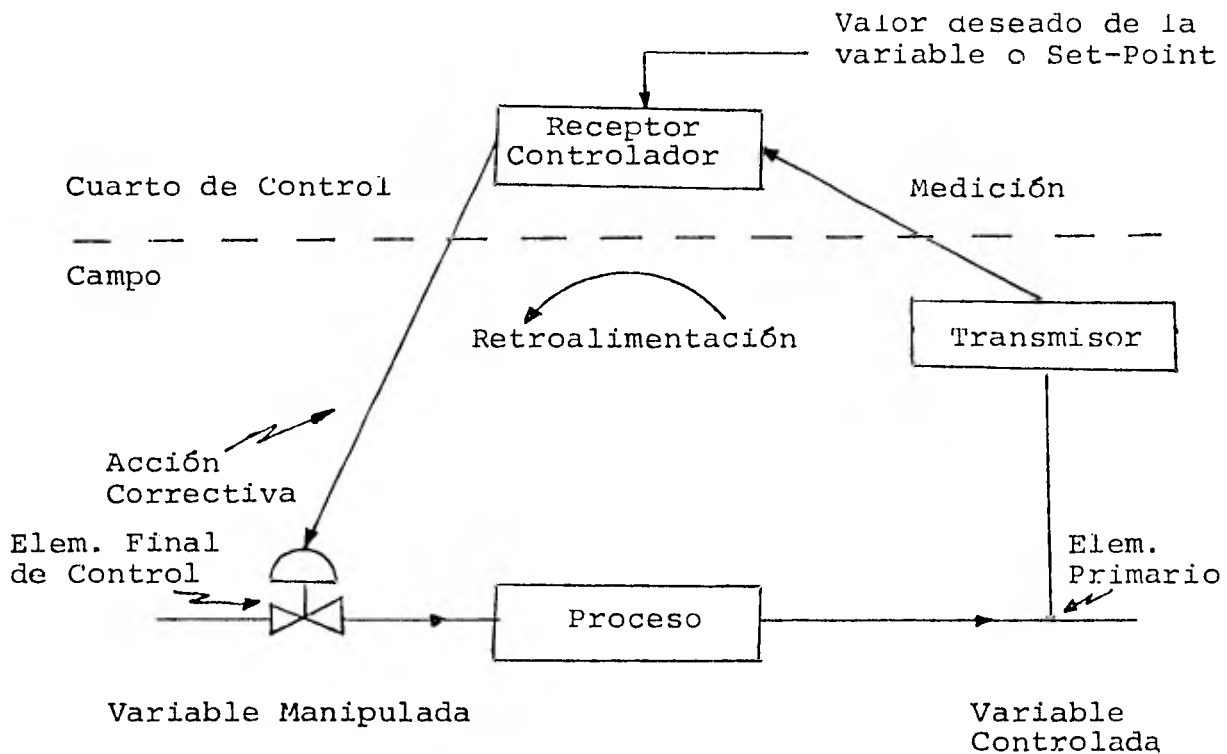
Las plantas por contar con un área normalmente extensa - requieren centralizar toda la información (cuartos de -- control) para poder ser operada efectiva e inteligente-- mente y poder tomar acciones correctivas en caso de emergencia o alguna falla en los sistemas de control. Como - sería de alto costo y en algunos casos peligroso llevar ramificaciones del proceso hasta el cuarto de control para poder medir la variable controlada, se utilizan los transmisores colocados en el campo, y se recibe en los - receptores colocados en el cuarto de control.

La función de un transmisor es transformar una variable del proceso (tal como presión, temperatura, etc.) a una señal de salida estándar (lenguaje de los instrumentos), la que es transmitida al receptor, el cual la representa como la variable del proceso, utilizándola para realizar un determinado número de funciones, tales como indica--- ción y/o registro y/o control.

El receptor puede también realizar operaciones algebraicas con la señal transmitida (tales como multiplicar, dividir, extraer raíz cuadrada, etc.) para su utilización posterior en otros instrumentos.

En los circuitos de instrumentación se utilizan medios - de actuación (suministro), tales como presión neumática, hidráulica o corriente eléctrica, y los dispositivos que forman los medios de medición, el controlador automático y algunos otros posibles se conocen como "instrumentos".

Desde el punto de vista del control automático, lo que - nos interesa, del proceso, del cual una definición puede



SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO

FIG. NO. 1.1.1

ser "El o los equipos en los cuales la variable va a ser controlada", con sus características dinámicas o relacionadas con el tiempo, entre éstas se pueden citar los retrasos: de capacitancia, de medición y tiempo muerto; -- las perturbaciones y cambios de carga.

Dependiendo de las características dinámicas del proceso a controlar, se establecen los modos de control, en esta tesis no se profundiza en el desarrollo matemático en el que de acuerdo al proceso se sacan ecuaciones que después de su desarrollo nos dan las constantes del proceso y -- sus modos de control los que pueden ser definidos como -- una 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.

Los modos de control más utilizados son: el proporcional puro, el integral (también conocido como reajuste automáticos), y el de derivada (también conocido como rate). Estos modos de control pueden ser utilizados solos (a excepción del de derivada), o en combinaciones entre ellos, más adelante se tratará cada caso en especial.

El modo de control ON-OFF (ABIERTO-CERRADO), no es sino un caso particular del proporcional puro cuando la ganancia del controlador tiende a infinito.

## 1.2 Simbología y Notaciones Usadas en Instrumentación y Control.

A fines del año de 1949, las grandes industrias tenían el problema de que para simbolizar la instrumentación en sus diagramas de flujo y de tuberías e instrumentación, había incongruencia de una organización a otra, y aún dentro de una misma organización había diferentes criterios para simbolizar los instrumentos en dichos diagramas. Estas diferencias acarrearán, como consecuencia, problemas en el diseño, construcción y operación de las plantas industriales.

En respuesta a los requerimientos de la industria para estandarizar la simbología de la instrumentación, la I.S.A (Instrument Society of America) elaboró y recomendó la práctica de la simbología para diagramas de flujo e instrumentación No. RP-5.1; desde entonces se utiliza dicha estandarización, lo que evita confusiones y retrasos en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las plantas industriales.

La definición de un instrumento será entonces:

a) Identificación general, cuando se use una combinación

de letras para establecer su propósito y función.

- b) Identificación específica, cuando a la combinación de letras acompaña 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 al combinarlos con símbolos dibujados en diagramas de tuberías e instrumentación (DTI'S) y planos en general relacionados con el control e identificación de un proceso.

#### Identificaciones Generales

Las identificaciones generales consisten en las letras - mostradas en la Tabla 1.2.1 usadas en combinaciones, como lo muestra la Tabla 1.2.2.

La tabla contiene las letras que pueden usarse 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:

- a) Las letras de identificación se escriben en todos los casos como mayúsculas, las únicas excepciones lo son de "d", "r" y "p" (esta última en la combinación - "ph" únicamente).
- b) Cada letra tendrá un sólo significado al usarse como primera letra en cualquier combinación, definiendo - la variable del proceso.
- c) Igualmente cada letra tendrá un solo significado -- cuando se use como segunda o tercera letra en una - combinación al definir el tipo de servicio.

TABLA 1.2.1 LETRAS PARA IDENTIFICACIONES

DEFINICIONES Y POSICIONES PERMITIDAS EN CUALQUIER COMBINACION			
LETRAS MAYUSCULAS	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	-

SEGUNDA Y TERCERA LETRAS TIPO DE MECANISMOS

la. Letra Variable del Proceso	Mecanismos Controladores				Válvulas de Seguridad (Relevo)	Mecanismos de Medición		Aparatos de Cristal para medir por ob- serva- ción.	Mecanismos de Alarma			Elemento  Primario
	Controladores Separados			Válvu-- las regu- doras ac- tuada por sí mismas		Re- gis- tro	Indica- ción.		Re- gis- tro	Indica- ción.	-	
	Registro	Indica- ción	-									
	-RC	-IC	-C	-CV	-SV	-R	-I	-G	-RA	-IA	-A	-E
Flujo	F- FRC	FIC				FR	FI	FG	FRA	FIA		FE
Nivel	L- LRC	LIC	LC	LCV		LR	LI	LG	LRA	LIA	LA	
Presión	P- PRC	PIC	PC	PCV	PSV	PR	PI	///	PRA	PIA	PA	PE
Densidad	D- DRC	DIC	DC			DR	DI	///	DRA	DIA		
Manual	H- HIC	HC	HCV			///	///	///	///	///		///
Conductividad	C- CRC	CIC				CR	CI	///	CRA	CIA	CA	CE
Rapidez	S- SRC	SIC	SC	SCV	SSV	SR	SI	///	SRA	SIA	SA	
Viscosidad	V- VRC	VIC				VR	VI	VG	VRA	VIA		
Peso	W- SRC	WIC				SR	WI		WRA	WIA		WE
Temperatura	T- TRC	RIC	TC	TCV	TSV	TR	TI	///	TRA	TIA	TA	TE

Los espacios con los guiones transversales indican combinaciones posibles.

TABLA 1.2.2 IDENTIFICACIONES GENERALES

- d) Lo anterior es particularmente importante al formar las combinaciones de letras que indica la Tabla -- 1.2.2 o bien al agregar más, de acuerdo con dicha se cuencia.
- e) No pueden usarse letras o combinaciones de letras - intermedias.

### Identificaciones Específicas

En la mayoría de los casos será necesario agregar a la identificación general de un instrumento, un sistema nu mérico para establecer así 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 de- berá ser apropiada para usarse en las identificaciones generales.

Un ejemplo de este caso es: El control y registro de -- flujo número cinco se representará: FRC-5.

El transmisor de presión número diez se representa: - PT-10.

### 1.3 Diagramas de Tuberías e Instrumentación, Simbología, Aplicaciones y Usos.

Los diagramas de tuberías e instrumentación (DTI's) es la representación pictórica de los equipos, líneas de -- procesos con sus diámetros, especificaciones de tuberías,

aislamiento, condiciones de operación, tales como, niveles, presiones, flujos y temperaturas de los equipos y líneas involucradas, los cuales en conjunto representan el proceso.

En los DTI'S por medio de símbolos se identifican todos los instrumentos involucrados en el proceso (Ver Dibujo 1.3.1, ejemplo simplificado de un DTI), el cual es de gran importancia para todas las personas que trabajan en el proyecto, pues en él vienen vertidos todos los datos que puede requerir cada disciplina (tuberías, mecánico, proceso, etc.) ayudados con documentos auxiliares como índice de instrumentos, hojas de datos de equipos, hojas de especificaciones, etc.

Los símbolos se usan para indicar la posición de cada instrumento en los DTI'S y se ilustran los más conocidos a continuación.

Se dan a continuación las siguientes notas, con el objeto de que se usen los símbolos adecuados:

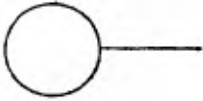
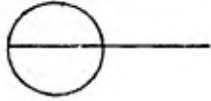
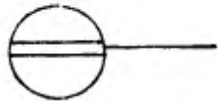
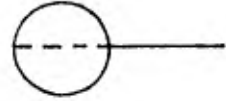
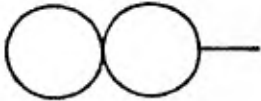
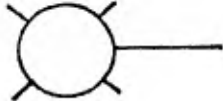
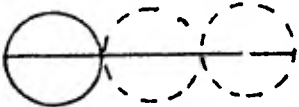
- a) El círculo, que debe ser aproximadamente de 7/16 de pulgada de diámetro, se emplea para localizar la posición de cada instrumento, propiamente dicho.
- b) Generalmente es innecesario repetir la identificación para el transmisor, válvula de control, elemento primario, etc., los cuales son nombrados de acuerdo con el instrumento principal al cual están conectadas.

SIMBOLOS:

(Ver siguiente hoja)

...



<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
	Instrumento de Montaje Local
	Instrumento Montado en Tablero Principal
	Instrumento Montado en Tablero Local
	Instrumento Montado atrás de Tablero Principal
	Instrumento con dos Funciones
	Luz Piloto o Alarma
	Indica que el registrador de línea llena va integrado en un registrador de tres plumas.

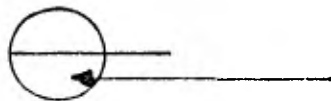
Siglas: Indicador Controlador de Presión

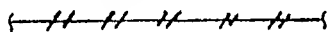


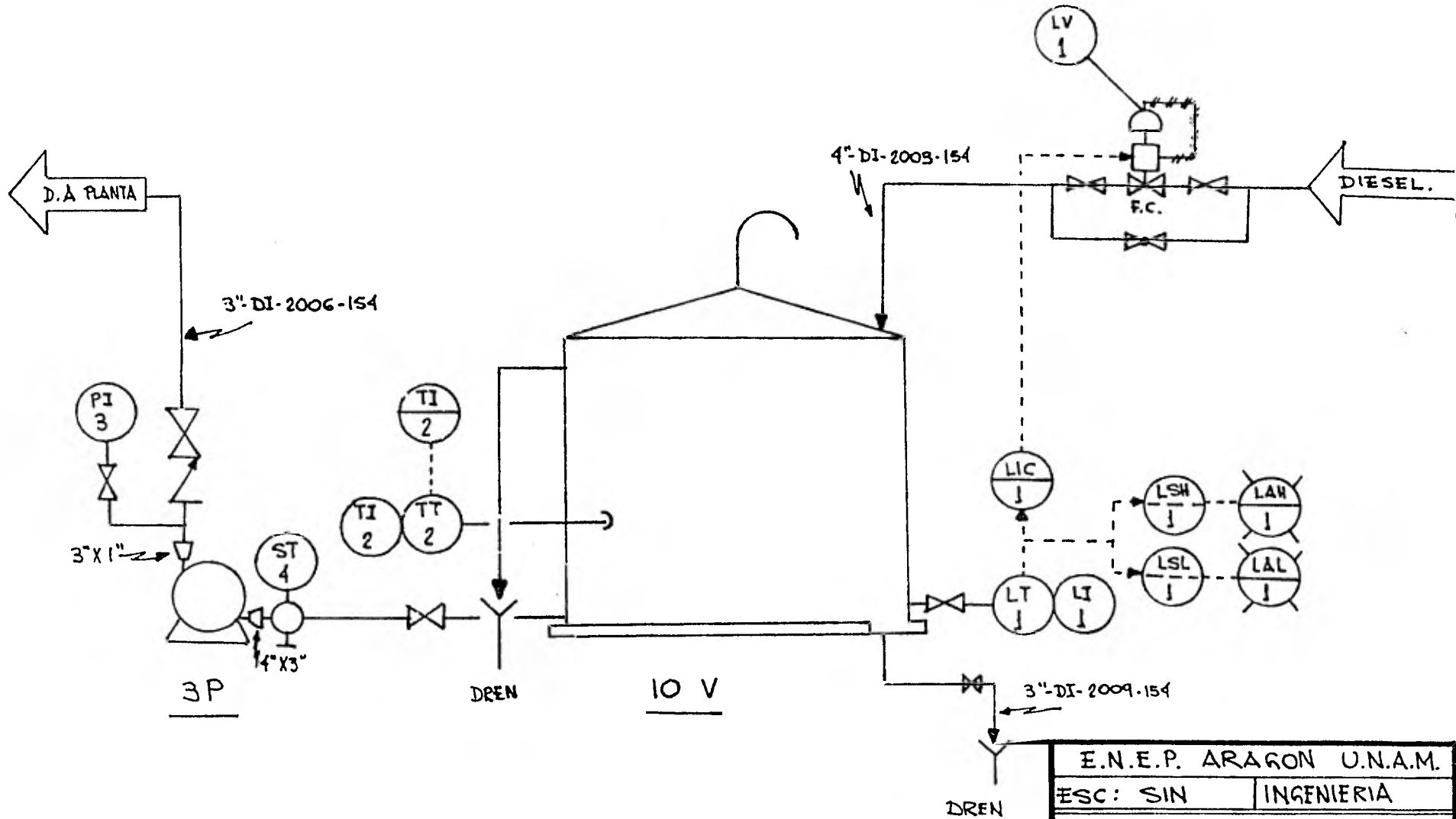
Localización



Número del Loop ó Instrumento



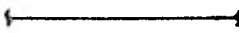
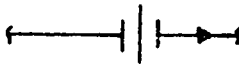

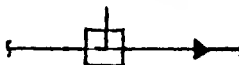


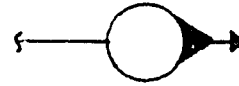

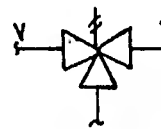
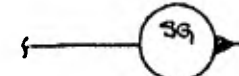



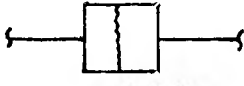
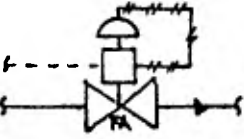
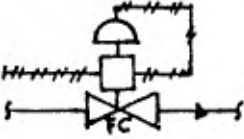
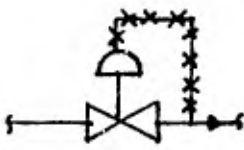
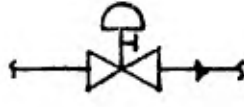
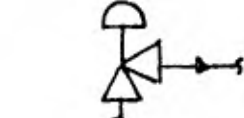
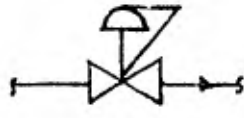
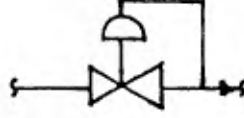
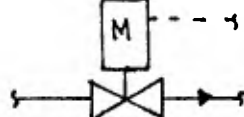
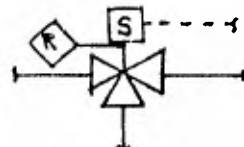
 Señal Neumática

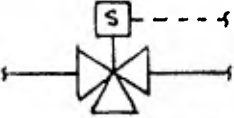
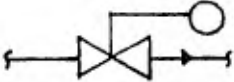



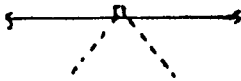


EJEMPLO SIMPLIFICADO.

E.N.E.P. ARAGON U.N.A.M.	
ESC: SIN	INGENIERIA
DIAG. DE TUB. E INSTRUMENTO.	
Nº 1.3.1	. 11

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
	Señal Eléctrica
	Tubo Capilar
	Conexión a Proceso o Cabezal Aire de Instrumentos.
	Placa de Orificio
	Detector de Flama
	Tubo Pitot o Venturi-Pitot
	Tubo Venturi
	Elemento Tipo Turbina o Propela
	Rotámetro
	Válvula de Alivio para Presión (con ejemplo de presión ajuste)
	Válvula de Alivio para Presión y Vacío
	Mirilla de Flujo

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
	Trampa de Vapor
	Sello Químico
	Válvula de Diafragma, abre a Falla de Aire Posicionador y Transductor Integrado.
	Válvula de Diafragma, cierra a Falla de Aire Posicionador Integrado.
	Válvula de Control de Temperatura Tipo Sistema Lleno.
	Válvula de Control con Operador de Diafragma y Volante
	Válvula de Control Tipo Angulo
	Válvula de Control de Presión Autoregurable
	Válvula de Control de Presión con Toma de Señal Exterior.
	Válvula de Control con Motor
	Válvula de Solenoide de Tres Vías, con ajuste Manual

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
	Válvula de Solenoide de Tres Vías
	Válvula Operada por Flotador
	Válvula Stop Check
	Arrestador de Flama
	Termopozo con Termopar Sencillo
	Termopozo con Termopar Duplex

Para localizar e identificar los instrumentos, y poder llevar a cabo un proyecto determinado, es necesario elaborar un índice de instrumentos, diagramas de instrumentación o loops, hojas de cálculo, y hojas de especificaciones de los instrumentos.

#### Índice de Instrumentos:

En el Índice de Instrumentos se enlistan todos los instrumentos por variables y por circuito de instrumentación. En el se describe el servicio, línea o recipiente donde se encuentra físicamente el instrumento, o bien, qué es lo que está indicando, controlando o registrando.

Además, se identifican todos los componentes de los circuitos de instrumentación, así como su localización.

Ejemplo tomado del diagrama de tuberías e instrumentación

No. 1.3.1.

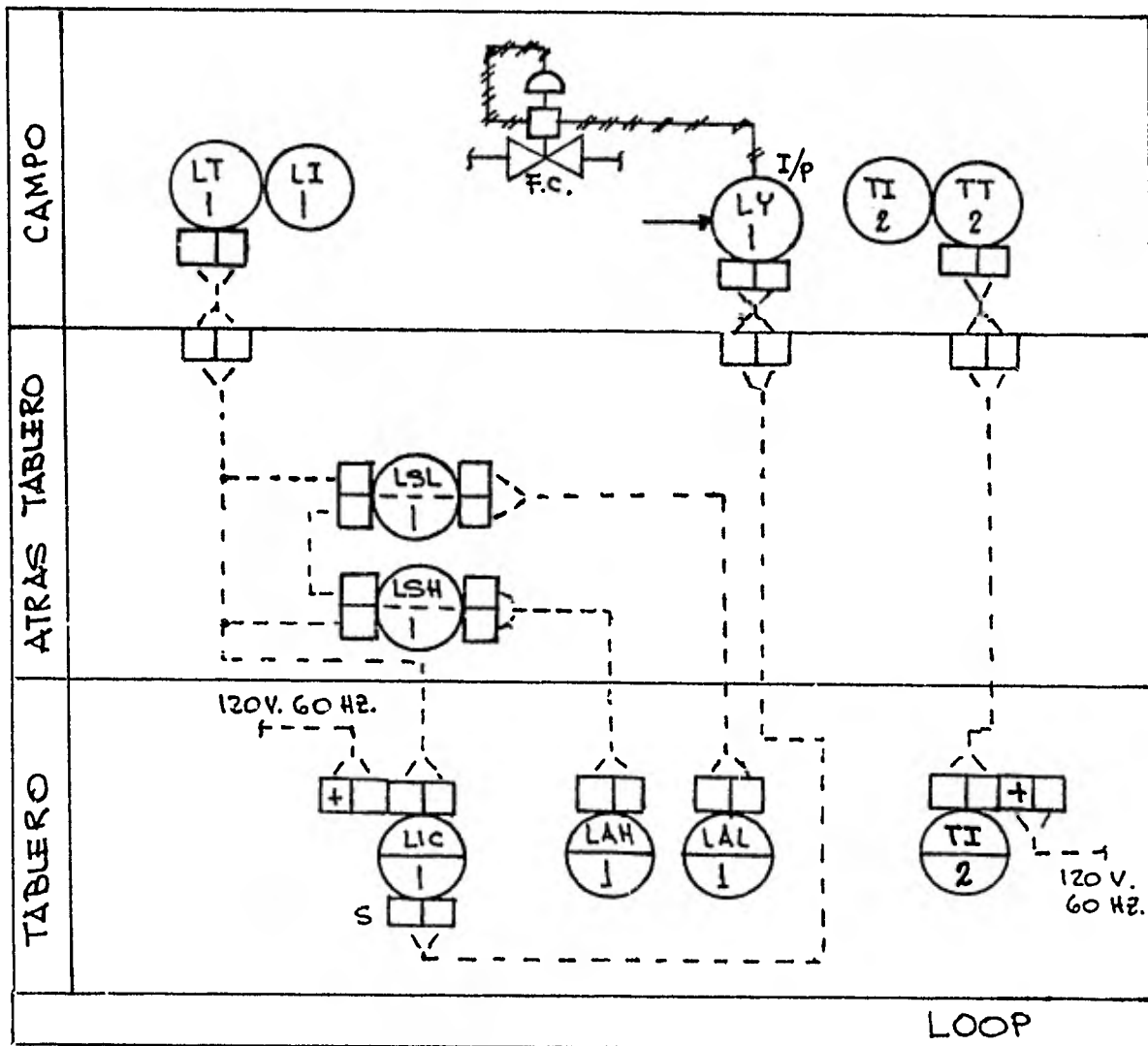
## INDICE DE INSTRUMENTOS

ENEP - ARAGON INGENIERIA		CLIENTE: PROYECTO: LOCALIZACION: CONTRATO:				
Tag	Servicio Descripción	Línea o Equipo	Proveedor	DTI	LOOP	Local.
LT-1	Diesel de Planta	10-V	Taylor	1.3.1	1.3.2	Campo
LI-1	Diesel de Planta	10-V	Taylor			Campo
LIC-1	Diesel de Planta	- -	Taylor			Tablero
LSH-1	Diesel de Planta	- -	Static-o- Ring			Atrás Tablero
LAH-1	Diesel de Planta	- -	Relay			Tablero
LSL-1	Diesel de Planta	- -	Static-o- Ring			Atrás Tablero
LAL-1	Diesel de Planta	- -	Relay			Tablero
LV-1	Diesel de Planta	4"-DI- 2003- 154	Fisher			Campo
LY-1	Diesel de Planta	4"-DI- 2003- 154	Fisher			Campo
TT-2	Diesel de Planta	10-V	Taylor			Campo
TI-2	Diesel de Planta	- -	Taylor			Tablero
PI-3	Diesel de Planta	3"-DI- 2006- 154	Emca		- -	Campo

"Diagramas de Instrumentación o Loops"

En los diagramas de instrumentación se dibujan los circuitos de control, registro o indicación que se encuentran tanto en el tablero principal de control, así como su intercomunicación con los instrumentos de campo,

Ejemplo tomado del DTI No. 1.3.1



- S.A. → Suministro de Aire (20 Psig.)
- - - - - ► Señal Marcada Eléctrica (120V.y 60 Hz)
- - - - - ► Señal no Marcada (24 V. 4-20 MA)

Hojas de Cálculo.

En estas hojas se realizan los cálculos de los elementos primarios (tales como placas de orificio, Venturis, etc.) o los cálculos de los elementos finales de control (válvulas de control), en base a los datos de proceso en los que especifican las condiciones a las cuales será sometido cada instrumento.

Ejemplo: Tomado del DTI No. 1.3.1

TAG: LV-1

FORMULA PARA LIQUIDOS

$$CV = \sqrt{\frac{G}{\Delta P}}$$

CV = FACTOR DE CAPACIDAD DE LA VALVULA

V = FLUJO DE LIQUIDO (GAL/MIN.)

G = DENSIDAD RELATIVA A CONDICIONES DE OPERACION

$\Delta P$  = CAIDA DE PRESION  $\Delta P = P_1 - P_2$

DATOS:

FLUIDO: DIESEL

V nor.: 150 GPM

V max.: 170 GPM

P1 = 20 PSIG.

P2 = 10 PSIG.

$\Delta P$  = 10

G = .861

En el Capítulo 5, inciso 6, se profundiza más sobreválvulas, su cálculo y selección.

CV Normal = 49.01 CV Máximo = 49.88

VALVULA SELECCIONADA:

Tipo: Globo Característica: Lineal

Modelo: ED (Fisher)

Tamaño Cuerpo: 2"  $\emptyset$



Tamaño Puerto: 2 5/16"

#### 1.4 Terminología del Control Automático.

Para que sea más comprensible el lenguaje de la técnica e ingeniería de control, es un requisito indispensable conocer los fundamentos del mismo. La normalización de la terminología de control ha sido difícil, principalmente debido a que los ingenieros normalmente utilizan varios términos para referirse al mismo fenómeno.

Existen varios intentos de normas, pero las más conocidas y respetadas son las normas ASME Standard 105, referentes a "Terminología de Control Automático", han sido publicadas por la "Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos" (ASME). La terminología de esa publicación, que se aplica a la instrumentación y control, se enlistata a continuación, teniendo asociado su concepto o definición:

PLANTA	Una planta es un equipo o equipos cuyo objetivo es realizar una operación determinada.
PROCESO	Es cualquier operación o secuencia de operaciones que involucre un cambio de estado de energía, de composición, de dimensión o de otra propiedad que pueda definirse con respecto a un valor o dato.
SISTEMA	Un sistema es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen determinado objetivo. Un sistema no está limitado a los objetivos físicos. El concepto de sistema puede ser aplicado a fenómenos abstractos y dinámicos.

PERTURBACION

Una perturbación es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se le denomina "interna", mientras que una perturbación "externa" se genera fuera del sistema y constituye una entrada.

CONTROL DE  
RETROALIMENTACIONES

Es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia de un sistema (o de un estado deseado) y que la hace sobre la base de esta diferencia. En este caso, solamente se consideran perturbaciones no previsibles, pues para las que pueden ser previstas o conocidas, siempre se puede incluir una compensación dentro del sistema, de modo que sean innecesarias las mediciones.

SISTEMAS DE CONTROL  
RETROALIMENTADO

Es aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparando ambas y utilizando la diferencia como parámetro de control.

SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMATICO

Es cualquier combinación operable de uno o más controladores automáticos conectados en circuitos cerrados, con uno o más procesos.

CONTROLADOR  
AUTOMATICO

Es un dispositivo que mide continua

mente el valor de una variable y actúa para corregir una posible des--viación de la variable, con respec--to a un valor de referencia o punto de ajuste. La forma en que el con--trolador actúa o corrige se llama - modo de control.

- PUNTO DE AJUSTE Es la posición a la cual se fija el mecanismo de control para servir como señal de referencia.
- VARIABLE CONTROLADA Es la cantidad o condición del proceso que es medida continuamente y comparada con el valor deseado de - la variable o punto de ajuste.
- MEDIO CONTROLADO Es aquella energía o material del proceso en el cual se está controlando continuamente una o más variables. La variable controlada es una condición o característica del medio controlado.
- VARIABLE MANIPULADA Es aquella cantidad o condición que es afectada por el controlador automático, de modo que afecte el valor de la variable controlada.
- AGENTE DE CONTROL Es aquella energía o material del proceso del cual la variable manipulada es una condición o caracterís--tica.
- ERROR Es la diferencia entre el valor de la variable controlada y el valor deseado o punto de ajuste.

ACCION CORRECTIVA

Es la variación de la variable mani  
pulada, producida por los medios de  
control; estos operan el elemento -  
final de control, el que de hecho  
modifica el valor de la variable ma  
nipulada, de tal manera, que la va-  
riable controlada vaya al valor de-  
seado, el cual es fijado por el pun  
to de ajuste.

PUNTO DE CONTROL

Es el valor de la variable controla  
da sobre el que opera el controlador  
para mantenerla sobre cualquier jue  
go de condiciones fijadas. Cuando  
el sistema se encuentra, el punto  
de control es el valor final que to  
ma la variable controlada y puede o  
no ser igual al punto de ajuste.

ELEMENTO PRIMARIO  
DE MEDICION

Es aquella porción del sistema de  
medición que está en contacto con la  
variable a medir, y que utiliza o  
transforma la energía del medio con  
trolado para producir un efecto que  
sea función de los cambios del valor  
de la variable controlada. El efecto  
producido por el elemento primario  
puede ser un cambio de presión, fuerza  
za, posición, potencial eléctrico,  
resistencia, etc.

ELEMENTO FINAL DE  
CONTROL

Es aquella porción del sistema de --  
control que cambia directamente el  
valor de la variable manipulada, pue  
de ser una válvula de control, amor-

tiguador, servomecanismo u otra forma de restrictor variable y ajustable que pueda cambiar el flujo del agente de control.

DESVIACION

Es un cambio no deseado en la salida sobre un período de tiempo, y -- que no está relacionada con la entrada, condiciones de operación o carga. La desviación se expresa generalmente como el cambio en la salida en un tiempo específico, con una entrada y condiciones de operación fijas.

RANGEABILIDAD

Es la relación entre los valores de más alto rango y más bajo rango.

SENSIBILIDAD

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

RESPUESTA

Es el comportamiento de la salida de un dispositivo, como función de la entrada, ambas con respecto al tiempo.

TIEMPO DE RESPUESTA

Es el intervalo de tiempo requerido para que la señal de medición de un detector alcance un porcentaje específico de su valor final, como resultado de un cambio en la variable de proceso.

TIEMPO MUERTO

Es el intervalo entre la iniciación de un cambio en la entrada y el comienzo de la respuesta resultante.

BANDA MUERTA

Es el rango a través del cual puede variarse a una entrada sin que se inicie la respuesta.

Generalmente se expresa como un porcentaje del rango de operación.

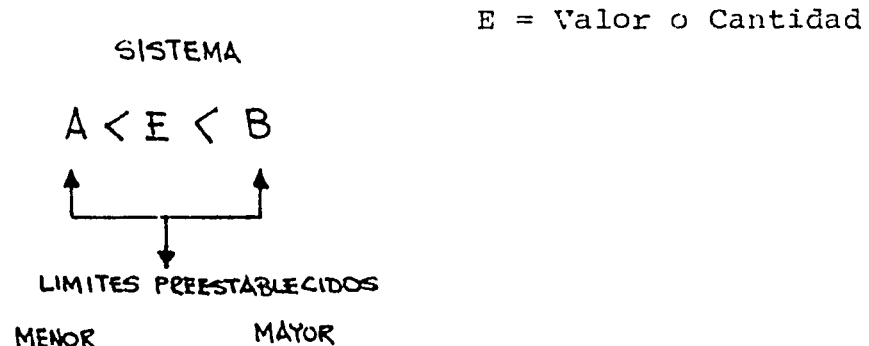
## CAPITULO 2

## TEORIA DEL CONTROL AUTOMATICO

## 2.1 Sistemas de Control.

Para establecer lo que es un sistema de control, una definición de éste sería: Un sistema dentro del cual un cierto valor o cantidad debe ser mantenido dentro de límites preestablecidos.

Matemáticamente se podría decir:



Para poder implementar un sistema de este tipo, se utiliza la instrumentación, con la cual se pueden hacer uno o varios tipos de combinaciones.

Los sistemas de control se pueden dividir en:

- . Sistemas de Control de Circuitos Abiertos
- . Sistemas de Control de Circuitos Cerrados

## 2.2 Sistemas de Control de Circuitos Abiertos.

El sistema de control de circuito abierto, involucra simplemente la realización de un estimado de la forma o cantidad de acción necesaria para tener un objetivo deseado y su base radica en la predicción. No se hace una comprobación para determinar si la acción correctiva ha cumpli-

do con el objetivo deseado.

Un ejemplo de un sistema de control abierto es el de un horno eléctrico. En este caso, la persona que lo opera tiene un objetivo (calentar algún material, para lograr un proceso) y lo compara con un nivel de referencia (contra algún patrón o tablas) y hace una predicción (ajustando el tiempo y la temperatura). El operador enciende el horno y espera (dedicándose inclusive a otros quehaceres) en la suposición de que la predicción hecha, conseguirá el objetivo deseado, si la predicción fue correcta en todos sus aspectos (cantidad necesaria de calor, tiempo, etc.) el material quedará exactamente dentro de los límites prefijados, 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 lo que se hizo la predicción, el sistema de control de circuito abierto no da un control perfecto (fuera de los límites prefijados).

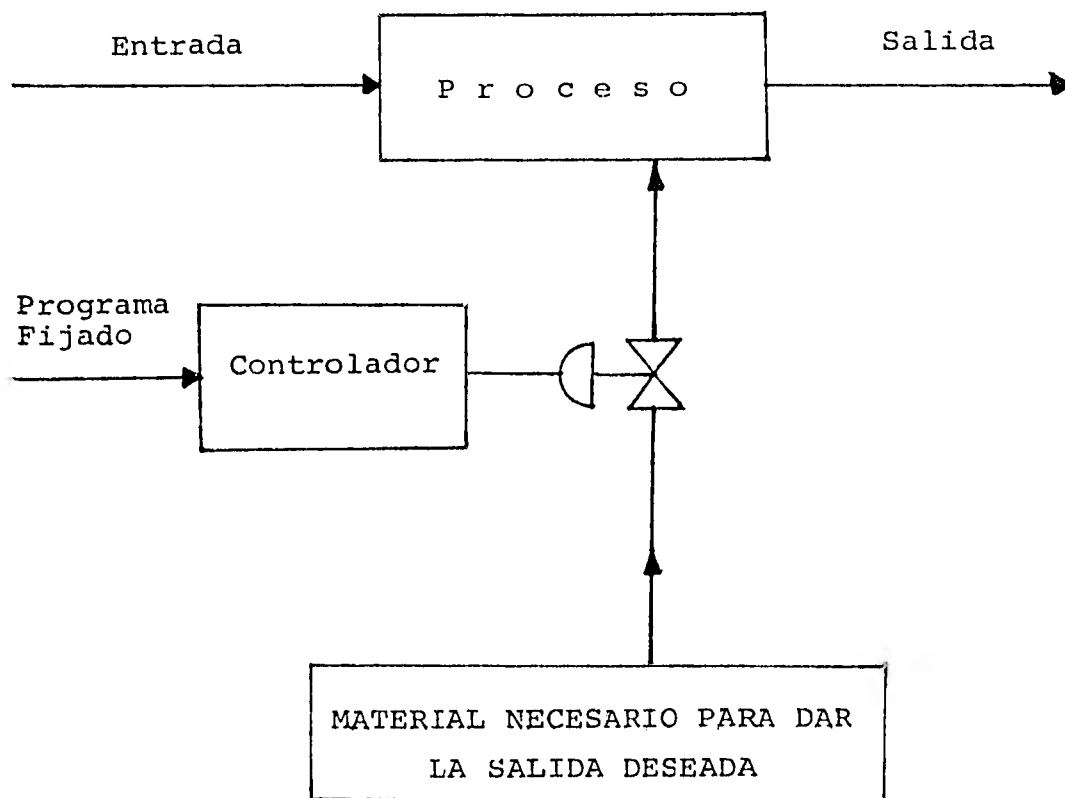
Dado que el horno no tiene los elementos necesarios, no hace una comparación final entre el resultado actual (características obtenidas) y el resultado deseado (características deseadas), cualquier error en la predicción (el programa fijado y materiales necesarios), produce una diferencia entre resultados.

En la práctica, solamente se puede usar el control de circuitos abiertos si la realización entre la entrada y la salida es conocida, y si no hay perturbaciones externas ni internas. Tales sistemas no son sistemas de control retroalimentado.

En el área de procesos industriales, en la mayoría de las



veces de tipo continuo, los sistemas de control de circuito abierto prácticamente no tiene aplicación, por lo que de aquí en adelante se tratará únicamente con los sistemas de control automático de circuito cerrado.



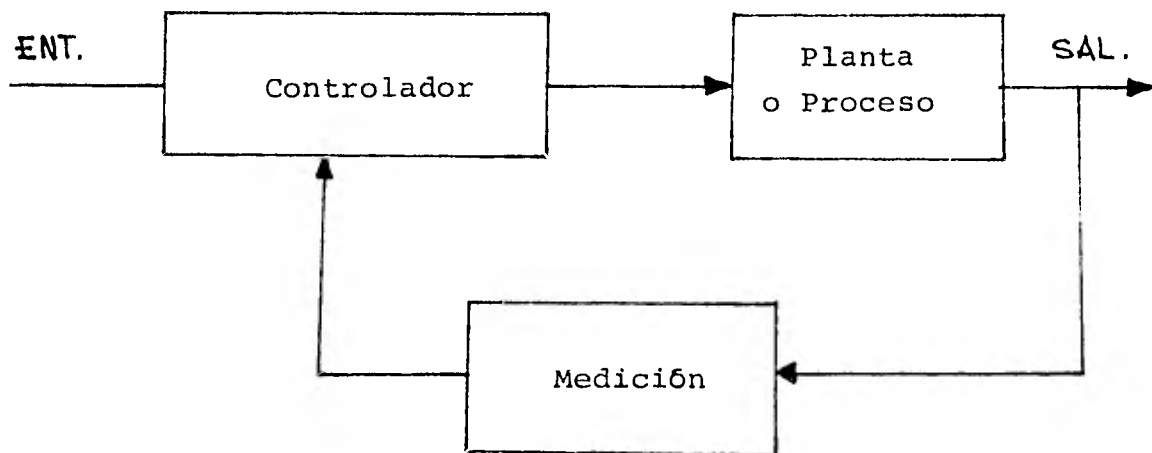
SISTEMA DE CONTROL DE CIRCUITO ABIERTO

FIGURA NO. 2.2.1

### 2.3 Sistemas de Control Circuito Cerrado.

Un sistema de control de circuito cerrado, es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control, esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control retroalimentado.

La señal de error actuante, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de retroalimentación, entra al controlador, y de esta manera se reduce el error y se lleva la salida del sistema al valor deseado. De aquí que el -- término "circuito cerrado" implique el uso de acción de retroalimentación para reducir el error del sistema.



SISTEMA DE CONTROL DE CIRCUITO CERRADO

FIGURA NO. 2.3.1

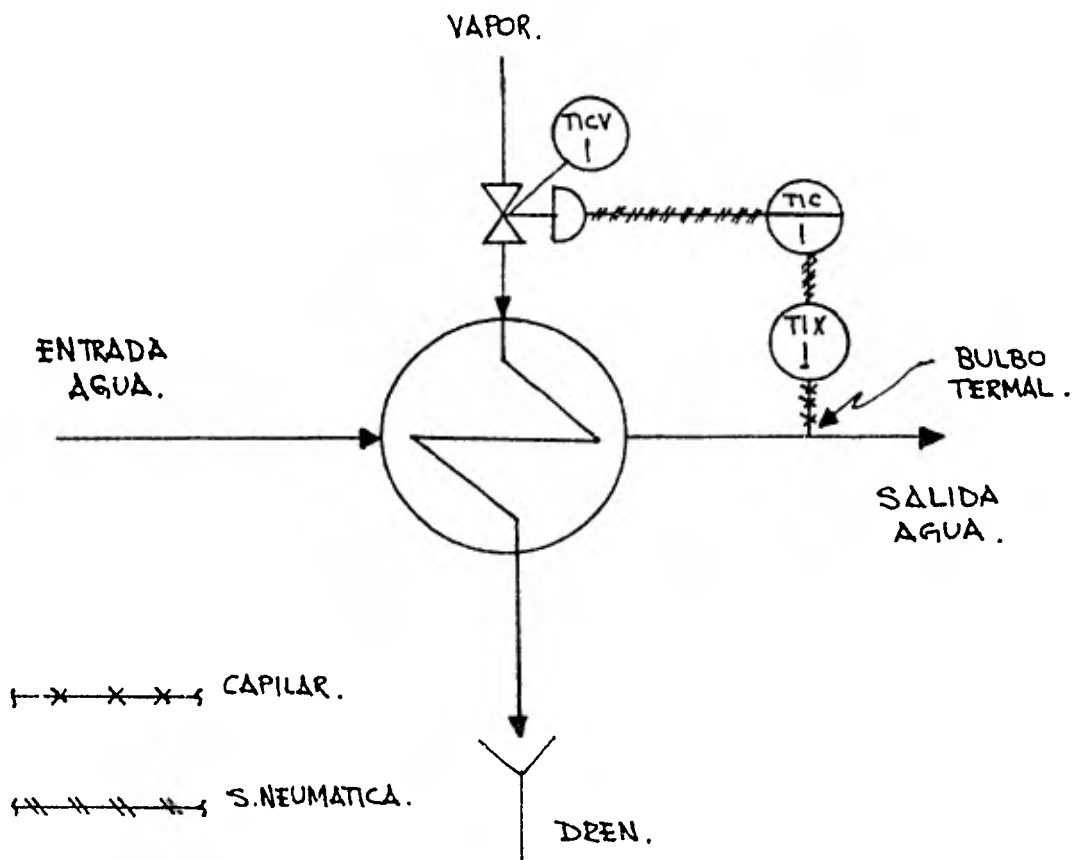
En los sistemas de control, la predicción se puede hacer automáticamente a través de un dispositivo que llamamos - controlador y una válvula de control, pero dicha válvula se puede mover también a mano por el operador y esto nos lleva a la división de los sistemas de control de circuito cerrado en:

- . Automáticos
- . Manuales

Sin embargo, el control de un sistema complejo por un --

operador humano no es eficaz por las muchas interrelaciones entre las diversas variables, aún en un sistema simple, un controlador automático eliminará cualquier error humano de operación.

En esta tesis solamente se hablará de sistemas de control de retroalimentación automáticos o sistemas de control automáticos de circuito cerrado.



EJEMPLO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO SENCILLO

FIGURA NO. 2.3.2

En el ejemplo anterior, el producto a calentarse (agua) es el medio controlado, la temperatura del agua es la variable controlada, la cantidad de vapor de entrada, es la

variable manipulada y el vapor es el agente de control.

Partes que Comprende un Sistema de Control  
de Circuito Cerrado Sencillo

Por lo expresado en el ejemplo anterior, se puede inferir que un sistema de control automático consta de las siguientes partes:

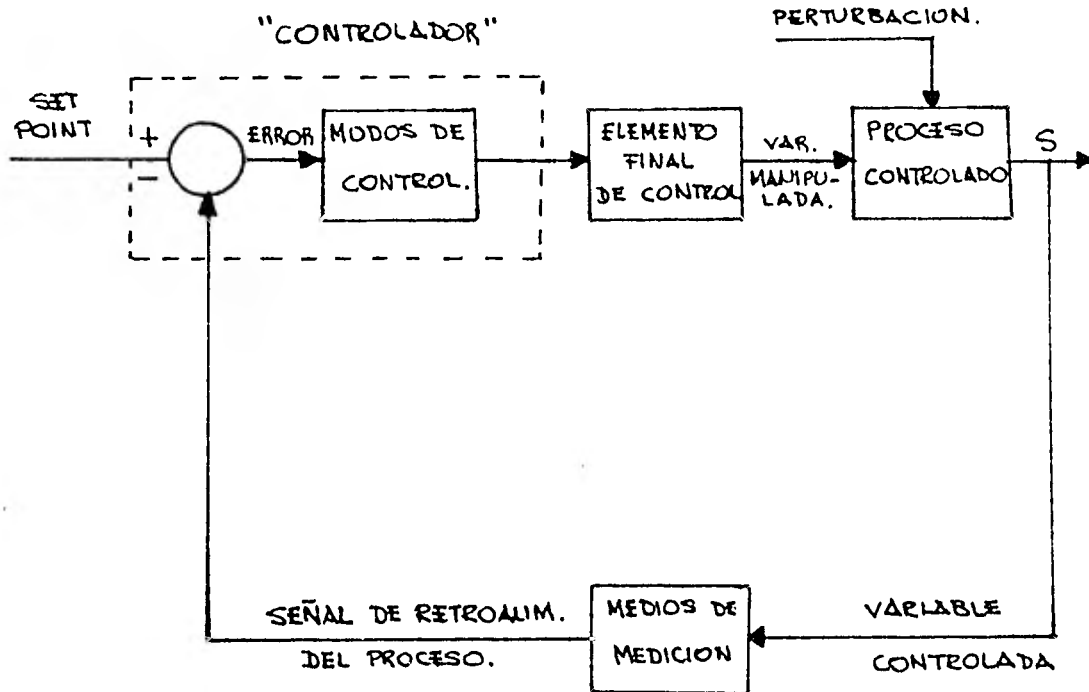
1. El proceso o sea el o los equipos en los cuales la variable va a ser controlada (cambiador de calor).
2. Una sección sensible que mide el valor actual de la variable controlada y la transmite al controlador automático (Bulbo Termal).
3. Una fuente de referencia que suministra e indica el valor deseado de la variable (Transmisor TIX-1).
4. El controlador automático que opera para corregir si la variable controlada no está dentro de los límites prefijados por el valor deseado (TIC-1).
5. El elemento final de control que ajusta la variable manipulada de acuerdo a la acción correctiva del controlador automático (TICV-1).

De las cuatro 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 (como en el ejemplo del bulbo termal y el transmisor es un solo instrumento), o por separado, pero cuando se interconectan entre sí forman un circuito de instrumentación.

La parte 5, el elemento final de control, es normalmente

una válvula automática operada por aire, aunque en otros casos puede operar hidráulica o eléctricamente, o ser un servomecanismo o algún otro tipo de instrumento o equipo que module nuestra "variable manipulada".



CIRCUITO BASICO DE CONTROL

FIGURA NO. 2.3.3

De la figura anterior, el controlador (en el cuadro de líneas punteadas), tiene dos partes, una que es el elemento de comparación, que recibe el "Set-Point" y la señal de retroalimentación del proceso, generándose una señal de error, y otra que recibe la señal de error y realiza las funciones de control necesarias (tales como acciones proporcionales, de reajuste, rate, etc.) que dan

por resultado una señal de salida del controlador.

La señal de salida del controlador llega a un elemento - final de control, el que generalmente es una válvula de control, dirigida por la señal recibida, varía el flujo a través de ella, y esto da una variación del proceso -- que es la variable manipulada.

La variable controlada, es la condición del proceso que deseamos regular a un valor igual o muy cercano al punto de ajuste. Las variables controladas son a menudo: flujo, nivel, presión y temperatura, aunque hay muchas más me-- nos usadas, tales como Ph, conductividad, humedad, vis-- cosidad, etc.

Las perturbaciones pueden entrar al elemento final de -- control o al proceso en cualquier forma para cambiar sus relaciones ENTRADA-SALIDA, y esta es la razón fundamen-- tal para usar un circuito de control, el que actúa, para mantener la variable controlada en un valor determinado a pesar de las perturbaciones.

Si deseamos controlar una variable de proceso, por medio de un sistema de retroalimentación, el controlador debe sentir esa variable, y crear una señal real, tanto con -- respecto a su valor, como a su relación de cambio con -- respecto al tiempo.

Los elementos de medición representan todos los elemen-- tos usados para convertir la variable controlada en una señal de la misma naturaleza que la señal del punto de -- ajuste en el controlador; estas señales pueden tomar la forma de un movimiento, una presión neumática, una co-- rriente eléctrica, etc., dependiendo del diseño del con-- trolador.

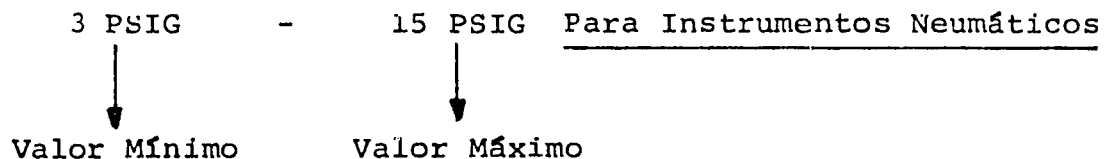
## CAPITULO 3

## CONTROL AUTOMATICO SENCILLO

## 3.1 Circuito de Control Automático Sencillo.

El sistema de control representado en la Figura No. 3.1.1 es un diagrama de bloques que liga distintas variables físicas, pero en una forma caracterizada, por ejemplo -- 3-15 Psig. de presión neumática, 4-20 Ma C.D., 0-100 Psig de presión hidráulica, etc., que es el lenguaje que entienden los instrumentos, es decir:

## R A N G O

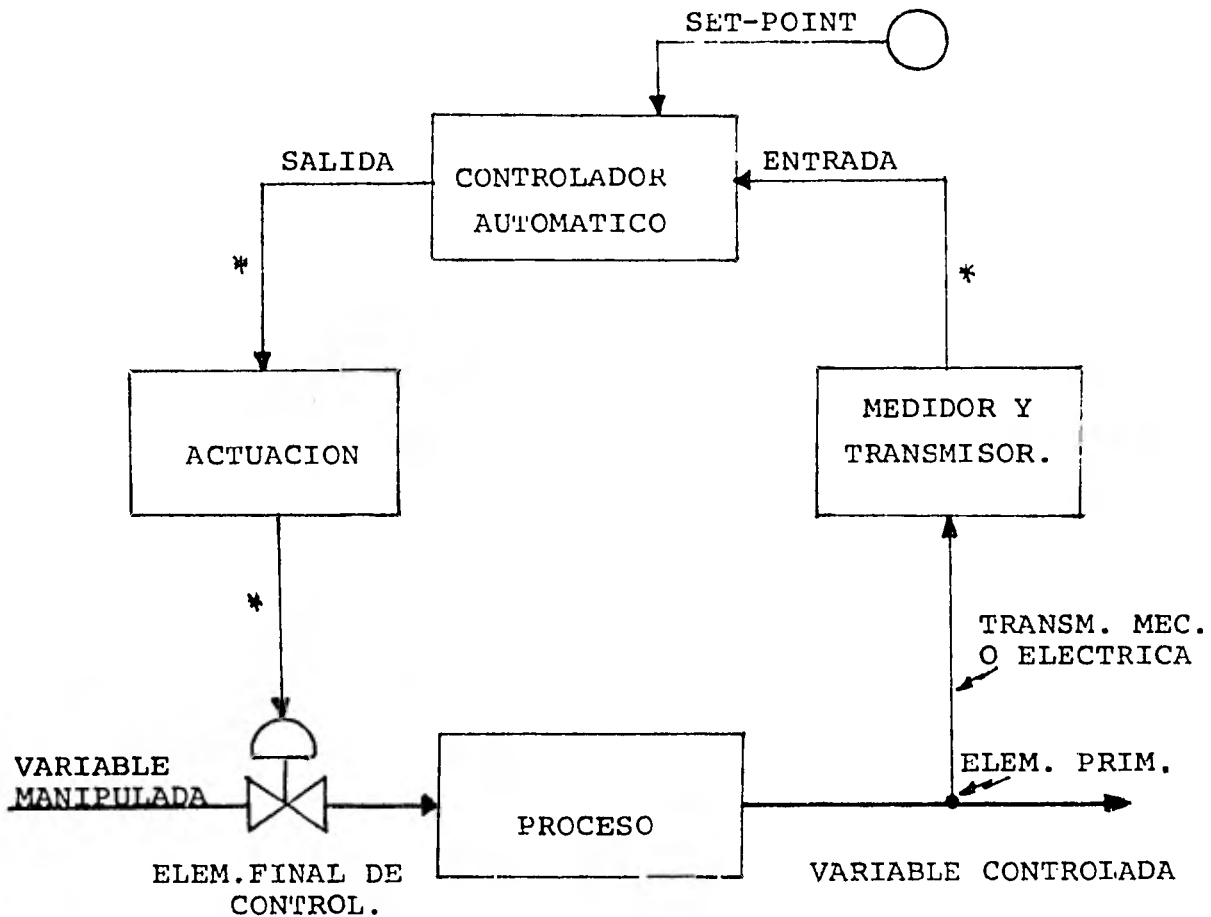


Ya sea de nivel, presión, temperatura, etc., digamos para un tanque en que el nivel a medir es 20 cms. a 1.50 m. el rango del nivel es: 20-150 cms., el instrumento va a mandar una señal de salida en la cual 20 cms. va a ser igual a 3 Psig. y 150 cms. va a ser igual a 15 Psig. en instrumentos neumáticos, y así para todos los demás tipos de -- transmisión caracterizada.

El transductor, transforma la variable de proceso a controlar, (temperatura, presión, etc.) a una forma de señal que pueda ser posteriormente fácil de manejar, como por ejemplo una presión diferencial, un desplazamiento, una -- señal de corriente, etc.

El transmisor transforma la señal generada por el trans-- ductor, en una señal caracterizada que pueda posteriormen-- te ser fácil de manejar por el resto de la instrumenta--- ción.

De acuerdo con lo anterior, el diagrama de bloques debe deberá contener un cierto número de componentes que lo hacen sofisticado.



\* TRANSMISION CARACTERIZADA (neumática, eléctrica, hidráulica, etc.)

DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO SENCILLO

FIGURA NO. 3.1.1

De la figura anterior, se obtiene la Tabla No. 3.1.2, la que nos representa prácticamente los instrumentos más usuales en un circuito de instrumentación sencillo que son:



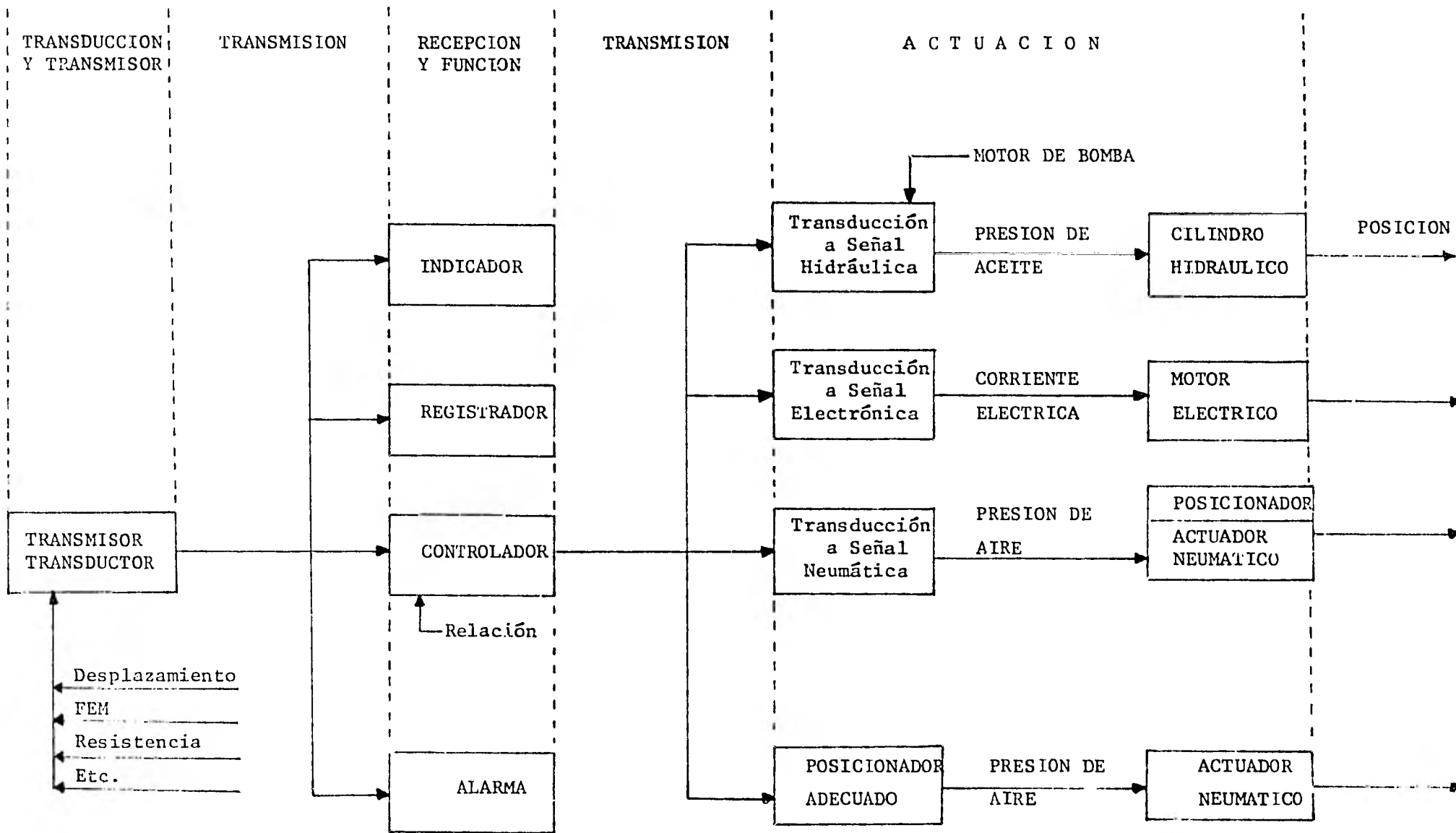


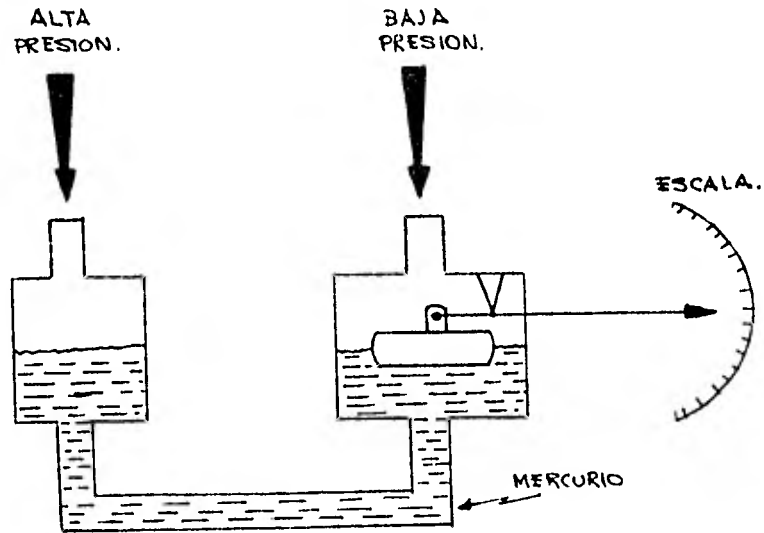
TABLA NO. 3.1.2 ARREGLO DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTOS QUE INCLUYE POSIBILIDADES HIBRIDAS

1. El Transductor y Transmisor.- Es el que transforma la variable a medir y/o controlar (temperatura, nivel, etc.) en una señal caracterizada que pueda ser conectada a cualquier instrumento con ese mismo diseño -- (neumático, eléctrico, etc.).
2. El receptor, que realiza la función necesaria, ya -- sea registrar, indicar, alarmar, controlar, que puede ser una o varias combinaciones entre ellas.
3. El actuador del elemento final de control, que opera sobre la variable manipulada.

Estos instrumentos se encuentran ligados entre sí, por sistemas de transmisión, que forman lo que podría considerarse "El Sistema de Distribución".

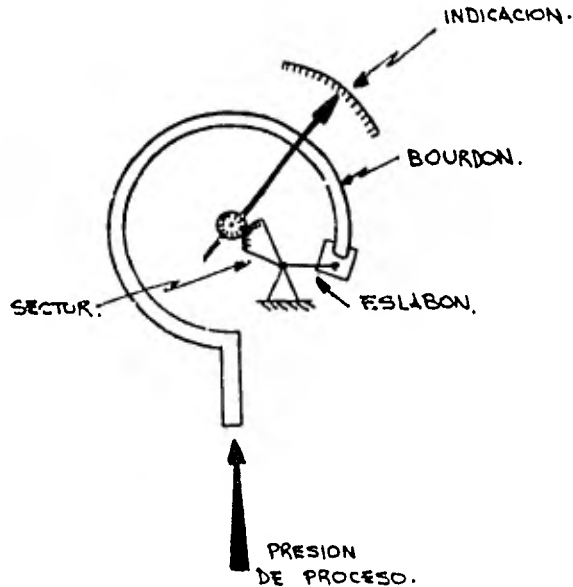
Sobre estos "Sistemas de Distribución" hay varios tipos, los cuales tienen sus ventajas y desventajas; a continuación se enlistan los más importantes:

1. TRANSMISION MECANICA.- Este tipo de transmisión utiliza elementos puramente mecánicos como son: levas, engranes, palancas, etc., y se utilizan con provecho si la distancia entre el elemento transmisor y el -- receptor, es muy corta.
2. TRANSMISION NEUMATICA.- En este caso, la señal se -- manda por medio de una presión de aire. Este sistema permite una mayor flexibilidad en la transmisión, y es más versátil que el mecánico, ya que el flujo de aire circula por un tubo de pequeña sección transversal y por ende poco peso, con lo cual los cambios de dirección no ofrecen problema, como en el caso de la transmisión mecánica. Las distancias recorridas por la señalen este caso pueden ser mayores, aunque existen limitaciones debidas a las caídas de presión a --



EJEMPLO DE TRANSMISION MECANICA DE UN MEDIDOR DE FLUJO POR MEDIO DE UNA DIFERENCIAL DE PRESION

FIG. NO. 3.1.3



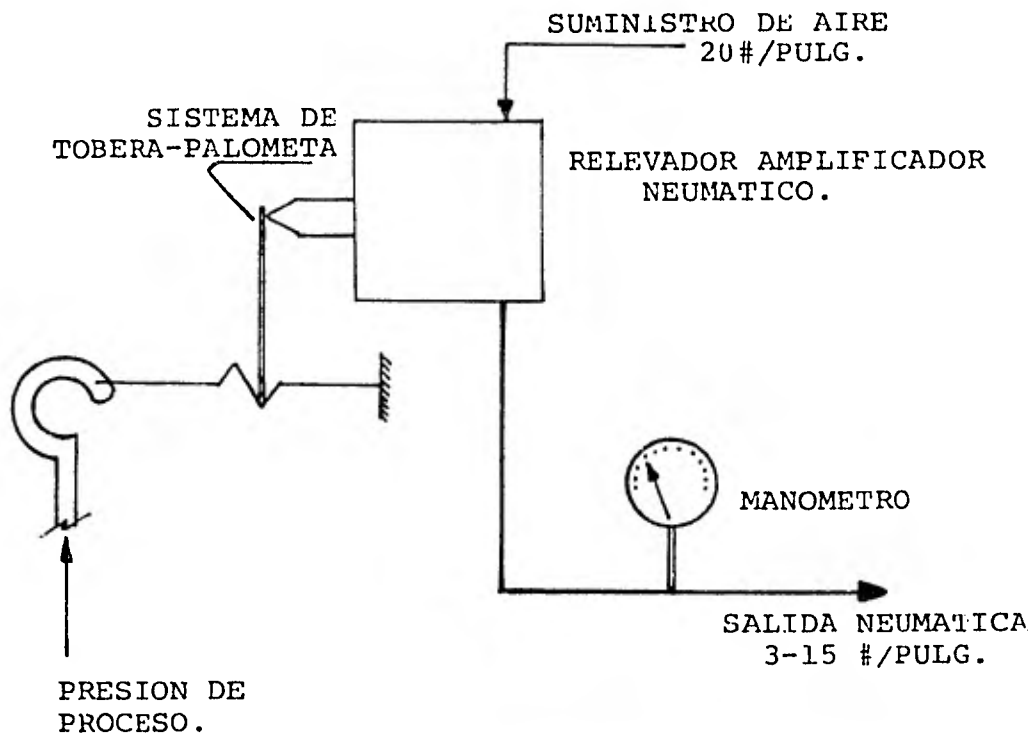
EJEMPLO DE TRANSMISION MECANICA DE UN BOURDON PARA MEDIR PRESION

FIG. NO. 3.1.4

lo largo de la línea de transmisión.

3. TRANSMISION ELECTRICA.- Esta transmisión tiene una

gran ventaja, ya que la señal se transmite por conductores entre puntos lejanos, sin tener pérdidas de energía tan grandes como las que existen en la transmisión neumática, y conservando y superando la flexibilidad de ésta. La señal se transforma en una corriente o una diferencial de potencial eléctrico por medio de un transductor apropiado.



### Transmisión Neumática

#### SISTEMA DE TOBERA-PALOMETA

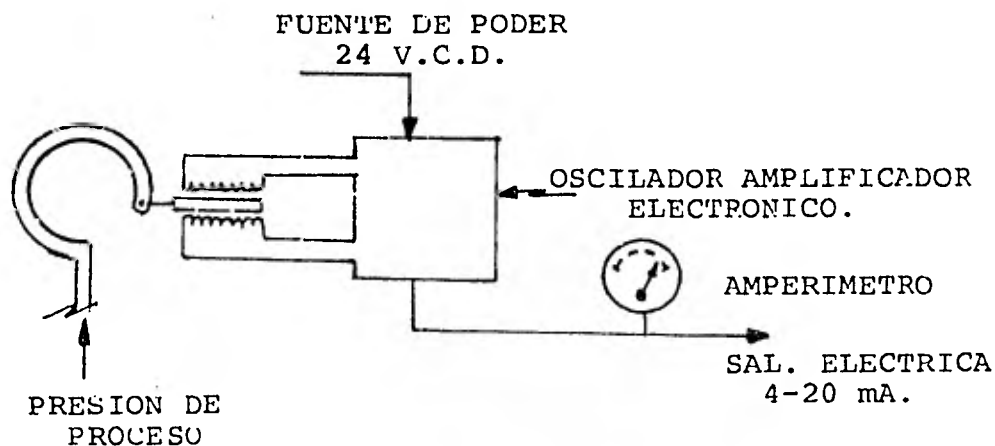
FIG. NO. 3.1.5

4. TRANSMISION P/CAPILAR.- Este tipo de transmisión se -

usa solamente para temperatura, pues trabaja bajo el principio de un sistema cerrado con líquido dentro -- (glicerina, etc.) que se dilata o expande por los cambios de temperatura registrados en el bulbo termal, - los cuales son detectados por un bourdon "o" espiral que lo registra y/o controla, los sistemas termales, se dividen en dos grandes grupos:

1. Los que responden a los cambios de presión.
2. Los que responden a los cambios de volumen.

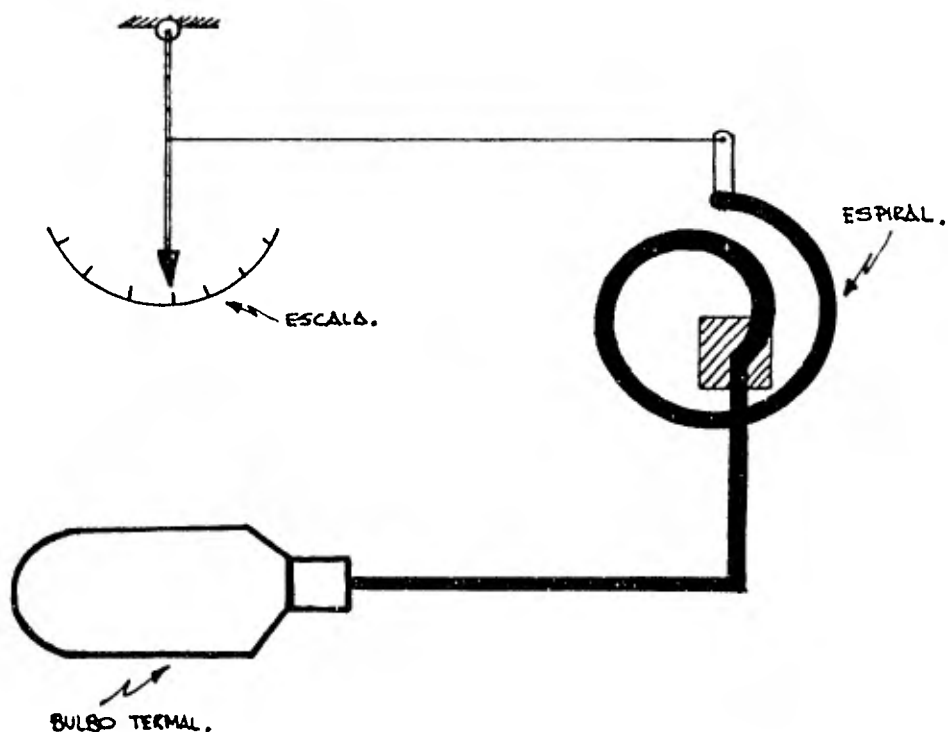
Más adelante se hablará más de estos sistemas.



### Transmisión Eléctrica

#### EJEMPLO DE TRANSMISION ELECTRICA

FIG. NO. 3.1.6



EJEMPLO DE TRANSMISION "TERMAL" CLASE "I"

FIG. NO. 3.1.7

### El Controlador Automático

El controlador automático, es el corazón de todo sistema de control automático, y puede ser definido como un dispositivo que maneja una entrada (desviación o error), para producir una salida, que es función de la forma matemática en que ha sido programado, ya que el controlador automático no es sino una micro-computadora analógica y de propósito especial.

La forma matemática que describe la manera en que se establecen las acciones correctivas del controlador en rela--

ción a la desviación o error entre la variable controlada y el valor deseado o punto de ajuste, se llama modo de control. Los tipos de acción de control son seis: de dos posiciones o abierto-cerrado, proporcional, integral, proporcional más integral, proporcional más derivativo, y proporcional más integral más derivativo.

### 3.2 Modos de Control.

#### Acción de Dos Posiciones o Abierto-Cerrado:

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente conectado y desconectado, el control de dos posiciones, es relativamente simple y económico y por esta razón ampliamente utilizado en sistemas de control, tanto industriales como domésticos.

Para lograr este control se hace que la ganancia tienda a infinito ( $G \rightarrow \infty$ ), entonces la banda proporcional - tiende a cero ( $B.P. \rightarrow 0$ ) y la salida (S) del controlador tenderá a más o menos infinito ( $S \pm \infty$ ) según el signo aritmético del error (e), y por 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.

$$S = Ge + C \quad - - - - - ( 1 )$$

G = Constante de Proporcionalidad

e = Error

$$e = E - P \quad - - - - - ( 2 )$$

E = Valor de la Variable Controlada

P = Valor de Referencia o Set-Point

C = Constante que depende de la Calibración del Controlador.

$$B.P. = \frac{100}{G} \% \quad - - - - - ( 3 )$$

B.P. = Banda Proporcional

G = Ganancia

El controlador de dos posiciones es meramente un "switch" que se mueve a una posición cuando el error es positivo - (señal de punto de ajuste menor que la variable controlada), y a la 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 posiciones no son las de completamente abierto o completamente cerrado, se conoce como control de "AL TO-BAJO".

Existe una modificación al control de dos posiciones que es de dos posiciones con abertura diferencial, esto es -- que la acción de switcheo ocurre solo después de que el error de entrada pasa a través de una abertura o zona diferencial. Si por ejemplo, el error fue previamente negativo y regresa a cero, no hay switcheo del controlador -- hasta que el error alcance algún valor positivo; entonces, si el error decrece nuevamente, debe caer a algún valor - negativo, como se requirió en el lado positivo.

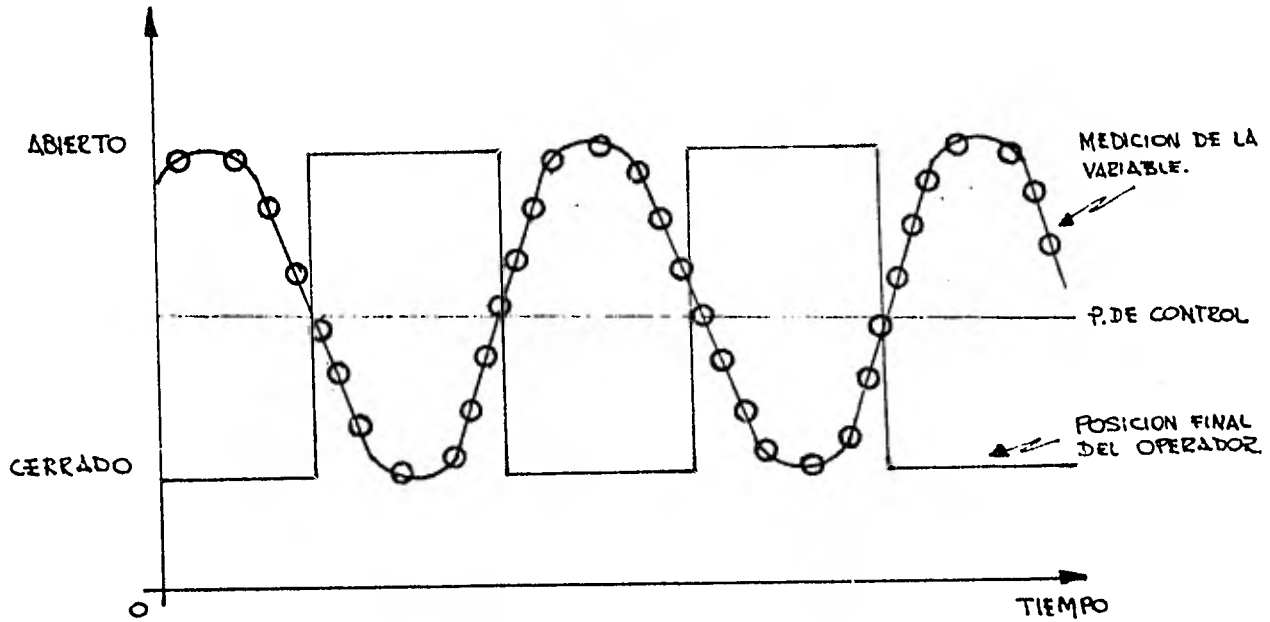
La abertura diferencial entre estos dos puntos de switcheo puede ser ajustable, y el punto de ajuste está en el punto medio de dicha abertura.

Acción de Control Proporcional:

El controlador con acción proporcional puro, es aquel en que la salida del controlador es proporcional a la entrada, o sea:

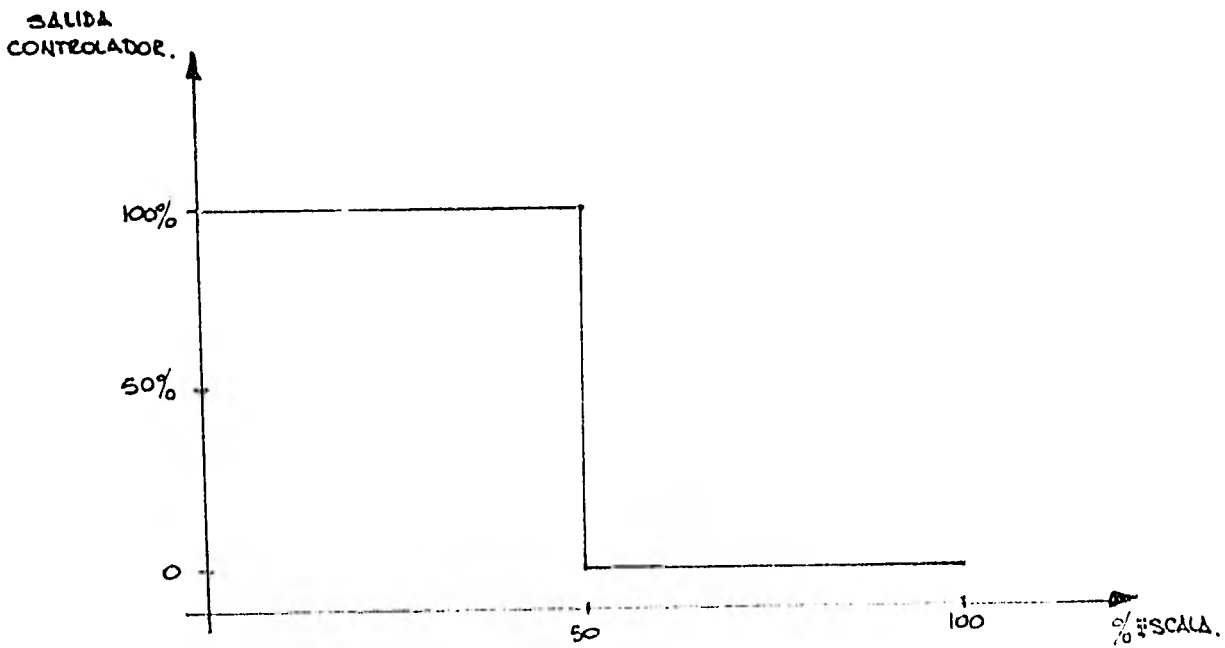
$$S = Ge + C$$





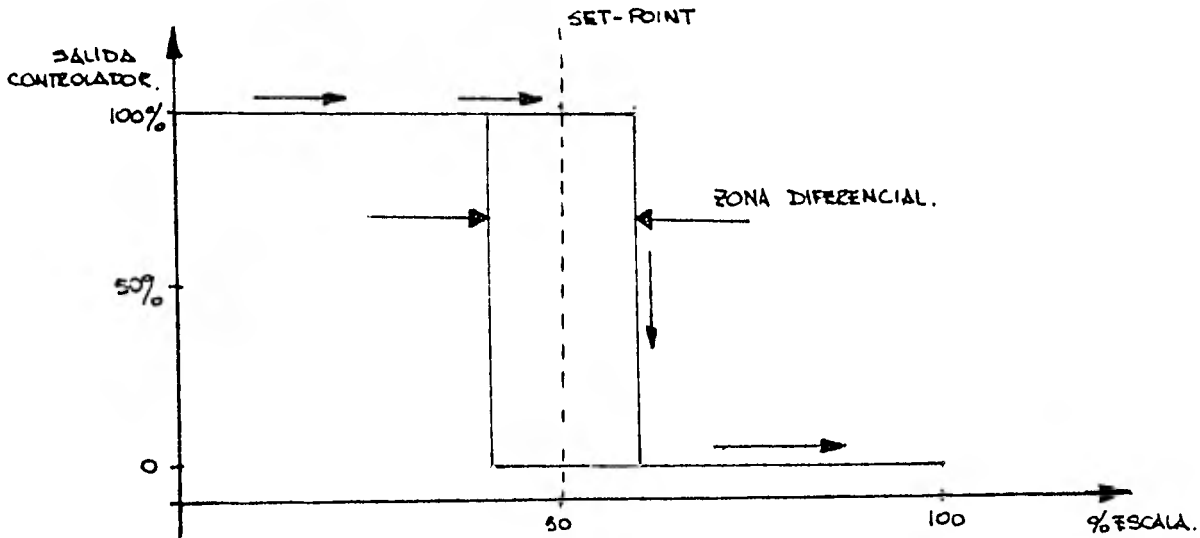
RESPUESTA DE UN CONTROL ABIERTO - CERRADO

FIG. NO. 3.2.1



ACCION DE DOS POSICIONES SIMPLE

FIG. NO. 3.2.2



ACCION DE DOS POSICIONES CON ABERTURA  
DIFERENCIAL

FIG. NO. 3.2.3

'G = Constantes de Proporcionalidad

e = Error ( e = E - P )

C = Constante de Calibración

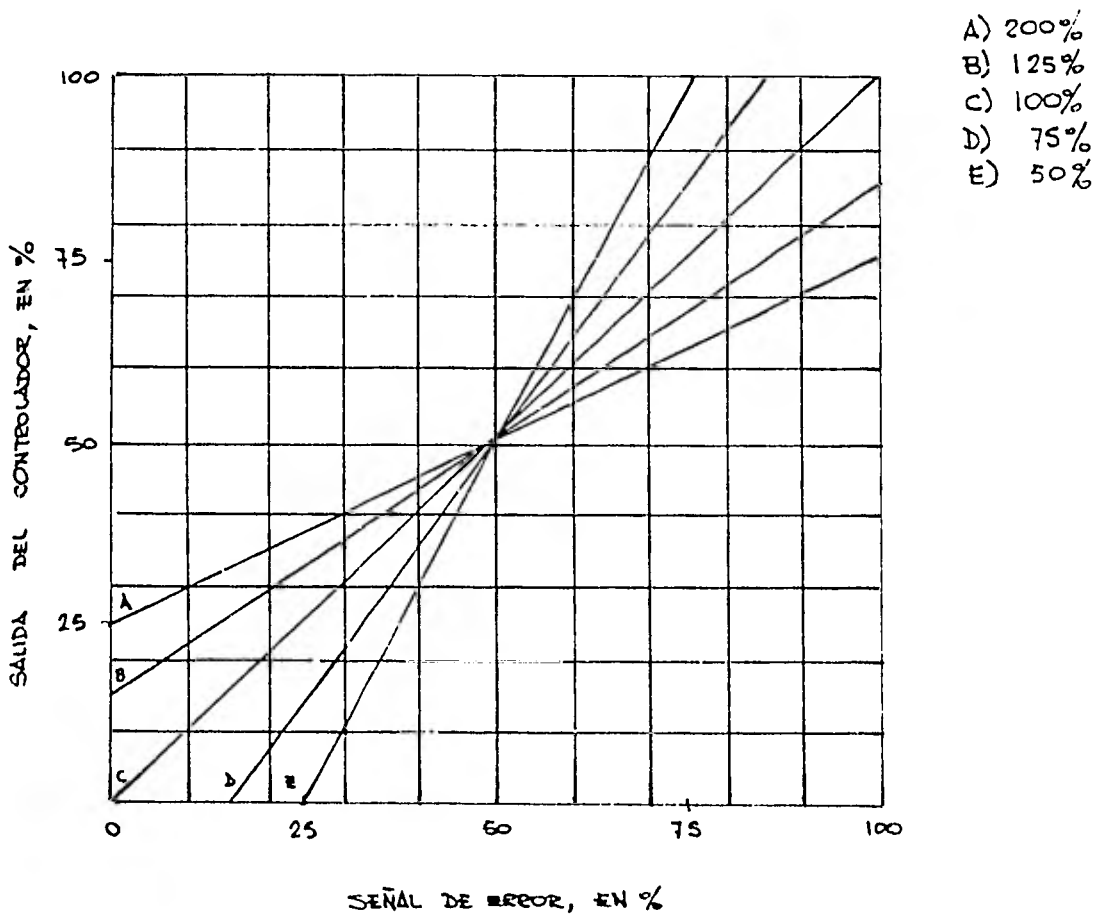
El rango de operación en el que se ejerce la acción de este controlador es la denominada "Banda proporcional", que es un porcentaje del rango total de la escala del dispositivo medidor.

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

$$\text{B.P.} = \frac{100}{G} \%$$

o sea que es el porcentaje de escala completa a través -- del cual debe fluctuar la variable controlada, para producir 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; esto se puede observar en la Figura No. 3.2.4.

B. PROPORCIONAL.

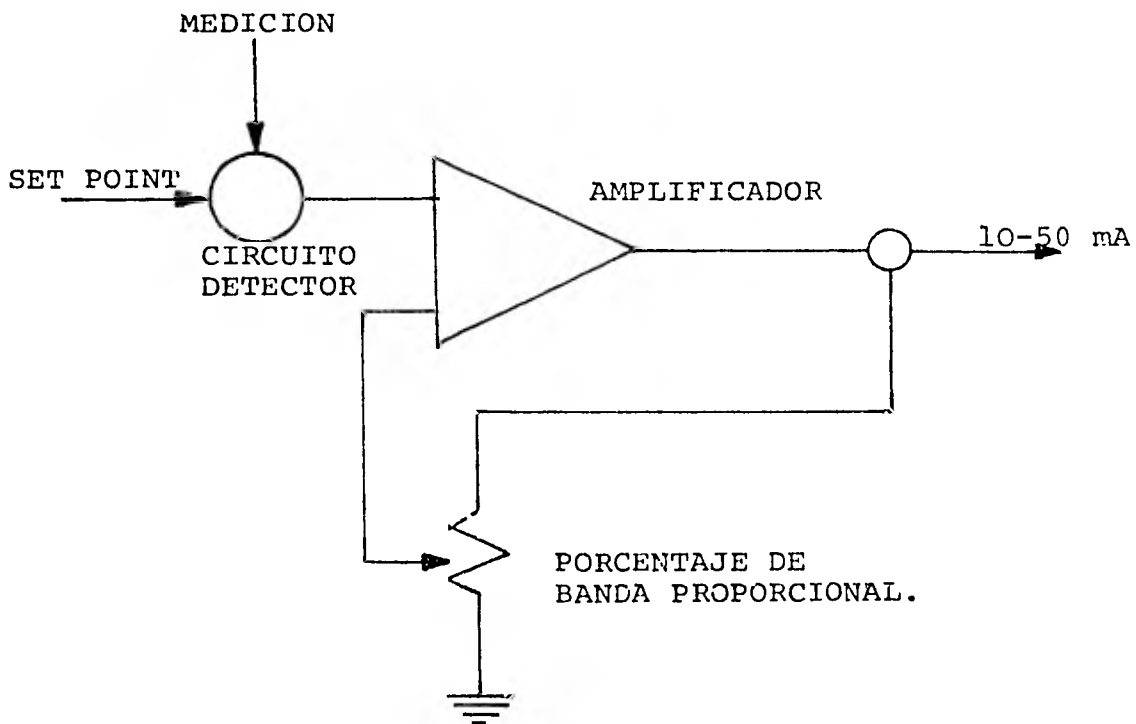


CARACTERISTICAS DE UN CONTROLADOR CON ACCION PROPORCIONAL PARA DIFERENTES VALORES DE B. P.

FIG, NO. 3.2.4

Generalmente el instrumento se alinea de modo que ocurra salida al 50% de la escala cuando el error es exactamente cero, aunque en ocasiones se incluye un reajuste manual para permitir salidas distintas a error cero; este reajuste manual se llama constante de calibración del controlador.

El controlador con acción proporcional, es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable, en donde la salida es proporcional a la señal del error.



CONTROLADOR PROPORCIONAL ELECTRONICO

FIG. NO. 3.2.5

En las figuras Nos. 3.2.6, 3.2.7 y 3.2.8, se muestran las acciones del control proporcional para tres tipos de bandas: ancha, moderada y angosta, y en ellas se nota que al llegar el control a la estabilización, siempre existe una

desviación. Esto se debe a que el control proporcional corrige cuando siente un cambio en el error de entrada, es decir, una desviación de la variable controlada, con respecto al punto de ajuste, y no habrá corrección si no hay desviación; en otras palabras, la desviación de la variable controlada es una característica del control proporcional.

En los controladores, la acción del control puede ser, tanto directa como inversa, al haber una variación de la variable controlada. Figura No. 3.2.9

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.

Acción de Control Integral o Reajuste Automático:

En este modo de control, la velocidad de cambio de salida varía proporcionalmente a la señal de error actuante, esto es:

$$S = F / edt + C$$

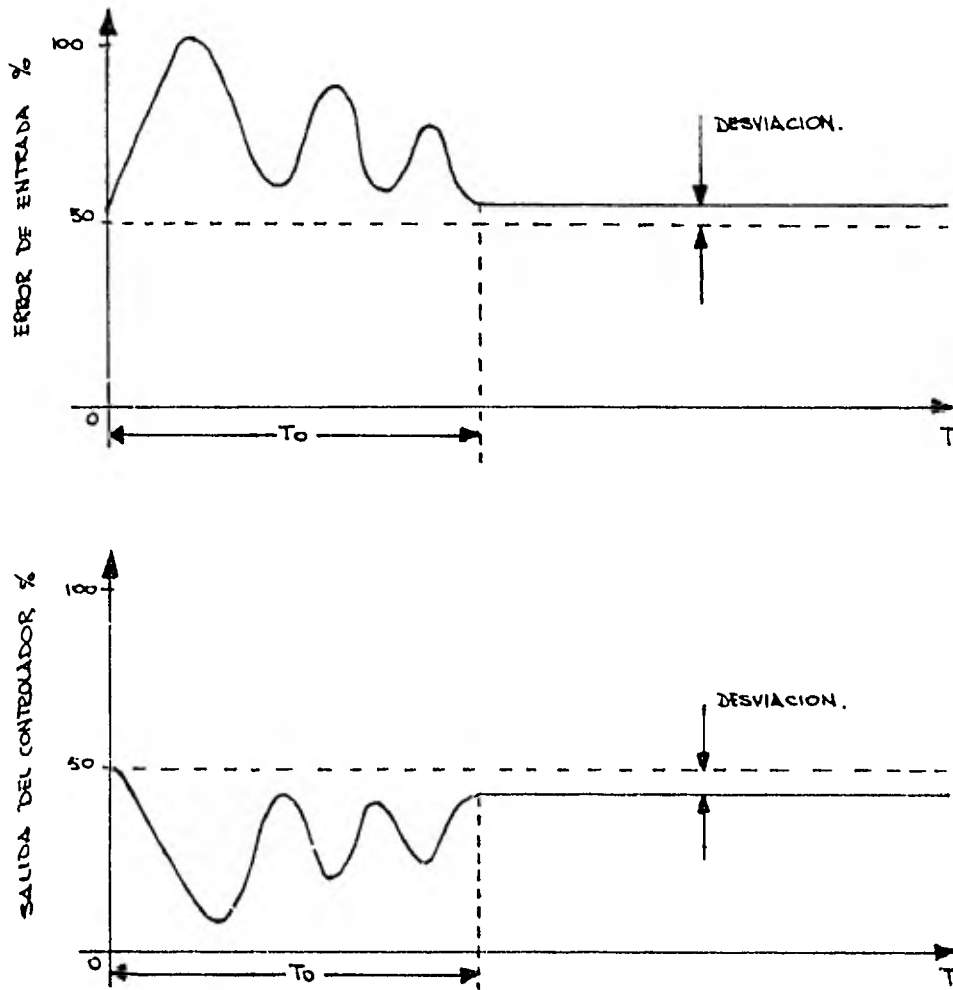
F = Constante de la Acción Flotante (Unidades están dadas repeticiones/por minuto.

C = Constante de Integración

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

- a) La desviación de la variable controlada.
- b) La duración de esta desviación.

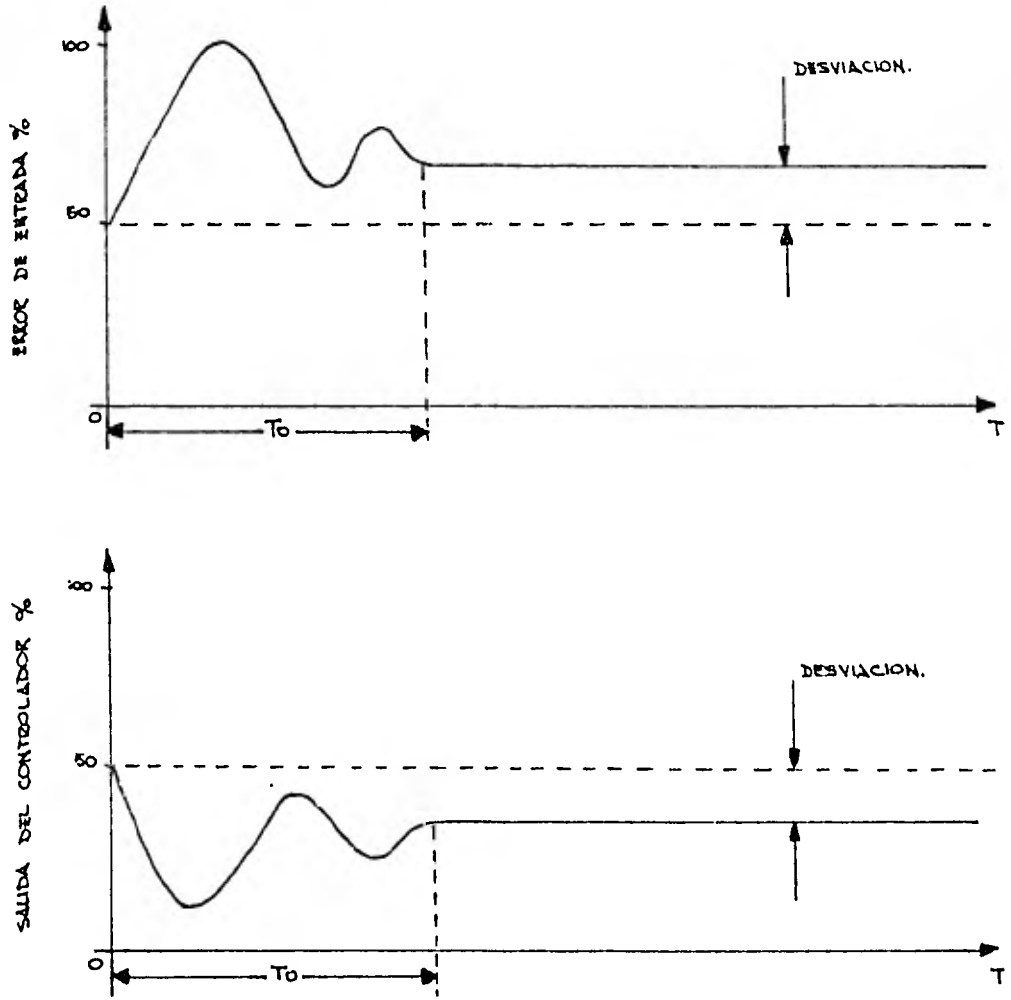
BANDA ANGOSTA



ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL CON  
BANDA ANGOSTA

FIG. NO. 3.2.6

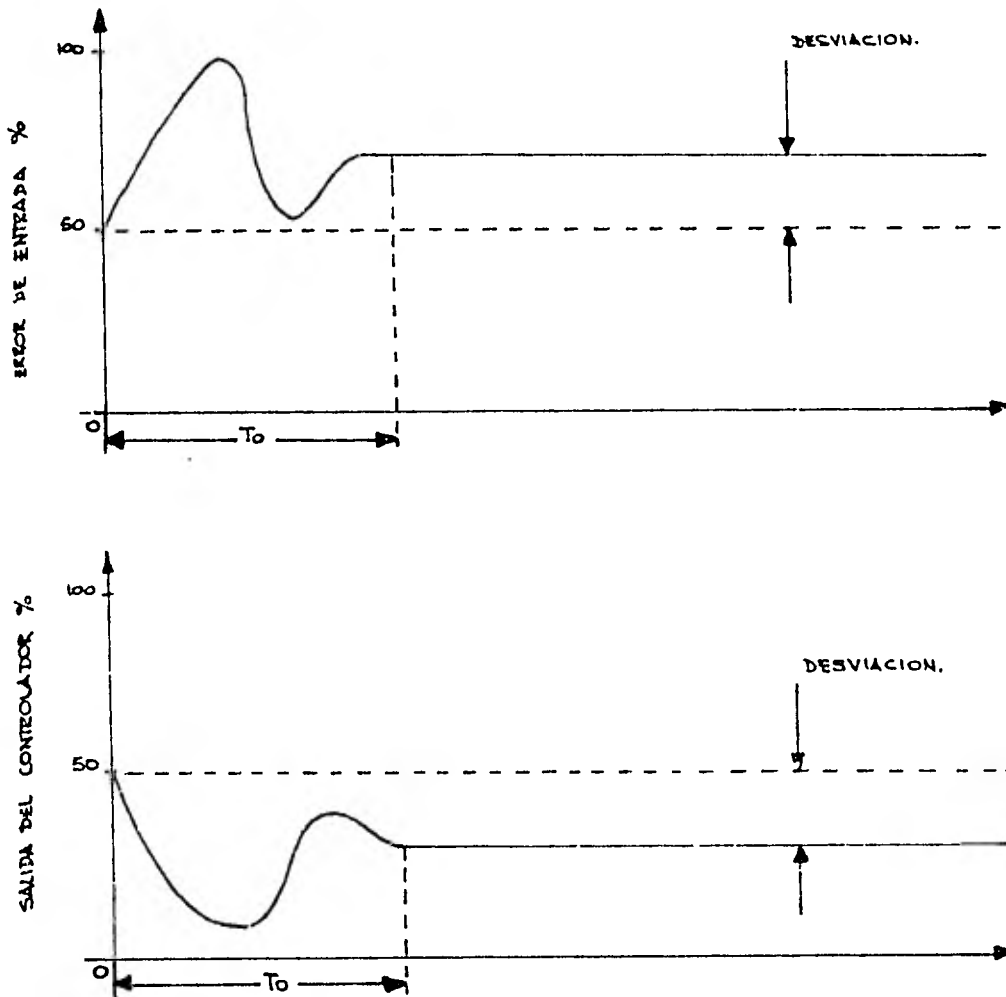
BANDA MODERADA



ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL CON BANDA MODERADA

FIG. NO. 3.2.7

BANDA ANCHA

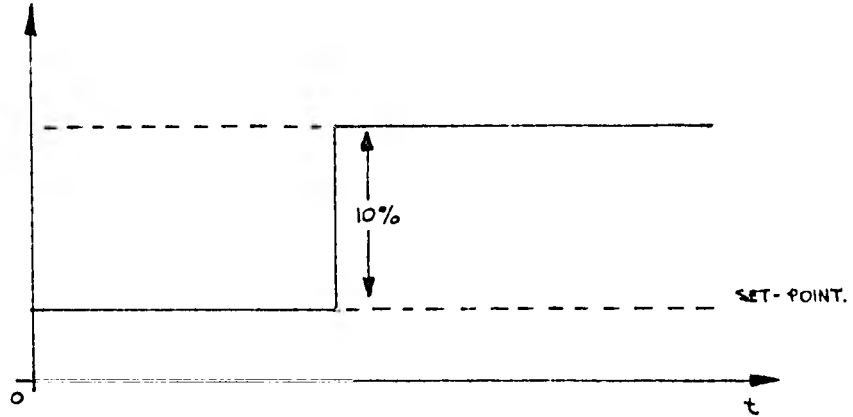


ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL CON BANDA ANCHA

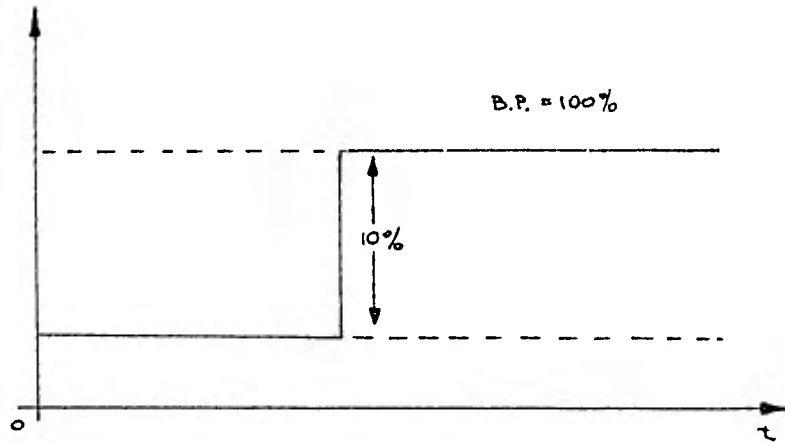
FIG. NO. 3.2.8



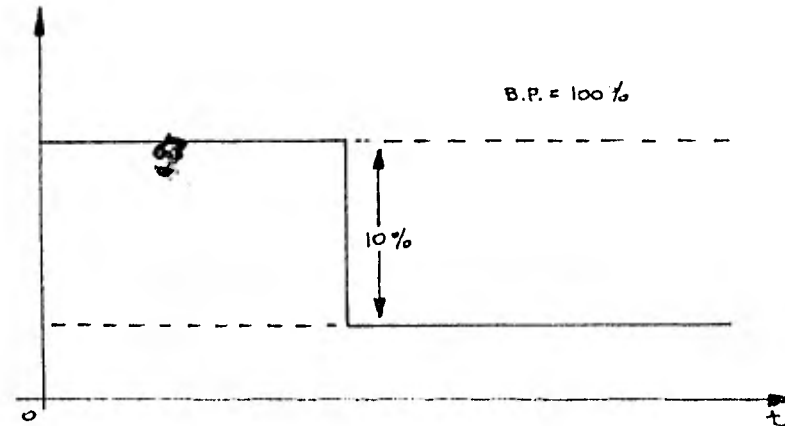
VARIABLE CONTROLADA



SALIDA DE CONTROLADOR (DIRECTA)



SALIDA DE CONTROLADOR (INVERSA)

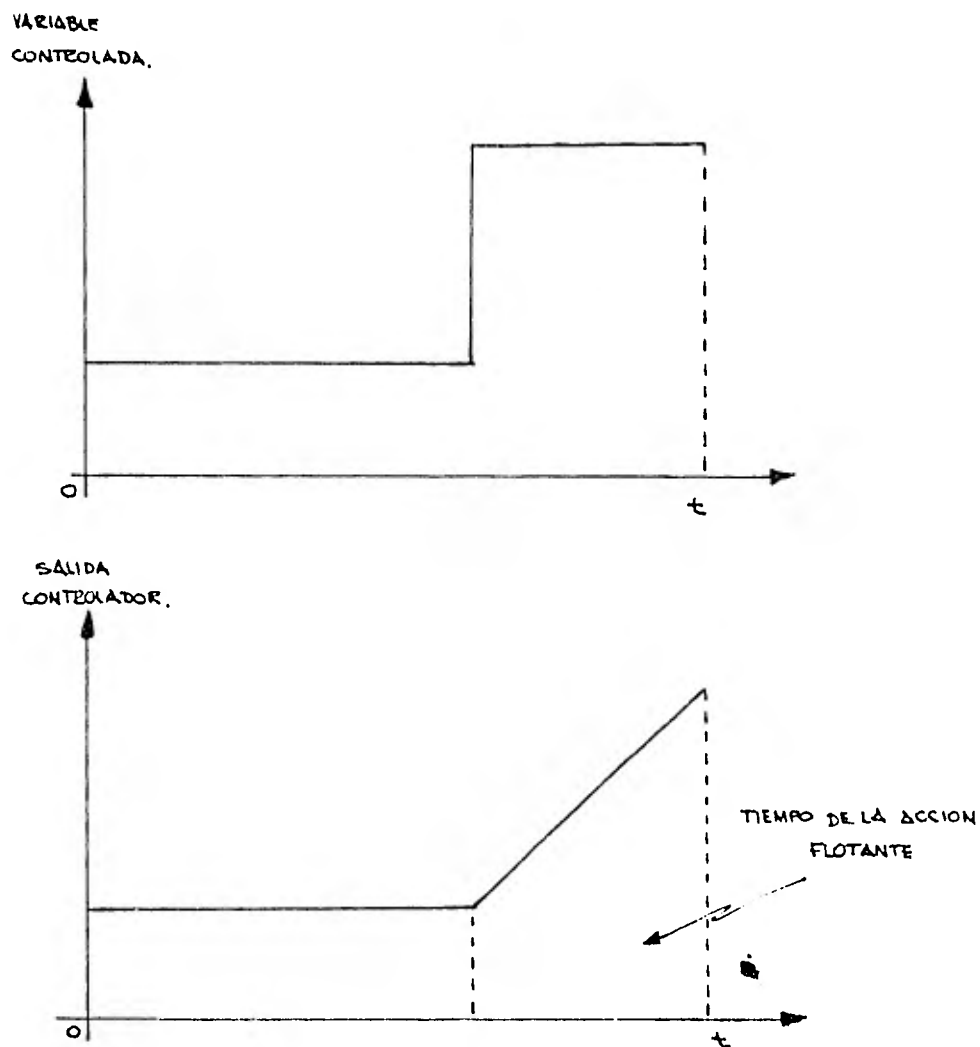


CONTROLADORES DE ACCIONES DIRECTA E INVERSA

FIG. NO. 3.2.9

La razón es porque, mientras mayor sea la desviación y -- más tiempo dure, mayor será la acción de velocidad proporcional o acción integral.

La acción del control integral se ve en la Figura No. 3.2.10, para un cambio brusco en la variable controlada.



CONTROLADOR INTEGRAL DE ACCION DIRECTA

FIG. NO. 3.2.10

### Acción de Control Proporcional más Integral:

Cuando a la acción proporcional pura se le suma la acción integral, se conoce como acción proporcional más reajuste automático y la acción de la salida del controlador toma la forma de:

$$S = F_p + \frac{F_p}{T_i} \int e \, dt + K_i$$

$F_p$  = Representa la sensibilidad proporcional o ganancia

$T_i$  = Es el tiempo integral, (Unidades son minutos por repetición)

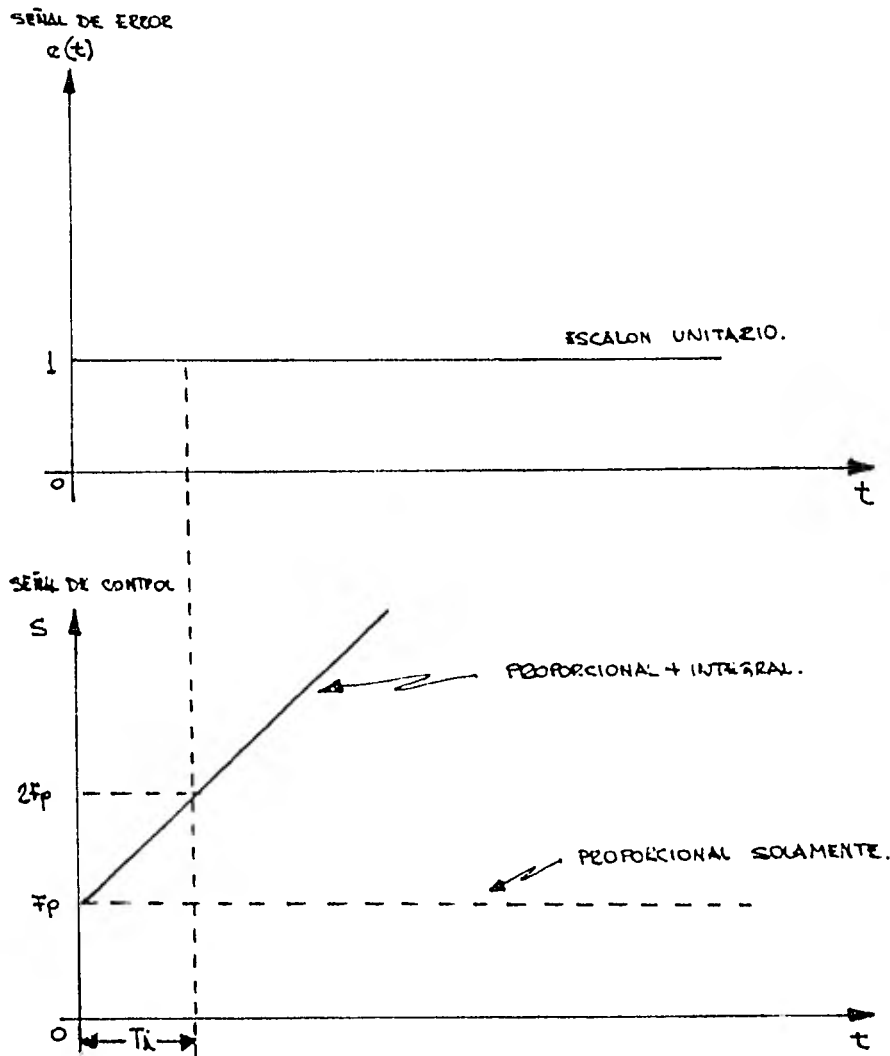
Tanto  $F_p$  como  $T_i$  son regulables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras una modificación en  $F_p$  afecta, tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control.

Al recíproco del tiempo integral,  $T_i$ , se le llama frecuencia de reposición. La frecuencia de reposición es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control, y se mide en términos de repetición por minuto.

La Figura No. 3.2.11, muestra la salida de un control de este tipo para una entrada  $e(t)$  escalón unitario. Se observa que después de transcurrido un tiempo igual a  $T_i$ , el valor de salida se duplica con respecto a la salida proporcional.

El control proporcional más integral, combina los efectos de las dos acciones de control para hacer que la respuesta del sistema ante las perturbaciones sea de buenas características.

La acción proporcional tiene por objeto proporcionar estabilidad y evitar un gran sobrepaso inicial de la señal de control, mientras que la acción integral tiene por objeto eliminar el error estacionario. La necesidad de añadir acción integral depende de la naturaleza del proceso y de la exactitud de control deseado



ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL + INTEGRAL

FIG. NO. 3.2.11

### Acción de Control Proporcional más Derivativo:

Generalmente, existen procesos que se caracterizan por -- sus atrasos presentados en la detección y transmisión de la variable controlada. Para compensar estos tiempos -- muertos es necesario que el controlador actúe inmediatamente, que detecte un cambio respecto al punto de ajuste y que se anticipe al efecto que pudiera producir un cambio de carga en un proceso con tiempo muerto. Para resolver este problema empleamos el control derivativo.

La acción de control proporcional más derivativa, queda definida por la siguiente ecuación:

$$S = F_p e(t) + F_p T_d \frac{de(t)}{dt} + C$$

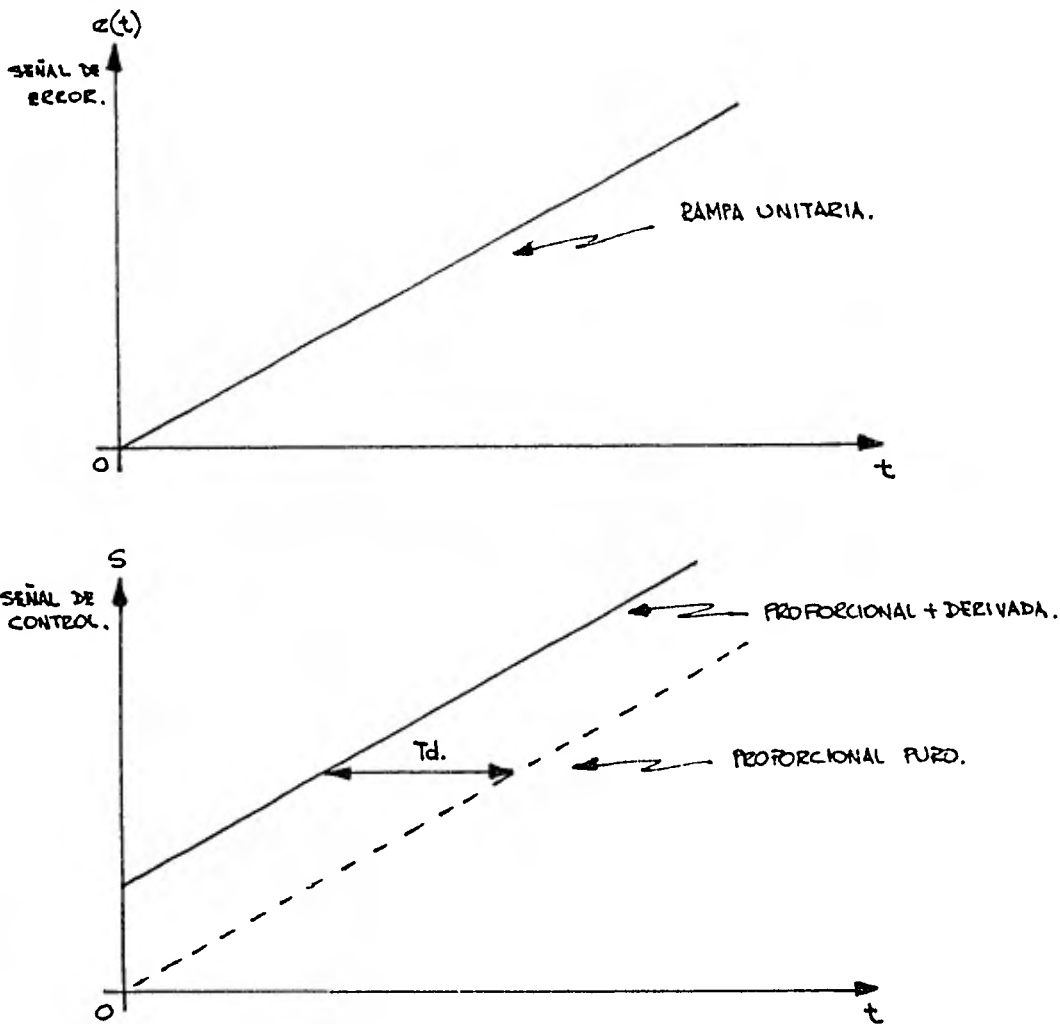
donde:

- S = Salida del controlador
- F<sub>p</sub> = Ganancia del controlador
- T<sub>d</sub> = Tiempo derivativo

El tiempo derivativo T<sub>d</sub>, es el intervalo de tiempo en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional.

En la Figura No. 3.2.12, se muestra la salida (S) de este controlador, para una señal de error actuante de tipo rampa unitaria.

Como puede observarse, la acción de control derivativo -- tiene carácter de anticipación. Sin embargo, la acción derivativa nunca puede anticiparse a una acción que aún no ha tenido lugar; por esta razón, nunca se puede tener una acción de control derivativa sola.



CONTROLADOR PROPORCIONAL MAS DERIVATIVO A  
UNA SEÑAL DE ERROR TIPO RAMPA

FIG. NO. 3.2.12

Acción de Control Proporcional más Derivativa,  
más Integral:

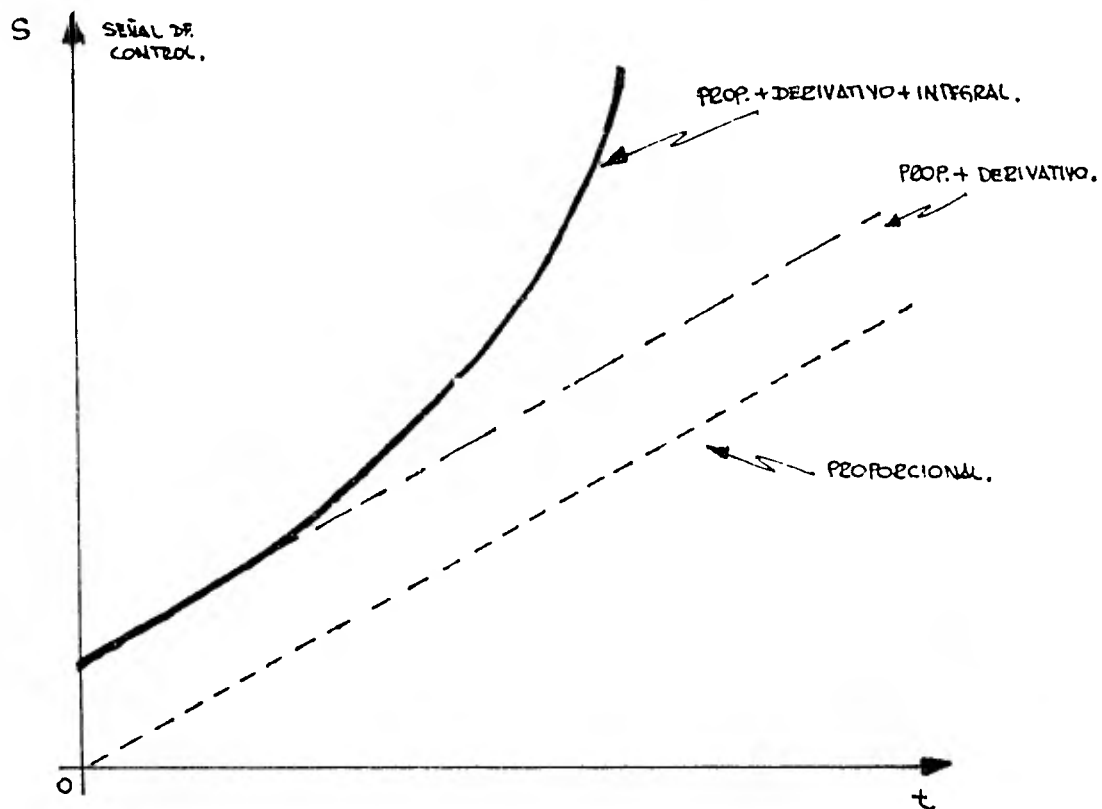
La combinación de las tres acciones de control, proporcio-  
na un modo de control más fino, ya que el controlador pro-  
porcional más derivativo tiene la característica de que no  
elimina la desviación sostenida, por lo que es conveniente

sumarle la acción integral, la cual tiene la característica de repetir en un tiempo determinado la acción proporcional, eliminando de esta manera, la desviación final.

La ecuación que describe este modo de control es:

$$S = F_p e(t) + \frac{F_p}{T_i} \int e(t) dt = F_p T_d \frac{de(t)}{dt} + (K + C)$$

La figura No. 3.2.13 muestra la respuesta de un controlador proporcional más integral más derivativo, para una señal de error, tipo rampa unitaria.



CONTROLADOR PROPORCIONAL MAS INTEGRAL MAS DERIVATIVO A UNA SEÑAL DE ERROR TIPO RAMPA

FIG. NO. 3.2.13

### 3.3 Modos de Control: Aplicaciones 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 casos típicos de comportamiento dinámico de proceso, se describen a continuación:

#### Retraso de Capacitancia.

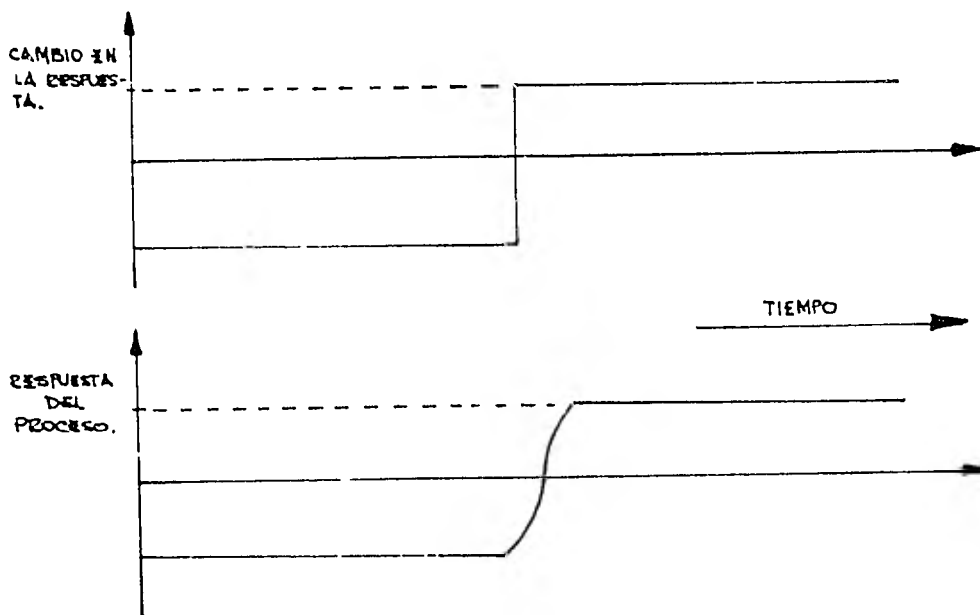
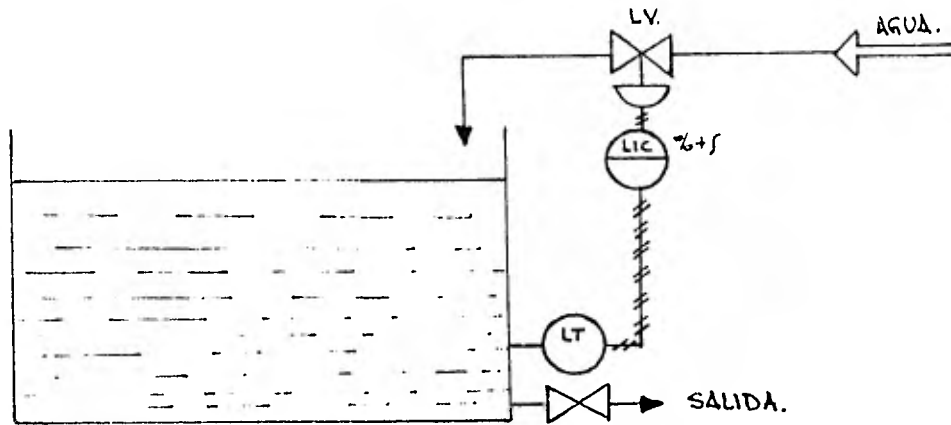
Este comportamiento se caracteriza por un efecto de amortiguación causado por el almacenamiento de fluido o energía en el proceso. Si la variable controlada es el nivel de un tanque con tiempo de almacenamiento relativamente grande, es claro que ningún cambio en el flujo de entrada, puede ser causa de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

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

#### Retraso de Medición.

Este tipo de respuesta produce una contestación a un cambio en la entrada como se muestra en la Figura No. 3.3.2, inicialmente sólo hay un cambio pequeño, pero ocurre un incremento posterior hasta que se alcanza una pendiente máxima, decreciendo posteriormente en una forma similar a

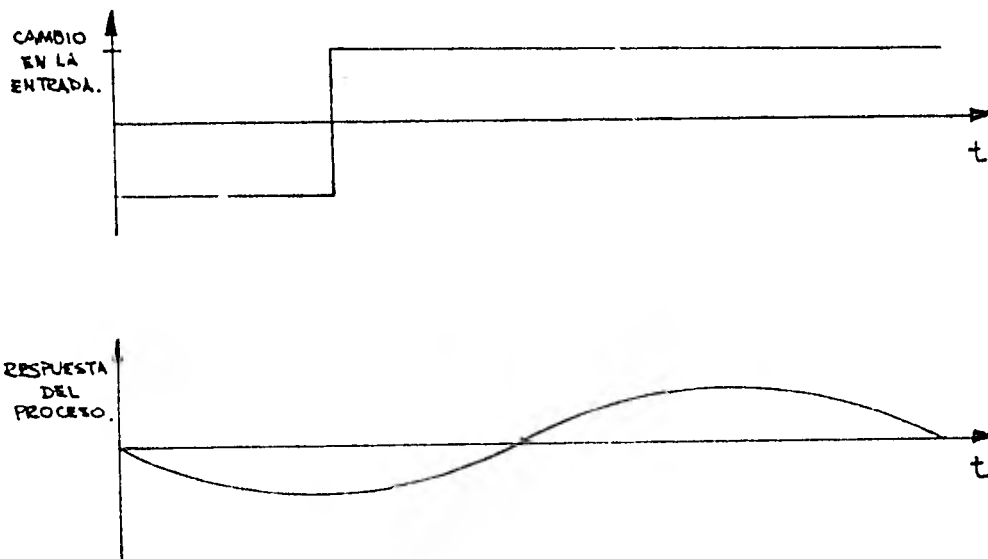
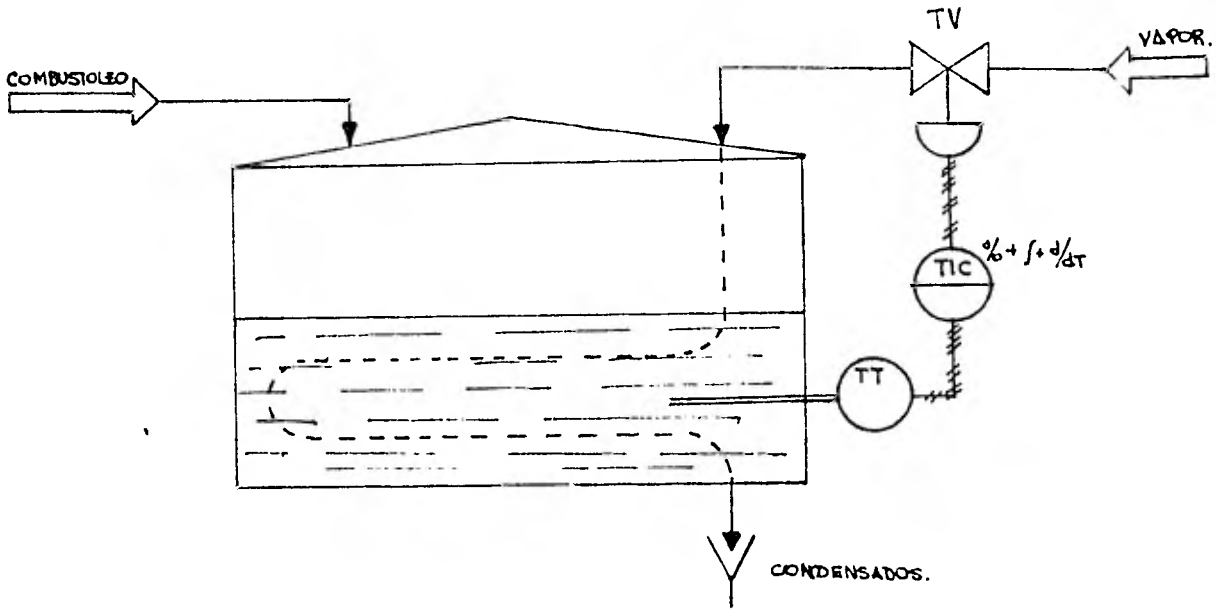




COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO  
CON RETRASO DE CAPACITANCIA

FIG. NO. 3.3.1

la curva para el retraso de la capacitancia. La mayor respuesta viene mucho después en un sistema con retraso de medición, por lo que es una buena selección, generalmente un controlador con acción proporcional más rate.



COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO  
CON RETRASO DE MEDICION

FIG. NO. 3.3.2

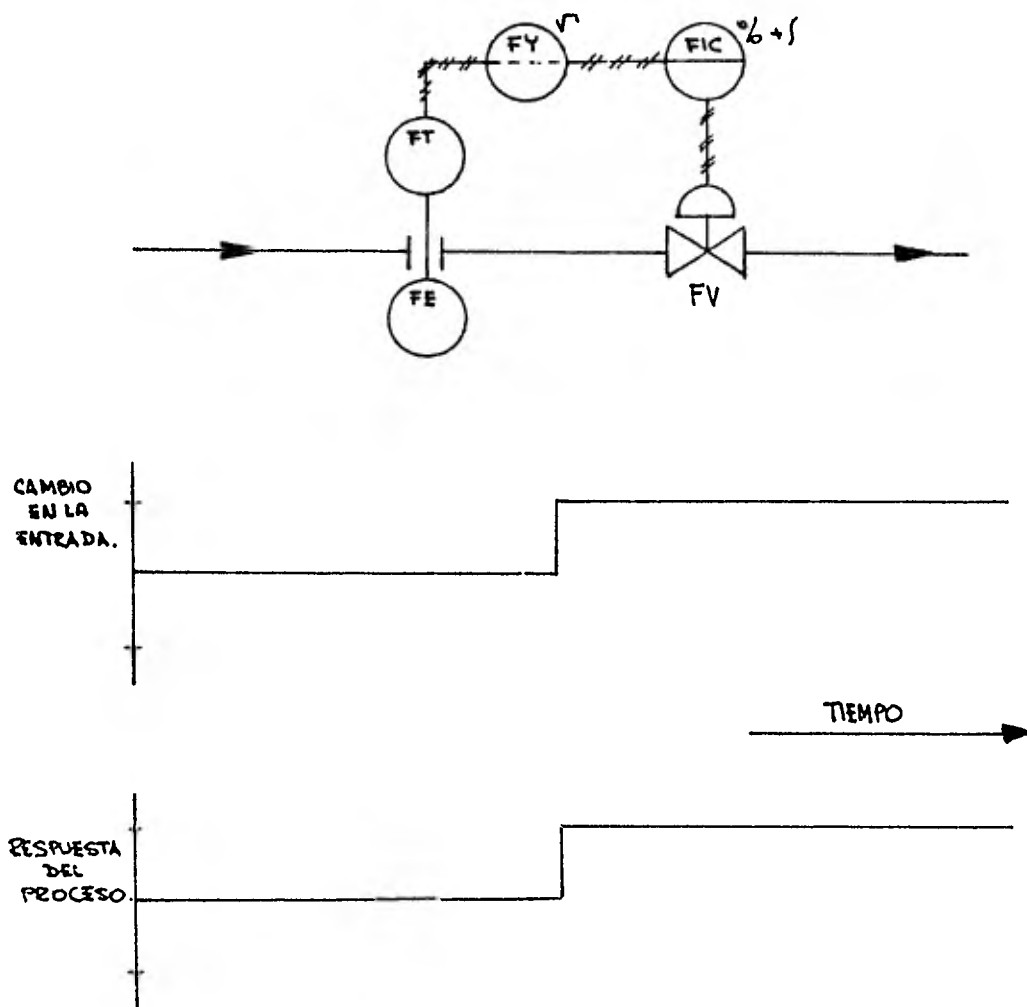
La acción de rate siente la pendiente de la curva de respuesta y provee una corrección adicional a la válvula mucho más rápido, que la que puede ser alcanzada con la acción proporcional solamente. El tamaño de la banda proporcional requerido para una buena estabilidad, puede ser de 10 por ciento o más, y si es este el caso, debe agregarse reajuste automático para evitar la desviación asociada -- con ajustes de banda proporcional ancha; por lo que el -- controlador tendrá tres modos proporcional, reajuste y rate.

#### Respuesta Instantánea.

El 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. 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 éstos tienen respuestas rápidas, 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 puedan ocurrir con tales bandas proporcionales tan -- amplias; por lo que los controladores proporcionales con reajuste automático son lo mejor que se puede seleccionar por control de flujo y presión de líquidos en tuberías.

#### Retraso de Velocidad-Distancia.

A veces 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



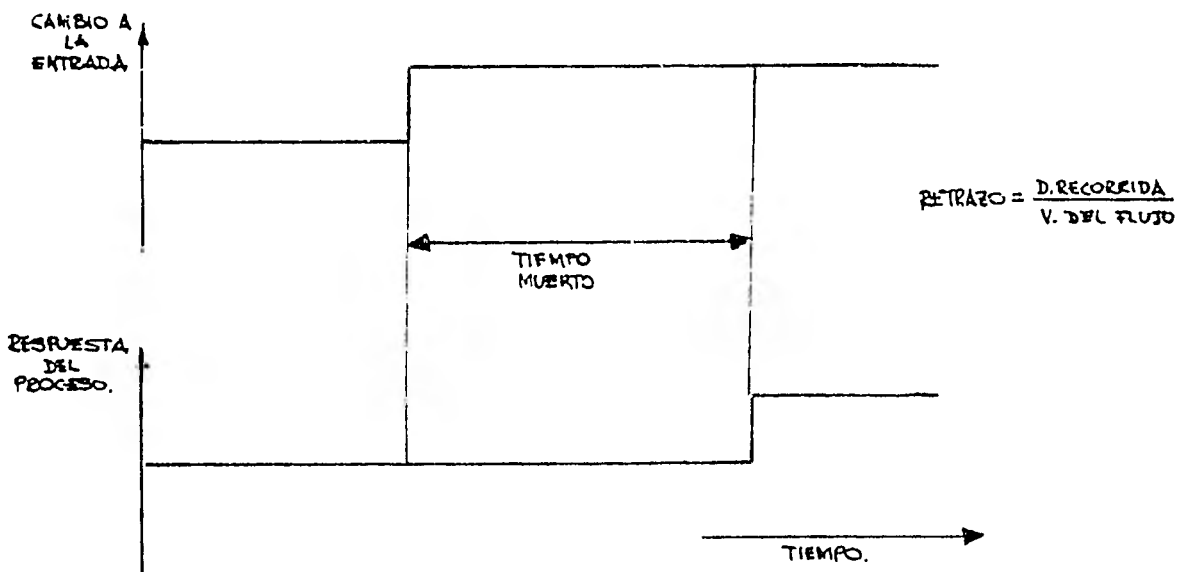
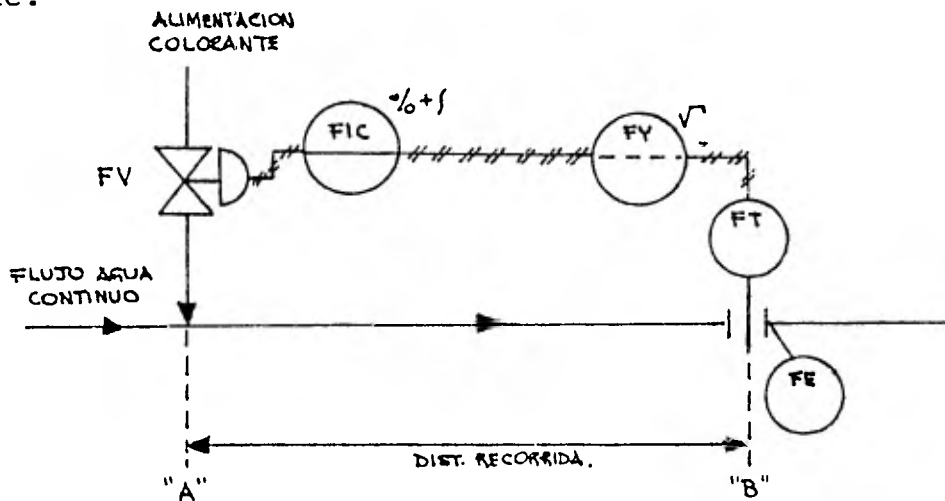
COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO CON  
RESPUESTA INSTANTANEA

FIG. NO. 3.3.3

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 --disturbancia nunca empezará a corregirse mientras no --transcurra el tiempo muerto y lo mejor que puede hacerse, es evitar las perturbancias mayores y abruptas si es posible.



COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN PROCESO CON RETRASO DE VELOCIDAD-DISTANCIA

FIG. NO. 3.3.4

## CAPITULO 4

## CONTROL AUTOMATICO COMPUESTO

## 4.1 Sistemas de Control Automático Compuesto.

El funcionamiento de un sistema de control está determinado por la naturaleza del sistema, las características del controlador y la localización y magnitud de las perturbaciones. Algunas, veces, el funcionamiento de un sistema de control retroalimentado simple puede mejorarse considerablemente mediante cambios relativamente pequeños, tales como, la reducción de un retraso de tiempo, agregar acción derivativa al controlador, etc.; sin embargo, algunas situaciones no pueden ser manejadas por un control de retroalimentación simple; la mayor desventaja es la necesidad de que exista una desviación del punto de control antes de que se desarrolle cualquier acción correctiva. Cuando no hay atrasos de tiempo muerto apreciables en el circuito, la detección y corrección del error se hace sin dificultad, pero cuando los retrasos en el proceso, debidos a tiempos muertos son más largos que la perturbación de la variable, un control de retroalimentación simple no puede regular los desajustes resultantes. Las correcciones al proceso se hacen mucho después de que resulten efectivas, y cuando el efecto en la variable controlada es detectado por el elemento primario, los requerimientos del proceso pueden ser diferentes. Por esta causa, se han desarrollado sistemas de control más complejos, capaces de resolver los problemas que el control simple no puede solucionar.

Existen varios tipos: cascada, relación, rango dividido, impulso con aviso de señal, predominio, ciclo de tiempo, punto final; aquí se describen los tres primeros, que son

los más utilizados en la industria en general.

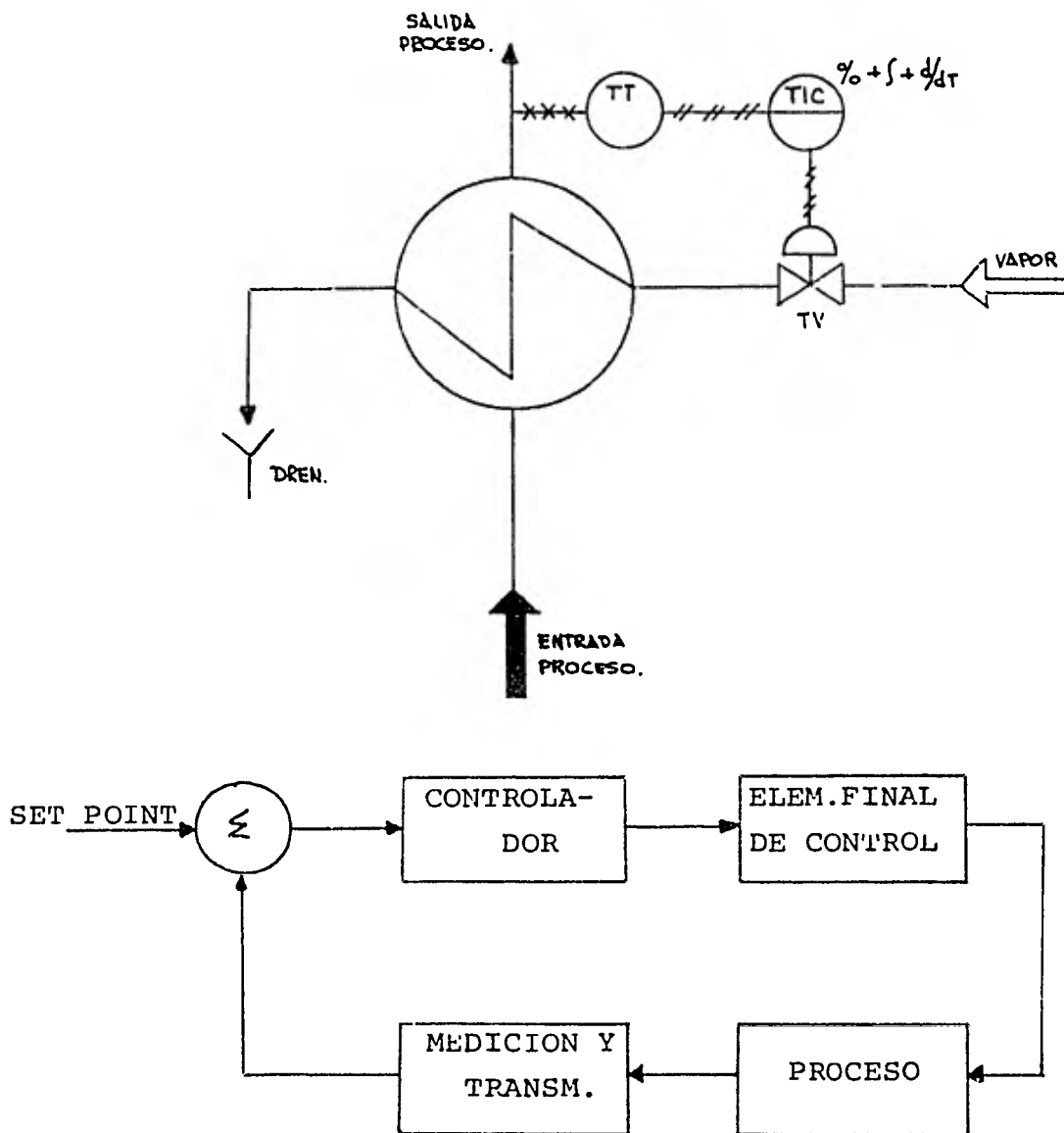
#### 4.2 Control de Cascada.

Una situación típica en la cual el control de retroalimentación simple no es satisfactorio, se muestra en la Fig. No. 4.2.1, en el cual se muestra un control de temperatura de un recipiente calentado a vapor. Aquí el elemento sensible a la temperatura (bulbo de un sistema termal), se muestra en la descarga del calentador continuo, aunque podría estar sumergido en el líquido del 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 (punto de ajuste), y después hace las correcciones, dependiendo si existe error, como se muestra en el diagrama de bloques, donde 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.
2. El tiempo que transcurra para el bulbo (elemento sensor) pueda detectar totalmente el cambio de temperatura como consecuencia de un cambio de carga, o de alguna otra perturbancia (Retraso de Medición).

Aunque el controlador pudiera corregir los retrasos en la medición, por medio de la acción de derivada (control anticipatorio), no podría hacerlo, por las variaciones en la demanda del vapor, y si éstas persisten, el resultado será una oscilación en la variable controlada que podría eventualmente (en caso de ser de amplitud constante), ser tolerada. En algunos casos, pero no en otros, existen

do inclusive el riesgo de que la oscilación se pudiera con vertir en divergente (la condición ideal es la convergente) y el sistema se saliera totalmente de estabilidad.



SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DIRECTO EN UN CALENTADOR DE VAPOR

FIG. NO. 4.2.1



Una de las técnicas para incrementar la estabilidad de un control como el descrito en los párrafos 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, el efecto de retraso de tiempo.

El sistema en cascada consta básicamente de un arreglo -- primario-secundario (o maestro-esclavo), y se puede observar en la Figura No. 4.2.2 el nuevo arreglo, en los cuales 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 se ve, un sistema de respuesta lenta es conectado en cascada con -- otro de respuesta rápida.

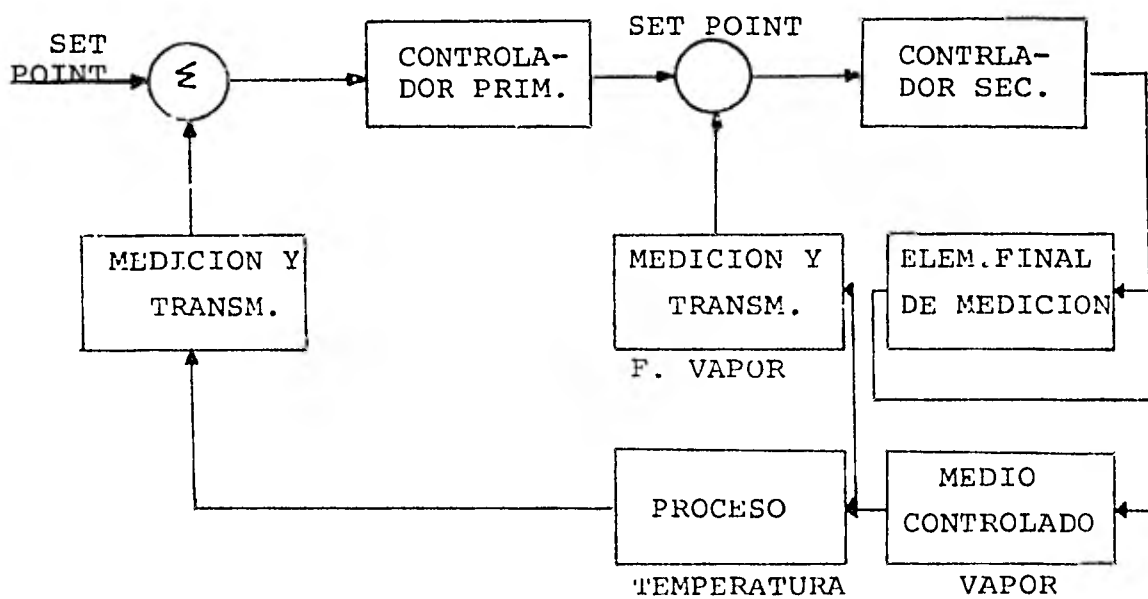
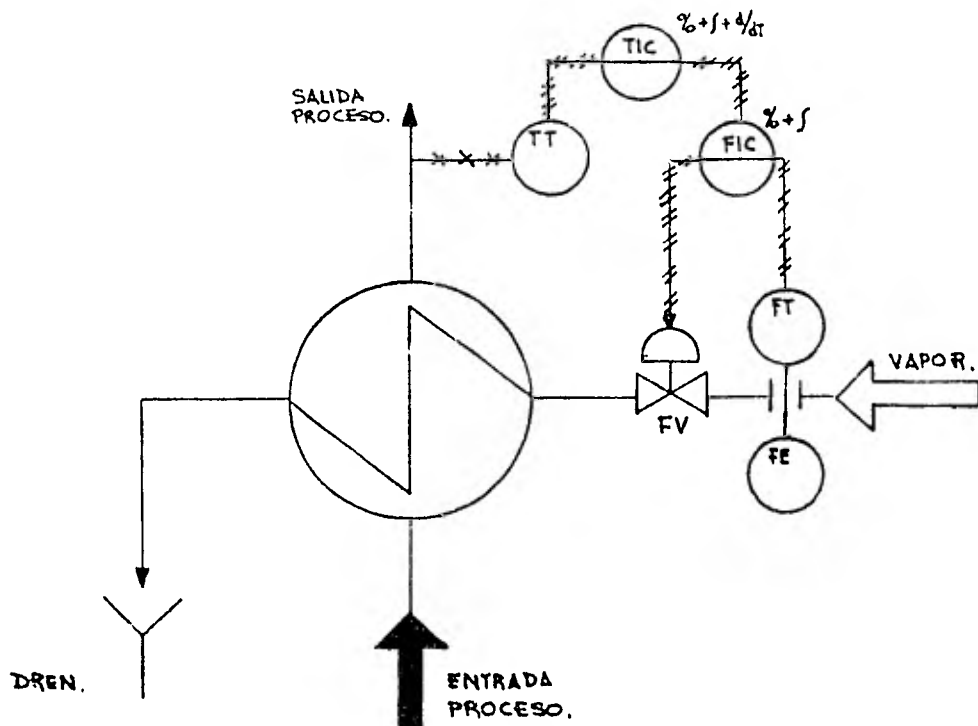
Los sistemas de control en cascada pueden ser de un solo controlador "MAESTRO", ajustando los Set-Points de varios controladores "ESCLAVOS".

#### 4.3 Control de Relación.

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

Con Estación de Relación.

En estos sistemas se controla una variable dependiente con otra variable independiente; en la Figura No. 4.3.1 se observa que el gas es el flujo independiente y el agua, el flujo dependiente, este es un caso de una torre de absorción, en el cual para cada variación en el flujo de gas,



SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA  
TEMPERATURA-FLUJO

FIG. NO. 4.2.2

existe una cantidad equivalente de agua.

La unidad de control de relación es a menudo una componente separada (Estación de Relación), aunque puede integrarse en un instrumento. La señal del transmisor independiente es relacionada (o multiplicada) por un factor que se ajusta en el estación de relación, ya sea manual o automáticamente, y este valor se convierte en el punto de ajuste 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:

$$\text{LECTURA DE RELACION} = \frac{(Rc) (Cv)}{(Rv) (Ce)}$$

En donde:

Rc = Flujo Controlado (dependiente)

Rv = Flujo No Controlado (Independiente)

Cv = Capacidad Máxima del Transmisor No Controlado

Ce = Capacidad Máxima del Transmisor 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:

$$\text{LECTURA DE RELACION} = \frac{Rc \cdot Cv}{Rv \cdot Ce} = \frac{1 \times 2}{4 \times 1} = 0,5$$

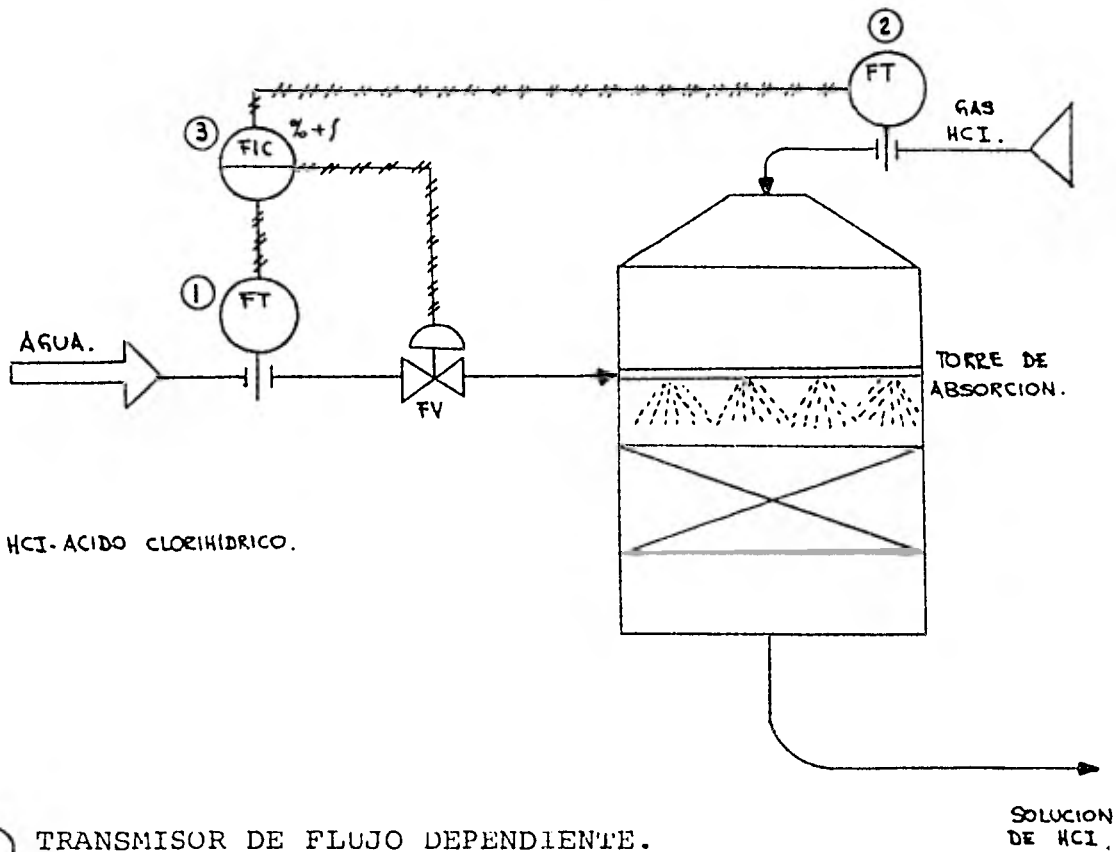
Existen tres Limitaciones para el Uso de Controles con Estación de Relación:

1. Ambas señales deben tener las mismas unidades (M<sup>3</sup>/HR, KG/HR, Etc.)
2. Deben tener las mismas características (Cuadrática o Lineal)
3. La gamabilidad del transmisor (Flujos de 1 unidad a 5 unidades con medición precisa)

La relación puede ser ajustada automáticamente en muchos circuitos de proceso, siendo un caso tipo el control de AIRE-COMBUSTIBLE para un quemador, con control de parte o total:

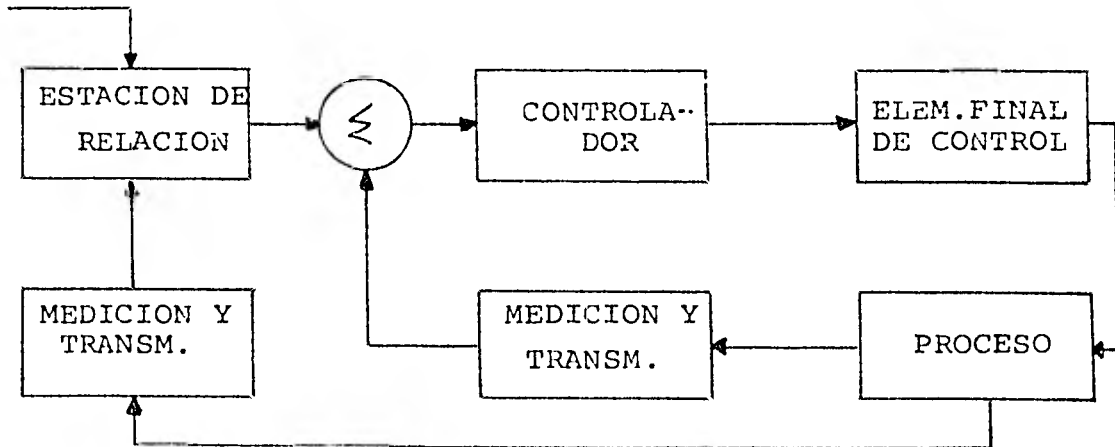
Una variante de la estación de relación, es el caso de control de parte o total, y se usa en dos situaciones principalmente:

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.
  - . El flujo puede ser altamente corrosivo.
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 el flujo total y también conocer qué tanto de este flujo total contiene un cierto porcentaje de la componente deseada.



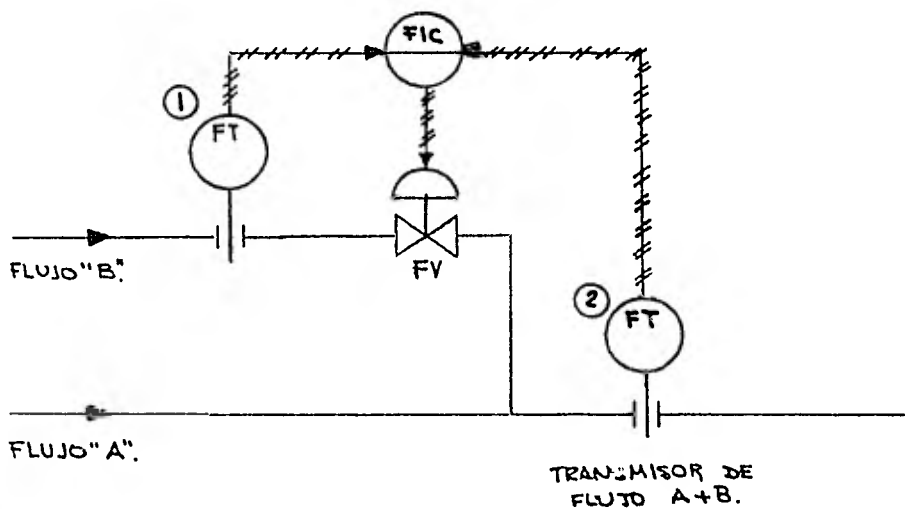
- ① TRANSMISOR DE FLUJO DEPENDIENTE.
- ② TRANSMISOR DE FLUJO INDEPENDIENTE.
- ③ CONTROLADOR DE FLUJO CON ESTACION DE RELACION.

AJUSTE DE RELACION



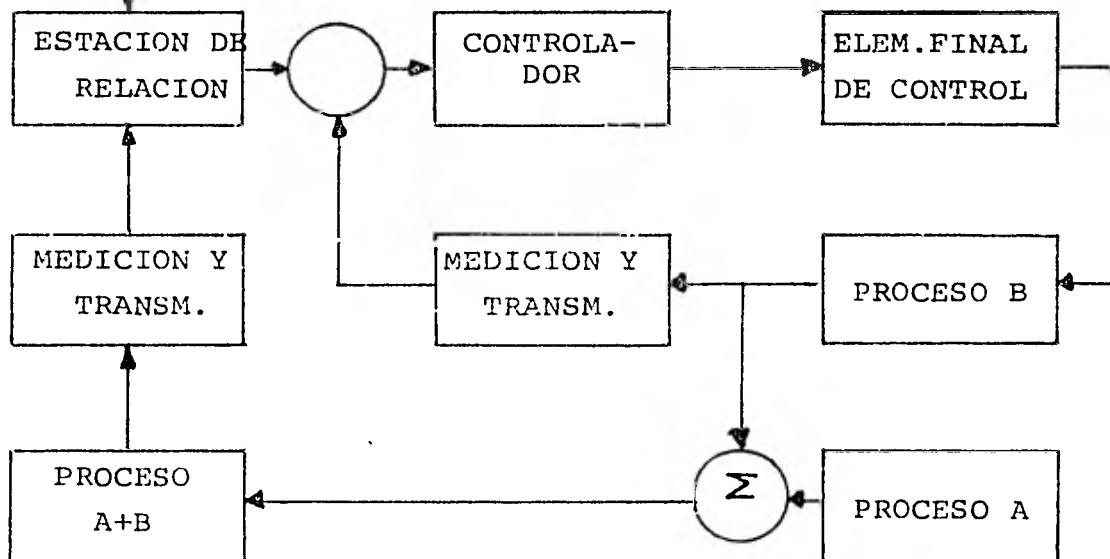
SISTEMA DE CONTROL CON ESTACION DE RELACION

FIG. NO. 4.3.1



- ① FLUJO "B" DEPENDIENTE.
- ② FLUJO "A" INDEPENDIENTE.

AJUSTE DE RELACION



SISTEMA DE CONTROL DE RELACION PARTE A  
TOTAL DE DOS PRODUCTOS

FIG. NO. 4.3.2

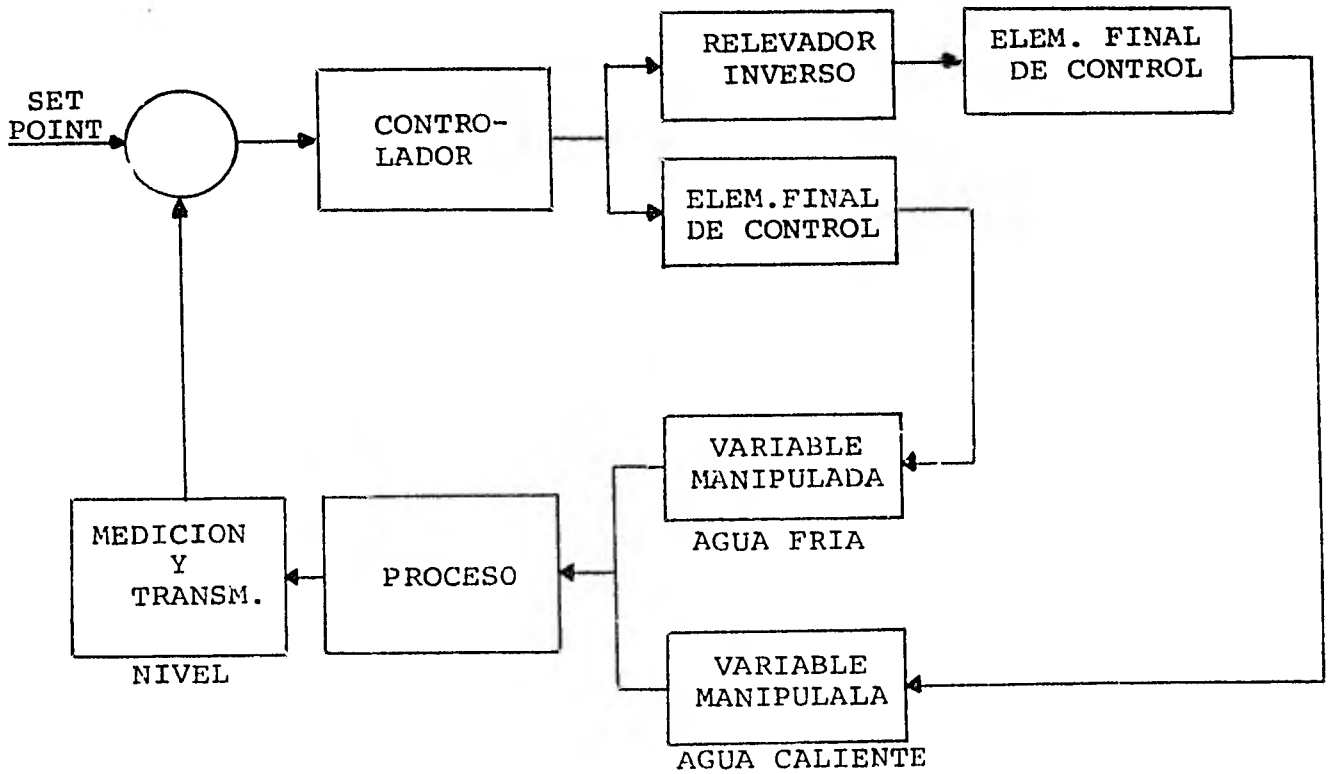
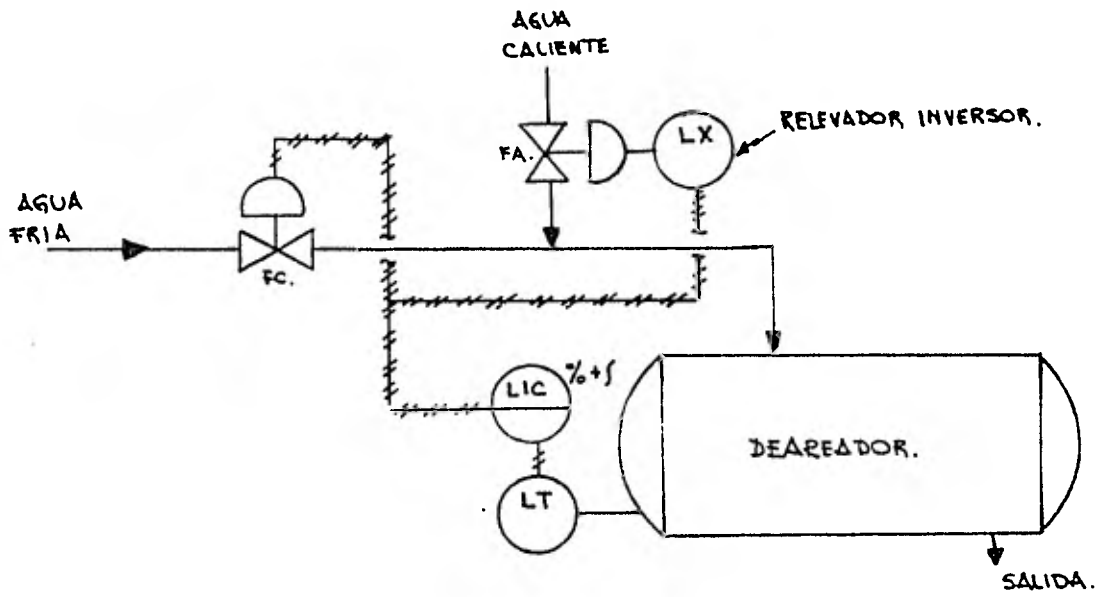
De Rango Dividido.

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.

En la Figura No. 4.3.3, se ilustra un sistema en el cual - se selecciona la mejor fuente de agua para un calentador - deareador de agua de alimentación. A medida que el nivel - en el calentador-deareador comienza a disminuir, agua ca-- liente del tanque correspondiente se empieza a agregar pa-- ra permitir cambios de nivel normales, el uso de agua ca-- liente evita desajustes de temperatura en el sistema de - deareación que puedan causar dificultades en el proceso, sin embargo, si la demanda de agua deareada pudiera persis-- tir y el nivel continuará fallando, la línea de agua calien-- te no sería la adecuada por más tiempo y en este punto se deberá agregar agua fría a la línea de servicios auxilia-- res.

Este sistema involucra la utilización de un rango de válvu-- la de media escala y un relevador inversor. También, la ac-- ción de la válvula se selecciona de modo que ésta se vuel-- ve 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 arri-- ba 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%. Si hubiera algún nivel mínimo en el calentador, ambas válvulas estarán ampliamente abiertas.



SISTEMA DE CONTROL EN RANGO DIVIDIDO

FIG. NO. 4.3.3



#### 4.4 De Predominio.

En algunos procesos es necesario limitar el valor de una cierta variable (valor alto o bajo), para evitar daños en el producto o llegar a puntos inestables en el proceso, en estos casos se impone el uso de un sistema de control de predominio.

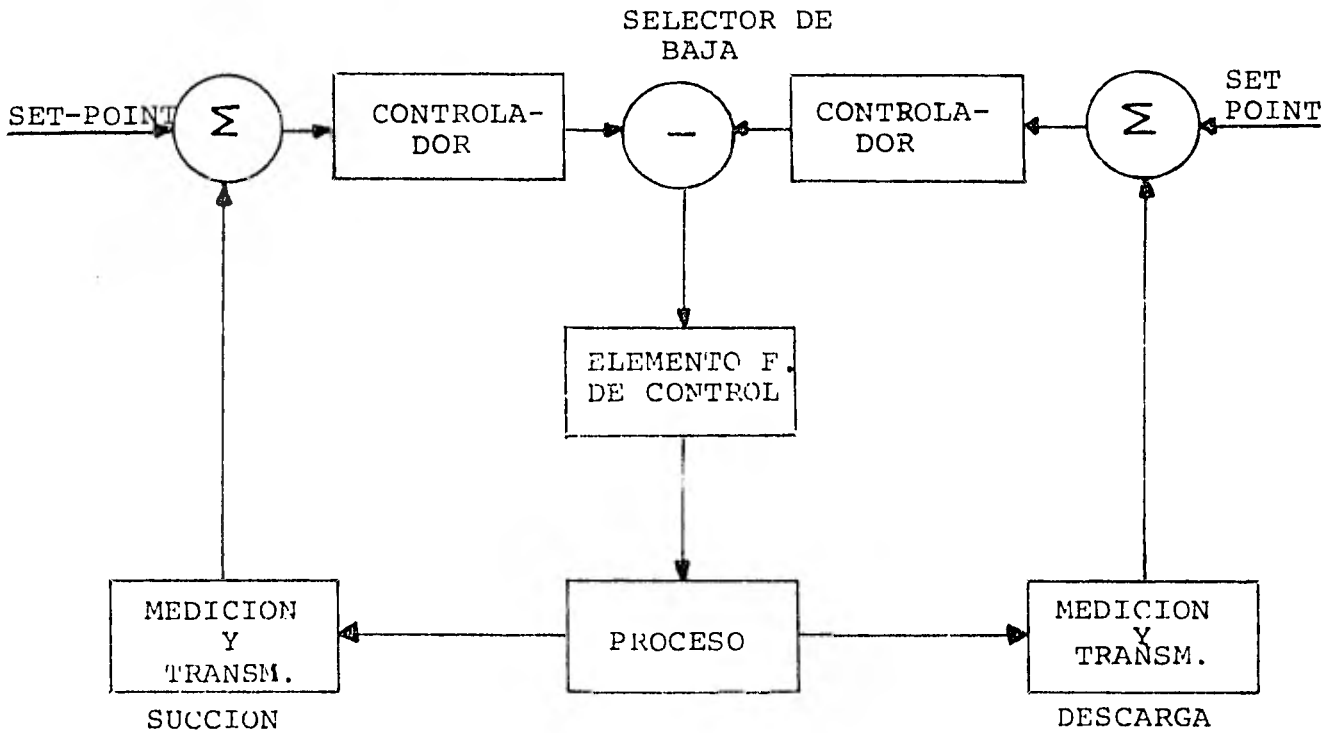
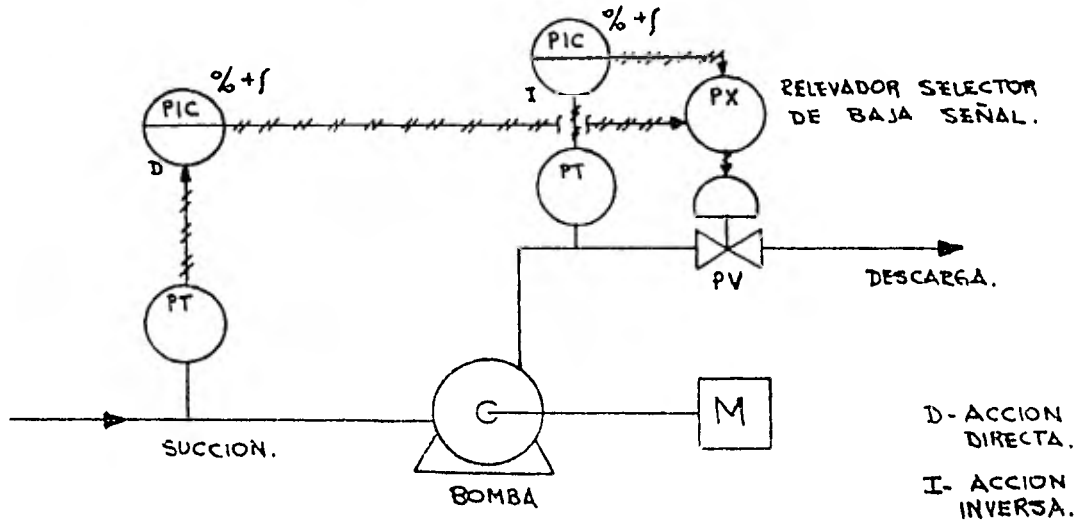
Un ejemplo de esto puede ser una estación de bombeo, donde el requerimiento es mantener dentro de los límites seguros, tanto la presión en la succión como en la descarga de la bomba. Figura No. 4.4.1

El sistema trabaja de modo que existe un circuito de control operando normalmente en una de las variables y continúa de esta forma hasta que la otra variable llega a un cierto valor crítico. En este punto, esta última variable se convierte en el factor de control hasta que las condiciones críticas son remediadas. Las salidas de los controladores de presión están conectadas a un selector de baja señal, estando el punto de ajuste 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 punto de ajuste.

El controlador en la descarga es una unidad de acción invertida y tiene su punto de ajuste 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 descarga), bajo condiciones de operación normal. Sin embargo, si la presión de succión cayera abajo de su punto de ajuste, la salida del 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 satisfactoriamente.



SISTEMA DE CONTROL DE PREDOMINIO

FIG. NO. 4.4.1

## CAPITULO 5

SELECCION Y USOS DE INSTRUMENTOS SEGUN LA  
VARIABLE CONTROLADA

## 5.1 Flujo.

Existen varios métodos para la determinación del caudal, - aquí solo se expondrán aquellos de más frecuente uso en a plicaciones industriales, éstos son:

- . Medidores Diferenciales de Presión
- . Medidores de Area Variable
- . Medidores de Desplazamiento Positivo
- . Medidores de Corriente

Medidores Diferenciales de Presión.

Elementos Primarios.- Cuando una corriente fluída pasa -- por una reducción en un conducto, el área de la sección - transversal del flujo se contráe y la velocidad aumenta y la presión estática (es la que ejerce un fluído sobre las paredes del conducto por el que circula), disminuye conforme la velocidad del fluído aumenta.

Las presiones estáticas en dos puntos de diferente velocidad son medidas con un instrumento de presión diferencial. Esta diferencia de presión es función de la velocidad del fluído y por lo tanto, se puede utilizar como medida de caudal calibrando el instrumento.

Después de atravesar la reducción de sección, la corriente fluída recobra su sección original, aunque ello no ocurre inmediatamente, sino a lo largo de cierto trecho, en forma gradual.

A la reducción de la tubería para propósitos de medición de caudal, se le llama elemento primario y puede ser una placa de orificio, una tobera, un tubo venturi, etc.

La presión diferencial que se mide por medio de dispositivos como los tubos de Pitot, no es el resultado de provocar una restricción en la sección de la tubería, éstos miden la diferencia entre la presión dinámica (es la presión que ejerce el fluido en la dirección del flujo por causa de la velocidad) y la estática, llamada presión -- de impacto.

#### Placas de Orificio.

Es el más sencillo de los elementos primarios, es el más barato de costo, pero puede resultar el más caro en funcionamiento, debido a las pérdidas de presión permanente.

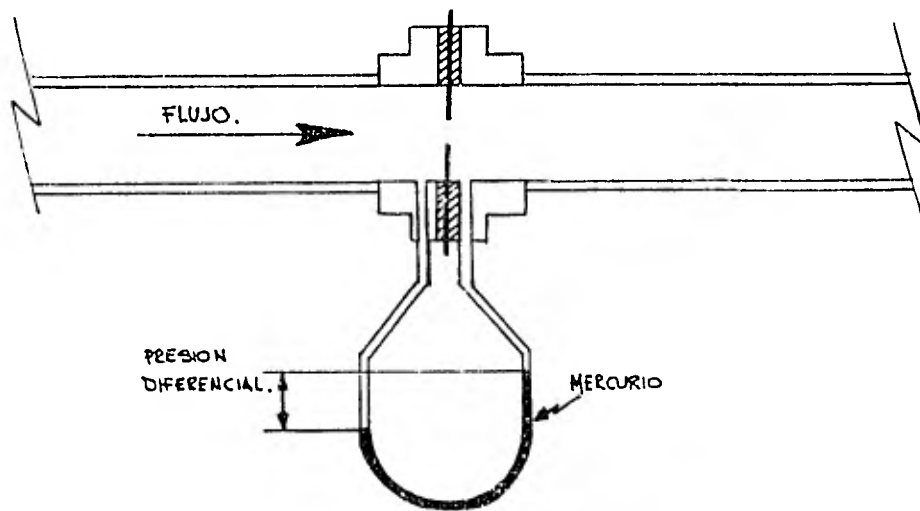
Consiste en un disco plano y delgado, con un orificio que se inserta entre dos bridas de la tubería. Ver Figura No. 5.1.1.

Usualmente los orificios de las placas son concéntricos, pero también pueden ser excéntricos o de segmento circular, como se muestra en la Figura No. 5.1.2.

Cuando los fluidos contienen un alto porcentaje de gases disueltos, es recomendable el uso de placa con orificio excéntrico.

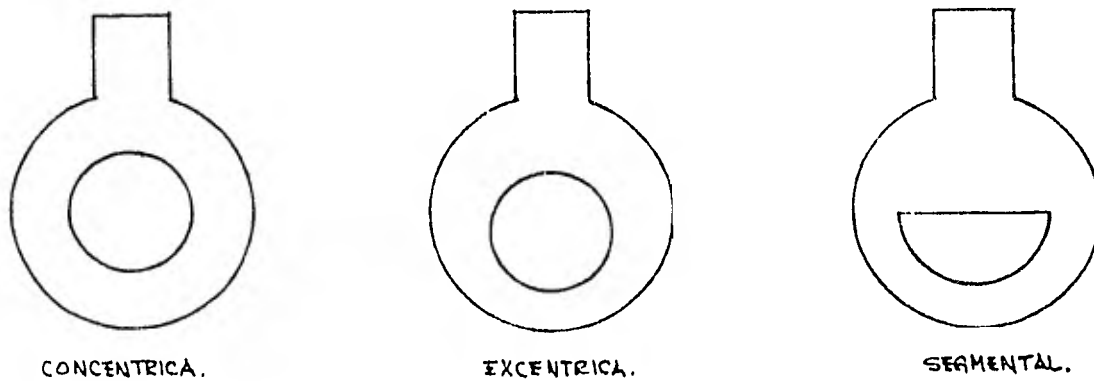
#### Tobera de Flujo.

La tobera de flujo se muestra en la Figura No. 5.1.3, permite medidas de velocidad de fluido de cerca de 60 a 65% más elevadas que lo permiten las placas. Por ello, la tobera encuentra su principal aplicación cuando se han de -



SISTEMA DE PRESION DIFERENCIAL

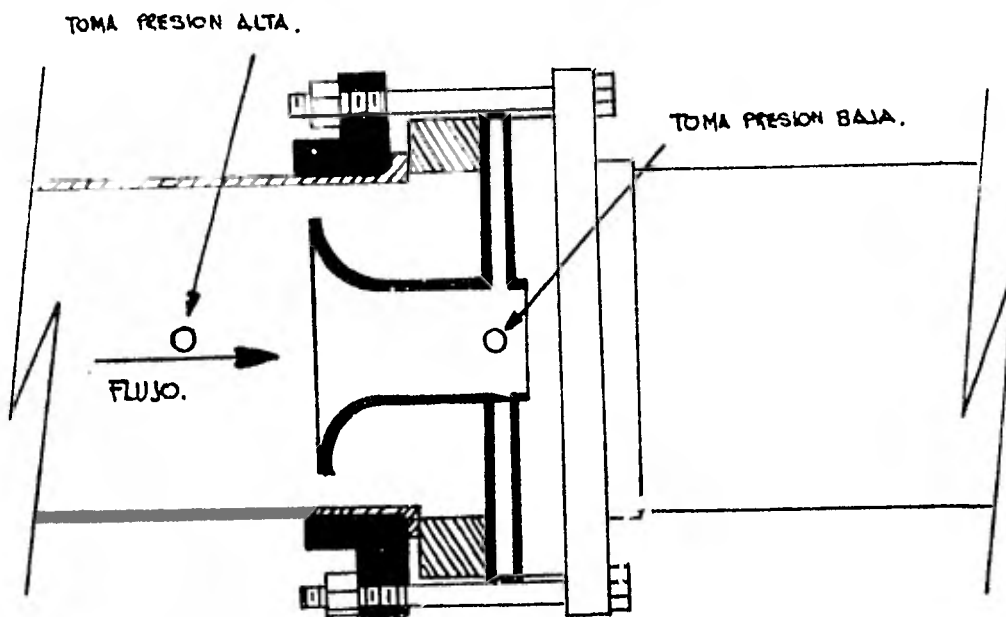
FIG. NO. 5.1.1



TIPOS DE PLACAS DE ORIFICIO

FIG. NO. 5.1.2

medir grandes caudales en líneas de alta presión y poco --  
diámetro, o cuando se manejan líquidos con sólidos en sus-  
pensión y sedimentos,



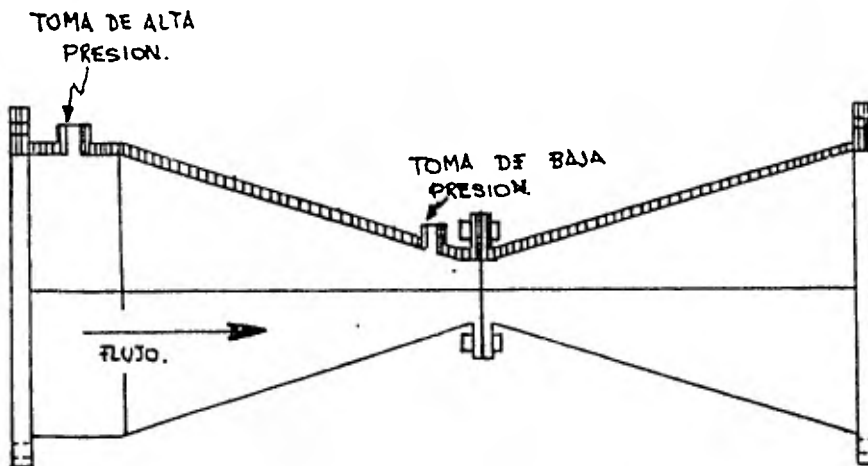
TOBERA DE FLUJO  
FIG. NO. 5.1.3

Tubos Venturi.

Es recomendable utilizar un tubo Venturi, ver Fig. No. 5.1.4

5.1.4, cuando el fluido a medir contiene grandes cantidades de sólidos en suspensión,

También se utiliza cuando se desea la máxima exactitud en la medición de fluidos altamente viscosos y cuando se de sea que la pérdida de carga debida al elemento primario - sea menor. Aunque tiene una desventaja, que es su alto -- costo inicial.



TUBO VENTURI

FIG. NO. 5.1.4

Tubos de Pitot.

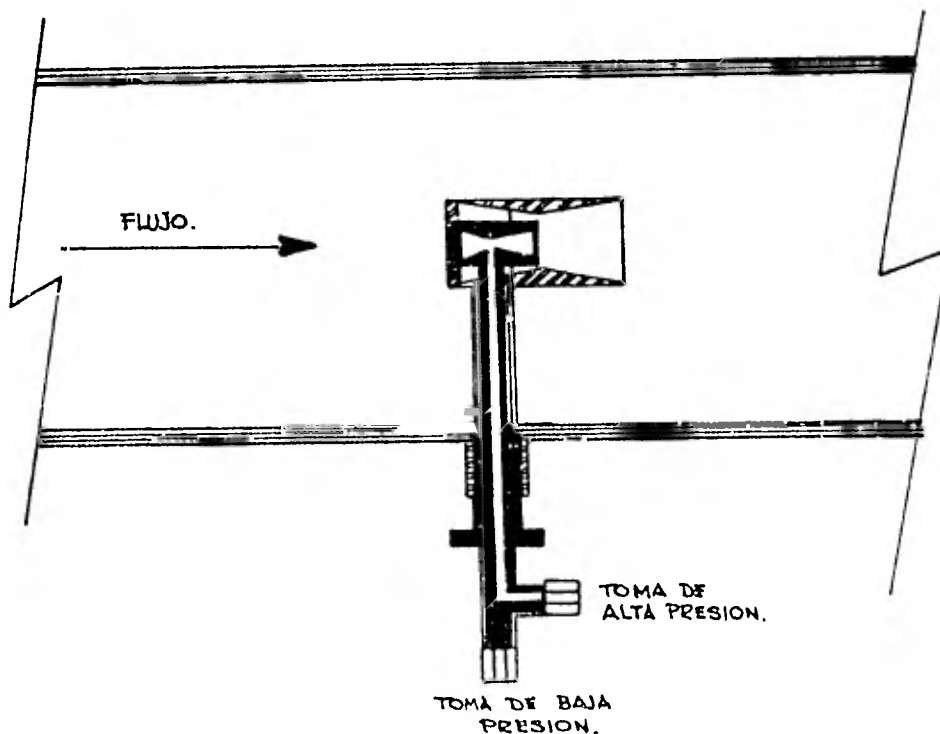
El tubo de Pitot se inserta en una tubería o conducto, de



tal forma que el flujo incida directamente sobre una pequeña abertura del tubo, llamada tobera.

La diferencia entre la presión tomada en la tobera en sentido contrario del flujo y la tomada en el mismo sentido, es la presión dinámica o presión diferencial buscada como función del caudal. El tubo de Pitot no promedia el flujo a través de una sección transversal de la tubería como lo hacen los elementos primarios vistos anteriormente, sino que mide el caudal solamente en el punto en que la tobera está situada.

En una tubería o conducto donde la distribución de velocidad no sea uniforme, no se puede utilizar el tubo de Pitot como elemento primario.



TUBOS PITOT

FIG. NO. 5.1.5

El tubo de Pitot presenta la gran ventaja de que su pérdida de carga es despreciable. Una desventaja es que no puede utilizarse con pequeñas velocidades de fluido, ya que la presión diferencial obtenida es muy pequeña, Este inconveniente limita su utilización en la industria.

Medidores de Caudal del Tipo de Mercurio.

Los medidores de caudal miden las presiones diferenciales que se producen por causa del fluido, en cualquiera de los dispositivos o elementos primarios ya descritos, expresándola en unidades de velocidad de flujo (o bien directamente en unidades de masa o volumen por hora). Ahora bien, la velocidad del fluido no es proporcional a la presión diferencial, sino a su raíz cuadrada.

$$V = K \sqrt{\Delta P.}$$

Donde:

V = Velocidad del Fluido

$\Delta P$  = Dif. de Presión

K = Constante

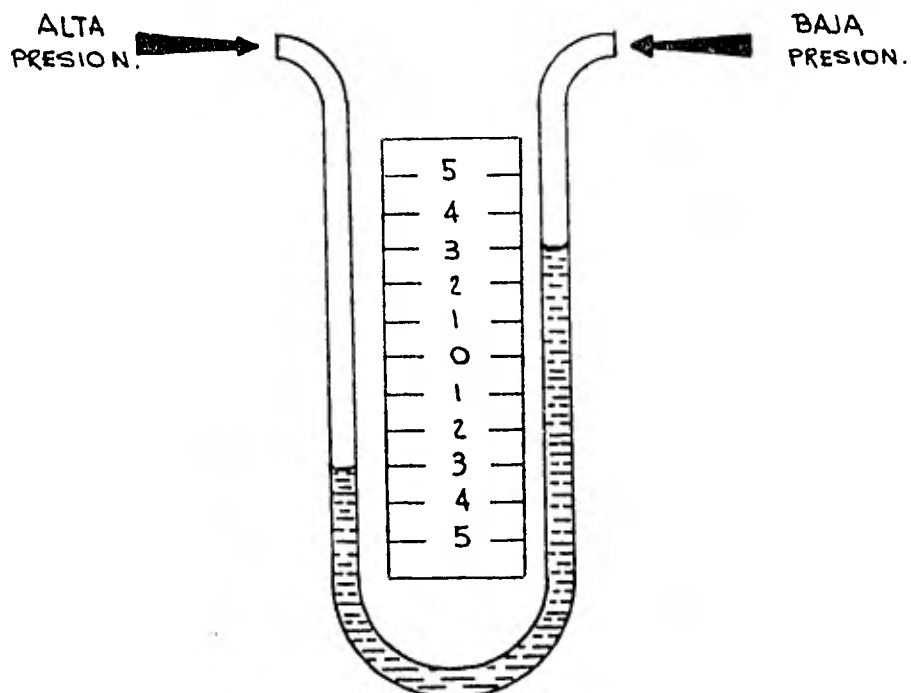
Por lo tanto, la indicación del captador de presión diferencial será proporcional al cuadrado de la velocidad, o se utiliza un extractor de raíz cuadrada ( $\sqrt{\quad}$ ) que traduzca la relación cuadrática a lineal.

De los medidores de caudal del tipo de mercurio, los más conocidos son los siguientes:

. Medidor de Tubo "U"

Es un manómetro de mercurio (Figura No. 5.1.6), consta de una cámara de presión de alta y otra para la presión me--

nor, ambas conectadas por medio de un tubo "U" lleno de --mercurio. Un flotador en la cámara de presión de alta se -desplaza arriba y abajo, siguiendo el nivel de mercurio.



PRINCIPIO DEL MEDIDOR TIPO "U"

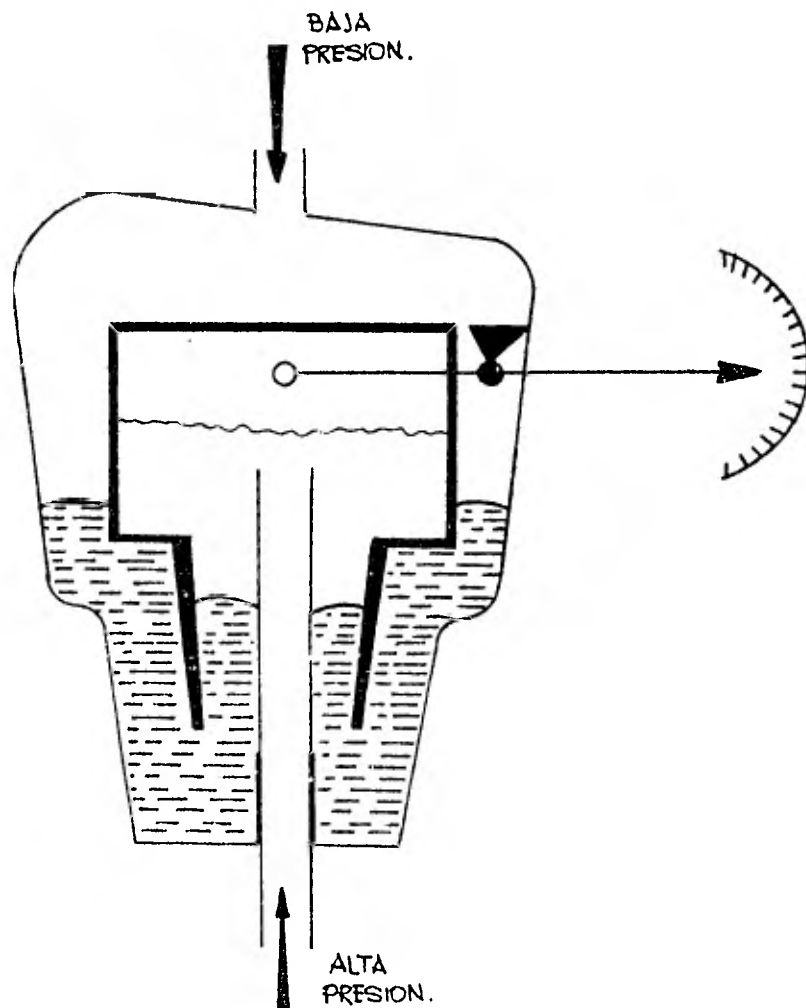
FIG. NO. 5,1.6

. Medidor de Caudal de Tipo Campana de Ledoux.

La campana de Ledoux Figura No. 5.1.7, transforma un desplazamiento proporcional a la raíz cuadrada de una variable (presión diferencial) en un movimiento lineal (proporcional a la velocidad del fluido).

La presión mayor se transmite por medio de un tubo verti-

cal a la cámara formada por el interior de la campana y - la superficie del mercurio (cámara de presión alta), mientras que la menor se aplica a la cámara formada por el exterior de la campana y la superficie del mercurio (cámara de presión baja). Las variaciones de presión desplazan la campana, que es libre de moverse arriba y abajo, conforme la presión diferencial aumenta, la campana se eleva y la sección interior de empuje de aquella disminuye y viceversa.



PRINCIPIO DE LA CAMPANA DE LEDOUX

FIG. NO. 5.1.7

. Medidor Eléctrico (Conductividad)

El método de conductividad utiliza la elevación del nivel

del mercurio en la rama de baja presión de un tubo "U" para variar la resistencia de un circuito eléctrico (Figura No. 5.1.8). La corriente eléctrica que fluye por este circuito, será por tanto, función de la presión diferencial aplicada al cuerpo medidor y en consecuencia, función de la velocidad del fluido que atraviesa el elemento primario.

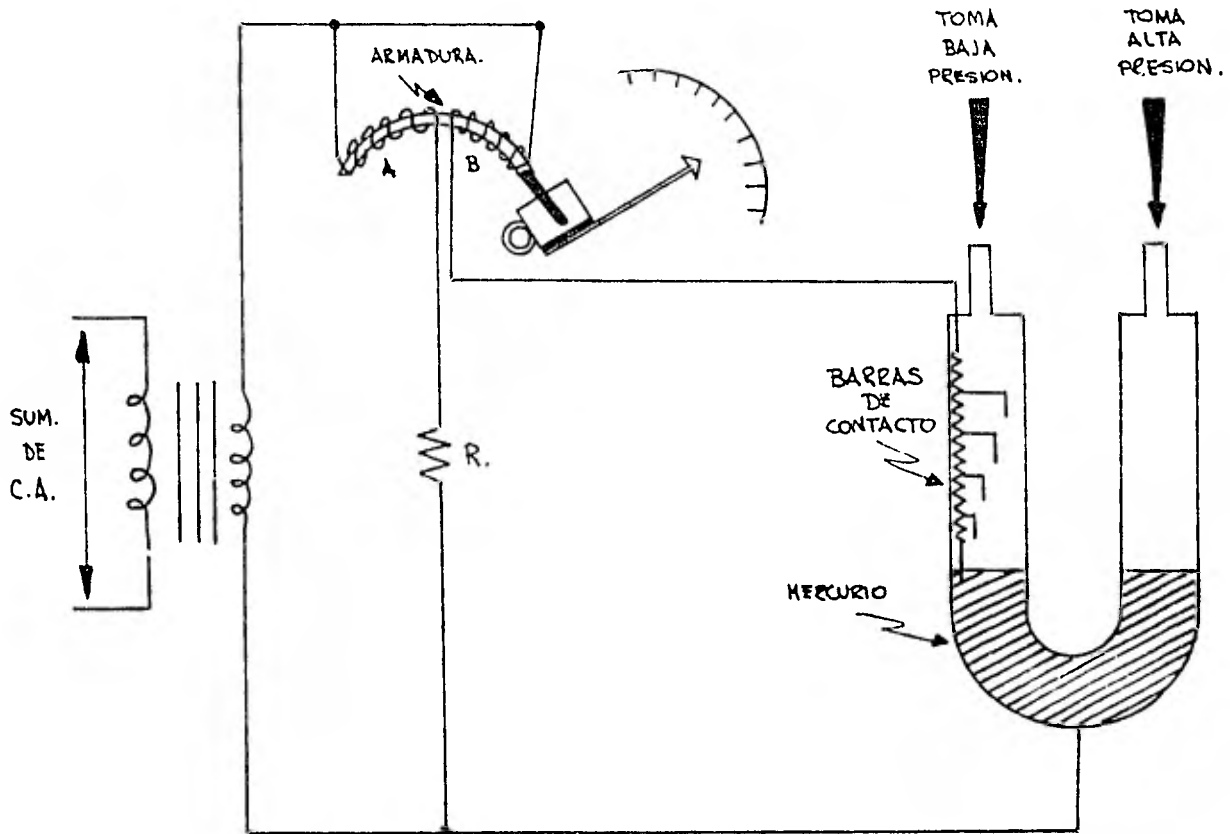
La indicación del instrumento de medida, se logra por medio de las bobinas "A" y "B" que tienen una armadura común. Una corriente constante circula por la bobina "A", cuya acción electromagnética sobre la armadura, tiende a mantenerla en la posición en que la pluma señala cero. Por la bobina "B" circula la corriente que fluye a través del mercurio, barras de contacto sumergidas en aquel y resistencias incorporadas.

Esta corriente varía con el cambio de nivel del mercurio y su acción al atravesar la bobina "B", es crear un campo magnético que tiende a desplazar la pluma o la aguja sobre la escala.

#### Medidores de Area Variable.

Los medidores de área variable, mantienen constante la presión diferencial, variando el área de la restricción en función del caudal; éstos mantienen una relación lineal entre el caudal y el área de paso.

En aplicaciones, especialmente con diámetros pequeños de tubería, el costo del captador e instalación, favorece la utilización de los medidores de área variable. Son muy utilizados con fluidos altamente viscosos, que no permiten el uso de placa de orificio. De este tipo, el más usado es el medidor de caudal rotatorio.



ESQUEMA DEL METODO DE CONDUCTIVIDAD

FIG. NO. 5.1.8

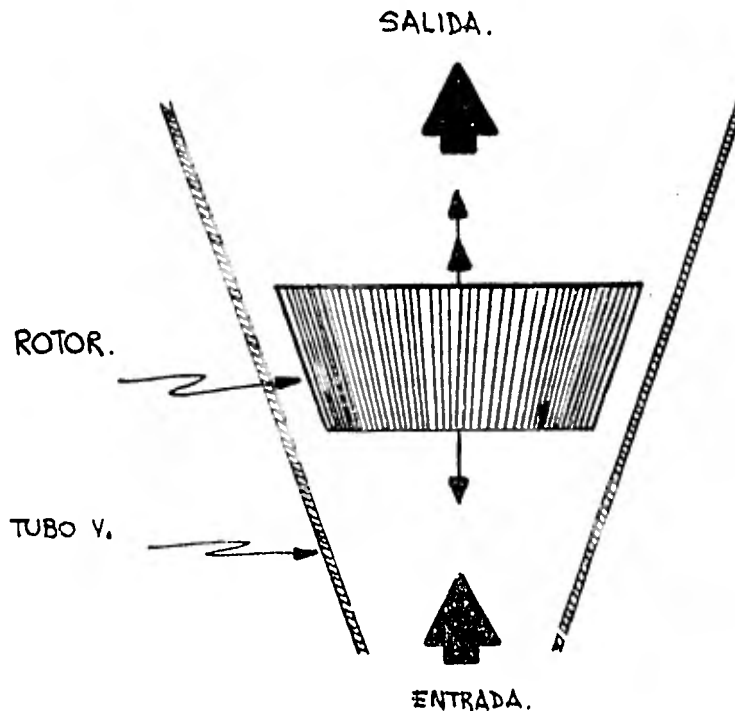
. Medidores de Caudal Rotatorios

El rango de un medidor rotatorio de caudal es de 10:1, lo que significa, que el alcance del instrumento puede ser 10 veces mayor que el caudal mínimo que se ha de medir con exactitud, para caudales menores, la inexactitud aumenta rápidamente.

El caudalímetro rotatorio, también llamado "rotámetro", -- consta de un flotador libre de desplazarse en el interior

de un tubo de vidrio, cuya sección transversal aumenta hacia arriba (Figura No. 5.1.9).

El espacio libre entre el flotador y la pared interior -- del tubo, forman un conducto de sección anular variable. Conforme el flotador sube, empujado por el fluido, el área de paso del conducto anular aumenta. El flotador es empujado hacia arriba al paso del fluido, hasta que el empuje producido por la presión diferencial sea igual al peso -- del flotador.



PRINCIPIO DE UN ROTAMETRO

FIG. NO. 5.1.9

Medidores de Desplazamiento Positivo.

Los medidores de desplazamiento positivo, son esencialmen

te instrumentos de cantidad de flujo. Se utilizan frecuentemente para medida de líquidos en procesos descontínuos. Para procesos contínuos, se prefieren los instrumentos de caudal.

El instrumento de desplazamiento positivo, toma una cantidad o porción definida del flujo (líquido o gas), y la conduce a través de un medidor, luego procede con la siguiente porción y así sucesivamente. Contando las porciones pasadas por el medidor, se obtiene la cantidad total pasada por éste. Una de sus limitantes es que deben ser fluidos absolutamente limpios, Los tipos de instrumentos más importantes de este tipo son:

. Medidor de Pistón Oscilante.

En la Figura No. 5.1.10, se muestra el principio del funcionamiento de un medidor de pistón oscilante. Lo que se llama pistón (anillo negro), se mueve alrededor de la superficie interna del cilindro o cámara de medición, en donde la admisión es "A" y el escape "B".

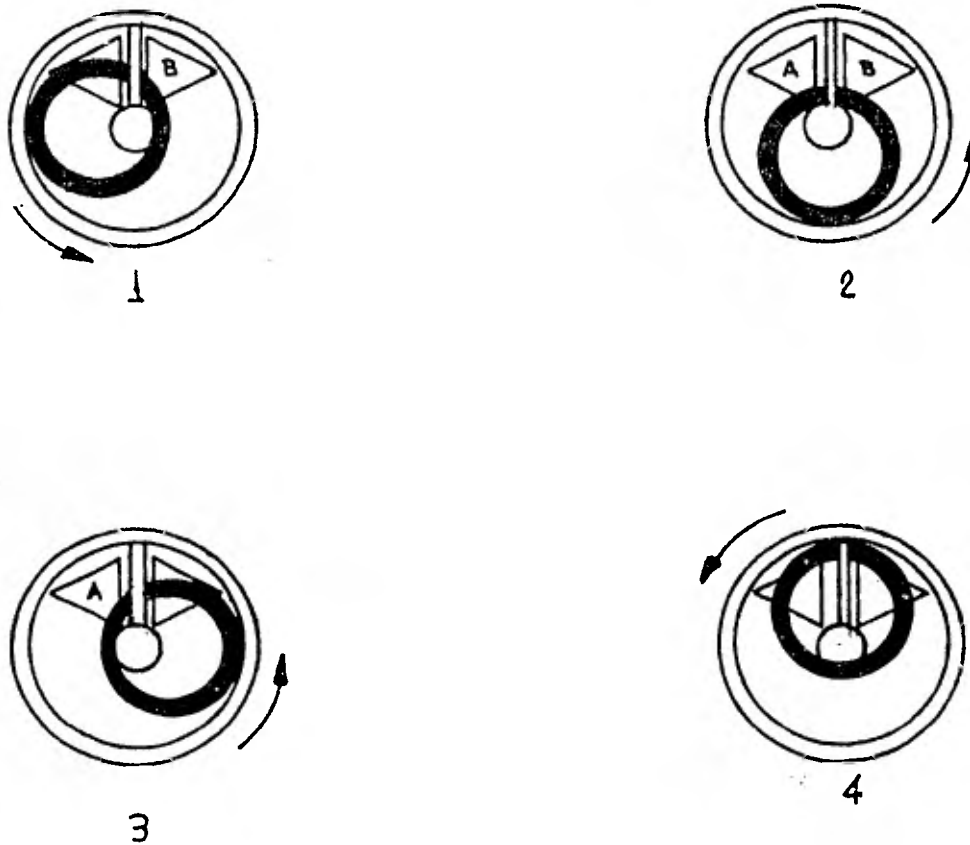
El movimiento del pistón es debido a la diferencia de presión entre las lumbreras de entrada y salida. La presión mayor en "A" obliga al pistón a moverse.

Los volúmenes de líquido transportados desde la admisión "A" a la evaluación "B", son iguales en cada ciclo y el contador los va sumando. El líquido debe estar libre de aire o gas.

. Medidor de Lóbulos.

Este medidor utiliza dos rotores (Figura No. 5.1.11), las cámaras de medición consisten en los espacios libres entre los lóbulos de los rotores y la envolvente. El medidor es





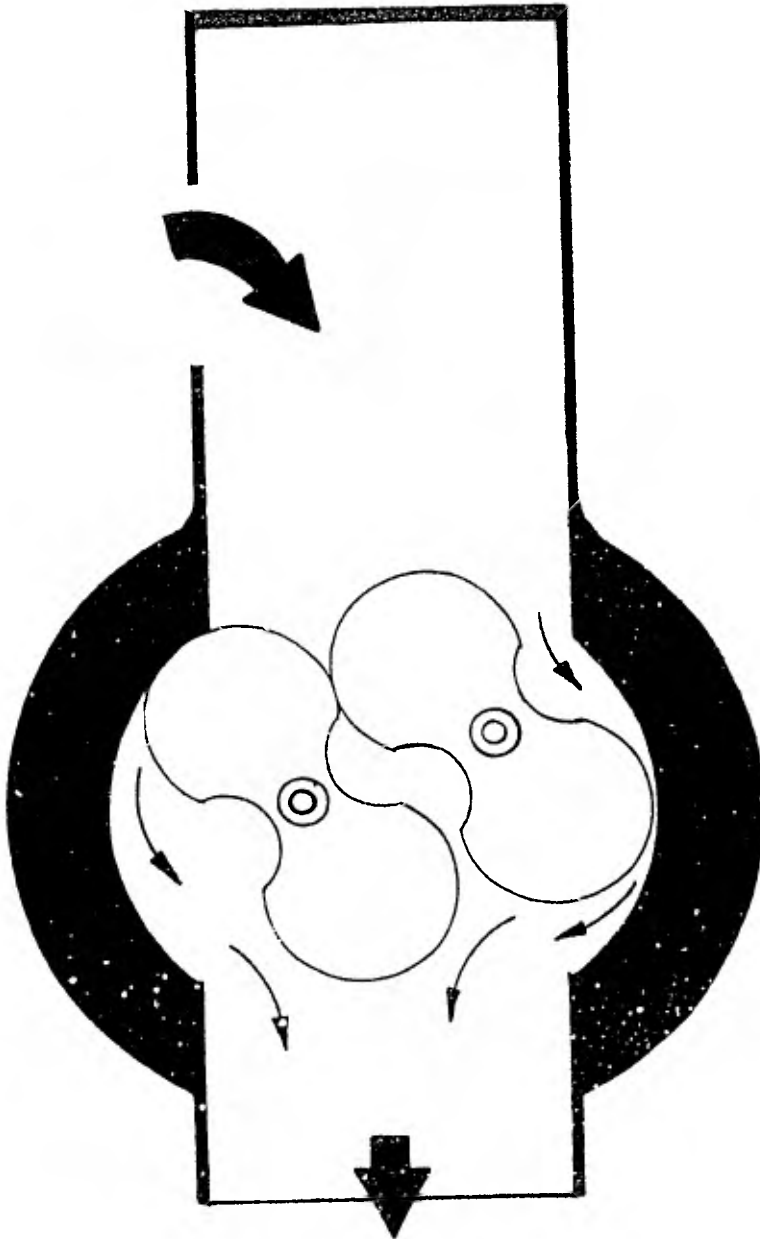
PRINCIPIO DE OPERACION DE UN MEDIDOR  
DE PISTON OSCILANTE

FIG. NO. 5.1.10

similar a una bomba de engranes, solo que en ésta el líquido es impulsado por el giro de los rotores, mientras que en el medidor, la corriente es quien acciona a aquellas.

. Medidores de Paleta.

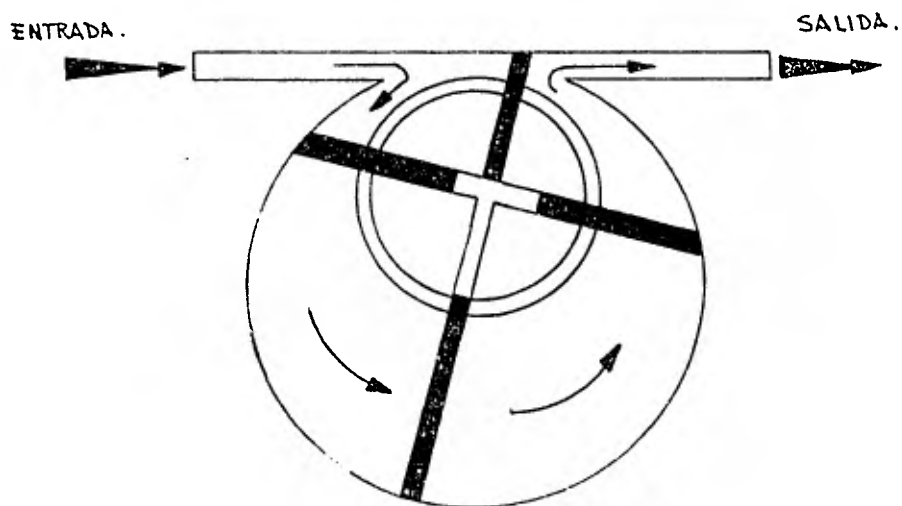
Este medidor consta de cuatro paletas, dispuestas sobre la circunferencia del rotor (Figura No. 5.1.12). El líquido llega por el conducto de admisión y llena la cámara formada por el rotor, la paleta y la carcasa. La presión



ESQUEMA DE UN MEDIDOR PARA GASES DE LOBULOS

FIG. NO. 5.1.11

ejercida sobre la paleta hace girar al rotor sobre su eje, pasando la paleta "2" a ocupar la posición que tenía la -- "1" y así sucesivamente, luego descarga por el conducto, - en el registrador en metros cúbicos o cualquier medida de volumen.

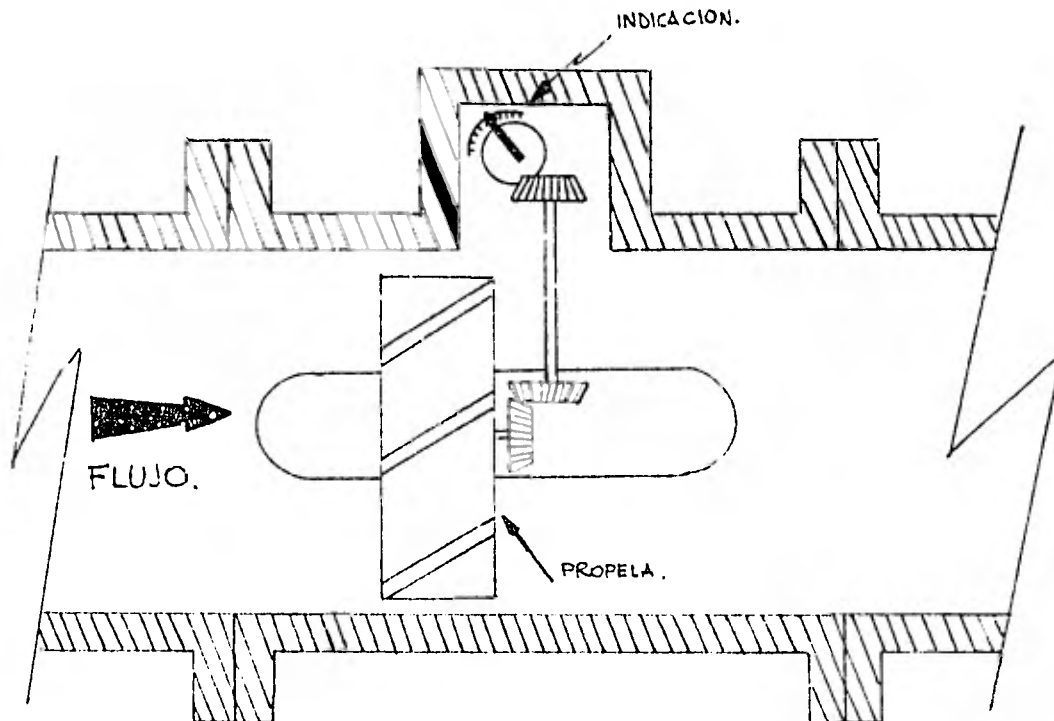


MEDIDOR DE PALETAS

FIG. NO. 5.1.12

## . Medidores de Corriente de Fluídos.

Estos medidores tienen una hélice u otro elemento giratorio, que es accionado por la corriente de fluido y transmite su movimiento por engranes al contador. Una de las ventajas de estos aparatos es la pequeña caída de presión que provocan. Otro tipo, es por medio de movimiento del propulsor, se transmite a un anillo magnético, que gira bajo una brida ciega de material no magnético, la cual -- cierra herméticamente la boca lateral de la tubería, por donde se introduce el propulsor. Con esta brida se halla la caja que acciona el mecanismo contador, que consta de un imán radial de 6 polos, que gira arrastrado por el -- anillo, al establecer un acoplamiento magnético a través de la brida. El eje del imán acciona el contador.



MEDIDOR DE CORRIENTE TIPO PROPELA

FIG. NO. 5.1.13

## 5.2 Presión.

Cuando se mide la presión, se desea generalmente leerla - en términos de presión relativa, presión absoluta, vacío o presión diferencial. La presión relativa es la diferencia entre la absoluta y la atmosférica.

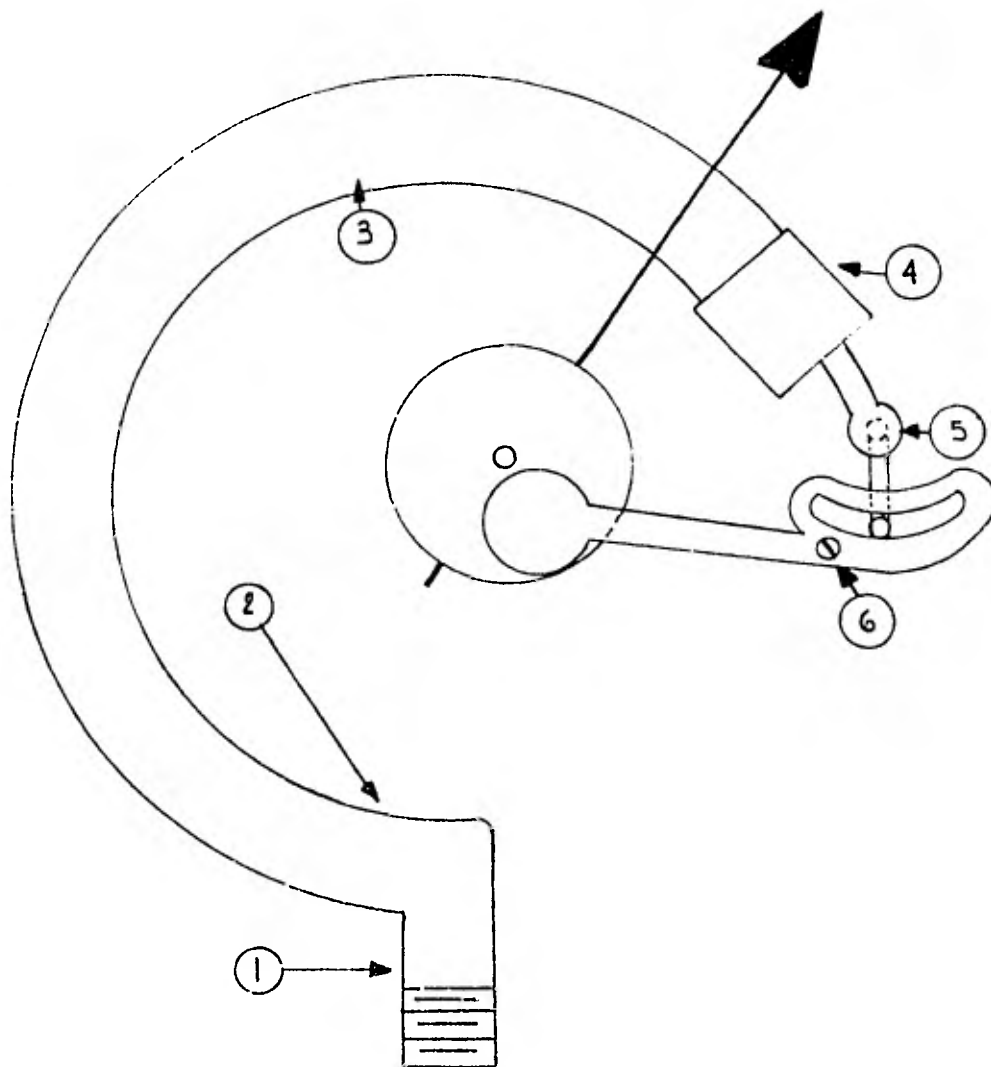
Hay varios modos de medir la presión dependiendo si es alta o baja presión, los más usuales son:

### . Tubo de Bourdon

El medidor de tubo de Bourdon es el que más frecuentemente se utiliza en medidas de presión, ya que es un instrumento extremadamente simple y robusto, cubriendo rangos desde vacío hasta alta presión.

La Figura No. 5.2.1, muestra un manómetro de este tipo. La presión (el fluido a presión), actúa sobre la conexión (1) y se transmite al interior del tubo Bourdon (3). Este es un tubo de forma circular y de sección ovalada, cerrado por su extremo libre (4). Cualquier presión en el interior del tubo, superior a la externa o atmosférica, es -- causa que varíe la sección ovalada del tubo, tomando una forma tanto más circular cuanto mayor sea la presión interior, los lados más planos son por tanto, forzados a separarse, resultando que el material se expande en la circunferencia interior y se contrae en la exterior. Los esfuerzos resultantes sobre el tubo tiende a estirarlo y su extremo libre se mueve hacia arriba, el efecto contrario -- tiene lugar bajo condiciones de vacío.

Una biela (5) conecta la punta del tubo a una cruceta cuya posición puede ajustarse sobre un alojamiento en arco abierto en un extremo de la leva. La cabeza de la biela se desliza en línea recta, mientras la leva describe un



MEDIDOR DE PRESION DE TUBO DE BOURDON

FIG. NO. 5.2.1

arco alrededor de su eje.

La aguja recibe el movimiento de la leva y el eje, se logra por medio de un sector y piñón dentados.

Los tubos de Bourdon se construyen en diferentes materiales, dependiendo de las presiones y fluidos con los que han de trabajar.

#### . Fuelles

Los manómetros de tipo Bourdon no son muy sensibles, los de tipo fuelle son algo más sensibles.

Los fuelles se utilizan frecuentemente para medición de presiones absolutas. Con un sistema de dos fuelles, forman dos cámaras separadas, una conectada a la presión a medir, y la otra se encuentra en vacío y está herméticamente cerrada, los extremos libres se conectan a una pieza en forma de campana, cuyo movimiento se transmite y amplifica por medio de un sistema de palancas, al brazo de la pluma del registrador en el interior de uno de los fuelles se ha efectuado, como ya se dijo, un vacío lo más elevado posible y cuyo valor es constante. Por otro lado, la presión del fluido que se ha de medir, que actúa en el fuelle que se encuentra entre la cámara y la carcasa, se obtendrá en unidades de presión absoluta y será independiente de la presión atmosférica y sus variaciones.

#### . Cápsulas

Los fuelles son más sensibles que los tubos Bourdon y las cápsulas más sensibles que aquellos. Las cápsulas de medida de presión se utilizan no solo para pequeños alcances, sino también donde es necesaria una gran exactitud.

La cápsula está fabricada normalmente de cobre-berilio y el fluido a presión actúa en su interior, el cual deforma la cápsula en forma proporcional a la magnitud de la presión. Se pueden admitir presiones diferenciales, admitiendo una presión en el interior de la cápsula y la otra en la caja del instrumento.

Se puede utilizar para bajas presiones, para presiones -- más altas de 30 Psia. (Lb/Pulg.<sup>2</sup> Abs.) se usan tubos espirales de Bourdon.

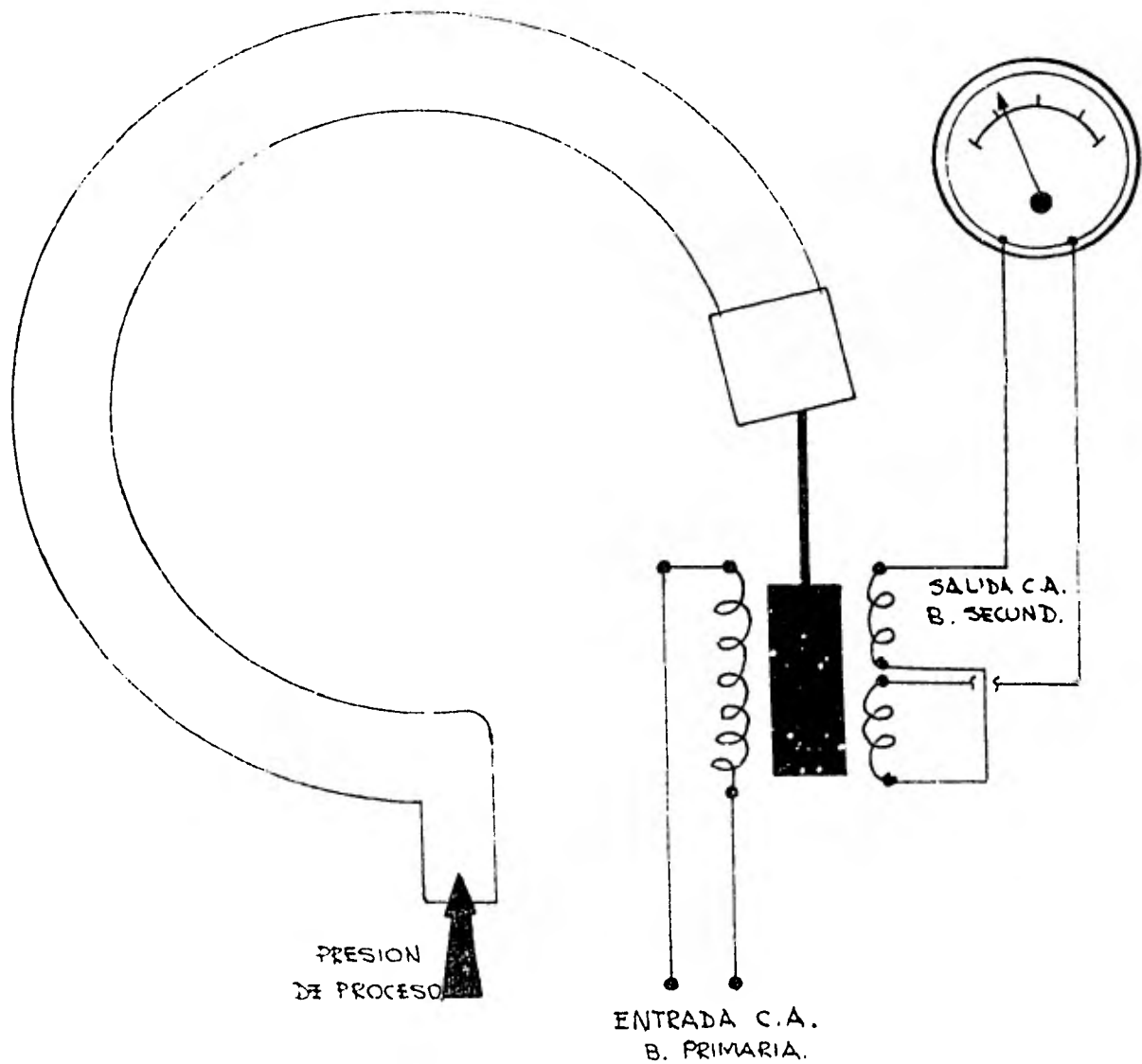
#### . Transmisores de Presión.

Una cápsula o tubo Bourdon desplaza una armadura (Barra - Ferromagnética) de un transformador, el desplazamiento relativo entre la armadura y las bobinas del transformador crea un desequilibrio eléctrico que actuando sobre un amplificador se convierte en una señal eléctrica, lo cual constituye el principio del transmisor de presión electrónico.

El transformador consiste en una bobina primaria y dos secundarias conectadas, como se muestra en la Figura No. -- 5.2.2. El núcleo del transformador está suspendido del extremo de un tubo Bourdon y se mueve arriba o abajo en respuesta a los cambios de presión del proceso que se está midiendo. La bobina primaria se conecta a la fuente de -- C.A. y el flujo magnético generado por esta bobina se distribuye por el núcleo, de tal forma que se induce una tensión en cada embobinado secundario. Si el núcleo se coloca, de tal forma que las tensiones inducidas en cada una de las bobinas secundarias sean iguales, a la salida de -- C.A. al indicador es nula, debido a que las bobinas están conectadas en oposición y la tensión inducida en una está defasada 180° respecto a la inducida en la otra. Como resultado, la salida del transformador corresponde a la -



diferencia entre los voltajes de ambos arrollamientos secundarios. Un desplazamiento extremadamente pequeño del núcleo es suficiente para producir una salida de tensión mediable, en el receptor.



ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE UN TRANSMISOR DE PRESION

FIG. NO. 5.2.2

### 5.3 Nivel.

Las mediciones de nivel se pueden hacer en muchas formas y estilos, inclusive en la industria existen muchas formas, unas más simples y otras más complejas, aquí se mencionan las más utilizadas por ser las más confiables y exactas en su medición.

#### Método de Presión Relativa.

Las mediciones de nivel que se basan en la presión que -- ejerce un líquido por su altura, implican que la densidad sea constante.

El instrumento se debe calibrar para una densidad específica y cualquier cambio en ella trae consigo errores de -- medición.

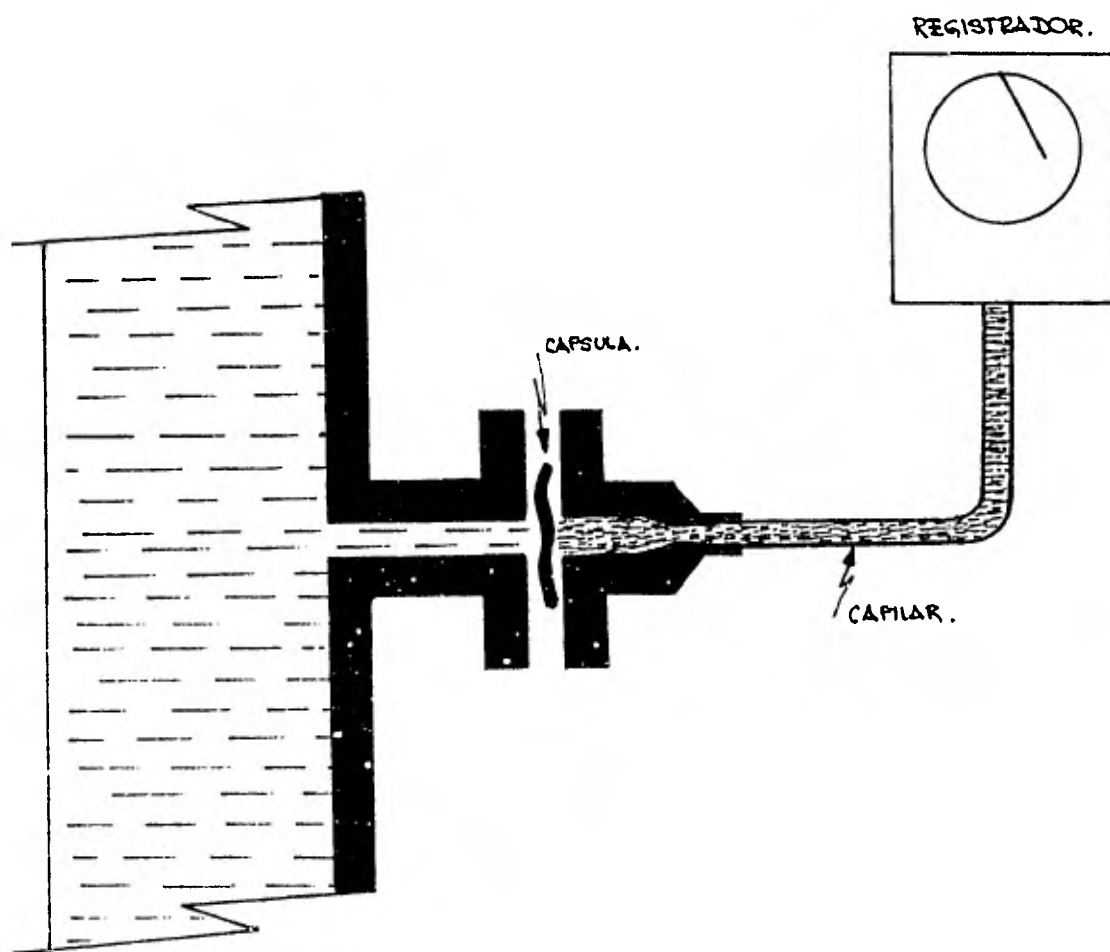
El método más simple para medir el nivel de un recipiente abierto, es conectar un medidor de presión por debajo del nivel, más bajo que se va a considerar. La presión estática indicada por el medidor es una medida de la altura de la columna del líquido, y por lo tanto, del nivel del recipiente.

Los niveles de líquidos corrosivos, altamente viscosos o con sólidos en suspensión, también se pueden medir con -- instrumentos de presión, cuando se utilizan líquidos separadores o diafragmas.

Un líquido separador es un fluido con el que se llena el sistema de medición. La superficie libre de éste, queda -- en contacto directo con el líquido medido. Sin embargo, los dos líquidos no deben mezclarse o reaccionar químicamente. Un diafragma su diferencia del anterior, es que éste separa el líquido del sistema medidor, con el líquido que se está midiendo. Responde al cambio en el nivel del líquido con un aumento o disminución de su deformación, --

debida al cambio en presión estática que se ejerce sobre él.

El diafragma se comunica con el elemento de presión por medio de un tubo capilar que se llena con líquido inerte, y el movimiento del diafragma se transmite así directamente al elemento de presión.



SELLO PARA MEDIR NIVEL EN LIQUIDOS CORROSIVOS O VISCOSOS

FIG. NO. 5.3.1

### Método de Presión Diferencial.

Para la medición de los niveles en tanques al vacío o bajo presión, pueden utilizarse instrumentos de presión diferencial.

La Figura No. 5.3.2, muestra la instalación de un captador diferencial utilizado para medidas de nivel de líquidos.

Para prevenir los errores de medida que provocaría la condensación de vapores (la mayoría de los líquidos bajo presión tienen vapores condensables). En la tubería de medida, que une lo alto del tanque con el captador, se dispone un recipiente de nivel que asegura una carga constante sobre la toma del captador conectada al techo del tanque.

La otra toma, conectada al fondo, está sometida a la presión del tanque más la correspondiente a la altura del líquido en el mismo.

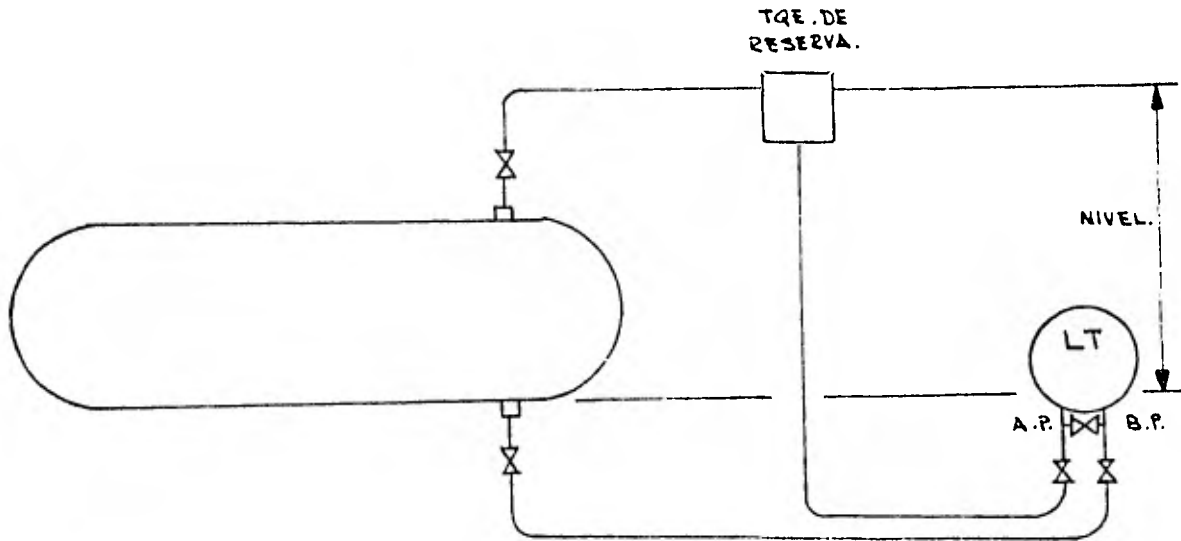
El instrumento mide por lo tanto, la diferencia de alturas entre el nivel del líquido en el tanque y el nivel fijo en el recipiente de condensación.

### Método de Flotador-Boya.

Los instrumentos que utilizan un flotador-boya, no dependen de la presión estática para medir el nivel de líquidos, como lo hacen los descritos anteriormente. Lo efectúan por medio de flotadores, que se conectan con otros sistemas para lograr la medición del nivel.

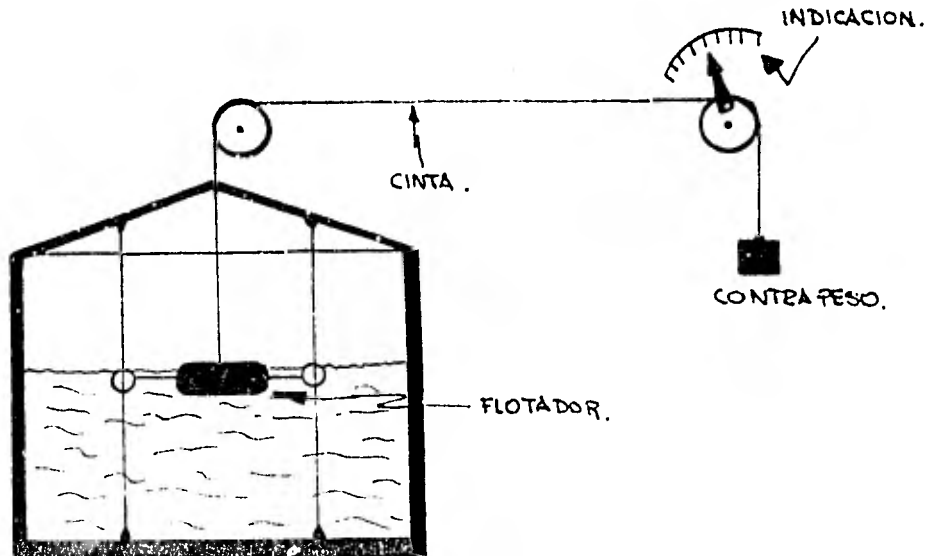
### Método de Conductividad Eléctrica.

Para el control de niveles límite por el método de conduc-



INSTALACION DE UN INSTRUMENTO PARA NIVEL EN UN RECIPIENTE A PRESION

FIG. NO. 5.3.2



PRINCIPIO DE OPERACION PARA MEDIR NIVEL POR MEDIO DE CINTA-FLOTADOR

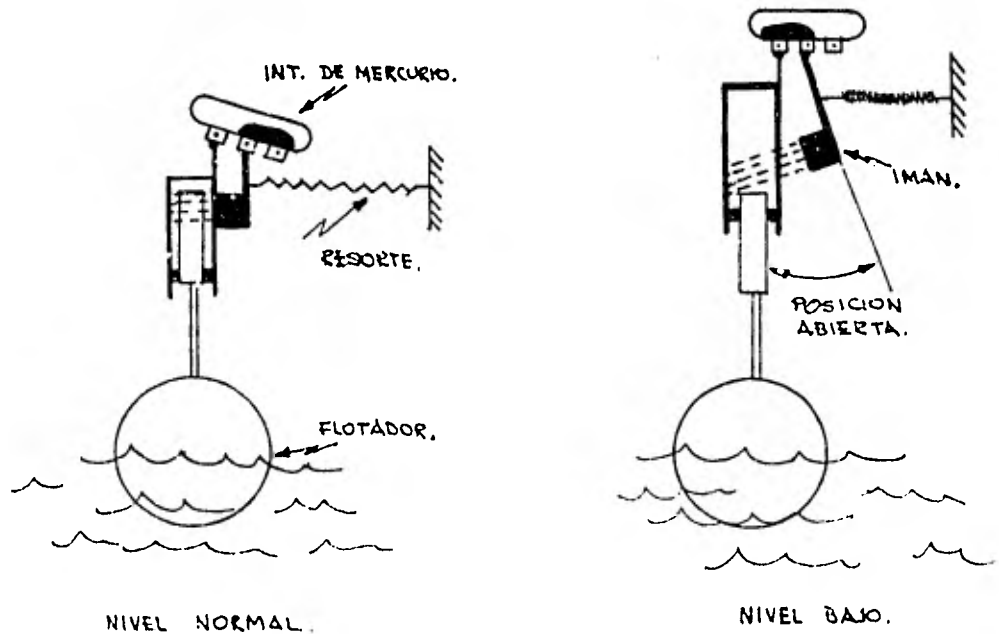
FIG. NO. 5.3.3.

tividad eléctrica, existen varios sistemas que utilizan - testigos para ello. Si se trata de controlar un solo nivel, se utiliza un solo testigo y dos, si el nivel debe - permanecer entre dos niveles límite.

La Figura No. 5.3.5 da idea de este último sistema.

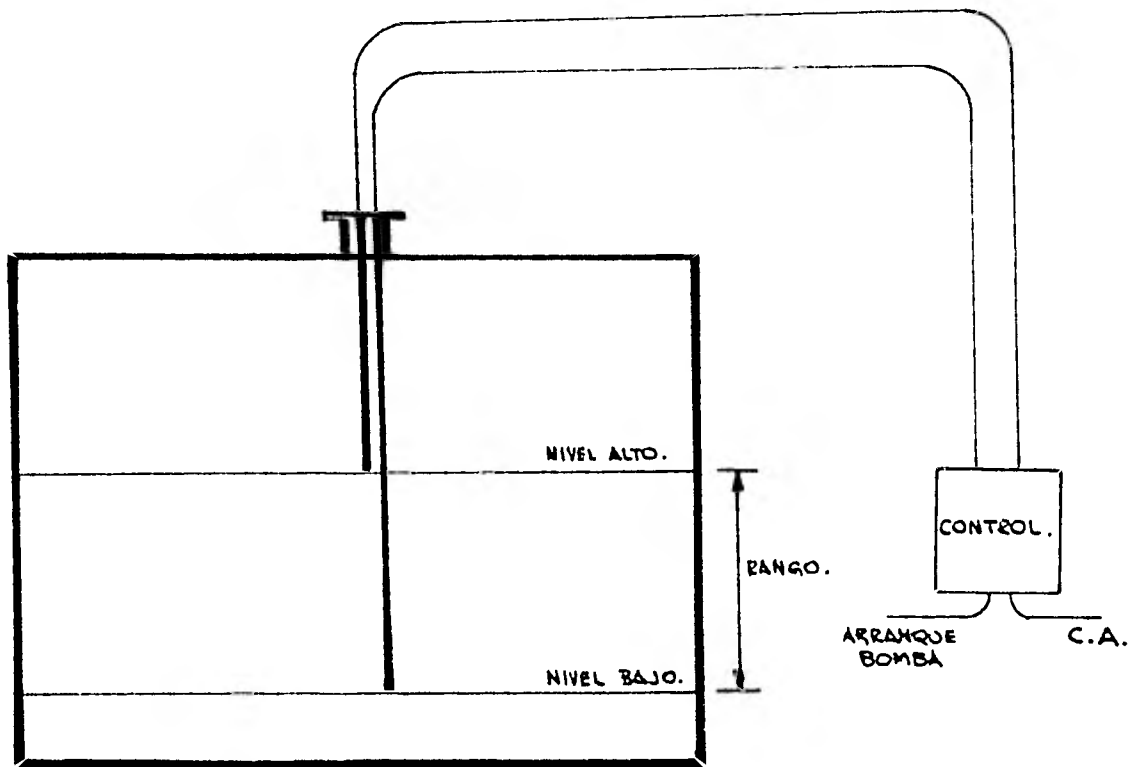
Dentro del tanque, se introducen dos barras testigo sopor tadas por una conexión estándar fija al techo del tanque. Estas barras se prolongan hasta alcanzar los niveles de-- seados; por ejemplo, el nivel bajo, al que tiene que empe zar el bombeo de líquido y el alto al que tiene que cesar.

Cuando el líquido se eleva hasta el nivel del testigo su- perior, su conductividad cierra un circuito eléctrico, - permitiendo el paso de una pequeña corriente que acciona al controlador, cuando el nivel del líquido desciende por abajo del testigo inferior, cesa la corriente que circula ba por el circuito correspondiente.



PRINCIPIO DE OPERACION SWITCH DE NIVEL

FIG. NO. 5.3.4



### CONTROLADOR DE NIVEL POR CONDUCTIVIDAD

FIG. NO. 5.3.5

#### Método de Capacitancia.

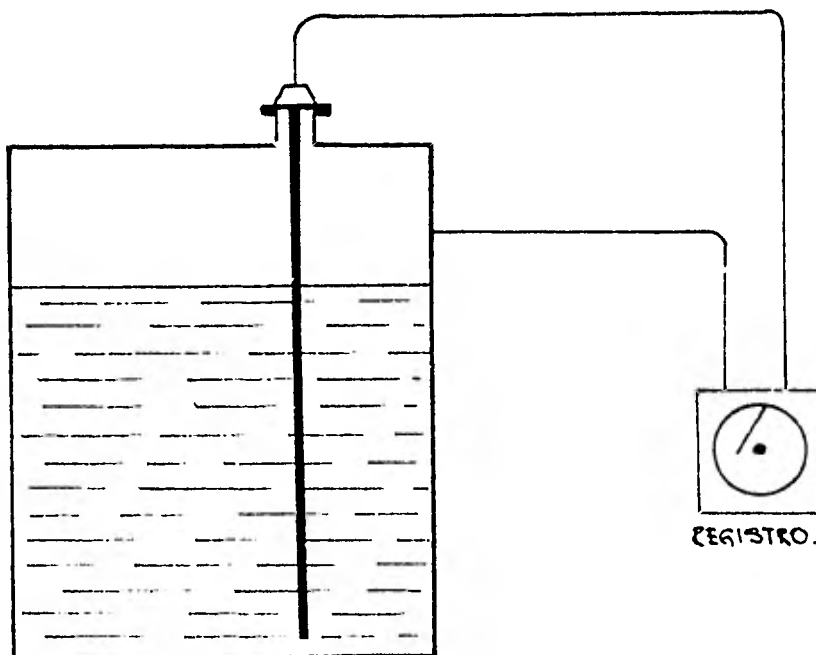
Este método opera bajo el principio básico del puente de capacitancia. Un condensador puede formarse con dos placas planas y paralelas o dos superficies cilíndricas concéntricas, como electrodos, separadas por un dieléctrico.

La capacidad de un condensador determinado depende de la constante dieléctrica de la sustancia interpuesta entre sus electrodos.

El condensador está formado por un electrodo de barra y el tubo metálico. La constante dieléctrica del aire y de casi todos los gases, es aproximadamente la unidad, mientras que la mayoría de los líquidos tienen constantes que varían entre "2" y "80".

Así cuando el recipiente está vacío, la capacitancia del condensador testigo es baja. Conforme el nivel del líquido asciende y se interpone entre sus placas, la capacitancia aumenta. Basta pues, medir la variación de capacitancia para tener idea del nivel del líquido en el tanque.

La ventaja de este sistema, consiste en la facilidad de - instalación, si son tanque a presión, y se puede utilizar también para medir niveles de muchas sustancias granulares.



MEDICION DE NIVEL POR CAPACITANCIA

FIG. NO. 5.3.6



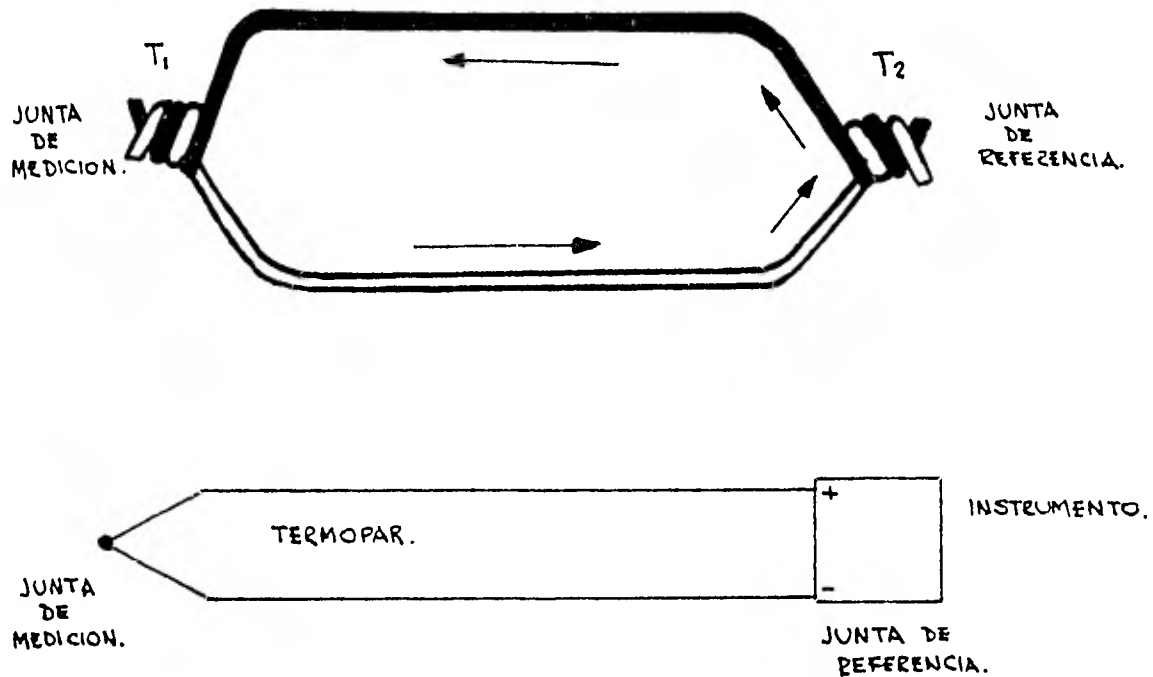
#### 5.4 Temperatura.

Cuando el cuerpo se calienta, la velocidad de vibración de sus moléculas aumenta rápidamente. Esto produce diferentes efectos físicos; en el caso del metal, varían tanto sus di men sio nes como su resistencia eléctrica; en el caso de un fluido contenido en un recipiente cerrado, su presión aumenta. Un instrumento mide la temperatura debido a que es sensible, por lo menos, a uno de los efectos físicos producidos por el incremento de actividad molecular.

Uno de los efectos utilizados es la termoelectricidad. Cuando dos hilos de diferentes materiales, por ejemplo hie rr o y constantan, o níquel y cobre, etc. se unen rígidamente por ambos extremos, quedan formando un circuito cerrado con dos uniones de diferentes materiales. Si una de las -- juntas se conserva a más alta temperatura que la otra, se crea una diferencia de tensión, que es función de la diferencia de temperatura entre las dos uniones. Conectando un aparato de medida al circuito y manteniendo una de las jun tas a temperatura de la otra unión. La unión a la que se midió la temperatura, representado el elemento sensitivo, es el termopar. La otra unión es la de referencia. Esta úl tima se encuentra normalmente como parte del instrumento, Figura No. 5.4.1, el aparato de medida puede ser un mili-- voltmetro o bien un potenciómetro.

Otro efecto del calor es el cambio de resistencia eléctrica de un hilo metálico. Esta característica es utilizada por los termómetros de resistencia.

Cuando un fluido está encerrado, su presión aumenta cuando su temperatura se incrementa. En los termómetros más comunes, hay fluidos herméticamente obturados, y su cambio de presión se usa en la medición de temperatura.



PRINCIPIO DE OPERACION DE UN TERMOPAR

FIG. NO. 5.4.1

La expansión de un líquido o de un sólido, es otro efecto del calor. Un ejemplo es el termómetro de mercurio en tubo de vidrio. Este principio se aplica también en los "Elementos Bimetálicos" que consisten en dos láminas de metales de distinto coeficiente de dilatación, soldadas juntas. Una puede ser de latón y la otra de invar (aleación que tiene un coeficiente de temperatura de 1/20 de la de latón). Cuando el conjunto formado por los metales se calienta, se flexiona debido a que un metal se dilata mucho más que el otro. La curvatura de flexión es función de la temperatura de las laminillas y puede utilizarse como medida de ésta.

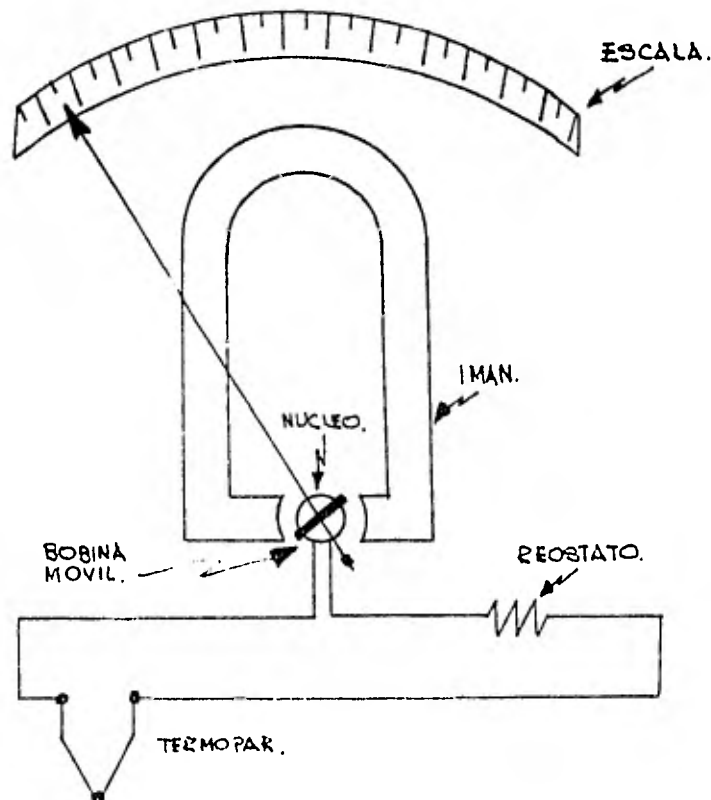
Principio del Milivoltmetro.

Las medidas de temperatura con milivoltímetros se fundan

en que el termopar origina una tensión o f.e.m. (fuerza - electromotriz) que produce la desviación de la aguja de - un milivoltmetro intercalado en el circuito cuya escala está directamente calibrada en grados de temperatura.

El multímetro de bobina móvil (Figura No. 5.4.2) combina la acción de dos campos magnéticos: uno de ellos es debido a un imán permanente fijo y el otro aparece a causa de la circulación de corriente por las espiras de una bobina que puede girar entre los polos de aquel. La interacción de ambos campos tiende a hacer girar la bobina, con un -- par proporcional a la corriente que circula por ella.

La desviación de la bobina es indicada sobre una escala - por una aguja solidaria al eje de aquella.



ESQUEMA DE UN MILIVOLTMETRO

FIG. NO. 5.4.2

El milivoltmetro que se usa para la medición del potencial eléctrico de termopares tiene una amplitud de la tensión medida de 0 a 50 mv. aproximadamente.

Con la variación de la temperatura también el hilo de cobre de la bobina del galvanómetro sufre cambios de resistencia, por lo cual se usa una resistencia con coeficiente de temperatura negativo, que conectado en serie con la bobina, compensa las variaciones de su resistencia debidas a cambios de temperatura.

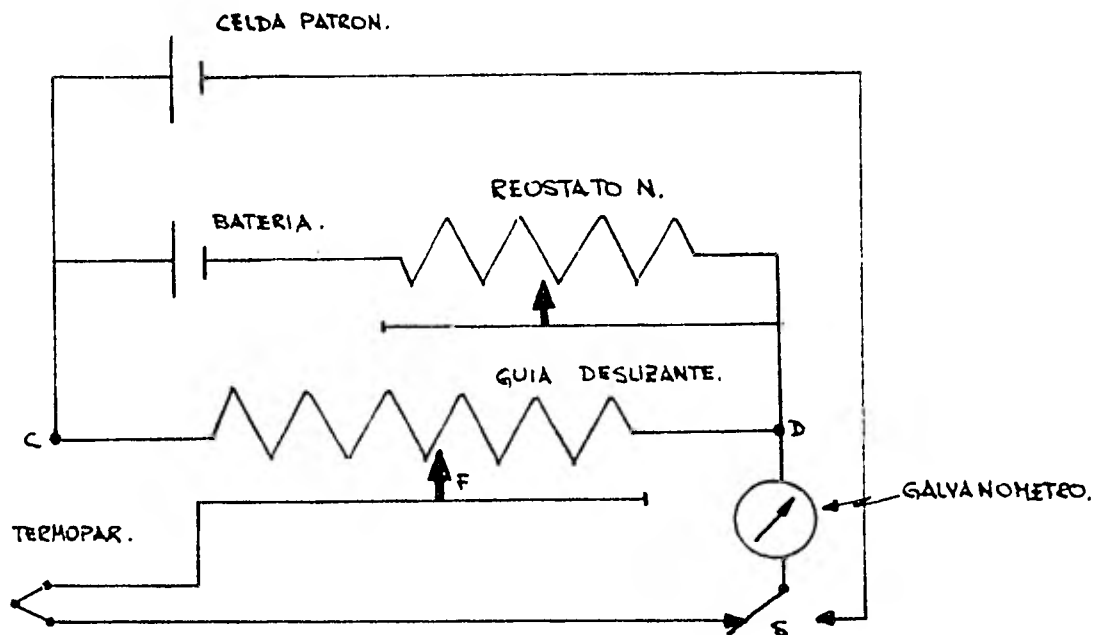
La importante ventaja del milivoltmetro es su bajo costo, su exactitud, aunque inferior a la de otros instrumentos, es satisfactoria para una gran parte de sus aplicaciones industriales.

#### Principio del Potenciómetro.

La diferencia básica entre el método de desviación del milivoltmetro y el método de reducción a cero del potenciómetro reside en que el primero mide directamente la f.e.m. de la salida del termopar e indica su magnitud, mientras que el potenciómetro necesita una segunda fuente de tensión, la salida de la cual se ajusta para compensar la salida del termopar. El ajuste requerido para lograr esta compensación es lo que mide el potenciómetro.

En la Figura No. 5.4.3, se muestra el esquema simplificado de un milivoltmetro potenciómetro.

En el esquema se observa el contacto "F" que es deslizante, puede tomar cualquier posición entre "C" y "D" y encontrar el ajuste para el cual la caída de tensión entre "F" y "D" debida a la intensidad que circula por el circuito de la batería, equilibre exactamente la f.e.m. del termopar aplicada a los mismos puntos; en esta condición no fluye co---



CIRCUITO DE UN POTENCIOMETRO

FIG. NO. 5.4.3

riente alguna en el circuito del termopar y el galvanómetro indica desviación a cero. Si la f.e.m. de la batería es constante, habrá una posición y solo una del contacto "F" que equilibra el valor de la f.e.m. de termopar. Por lo tanto, las posiciones del contacto pueden indicarse sobre una escala graduada directamente en temperatura. Para cumplir la condición de que la f.e.m. de la batería sea constante, debe compensarse periódicamente su disminución, ello se logra variando el reostato normalizador, con lo que consigue mantener constante la caída de tensión en los bordes "C" y "D" del potenciómetro de medida, lo que equivale a la condición expuesta, el control periódico de la batería (suele ser una pila seca) es posible por medio de una pila patrón.

El potenciómetro es un instrumento de muy alta precisión,

extremadamente sensible para la medición de pequeños potenciales eléctricos.

Termopares.

En la tabla siguiente se muestran los metales y combinaciones más comunes, junto con sus símbolos:

TERMOPAR	SISTEMA DE TERMOPAR		
	Combinación	Alambre Positivo	Alambre Negativo
1. Hierro-Constantan	Hierro	Constantan	J
2. Cromo - Alumel	Cromo	Alumel	K
3. Platino/10% Rodio-Platino	PT/10% Rh	Platino	S
4. Platino/13% Rodio	PT/13% Rh	Platino	R
5. Cobre-Constantan	Cobre	Constantan	T

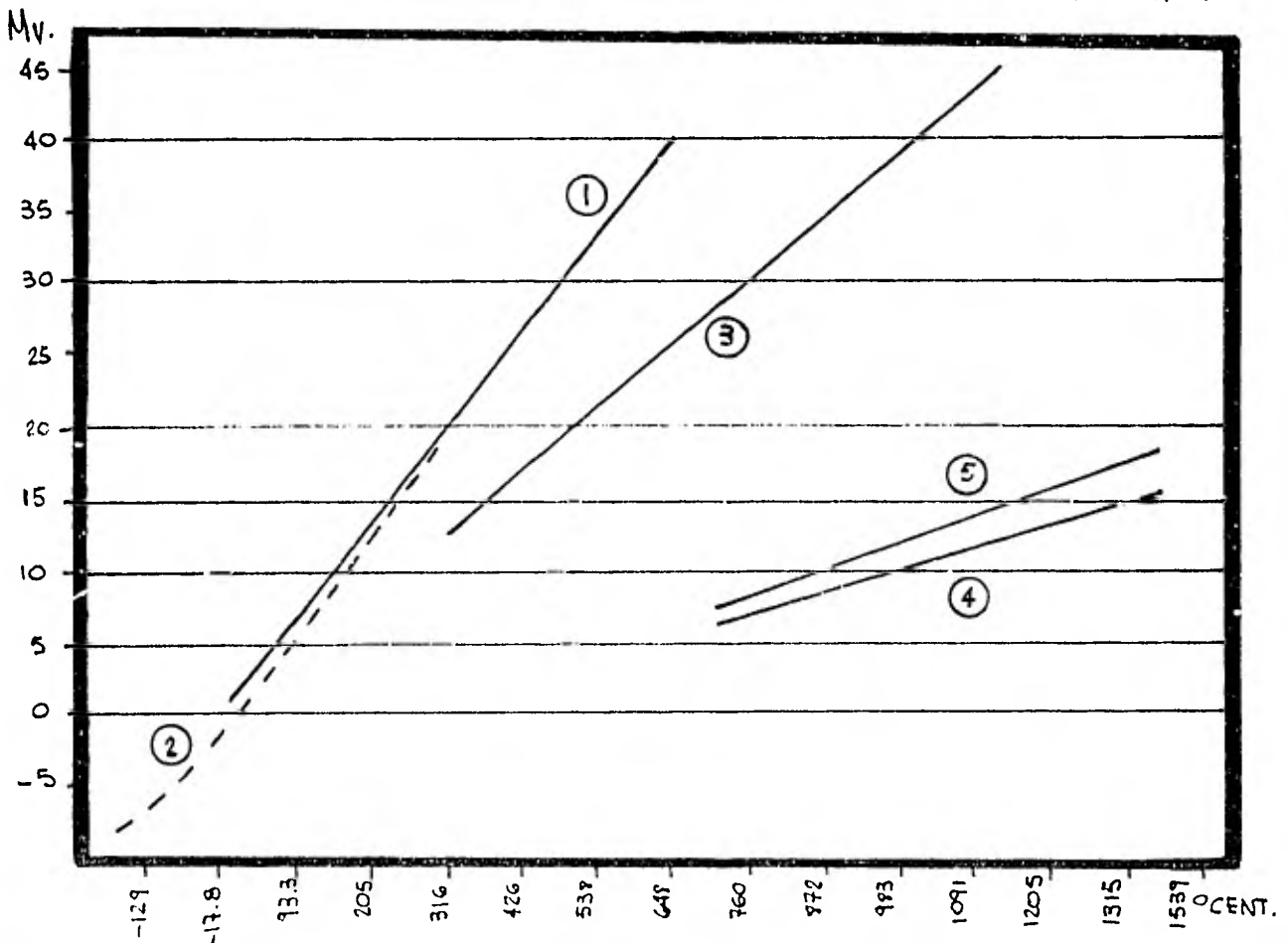
Los termopares que contienen platino se llaman de metal noble y todos los demás, de metal básico. La elección de un termopar depende en gran parte de la temperatura para la que se va a utilizar.

En la Figura No. 5.4.4. se muestran los límites de temperatura, éstos están determinados no solo por el material, sino también por el grueso del hilo, si el uso a temperatura máxima es intermitente o continuo por la naturaleza de la envoltura del termopar o del tubo de protección, si lo lleva.

Siempre es preferible proteger un termopar (aunque la cali

dad de respuesta disminuya) a fin de reducir las posibilidades de que sufra daños mecánicos y contaminaciones. Con este propósito se utilizan tubos y paredes protectoras -- llamados termopozos; la elección del material viene determinada por las condiciones de la atmósfera a que hayan -- de estar expuestas. Los termopares de metal noble requieren una consideración especial, debido a que son sensibles a vapores metálicos que se puedan producir en un tubo protector o pared de este material y requieren por tanto, el uso de tubos de cerámica; como estos tubos cerámicos son frágiles, se utilizan frecuentemente con un segundo tubo protector de metal.

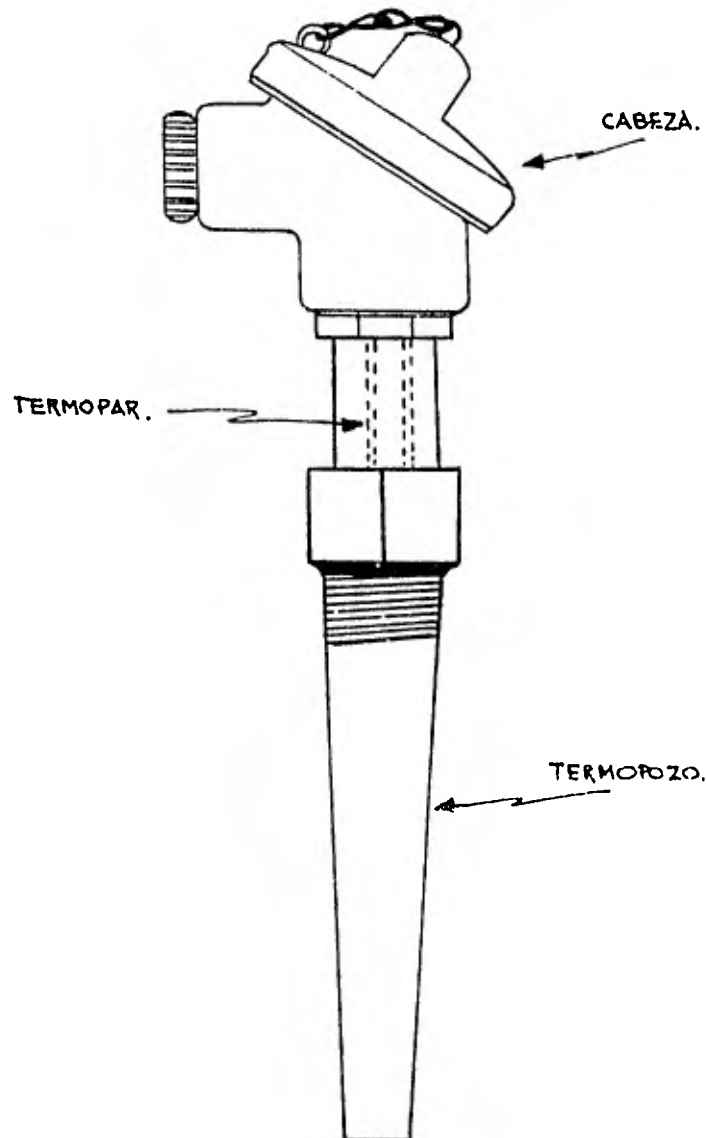
JUNTA DE REFERENCIA: 23.9°C.



F.e.m. DE SALIDA DE LOS TERMOPARES RESPECTO A LA TEMPERATURA

FIG. NO. 5.4.4

Los tubos y las paredes protectoras introducen un considerable retraso o inercia en la medición de la temperatura. Los materiales estándar del tubo son del tipo acero inoxidable 304 e inconel. A la vez que esta disposición les da la protección mecánica deseada, interfiere muy poco en la velocidad de respuesta, ya que no existe separación entre la junta de medida y el tubo protector.



ENSAMBLE DE TERMOPAR Y TERMOPOZO

FIG. NO. 5.4.5



El termopar se conecta al instrumento de medida, por medio de un cable bifilar de características termoeléctricas similares a las de los hilos del termopar.

#### Sistemas Térmicos.

Existe una diferencia decisiva entre los instrumentos descritos anteriormente y los sistemas térmicos. Con aquellos, el efecto del calor expresado en temperatura se convirtió en señal eléctrica.

Ahora, la temperatura da lugar a un movimiento mecánico, debido a una presión o expansión, cuya magnitud es detectada y medida.

Los sistemas térmicos de un manómetro de presión de fluidos comprenden: el bulbo del termómetro, un elemento de expansión (como un tubo Bourdon, un diafragma o un fuelle) y un tubo capilar que conecta el bulbo y el elemento de expansión.

La clasificación que se ha hecho sobre los termómetros de presión de fluidos, es en cuatro clases básicas:

- Clase I      El sistema térmico está completamente lleno de un líquido no metálico y opera por el principio de la expansión de éste.
  
- Clase II     El sistema térmico está parcialmente lleno de un líquido volátil y opera por el principio de tensión de vapor.
  
- Clase III    El sistema térmico está lleno de un gas y opera por el principio del cambio de presión con la temperatura.
  
- Clase IV     El sistema térmico está lleno con mercurio o

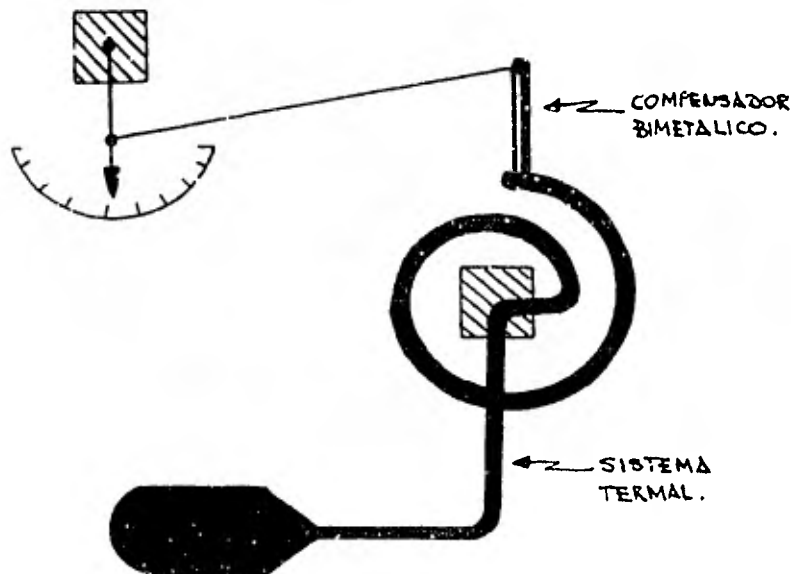
mercurio-talio, en amalgama eutéctica, opera por el principio de dilatación del líquido.

El fluido contenido en todo el sistema térmico es normalmente sensible a la temperatura. Esto puede producir errores debidos a los cambios de temperatura ambiente a lo largo de la tubería capilar y el elemento de expansión.

#### Sistemas Llenos de Líquido no Metálico (Clase I).

Las temperaturas máximas que pueden ser medidas con estos instrumentos son generalmente  $315^{\circ}\text{C}$ , lo mismo que con los sistemas de Clase II. Los límites más bajos pueden llegar a  $87.3^{\circ}\text{C}$  o hasta  $184.5^{\circ}\text{C}$ .

Para compensar la temperatura ambiente, existen sistemas de compensación por medio de placas bimetálicas (Figura - No. 5.4.6)



SISTEMA TERMAL CON COMPENSACION

FIG. NO. 5.4.6

### Sistemas Parcialmente Llenos con Líquido Volátil (Clase II).

Los sistemas de la Clase II son probablemente los que más se utilizan, ya que son los de más rápida respuesta y más bajo costo.

Se utilizan varias clases de líquidos, como propano, éter etílico, tolueno, según los alcances del instrumento. El bulbo se llena parcialmente con el líquido y el resto del sistema con la misma sustancia en estado de vapor.

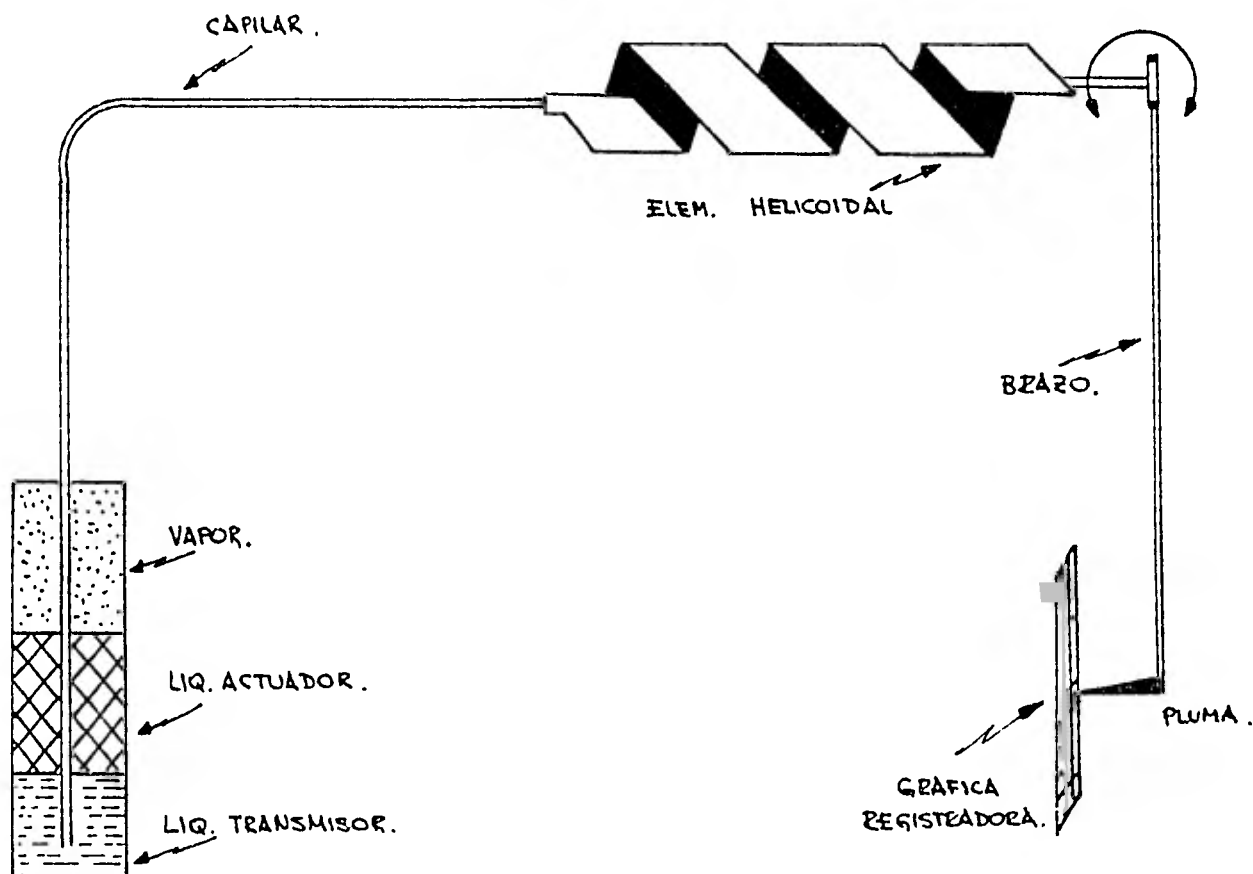
La exactitud en estos sistemas no se afecta por cambios en la temperatura ambiente, ya que estas variaciones no oscilan alrededor de la temperatura del proceso que el instrumento va a medir.

Otro factor que afecta al instrumento, es el efecto de cabeza. El líquido pesa más que el vapor, y si el bulbo se monta más alto que el instrumento de medida, la espiral de Bourdon responderá a la diferencia en peso líquido-vapor con el error correspondiente y también si el bulbo queda más abajo del instrumento, Figura No. 5.4.7.

### Sistemas Llenos de Gas (Clase III).

Junto con los termómetros de la Clase IV, éstos se pueden utilizar con temperaturas relativamente altas, hasta los 538°C y también con temperaturas más bajas que cualquier otro instrumento.

Se utilizan generalmente con grandes amplitudes de escala, debido a que el incremento de presión por grado de incremento de temperatura, es pequeño.



SISTEMA TERMICO DE PRESION DE VAPOR

FIG. NO. 5.4.7

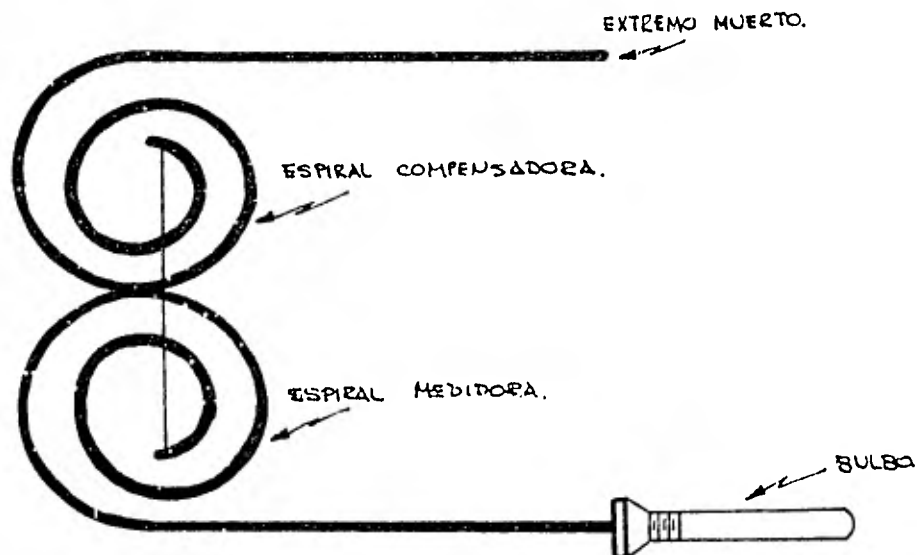
En aplicaciones normales, la Clase III es por lo tanto, - el sistema más lento. En otras aplicaciones, que es reduciendo el tubo capilar en su longitud y el bulbo más pequeño, como se une para transmisores de temperatura, se incrementa bastante la respuesta.

Sistemas Llenos de Mercurio  
(Clase IV).

El mercurio requiere un sistema térmico de acero estañado. Donde las condiciones del proceso no permiten el uso de este material, debe elegirse otra clase.

Para compensar los cambios en la temperatura ambiente, se utilizan dos métodos:

- 1) Caja de compensación, la cual contrarresta los efectos del cambio de temperatura solamente en la caja del instrumento.
- 2) Compensación completa, la cual incluye la compensación también en la tubería capilar.



COMPENSACION COMPLETA PARA SISTEMAS TIPO CLASE IV

FIG. NO. 5.4.8

Para el sistema de compensación completo, se utilizan dos tubos capilares y dos espirales; por lo tanto, dos sistemas térmicos llenos con el mismo fluido. Sin embargo, sólo un tubo capilar está conectado con el bulbo de medición; el otro, es un tubo compensador y está taponado en el extremo que correspondería al bulbo. El efecto es que ambas tuberías reaccionan a la temperatura ambiente, pero sólo una responde al efecto adicional del bulbo. Las dos espirales están montadas de tal forma, que su movimiento es de sentido contrario, entonces las variaciones de temperatura en los capilares y espirales se contra-restan.

#### 5.5 Otras Variables.

En la industria se usan, dependiendo de la complejidad -- del proceso, otras variables a medir o controlar, pueden ser humedad, densidad, viscosidad, velocidad, análisis de PH, conductividad, etc. Tal vez menos usadas, pero no -- por eso, menos importantes.

En esta tesis no se profundiza en estas variables, pues -- se les dió un poco más de importancia a lo que es flujo, nivel, presión y temperatura, que son las variables básicas a controlar en cualquier tipo de industria.

#### 5.6 Elementos Finales de Control.

Fundamentalmente, una válvula de control está constituida por el cuerpo y por el activador. 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 control neumática (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.

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. Las válvulas tipo globo son las más comunes.

#### Características de Válvulas 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.

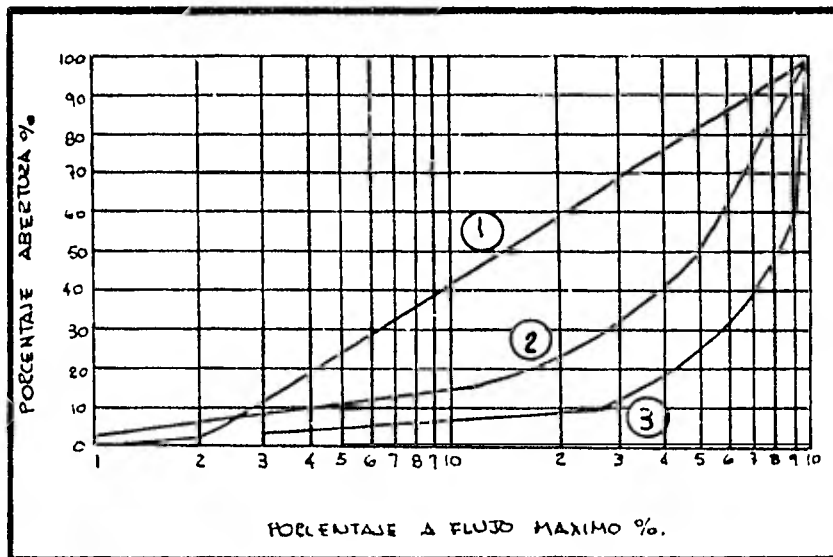
Las características usuales en las válvulas son: la lineal, igual porcentaje, apertura rápida y la parabólica, siendo esta última muy poco usual actualmente.

En la Figura No 5.6.1 se muestran las características inherentes de las válvulas de control, en esta curva 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 solo el 40% de apertura. Esta característica es empleada generalmente en sistemas de control ON-OFF.

En la característica lineal, se pretende que para cada por

centaje 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.



- 1- IGUALES %.
- 2- LINEAL.
- 3- ON-OFF.

CARACTERISTICAS DE DISEÑO PARA VALVULAS

FIG. NO. 5.6.1

Aparentemente la válvula de característica lineal sería la mejor para los sistemas de control, pero su comportamiento deja de ser lineal si la caída de presión aumenta al disminuir la apertura. Al aumentar esta deformación de la característica 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.

Tipos de Válvulas de Control:

Tipo Globo.- Son las más utilizadas, están constituidas fundamentalmente por el cuerpo que guía el 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 válvula de puerto sencillo y doble puerto.

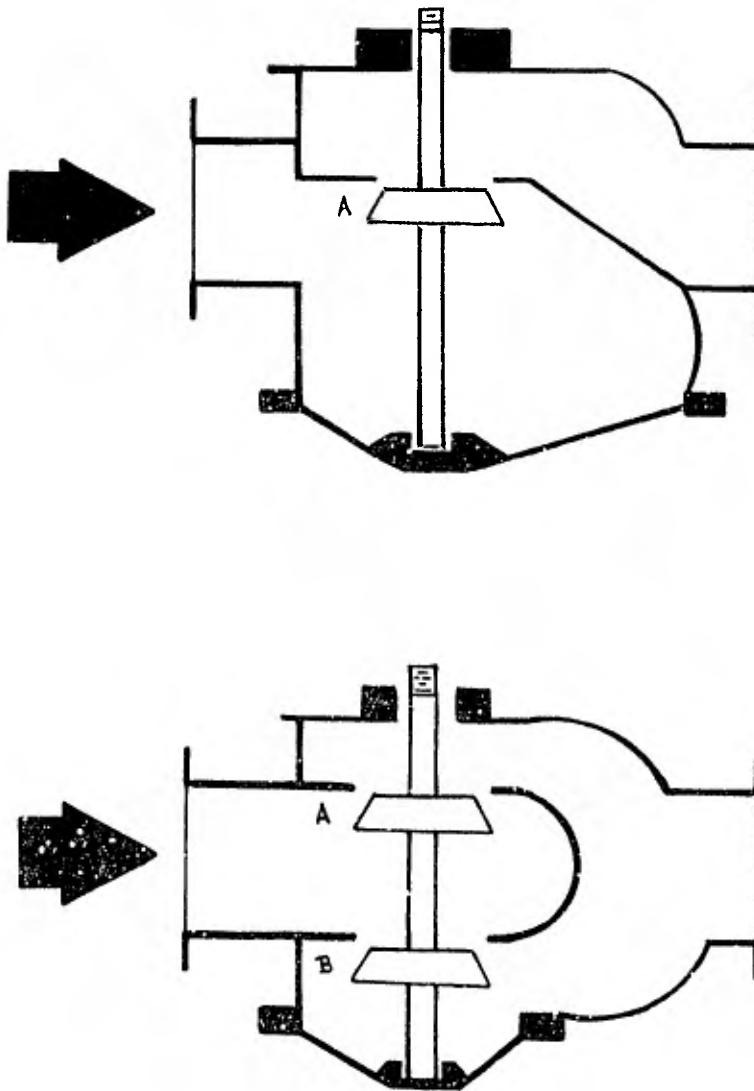
Las válvulas de puerto sencillo se utilizan cuando se requiere cierre hermético y las válvulas de doble puerto -- presentan una capacidad de flujo mayor y tienen la ventaja de presentar fuerzas balanceadas sobre el tapón, pero no tienen cierre hermético.

Cuando la temperatura es extremosa, se pueden considerar bonetes de extensión con aletas de radiación, para evitar daños al actuador por altas temperaturas.

Tipo Mariposa.- Es una válvula de tipo rotatorio, se aplican generalmente cuando se requiere una gran capacidad de flujo, están limitadas a caídas de presión pequeñas.

La válvula mariposa consta de un cuerpo muy sencillo de forma anular del tamaño de la tubería, la parte móvil es un disco, cuyo diámetro coincide con el diámetro interno del cuerpo, el disco gira desde 0° a 90°, por medio de -- una flecha conectada al actuador.

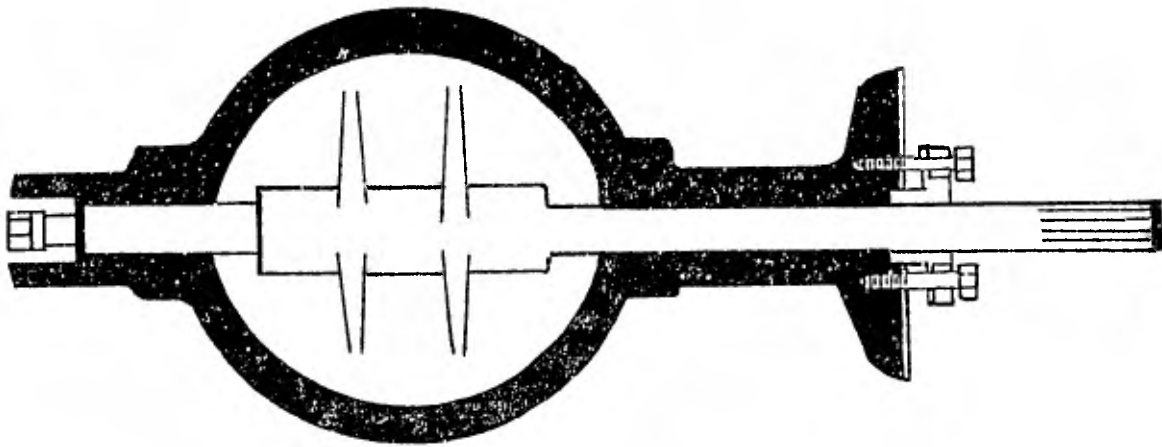
Tipo Bola.- Este tipo de válvulas, por medio de algún elastómero (teflón), son de cierre hermético. Son muy usadas en líquidos con fibras. El cuerpo contiene una esfera gira



DISEÑOS BASICOS DE VALVULAS DE GLOBO CON  
PUERTO SENCILLO Y DOBLE

FIG. NO. 5.6.2

toria con un corte tal, que al girar produce la modulación del flujo. La forma del corte puede variar, según la característica del flujo requerido.

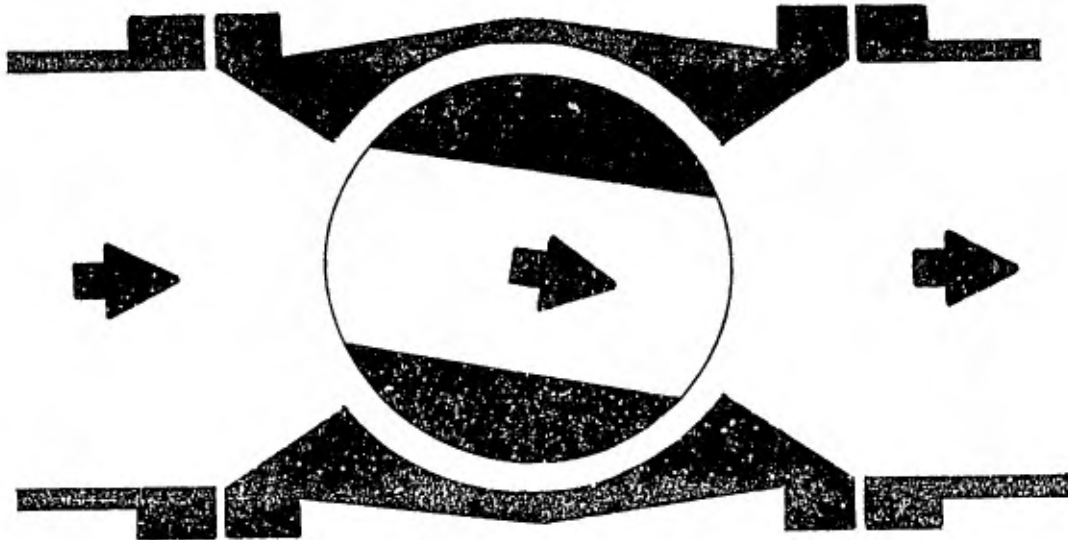


VALVULA TIPO MARIPOSA

FIG. NO. 5.6.3

Posicionadores.

Es un dispositivo, que recibe la señal de control, y una -  
medición de la posición del vástago del actuador, las com-  
para y manda al actuador la señal de corrección, hasta que



PRINCIPIO DE LA VALVULA DE BOLA

FIG. NO. 5.6.4

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 histeresis, etc.; 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, por alta presión en la tubería o grandes diámetros.

#### Dimensionamiento de Válvulas de Control.

El dimensionamiento de las válvulas se basa en el cálculo del factor de capacidad conocido como "Cv" y en la selección apropiada del tamaño de la válvula en las tablas publicadas por los fabricantes en las que relacionan el tamaño con el "Cv".

El factor de capacidad "Cv", se define como: el número de galones por minuto, de agua a 60°F, que atraviesan por la válvula, cuando la caída de presión es 1 lb/Pulg.<sup>2</sup>

El procedimiento y las fórmulas del "Cv" varían con cada fabricante de válvulas, aquí se ha seleccionado uno de los procedimientos más sencillo, cuyas fórmulas son las siguientes:

$$\text{Para Líquidos:} \quad C_v = V \sqrt{\frac{G}{P}}$$

$$\text{Para Gases:} \quad C_v = \frac{Q}{1360} \sqrt{\frac{T}{\Delta P} \frac{(G)}{(P_2)}}$$

$$\text{Para Vapores} \quad C_v = \frac{W}{63.3 \sqrt{\Delta P \cdot Y}}$$

Donde:

- Cv = Capacidad de la válvula
- V = Flujo de líquido (Gal/Min.)
- Q = Flujo de Gas (SCFH = ft<sup>3</sup>/hr. a 14.7 lb/pulg.<sup>2</sup>, 60°F)
- W = Flujo de Vapor (lb/hr.)

- G = Densidad relativa a Cond. de Operación
- Y = Densidad a la salida (lb/ft<sup>3</sup>)
- T = Temperatura de Operación ( $t_R = ^\circ F + 460$ )
- $\Delta P = P_1 - P_2 =$  Caída de Presión

NOTA: Todos estos cálculos y factores están hechos exclusivamente para el sistema inglés.

Una vez calculado el "Cv" con el flujo normal y con el -- flujo máximo, se escoge de las tablas de los fabricantes, una válvula cuyo "Cv" al 100% de apertura sea un poco mayor que 1.4 "Cv" normal y que cubre el "Cv" para flujo -- máximo.

=%

DIAM.	INT.	ABERTURA DE VALVULA %										CARR.	AREA
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10		
1.50	1.25	30.0	30.0	28	24.0	15.0	8.6	5.7	4.4	3.0	2.4	1.0	1.23
	1.00	22.4	19.6	17.8	12.2	8.2	5.2	3.8	2.8	2.2	1.5	.75	.785
	.81	15.8	14.8	13.1	7.7	4.2	2.7	2.0	1.4	.8	.75	.75	.405
2.00	.62	8.9	7.2	4.9	3.1	2.1	1.4	.9	.7	.5	.3	.75	.307
	1.62	50.0	43.7	39.8	27.4	19.3	11.6	8.4	6.3	4.9	3.9	1.50	2.07
	1.25	34.8	30.4	27.7	19.0	12.7	8.1	5.9	4.4	3.4	2.7	1.00	1.23
	.81	17.8	15.5	14.2	9.8	6.5	4.2	3.0	2.3	1.8	1.3	.75	.518

TABLA TIPICA DE "Cv"

FIG. NO. 5.6.5

## Selección de Válvulas.

La selección de válvulas de control incluye:

- . Tamaño
- . Característica
- . Material
- . Tipo

### . Tamaño.

El tamaño de una válvula de control está en función -- del factor de capacidad "Cv" de acuerdo con las tablas (como la mostrada anteriormente).

El tamaño de la válvula se selecciona de tal forma, -- que el "Cv" normal esté aproximadamente al 70% de la capacidad total de la válvula y que el "Cv" máximo requerido esté por abajo del 90%.

### . Característica.

Para un sistema de control "ON-OFF", las características recomendables son la lineal y la de igual porcentaje dependiente de las características del proceso.

Sistemas de Nivel.- Para los controles de nivel es posible usar la característica lineal, a menos que la caída de presión decrezca al aumentar la carga hasta un 20% o menos de la caída máxima; en este caso, se recomienda una de igual porcentaje.

Sistemas de Presión.- En este caso, es recomendable la característica de igual porcentaje, a menos que la caída de presión aumente, al aumentar la carga, hasta un 20% o más, entonces se prefiere una válvula lineal.

Sistemas de Flujo.- Si el rango del punto de ajuste de -- flujo es muy amplio, se recomienda una válvula lineal. Si el rango es pequeño pero hay aumentos de la caída de presión al disminuir la carga, entonces se recomienda una -- válvula de igual porcentaje.

Hay que considerar que lo anterior es solo una recomendación muy superficial, puesto que la característica óptima para un proceso depende de un análisis dinámico completo del proceso.

Materiales.- Los factores que intervienen en la selección de los materiales de construcción son entre otros, corrosión, erosión, presión, temperatura y costo. Si los factores anteriores lo permiten, lo usual es utilizar para el cuerpo acero al carbón y para los interiores, acero inoxidable.

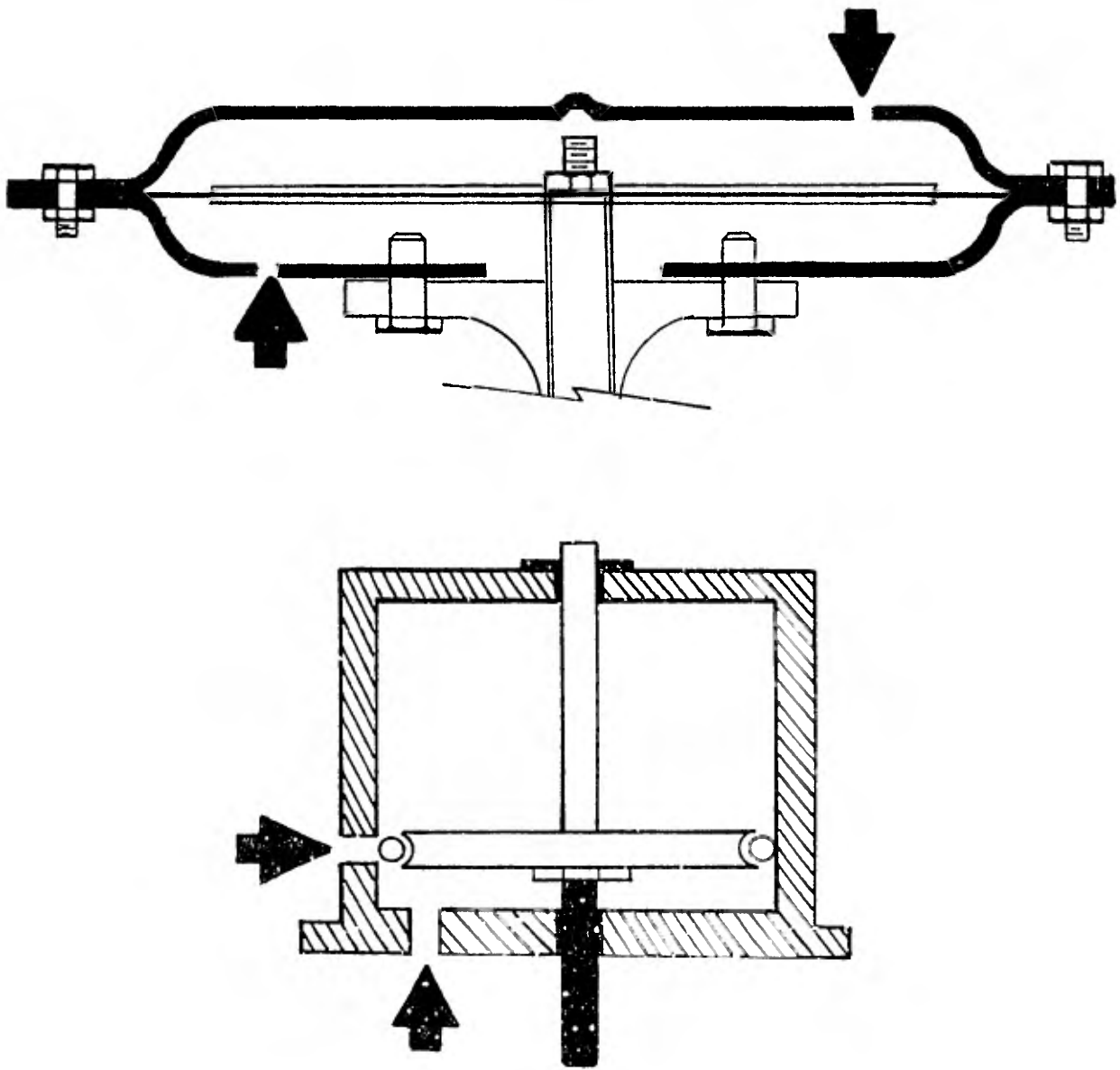
Actuadores.- Un actuador es el mecanismo que convierte -- una señal de control eléctrica o neumática, en un movi--- miento que actúa al elemento final de control en contacto con el proceso (comúnmente a una válvula de control).

Los actuadores pueden mover válvulas de control, compuertas, reguladores de tiro, guías para transportes de sólidos, etc.

Los actuadores más conocidos son los de tipo diafragma y tipo pistón (Figura No. 5.6.6).

En los actuadores de diafragma la señal neumática actúa sobre un diafragma flexible, la fuerza necesaria para mover el tapón de una válvula de control depende del área -- del puerto, de la caída de presión y del tipo de válvula. Existen tamaños diferentes de diafragmas según la fuerza requerida.





ACTUADOR TIPO DIAFRAGMA Y TIPO PISTON

FIG. NO. 5.6.6

Ayudado de un resorte se pueden lograr diafragmas de acción directa o acción inversa, esto es que cuando no haya aire, la válvula quede abierta o cerrada dependiendo del proceso.

Los de tipo pistón, se utilizan cuando se requiere una -- fuerza muy grande sin mucha área de presión.

Los pistones pueden ser actuados por una señal neumática en oposición de un resorte, o pueden ser actuados por dos señales neumáticas, una para abrir y otra para cerrar.

## CONCLUSIONES

Por lo que se ha visto en el transcurso de la tesis, la -- instrumentación puede tener varias alternativas para hacer la misma función, pero ahí es donde entra el criterio del ingeniero, para determinar, qué es lo que más conviene para el proceso, cual de las opciones es más económica, qué instrumento es más delicado o más duradero, cual nos da ma yor seguridad en un proceso altamente peligroso, cual es -- el material más recomendado para que resista la corrosión y las altas presiones, cuidando también que el precio no se dispare.

Aquí es donde se ve cual es el trabajo de un ingeniero, -- que tiene que balancear costo inicial y de mantenimiento -- de la planta, seguridad, funcionalidad y tratando de dar -- todas las comodidades al operario, tanto para operación co mo para mantenimiento.

Con esta tesis, se tiene una idea más precisa de qué es la instrumentación, en una forma básica, pues si profundiza-- mos a detalle en cada instrumento, su forma de instalación, sus características especiales, como son: sensibilidad, -- rangeabilidad, rangos de uso, cálculos, materiales standard calibración, mantenimiento, teoría de control y su desarrollo matemático; ¿ como especificarlos?, se habría llevado varios volúmenes y no se habría cumplido con el propósito inicial.

## B I B L I O G R A F I A :

- D. M. Considine "Process Instruments and Controls Handbook" 2a. Edición, McGraw Hill 1975.
- John R. Lavigne An Introduction to Paper Industry Instrumentation. Revised Edition 1977.
- W. G. Andrew Applied Instrumentation in the - Process Industries Vol. II 1974.
- Fisher Control Typical Application of AC<sup>2</sup> - Instruments. 1972
- W. G. Holzbock Instrumentos para Medición y - Control 2a. Edición, C.E.C.S.A. 1978
- Pedro Salazar Curso de Control Automático para la Industria.
- Leeds & Northrup Catalog of Instrumentation Catalog HO.0001-1179. 1979
- Smith Meters Catalog of Flow Measurement (Geosource) 1980.
- Eagle Eye (Annubar) Medidores de Flujo y de Presión Diferencial. Boletín M-101
- Dieterich Standard Corporation Medición de Flujo, Línea Industrial. Boletín DS-1000 M (8-80) Sección B.

. . . Bibliografía.

Phillips Petroleum  
Company

Symbols and Coding System,  
Typical for Mechanical and Process  
Flow Sheets, Engineering Standards  
1.10-6, Rev. 10

Latinoamericana de  
Ingeniería

Criterios de Diseño para  
Instrumentación en Plantas Petro--  
químicas. Referencia RD-IN-001

Requerimientos Generales para el  
Diseño de los Sistemas de Control  
Automático de Plantas Petroquímicas  
y de Plantas de Procesamiento de  
Hidrocarburos. Referencia RD-IN-001