

T
629.83
PIC
V.1



Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

”SIMULADOR DE CONTROL PARA
PROCESOS
DE TEMPERATURA“

TOMO I

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:
LUIS GABRIEL PICO SALTOS

Guayaquil - Ecuador

Año - 2001



DEDICATORIA



A mi familia

A mi abuela

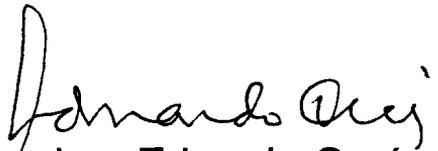
A mis Padres

A mis hermanos

TRIBUNAL DE GRADO



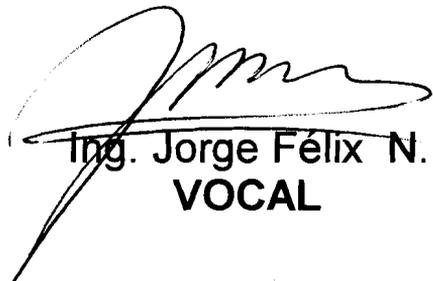
Ing. Mario Patiño A.
SUBDECANO FIMCP



Ing. Eduardo Orcés P
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Jorge Duque R.
VOCAL



Ing. Jorge Félix N.
VOCAL

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesis me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Luis Gabriel Pico Saltos

Luis Gabriel Pico Saltos.



RESUMEN

El trabajo aquí presentado consiste en un simulador electroneumático de Procesos Industriales, diseñado y construido en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL, el cual puede ser utilizado como un instrumento práctico para instrucción en la técnica del control automático de procesos.

El simulador se construyó con la finalidad de realizar pruebas y elaborar a partir de las mismas las respectivas guías de laboratorio para el curso de Sistemas de Control.

Las pruebas realizadas se hicieron en un lazo de control de temperatura, la cual es una de las variables más comunes en la Industria de Procesos.

El trabajo práctico realizado consistió en:

- a) Instalación de la red neumática interna y externa del simulador,
- b) Instalación eléctrica y electrónica del simulador de control de temperatura,
- c) Instalación del panel de control electroneumático,

- d) Calibración neumática y electroneumática de todos los instrumentos constitutivos del sistema de control,
- e) Realización de pruebas de respuesta del sistema de control a entradas escalonadas.

Aunque el controlador requerido para estas pruebas es sólo de tipo neumático, su aplicación es muy amplia y es de gran soporte para el entendimiento de los fundamentos teóricos de control utilizados.

Como la tecnología avanza, se deja lista la instalación electrónica, para que en el futuro se puedan hacer las pruebas electro-neumáticas con la ayuda de la computadora o un controlador electrónico.

El desarrollo de la tesis se hizo de tal manera, que sea de fácil entendimiento para estudiantes y profesionales en la rama de ingeniería en mecánica, otras ramas afines y para personas que gustan de esta ciencia.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE TABLAS.....	VI
INDICE DE GRAFICOS.....	VII
INTRODUCCION.....	1

CAPITULO 1: FUNDAMENTOS DE CONTROL

1.1 Generalidades.....	3
1.2 Lazos de control.....	4
1.2.1 Lazo de control abierto.....	4
1.2.2 Lazo de control cerrado.....	9



1.3 Definiciones de control.....	13
1.4 Modos de control.....	22
1.4.1 Generalidades.....	22
1.4.2 Modos de control de dos posiciones.....	31
1.4.3 Modo de control proporcional.....	38
1.4.4 Modo de control integral.....	55
1.4.5 Modo de control proporcional más integral.....	58
1.4.6 Modo de control proporcional más derivativo.....	65
1.4.7 Modo de control proporcional más integral.....	71

CAPITULO 2: FUNDAMENTOS DE INSTRUMENTACION

2.1 Definiciones.....	76
2.2 Clases de instrumentos.....	80
2.2.1 Clases de instrumentos según la variable de proceso.....	84
2.3 Errores.....	85
2.3.1 Generalidades.....	85
2.3.2 Errores de medida en los instrumentos.....	86
2.3.3 Causas de los errores de medida.....	87
2.4 Medición de la temperatura.....	92
2.4.1 Generalidades.....	92

CAPITULO 3: INSTRUMENTOS DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

3.1 Generalidades.....	110
3.2 Mediciones de presión y vacío.....	110
3.2.1 Descripción de instrumentos de presión más importantes y auxiliares.....	112
3.2.1.1 El manómetro de tubo en "U".....	112
3.2.1.2 El manómetro de tubo Bourdon.....	115
3.2.1.3 El manómetro de diafragma y fuelle.....	117
3.2.1.4 El probador de peso muerto.....	120
3.3 Descripción de operación de los instrumentos.....	121
3.3.1 El termómetro industrial.....	121
3.3.2 Transmisores indicadores neumáticos de temperatura.....	126
3.3.3 Controladores de temperatura.....	134
3.3.3.1 Controlador registrador neumático.....	139
3.3.4 Convertidores.....	149
3.3.4.1 Convertidor de presión a corriente.....	150
3.3.4.2 Convertidor de corriente a presión.....	157
3.3.5 Reguladores de presión neumáticos.....	163
3.3.6 Válvula solenoide.....	178
3.3.6.1 Válvula solenoide servopiloteada.....	182

CAPITULO 4: DESCRIPCION DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

4.1 Generalidades.....	183
4.2 Esquemas principales.....	188
4.2.1 Sistema a controlar.....	188
4.2.2 Lazo de control.....	188
4.3 Descripción y funcionamiento.....	188
4.3.1 Sistema a controlar.....	188
4.3.1.1 Funciones de las válvulas HV# y FCV1.....	199
4.3.2 Lazo de control.....	210
4.3.2.1 Instalación del termostato.....	217
4.3.2.2 Conexiones neumáticas.....	219
4.3.2.3 Válvulas neumáticas.....	222
4.3.2.4 Válvulas solenoides servopilotadas.....	231
4.3.3 Pre-marcha del lazo de control.....	239
4.3.4 Lazo de formación de control de proceso.....	255

CAPITULO 5: CALIBRACION DE LOS INSTRUMENTOS

5.1 Generalidades.....	268
5.2 Errores de los instrumentos.....	271
5.3 Procedimiento general de calibración.....	285
5.4 Calibración de los instrumentos de presión.....	300

5.5 Calibración de los instrumentos del lazo de control de temperatura.....	301
5.5.1 Transmisor indicador neumático de temperatura Taylor.....	303
5.5.2 Controlador registrador neumático de temperatura Taylor.....	314
5.5.3 Convertidores Taylor.....	333
5.5.4 Válvula de control de flujo con accionamiento neumático Taylor..	343

CAPITULO 6: PRACTICAS DE LABORATORIO

6.1 Práctica # 1: Prueba de calibración de los manómetros.....	360
6.2 Práctica # 2: Prueba de calibración de los transmisores.....	386
6.3 Práctica # 3: Prueba de calibración del controlador neumático.....	403
6.4 Práctica # 4: Prueba de calibración de la válvula de control neumático	429
6.5 Práctica # 5: Prueba de calibración de los convertidores.....	447
6.6 Práctica # 6: Efecto del retardo en la respuesta del sistema de control	471
6.7 Práctica # 7: Efecto de las perturbaciones en la respuesta del sistema de control.....	513
6.8 Práctica # 8: Métodos de ajuste del controlador neumático.....	548

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	375
-------------------------------------	-----

APENDICES.....	641
----------------	-----

BIBLIOGRAFIA.....	656
-------------------	-----

ABREVIATURAS

TIT1	Transmisor indicador neumático de temperatura 1
TIT2	Transmisor indicador neumático de temperatura 2
TRC	Controlador registrador neumático de temperatura
MOD 30	Controlador electrónico
FCV1	Válvula de control de flujo 1(elemento final de control)
I/P ₁	Convertidor o transductor de corriente a presión 1
P/I ₁	Convertidor o transductor de presión a corriente 1
P/I ₂	Convertidor o transductor de presión a corriente 2
UMA	Unidad de mantenimiento del regulador de presión de aire
#	Número (1, 2, 3,...)
Reg. #	Regulador de presión de aire #
NV#	Válvula neumática de abre y cierre #
p	Presión
psi.	Libras fuerza por pulgada cuadrada de presión de aire
IN	Acceso a la señal de entrada
INPUT	Acceso a la señal de entrada
OUT	Acceso a la señal de salida
OUTPUT	Acceso a la señal de salida
AIR SUPPLY	Suministro de aire

G	Ganancia o Sensibilidad
High sensitivity	Alta ganancia
B.P.	Banda proporcional
P.B.	Porcentaje de banda proporcional
pen	Aguja de registro o indicación
set-pointer	Aguja de fijación de la temperatura deseada
rpm	Repeticiones por minuto
r_i	Ajuste integral en rpm
τ_i^R	Ajuste integral en rpm
min	Minutos
seg	Segundos
T_d	Ajuste derivativo o tiempo derivativo en min
τ_D	Rapidez de derivación o Ajuste derivativo en min
d/dt	Pre-actuación y estabilización
hub	Eje
span	Ajuste de multiplicación
zero	Ajuste de cero
s.p.#.	Set-point (punto de consigna) #
Range	Campo de medida
Span	Alcance
Accuracy	Exactitud

Precision	Precisión
Resolución	Mínima división
Dead zone	Zona muerta
P	Proporcional
PI	Proporcional más integral
PD	Proporcional más derivativo
PID	Proporcional más integral más derivativo
A.C.	Corriente alterna
D.C.	Corriente continua
A	Amperios de corriente
V	Tensión en voltios
Ω	Ohmios de resistencia
K Ω	Kilo-ohmios de resistencia
mA	Miliamperios de corriente
~	Señal de corriente alterna
-	Señal de corriente continua
+	Polo positivo de conexión eléctrica
-	Polo negativo de conexión eléctrica
	Conexión eléctrica a tierra
L#	Línea de fuerza #
N	Línea neutra

$R_{\#}$	Resistencia eléctrica #
K_W	Kilowatio de potencia
T	Termostato
$B_{\#}$	Bobina contactor #
C, C_1	Contacto de contactor
$B_{\#}, B_R$	Bobinas
R	Contacto de relé
F	Fusible
S_W	Switch de energización
$SW_{\#}$	Selector de vías eléctrico de tres posiciones #
$SE_{\#}$	Switch de enclavamiento para electro-válvulas #
T	Tiempo o Período en min o seg
T_u	Tiempo o Período último en min o seg
$t_{o\#}$	Tiempo de transporte (tiempo muerto) #, en min o seg
$\tau_{\#}$	Constante de tiempo #, en min o seg
e.a.	Error de angularidad
$R_{\#}$	Serpentines, o sistemas térmicos #
L	Longitud de serpentín en metros
A_t	Área transversal en metros cuadrados
$HV_{\#}$	Válvula manual para regular el flujo de agua #

lit/min	Litros por minuto
m^3/s	metros cúbicos por segundo
Q	Flujo de agua fría o agua caliente en lit/min o m^3/s
Kg/s	Kilogramo por segundo
F+Qc(x)	Flujo total de agua o flujo de mezcla en lit/min o Kg/s como función de una cierta variable x
Qc(t)	Flujo de agua caliente como función del tiempo en lit/min o Kg/s
F(t)	Flujo de agua fría como función del tiempo en lit/min o Kg/s
$^{\circ}C$	Grados centígrados o Celsius
$^{\circ}F$	Grados Fahrenheit
lb	Libra
Kg	Kilogramo
Kg/m^3	Kilogramo por metro cúbico
ρ, φ	Densidad de fluido en Kg/m^3
$\rho_{\#}, \varphi_{\#}$	Densidad de fluido, a $\#^{\circ}C$ en Kg/m^3
cp	Calor específico a presión constante en $Btu/(lb^{\circ}F)$
cp $_{\#}$	Calor específico a presión constante, a $\#^{\circ}C$, en $Btu/(lb^{\circ}F)$
cp $_{x,y}$	Calor específico a presión constante a $x^{\circ}C$ o $y^{\circ}F$, en $Btu/(lb^{\circ}F)$
$T_{1/2}^{fijo}(t)$	Temperatura que se desea y se fija en el controlador en $^{\circ}F$ o $^{\circ}C$, como función del tiempo

$T_c(t)$	Temperatura del agua caliente como función del tiempo en °F o °C
T_i	Tiempo de integración en minutos
$T_i(t)$	Perturbación de la temperatura que se fija en el termostato o temperatura inicial obtenida en el tanque de reserva en °F o °C, como función del tiempo
$T_1(t)$	Temperatura medida a la entrada de los serpentines en °F o °C, como función del tiempo
$T_2(t)$	Temperatura en °F o °C, medida a la salida de los sistemas con condiciones de retardo en función del tiempo
$T_{1/2}(t)$	Temperatura de proceso en los puntos 1 o 2 como función del tiempo medidas en el transmisor 1 o 2 en °C
$Tt_{1/2}$	Señal de salida desde cualquiera de los transmisores, TIT1 o TIT2 en psi, hasta la entrada del controlador.
$u(t)$	Función en el tiempo para forzamiento escalón unitario.
$u(t-a)$	Función en el tiempo para forzamiento escalón unitario, desplazada un valor a en el tiempo.
f	Franja del termostato en °C o °F
$X(s)$	Variable X como función de la variable s (variable de la transformada de Laplace)
$X(t)$	Variable X como función de la variable t

\bar{X}	Valor promedio de la variable X, en estado estacionario
S, M(s)	Salida o señal controlada en psi
$e_{\#}, d_{\#}$	Error o desviación #, en estado estacionario
E(s)	Señal de error en psi
$K_{\#}$	Constante # de proporcionalidad, utilizada en las funciones de transferencia
$X(s)/Y(s)$	Función de transferencia que estudia el comportamiento de la variable X o salida, a los cambios o perturbaciones realizadas por la variable Y o entrada, todas en función de la variable independiente s
$X(t)/Y(t)$	Función de transferencia que estudia el comportamiento de la variable X o salida, a los cambios o perturbaciones realizadas por la variable Y o entrada, todas en función de la variable independiente t
$\delta X/\delta Y$	Ganancia de estado estacionario de una cierta variable como $T_{1/2}$, con respecto a otra variable que perturba, obtenida a partir de derivadas parciales
$G_x(s)$	Ganancia de una cierta variable como $T_{1/2}$ con respecto a otra variable que perturba en función de s

$G_x(0), K_x$	Ganancia de estado estacionario de una cierta variable como $T_{1/2}$ con respecto a otra variable que perturba, obtenida a partir de derivadas parciales
$K_{c\#}$	Ganancia #, en estado estacionario del controlador, psi/psi
K_{c_u}	Ganancia última del controlador
K_h, K_T	Ganancia del transmisor en $\text{psi}/^\circ\text{C}$ igual a $\delta T_{t_{1/2}}/\delta T_{1/2}$
$H(s)$	Ganancia del sensor transmisor en función de la variable "s" en $\text{psi}/^\circ\text{C}$
K_{sp}	Factor de escala para el punto de control de temperatura en $\text{psi}/^\circ\text{C}$
K_v	Ganancia en estado estacionario de la válvula de control en $(\text{Kg}/\text{seg})/\text{psi}$
$\delta Q/\delta X$	Ganancia en estado estacionario de la válvula de control en $(\text{Kg}/\text{seg})/\text{psi}$
$\Delta X/\Delta Y$	Relación de estado estacionario para un cambio en la salida de una cierta variable X de las perturbaciones Y
$\Delta X'/\Delta Y$	Relación en estado estacionario para un cambio en la salida de una cierta variable X de las perturbaciones Y, considerando la ganancia de mezcla K_{MT}
ξ	Relación de amortiguación



$c(t)$	Variable que se controla desde el transmisor, en psig
$r(t)$	Punto de control, °C (psig)
$m(t)$	Salida del controlador en psig
r_n	Eigenvalores o raíces de la ecuación característica
$b_n e^{r_n t}$	Respuesta sin forzamiento
a_n	Coeficientes de un polinomio
$t \rightarrow \infty$	Valor de la variable t que tiende o se acerca al infinito (generalmente en condición estacionario del proceso)
$s \rightarrow 0$	Valor de la variable de la transformada de Laplace que se acerca o tiende a cero (generalmente en condición estacionaria del proceso)
$\sqrt{\quad}$	Raíz cuadrada
ω	Frecuencia
ω_u	Frecuencia última

INDICE DE FIGURAS

N°	PAG.
1.1	Lazo abierto de control (con diagrama de bloques)..... 5
1.2	Lazo abierto de control..... 8
1.3	Lazo cerrado de control (con diagrama de bloques)..... 10
1.4	Lazo cerrado de control..... 12
1.5	Control práctico de proceso (control manual)..... 23
1.6a	Control básico de proceso (control automático)..... 25
1.6b	Control básico de proceso (control manual)..... 26
1.7	Control práctico de proceso (control automático)..... 27
1.8	Lazo cerrado de control retroalimentado..... 30
1.9a	Control todo o nada (control ideal)..... 33
1.9b	Control todo o nada (control real)..... 34
1.10	Respuesta de un control de dos posiciones..... 35
1.11	Respuesta del modo de control de dos posiciones con banda diferencial..... 37
1.12a	Relación: variable controlada con la posición del vástago de la válvula en modo de control proporcional..... 39
1.12b	Comportamiento de la variable controlada (T), con la posición del vástago de la válvula (S), en modo de control proporcional..... 41

N°	PAG.
1.13a Banda proporcional (variación de B.P.).....	44
1.13b Banda proporcional (variación de S.P.).....	45
1.14 Banda proporcional (% variable controlada vs. % de apertura o cierre de la válvula de control).....	47
1.15 Comportamiento del modo de control proporcional (flujo de agua caliente y variable controlada vs. tiempo).....	51
1.16 Comportamiento del modo proporcional (posición de la válvula, carga y punto de control vs. tiempo).....	53
1.17 Comportamiento del modo integral.....	56
1.18 Comportamiento del modo proporcional más integral.....	59
1.19 Respuesta a un cambio de carga del modo proporcional más integral.....	61
1.20 Razón de ajuste integral (rep/min).....	63
1.21 Comportamiento del modo proporcional más derivativo.....	67
1.22 Acción derivativa (Td).....	69
1.23 Comportamiento del modo proporcional más integral más derivativo.....	72
2.1 Definiciones en control.....	81
2.2 Definiciones en control de los instrumentos.....	82

N°	PAG.
2.3	Equivalencias entre la escala fahrenheit y celsius a la presión atmosférica normal..... 94
2.4	Termómetros (de presión de resorte, de hélice bimetálica, de bulbo)..... 101
2.5	Medidor de temperatura con termopar y milivoltímetro..... 105
2.6	Termómetro de resistencia con potenciómetro registrador autobalanceado..... 105
2.7	Pirómetro óptico..... 107
2.8	Pirómetro de radiación..... 107
3.1	Manómetros de tubo..... 114
3.2	Manómetro de tubo Bourdon..... 116
3.3	Manómetro de fuelle..... 119
3.4a	Termómetro industrial (de caja metálica)..... 122
3.4b	Termómetro industrial (de hélice)..... 123
3.5	Operación del transmisor neumático de temperatura..... 125
3.6a	Diagrama esquemático del transmisor..... 128
3.6b1	Vista en perspectiva superior del transmisor indicador neumático de temperatura..... 129
3.6b2	Vista en perspectiva inferior del transmisor indicador neumático de temperatura..... 130

N°	PAG.
3.6b3 Vista en perspectiva lateral derecha del transmisor indicador neumático de temperatura.....	131
3.6b4 Vista en perspectiva lateral izquierda del transmisor indicador neumático de temperatura.....	132
3.6c Maniobras de la señal de salida del transmisor indicador neumático de temperatura.....	133
3.7a Maniobras del controlador registrador neumático de temperatura.....	135
3.7b Vista en perspectiva del controlador registrador neumático de temperatura.....	136
3.8a Controlador electrónico MOD 30 (visto en perspectiva lateral).....	137
3.8b Controlador electrónico MOD 30 (visto en perspectiva posterior)..	138
3.9 Diagrama esquemático del controlador neumático Taylor.....	140
3.10a Vista en perspectiva del controlador registrador neumático de temperatura (descubierto totalmente).....	144
3.10b Vista frontal del controlador registrador neumático de temperatura (descubierto) con el plato de la carta de registro.....	145
3.11 Mecanismo diferencial.....	148
3.12 Convertidores Taylor (descubiertos totalmente).....	151
3.13 Convertidores Taylor (descubiertos parcialmente).....	152

N°	PAG.
3.14	Diagrama de conexión eléctrica del convertidor P/I..... 153
3.15	Montaje y conexión de las señales eléctricas y neumáticas del convertidor P/I..... 154
3.16	Operación del convertidor P/I..... 156
3.17	Operación del convertidor I/P..... 159
3.18	Montaje y conexión de las señales eléctricas y neumáticas del convertidor I/P..... 161
3.19	Diagrama y esquema de conexión eléctrica del convertidor I/P... 162
3.20	Reguladores de presión neumáticos Taylor..... 164
3.21a	Disposición interior de un regulador de presión..... 166
3.21b	Despiece de un regulador de presión Taylor..... 167
3.22	Sección de un regulador de presión..... 170
3.23	Características de caudal de un regulador de presión..... 172
3.24	Características de regulación de un regulador de presión..... 173
3.25	Funcionamiento de un filtro de aire..... 175
3.26	Filtro para aire comprimido de purga manual..... 176
3.27	Filtro para aire comprimido de purga automática..... 177
3.28	Solenoides..... 181
4.1	Sistema a controlar..... 189
4.2a	Conexiones neumáticas del lazo de control de temperatura..... 190

N°	PAG.
4.2b Descripción, designación y representación de los elementos del panel de control de temperatura.....	191
4.2c Conexiones eléctricas y electrónicas del lazo de control de temperatura.....	193
4.3 Diagrama electro - neumático de las electro - válvulas.....	233
4.4 Diagrama de control del circuito bomba – calentador de agua.....	245
4.5 Diagrama eléctrico de fuerza de la bomba y resistencias del calentador de agua.....	246
4.6 Conexiones neumáticas y eléctricas del compresor.....	247
4.7 Conexión eléctrica del reloj del controlador neumático.....	250
4.8 Tablero de control eléctrico principal de la bomba, calentador, termostato.....	251
4.9 Panel principal de control eléctrico (descubierto).....	252
4.10 Conexiones eléctricas del calentador.....	253
4.11 Despiece del termostato.....	254
4.12a Maniobras del lazo de control de temperatura.....	265
4.12b Maniobras del lazo de control de temperatura.....	266
4.13 Instalación de la tubería principal de aire	267
5.1 Relación salida – entrada en varios tipos de instrumentos.....	270
5.2 Relación medida real – lectura.....	273

N°	PAG.
5.3	Error de cero..... 275
5.4	Error de multiplicación..... 276
5.5	Error de angularidad..... 278
5.6a	Transmisión de movimientos y localización de ajustes..... 283
5.6b	Transmisión de movimientos y localización de ajustes..... 284
5.7	Método general de calibración..... 287
5.8	Situación de los ajustes en instrumentos..... 288
5.9a	Manómetros patrón (vista frontal)..... 290
5.9b	Manómetros patrón (vista posterior)..... 291
5.10	Comprobador de manómetros por pesas..... 293
5.11	Comprobador de manómetros portátil..... 295
5.12	Extractor de agujas de manómetros..... 298
5.13	Comprobación neumática y electrónica..... 302
5.14	Instrumentos para calibrar..... 304
5.15	Controlador neumático en fallas comunes..... 315
5.16	Controlador neumático en fallas comunes (descubierto)..... 316
5.17	Posiciones de la aguja registradora y el set – pointer para detectar fallas comunes..... 318
5.18	Perpendicularidad: Varilla de conexión y brazo de imitación con la pluma de registro en 50% de la escala del controlador neumático..... 325

N°		PAG.
5.19	Pivotes para las dimensiones de las cartas de registro.....	326
5.20	Acoplamiento de prueba neumático para un convertidor P/I.....	340
5.21a	Ajustes y conexiones eléctricas, electrónicas y neumáticas para calibración del convertidor P/I.....	341
5.21b	Ajustes y conexiones electrónicas y neumáticas para calibración del convertidor I/P.....	342
5.22	Centrado de la entrada del fuelle en la manga (o manguito) del convertidor P/I.....	344
5.23	Acoplamiento de prueba y actuador de aire para cerrar la válvula de control de flujo.....	345
5.24	Ajuste del rango del actuador de la válvula de control.....	347
5.25	Placa de indicación de recorrido presentando el recorrido del obturador de la válvula de control.....	350
5.26	Ajuste del recorrido del obturador de la válvula de control.....	351
5.27	Despiece de la válvula de aire para bajar el actuador.....	354
5.28	Determinación del número de terminación del actuador.....	358
6.1.1	Instalación para prueba y calibración de manómetros.....	366
6.1.2a	Procedimiento micrométrico de calibración de manómetro ASHCROFT tipo 1082.....	367
6.1.2b	Ajustes del manómetro ASHCROFT tipo 1082.....	368

N°	PAG.
6.1.3 Regulador de aire WALLACE para alta precisión.....	371
6.1.4 Instalación de regulación para comprobación y calibración manométrica.....	372
6.2.1 Instalación para ajuste y calibración de transmisores.....	388
6.2.2 Ajuste y calibración de transmisores.....	389
6.3.1 Instalación para prueba y calibración de registro del controlador...	407
6.3.2 Instalación para la comprobación básica del mecanismo diferencial del controlador.....	411
6.3.3 Instalación para prueba y calibración del controlador neumático....	413
6.4.1 Acoplamiento de prueba de la válvula de control FCV1.....	434
6.4.2 Dispositivo de prueba del flujo del líquido a través de la válvula con el % de cierre de su obturador.....	436
6.5.1a Instalación para prueba y calibración en los convertidores.....	454
6.5.1b Instalación para prueba y calibración en los convertidores.....	455
6.5.1c Ajuste y calibración de los convertidores utilizando el regulador Wallace.....	456
6.5.2a Toma de la señal de salida del convertidor P/I en la entrada de señal del convertidor I/P.....	458
6.5.2b Toma de la señal de salida del convertidor P/I en la salida de señal del convertidor P/I.....	459

N°	PAG.
6.6.1 Condiciones de retardo A (R_1, R_2, R_3) en la respuesta del sistema de control.....	472
6.6.2 Condiciones de retardo B, en la respuesta del sistema de control..	473
6.6.3 Diagramas de bloques para el modelo de orden superior o la respectiva aproximación de primer orden para los sistemas combinados A y B con tiempo muerto.....	503
6.7.1a Circuito de control por retroalimentación para controlar la temperatura de mezcla $T_1(t)$, en los serpentines R_1, R_2 o R_3	515
6.7.1b Circuito de control por retroalimentación para controlar la temperatura de mezcla $T_2(t)$, en el tanque de proceso.....	516
6.7.1c Opciones para establecer $T_i(t)$	517
6.7.2 Diagramas de bloques del circuito de control de temperatura por retroalimentación para controlar $T_1(s)$ o $T_2(s)$	522
6.8.1a Control de temperatura a la salida de los serpentines o a la entrada del tanque de proceso.....	570
6.8.1b Control de temperatura dentro del tanque de proceso o a la salida del mismo.....	571
6.8.2 Ejemplo de respuesta críticamente amortiguada y sobreamortiguada de una Unidad de control.....	592

N°	PAG.
6.8.3 Decaimiento de la amplitud de oscilación debido al término exponencial en el ajuste de una Unidad de control.....	595
6.8.4 Circuito por retroalimentación unitaria equivalente y simplificado representando a la unidad de control de temperatura.....	596

INDICE DE TABLAS

Nº	PAG.
4.1 Descripción, cantidad y abreviatura de los instrumentos del lazo..... de control de temperatura.....	211
4.2 Equivalencias aproximadas entre la Banda proporcional,..... sensibilidad y ganancia del controlador neumático de temperatura..	216
5.1 Valores generales de calibración de los instrumentos.....	289
5.2 Impedancias características de los instrumentos electrónicos.....	299
5.3 Flujo de corriente vs. caída de voltaje a través del resistor.....	336
5.4 Procedimiento de calibración y valores de instrumentos..... electro - neumáticos.....	338
6.1.1 Referencia de calibración de los manómetros para la salida en..... la indicación.....	378
6.1.2 Resultados de la indicación en el manómetro de prueba de..... resolución 0.1 psi (en descalibración y calibración intermedia).380, 382	
6.1.3 Resultados de la indicación en el manómetro de prueba..... de resolución 0.2 psi (en descalibración).....	384
6.2.1 Resultados de la prueba para calibración de los transmisores..... (resultados: iniciales, intermedios y finales).....	395, 398
6.3.1 Resultados de la prueba para calibración del registro del..... aplicada sobre cada condición de retardo: A, B, A y B.....	510

controlador (en descalibración y después de calibración).....	422
6.3.2a Resultados de la prueba para calibración del control	
proporcional del controlador (generando un error y cambiando la acción del instrumento).....	425
6.3.2b Resultados finales de la prueba para calibración del controlador en acción proporcional directa.....	427
6.4.1 Resultados de la prueba para calibración de la indicación del.....	
recorrido del vástago de la válvula de control (referencia y	
generación de error).....	443
6.4.2 Resultados de la prueba para calibración del flujo de salida de....	
agua con la posición del vástago de la válvula de control	445
6.5.1 Resultados de la prueba para calibración del convertidor P/I1.....	465
6.5.2 Resultados de la prueba para calibración del convertidor P/I2.....	465
6.5.3 Resultados de la prueba para calibración del convertidor I/P1.....	468
6.5.4 Resultados finales de la prueba para calibración de los converti- dores.....	468
6.6.1 Resultados teóricos y experimentales para las condiciones de... retardo A en R_1 , R_2 y R_3	508
6.6.2 Resultados obtenidos para la respuesta a la perturbación sobre.. el proceso en las condiciones de retardo B con R_1 , R_2 y R_3	509
6.6.3 Respuestas obtenidas en función del tiempo a la perturbación.....	

6.7.1 Programa que calcula el cambio en la temperatura de salida..... provocado por las perturbaciones indicadas introduciendo los..... valores de K_c (condiciones de estado estable).....	544
6.8.1 Ecuaciones para determinar la función de transferencia de..... circuito cerrado entre las señales de entrada y la temperatura de salida $T_{1/2}(s)$ del circuito de control de la Unidad de..... temperatura.....	581
6.8.2 Representación, significado y unidades de los términos utilizados para definir las ecuaciones de las funciones de transferencia de circuito cerrado de la tabla 6.8.1.....	582
6.8.3 Programa que calcula los valores físicos necesarios bajo las..... condiciones de trabajo establecidas o a inicializar como..... temperatura requerida ($T_{1/2}$) y flujo de suministro ($F+Q_c$).....	614
6.8.4 Programa que calcula los resultados de flujo de agua caliente,... constante de tiempo y ganancias en estado estacionario para... las condiciones de trabajo establecidas y otras condiciones..... (consecuencia del programa de la tabla 6.8.3).....	615
6.8.5 Programa que calcula la variación de la temperatura deseada... debido a la variación de la temperatura fijada con la..... introducción de la ganancia del control (consecuencia de las..... tablas 6.8.3 y 6.8.4).....	616
6.8.6 Programa que calcula los resultados de ganancia última y.....	

período último por el método de Routh y de sustitución directa. bajo las condiciones de trabajo establecidas y otras condiciones (consecuencia de las tablas 6.8.3 y 6.8.4).....	617
6.8.7 Programa que calcula los resultados de ganancia, repeticiones.... por minuto y tiempo derivativo óptimos por el método de Ziegler. y Nichols bajo las condiciones de trabajo establecidas y otras..... condiciones (consecuencia de las tablas 6.8.3 a 6.8.6).....	618

INDICE DE GRAFICOS

Nº	PAG.
6.1.1 Referencia para calibración manométrica.....	379
6.1.2a Descalibración manométrica (manómetro de resolución: 0.1 psi)	381
6.1.2b Calibración manométrica intermedia (manómetro de resolución: 0.1 psi).....	383
6.1.3 Descalibración manométrica (manómetro de resolución: 0.2 psi)	385
6.2.1a Generación de descalibración del transmisor.....	396
6.2.1b Calibración intermedia del transmisor.....	397
6.2.1c Calibración final del transmisor.....	399
6.2.1d Resultado final de la calibración del transmisor.....	400
6.3.1a Generación de descalibración del registro en el controlador.....	423
6.3.1b Resultado final de la calibración del registro en el controlador.....	424
6.3.2a Generación de descalibración en el control proporcional.....	426
6.3.2b Resultado final de la calibración del control proporcional directo... con ganancia $G = 1$	428
6.3.3 Prueba del tiempo derivativo en el controlador.....	417
6.4.1 Calibración de la indicación del recorrido del vástago de la válvu- la de control FCV1.....	444
6.4.2 Calibración del flujo de salida con la posición del vástago de la.....	



válvula de control FCV1.....	446
6.4.3 Aproximación del comportamiento del caudal Q_c , a través de.....	
la válvula de control, con la apertura del vástago de la misma.....	440
6.5.1 Calibración del convertidor P/I1.....	466
6.5.2 Calibración del convertidor P/I2.....	467
6.5.3 Calibración del convertidor I/P1.....	469
6.5.4 Resultados finales de la prueba para calibración de los converti- dores.....	470
6.6.1 Respuesta del proceso térmico R_1 , R_2 y R_3 , a un cambio escalón en la temperatura de entrada T_c	476
6.6.2 Respuesta del proceso, a un cambio escalón en la temperatura.... de entrada T_c , a través de los serpentines R_1 , R_2 y R_3	489
6.8.1 Respuesta de $T_{1/2}$, ante el ajuste del controlador en circuito cerrado en las condiciones establecidas de trabajo..... (demostración del funcionamiento de la Unidad de temperatura)....	633

INTRODUCCION

Dentro de la modernización industrial del país, es importante la automatización de los procesos por las ventajas que ofrece, tales como, el ahorro de tiempo, mano de obra y en consecuencia dinero. La reducción del personal de operadores orientados hacia otras áreas o el mismo personal trabajando dentro de la misma área en otras operaciones, dando todo esto como resultado, un gran beneficio cuando se trata de producciones en mediana y gran escala.

En tal virtud, en el área de Diseño y Producción de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) se ha diseñado y construido un simulador de control para procesos industriales, en el cuál se realizarán operaciones similares a las que se ejecutarían en un lazo de control de procesos industriales.

La tesis contemplará inicialmente los fundamentos teóricos de control automático, instrumentación industrial y los términos aplicados en el control de la variable de temperatura de dicho simulador. Se describirá la operación de los instrumentos que constituyen el lazo de control, se describirán las conexiones neumáticas, eléctricas y electrónicas realizadas incluyendo el funcionamiento general del simulador. Además se describirá la

implementación y montaje de un circuito para simular fallas que podrían ocurrir dentro del circuito de control. Se elaborarán los diagramas de instrumentación y control de acuerdo a las normas establecidas, se realizarán las pruebas de calibración de los instrumentos y del sistema completo, para finalmente obtener las guías de laboratorio.

Dentro de la ejecución y desarrollo de las pruebas del sistema de control de temperatura, será necesario hacer un análisis teórico mediante la formulación de un modelo matemático. Este modelo se lo prueba, sometiendo el sistema a perturbaciones y ajustando la respuesta a una salida estable, registrada en curvas reales, desde las cuales se determinarán los valores de ganancia, ajuste integral y ajuste derivativo mediante métodos como el de sensibilidad última.

Se establecerá una comparación entre los resultados teóricos y reales, para comprobar la confianza que se le puede brindar al modelo matemático para el sistema de control.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS DE CONTROL

1.1 Generalidades

Las magnitudes controladas más comúnmente en los procesos industriales son:

- **Presión** [P]
- **Caudal** [Q]
- **Nivel** [H]
- **y Temperatura** [T]

Una definición comprensible de **sistema de control** dice:

Se efectúa una acción de corrección de acuerdo con el error existente sin que alguna persona intervenga cuando se compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado de la misma.

Los sistemas de control están constituidos por los siguientes elementos:

- La unidad de medida,
- el transmisor,

- la unidad de control,
- el indicador,
- el registrador,
- el elemento final de control,
- y el proceso.

Todos ellos dispuestos de una manera que puede denominarse:

- a. lazo de control abierto, ó,
- b. lazo de control cerrado.

1.2 Lazos de Control

Los lazos de control más comúnmente conocidos son:

- Lazo de control **abierto**
- Lazo de control **cerrado**.

1.2.1 Lazo de Control Abierto

La fig. 1.1, nos muestra un sencillo ejemplo de un lazo abierto de control con su respectivo diagrama de bloques aplicado a la variable de temperatura.

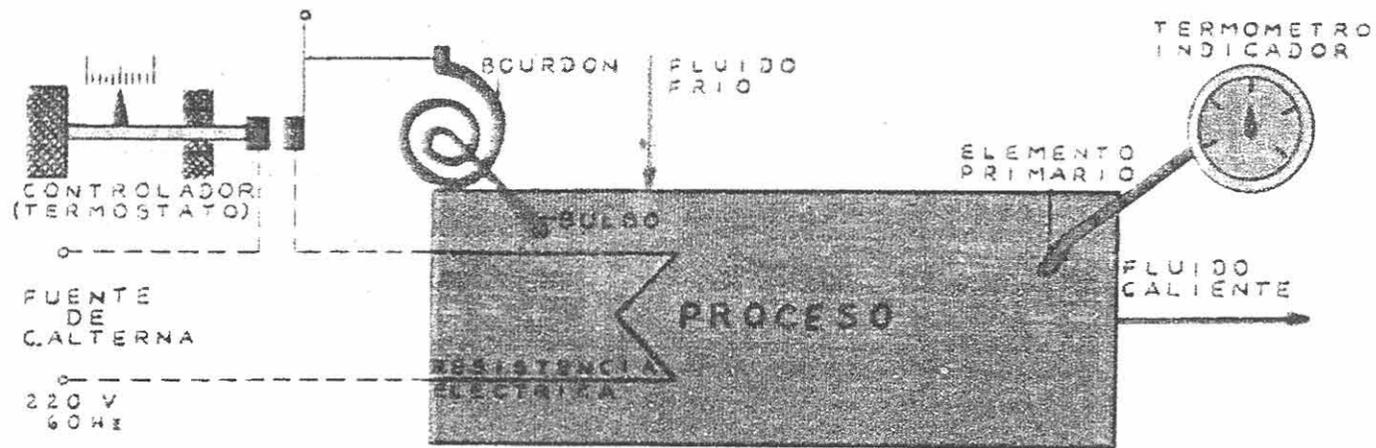


DIAGRAMA DE BLOQUES

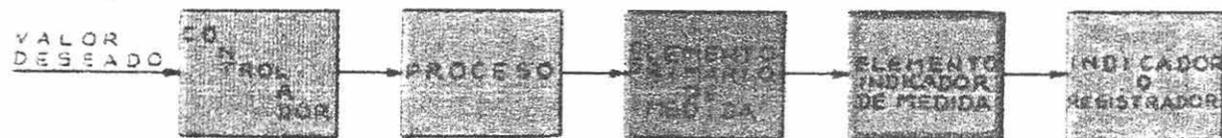


Fig. 1.1 LAZO ABIERTO DE CONTROL

Este sistema de control, tiene la particularidad, que no efectúa la realimentación del valor de la temperatura indicada o registrada hacia el controlador, y compararlo con el valor del punto de consigna para efectuar la respectiva corrección, es decir que el indicador no entrega ninguna información al controlador.

El controlador tiene incorporado un dispositivo de control de relé térmico que abre o cierra un contacto de acuerdo a la temperatura consignada o deseada.

Para nuestro caso, la unidad de medida es la ***variable a medir***, que es la ***témporatura***. En la unidad de control que es el termostato está el transmisor con su elemento sensor o elemento primario el cual tiene su elemento de transmisión para detectar la señal y viene incorporada la indicación cubriendo la escala a medir en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$), ó grados fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$).

En ocasiones, no necesariamente deben existir los registradores o indicadores a la vez, como en esta oportunidad. El elemento final de control, lo constituye, el interruptor térmico que cierra el circuito de corriente para la generación de calor en la resistencia eléctrica.

Por último, tenemos el proceso al cual se regula las condiciones de temperaturas, según los requerimientos.

En el diagrama de bloques presentado, el valor deseado o consignado es el valor de la temperatura requerida del proceso. El controlador o termostato es el dispositivo que gobierna la temperatura y posee una escala de indicación regulable. El proceso, es el agente energético o temperatura de fluido a gobernar.

Adaptado a nuestro sistema de control, un ejemplo de lazo abierto sería el que a continuación presentamos en la siguiente fig. 1.2, el cual es muy parecido al anteriormente presentado.

Similarmente, en este ejemplo tenemos la indicación incorporada a dos transmisores, uno para el estado estable y otro para el estado transitorio. La variable a medir sigue siendo la temperatura, y la delimitación del proceso se prolonga hasta la *salida del tanque de proceso*, en el caso que deseamos conocer la temperatura de estado estable del **proceso**, ó hasta la entrada del tanque de proceso en el caso de la indicación de la temperatura transitoria.

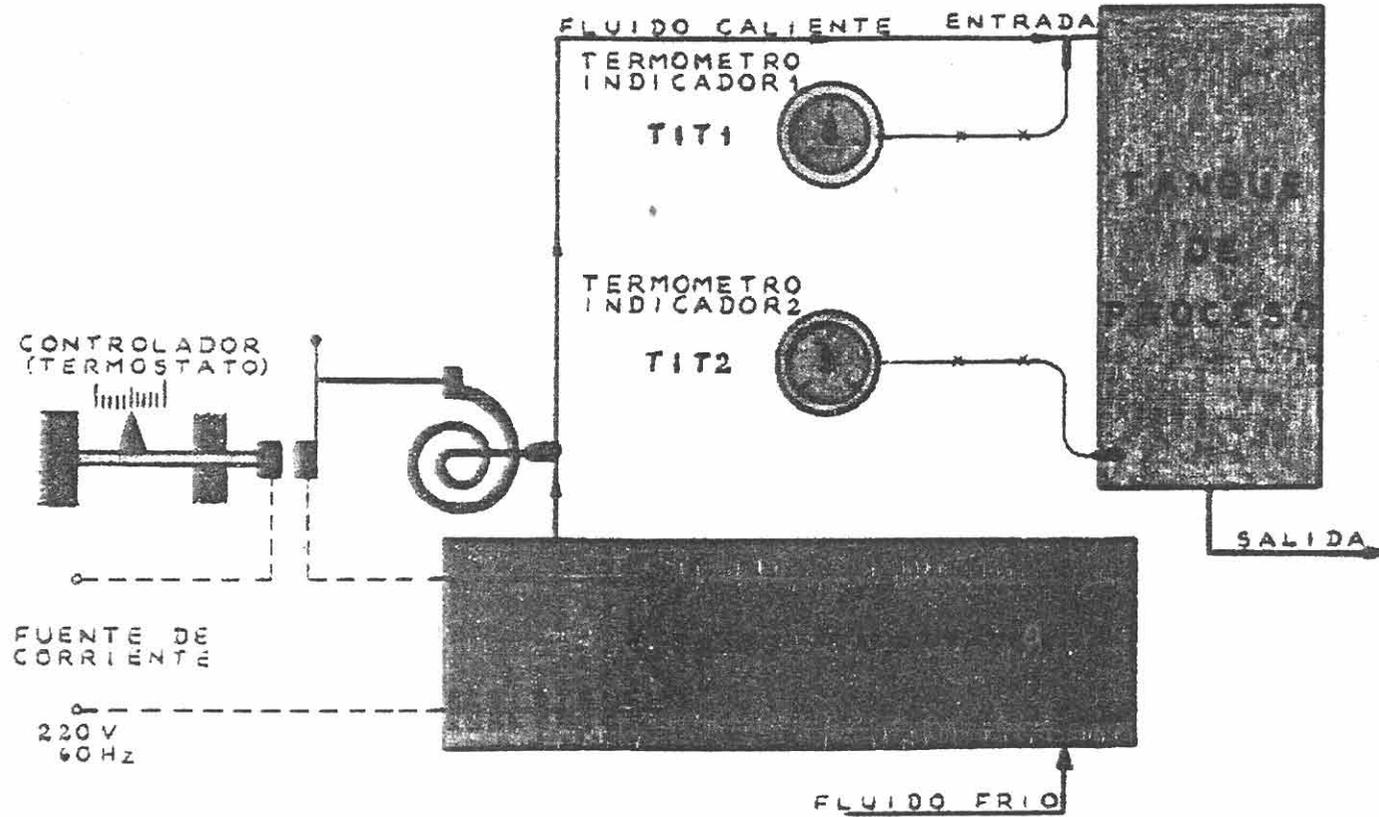


Fig. 1.2 LAZO ABIERTO DE CONTROL

1.2.2 Lazo de Control Cerrado

A continuación se puede presentar un lazo cerrado de control, fig. 1.3. La variable a controlar es de temperatura. Se observa su característica principal que es la de realimentación, los elementos que intervienen en ellos son:

- Elemento primario de medida, en repetidas ocasiones utiliza un bulbo sensor.
- El elemento de transmisión, el gas o líquido que se deposita en el interior del elemento primario, el cual entregará su señal al transmisor.
- El transmisor que puede tener incorporada una indicación o registro que recibe la señal del elemento de transmisión, y la indica o registra transmitiéndola hacia el controlador, la señal utilizada es de tipo neumática.
- El controlador, que tiene incorporado un indicador o un registrador, recibe la señal del transmisor, la compara con el valor deseado, apareciendo un error si es que lo hubiere y ordena una señal de corrección neumática hacia el elemento final de control.

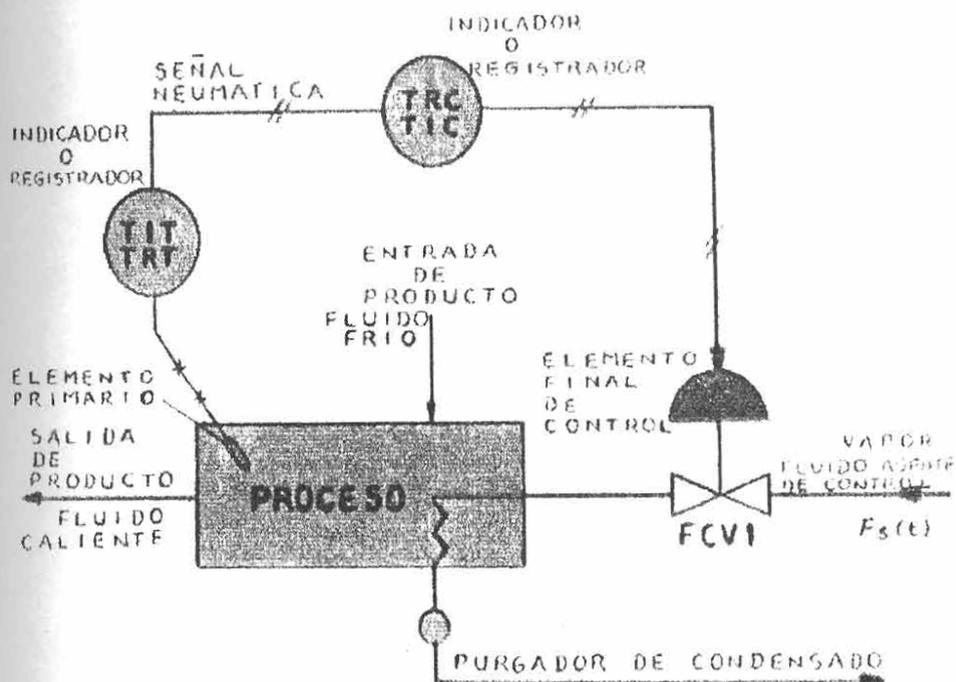


DIAGRAMA DE BLOQUES

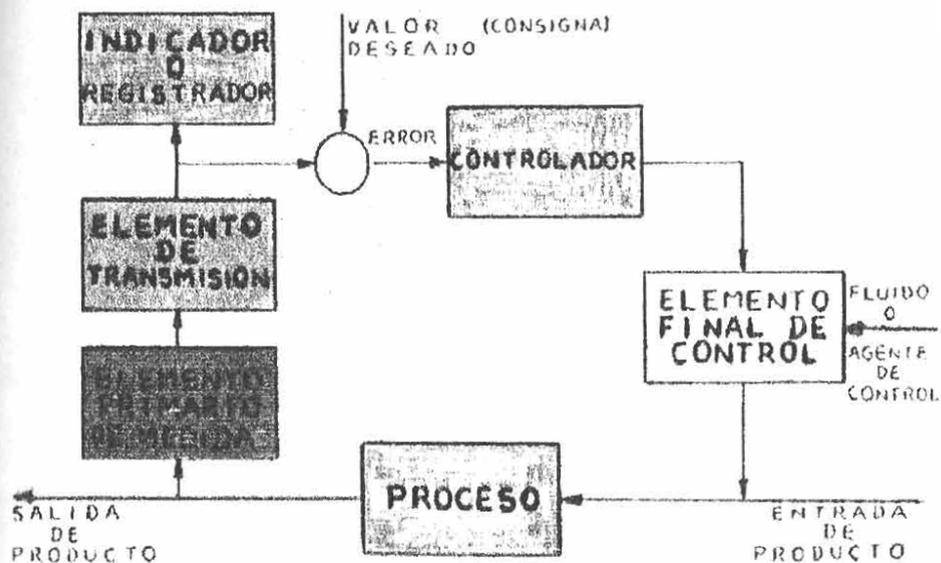


Fig. 1.3 LAZO CERRADO DE CONTROL

- Elemento final de control, la constituye una válvula de accionamiento neumático el cual deja pasar la cantidad de fluido o agente de control requerido para obtener las condiciones deseadas del producto resultante.

Semejantemente, adaptaremos este ejemplo al lazo de control de temperatura, donde identificaremos un lazo cerrado como el que presentamos en la fig. 1.4, en donde la indicación también aparece incorporada a dos transmisores, simulando, uno para el **proceso 1** y otro para el **proceso 2**. La variable a medir es la temperatura; la delimitación del proceso depende del transmisor a utilizar funcionando uno a la vez. Cuando funciona el transmisor indicador 1(TIT1), se excluye el tanque de proceso y los valores de temperatura tomados, son los del proceso 1, quedando cerrado el paso de aire de la válvula neumática 2 (NV2), abriendo la válvula neumática 1 (NV1) para el paso de la señal neumática desde TIT1 hasta el controlador, se efectuará la comparación, aparecerá el error (si es que lo hubiere), y el controlador enviará la señal al elemento final de control o válvula reguladora del flujo de agua caliente FCV1 para la corrección respectiva.

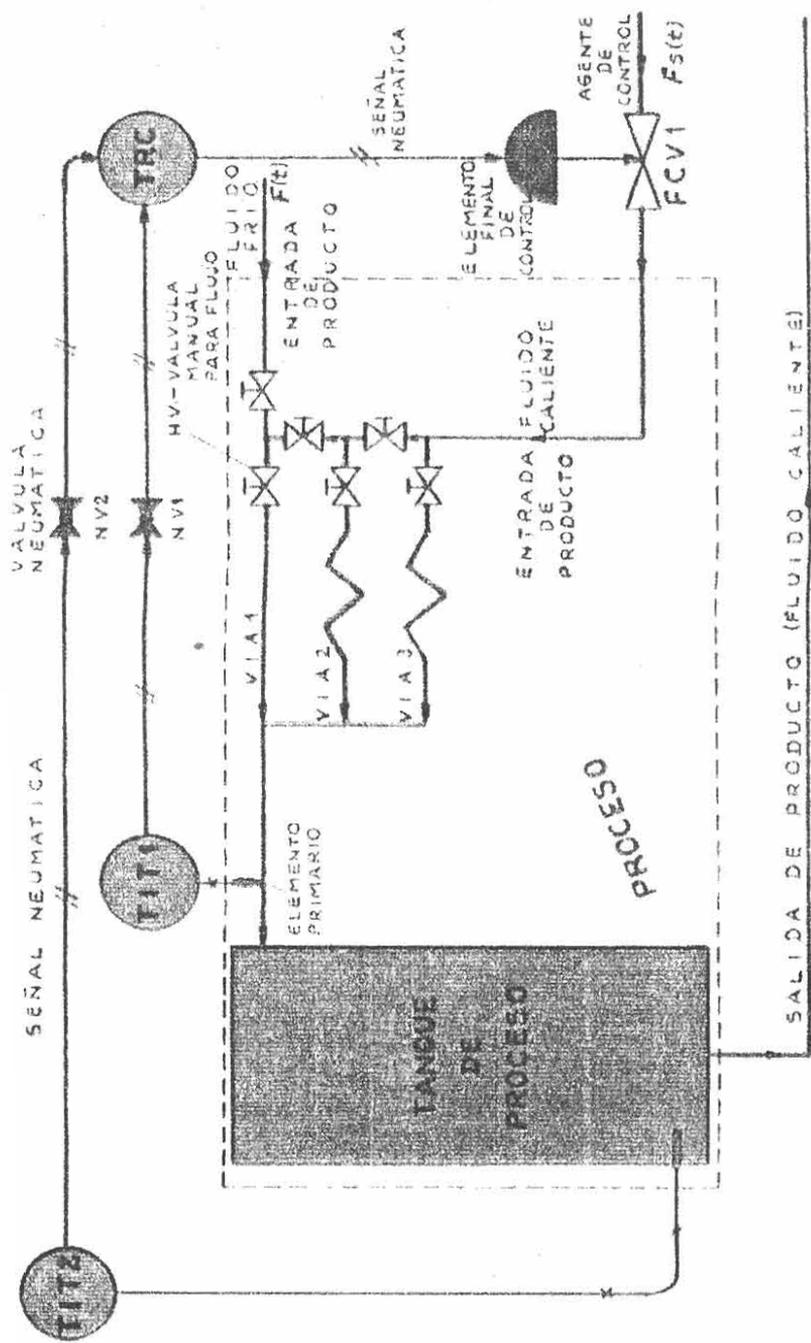


Fig. 1.4 LAZO CERRADO DE CONTROL

El proceso en sí, es la mezcla de agua fría y agua caliente que circulan a través de cualquiera de las tres vías (una a la vez), vía 1, vía 2, vía 3, encontrándose con el transmisor correspondiente. Cuando queremos gobernar la temperatura del proceso dentro del tanque, simplemente omitimos el transmisor indicador 1 (TIT1), cerrando la señal neumática desde este hacia el controlador (sin que con esto no podamos observar la indicación del proceso 1), con la válvula neumática 1 (NV1) y abriendo la válvula neumática 2 (NV2) para que el controlador reciba la señal de la mezcla de agua fría y agua caliente del proceso 2, haga la comparación y ordene la respectiva corrección a través de la válvula neumática.

Instaladas al sistema tenemos válvulas manuales de flujo (HCV) para elegir el camino o vía de mezcla de agua fría y caliente que deseemos utilizar para nuestros propósitos.

1.3 Definiciones de control

El control automático es la herramienta que ofrece atención continua y permanente al sistema a controlar sin razonamiento a nuevas condiciones de trabajo.

El concepto proceso en control automático es, fundamentalmente, el conjunto de funciones y operaciones a realizarse en el tratamiento de materiales. En general, los procesos trabajarán eficientemente cuando ciertas variables involucradas a ellos, son fijas dentro ciertos límites.

Las variables de un proceso cambiarán si el material (o energía) de entrada no es igual al de salida. De aquí que, la función más importante del control de proceso es la **entrada/salida** de energía (o material) de manera que se mantengan las variables dentro de los límites establecidos.

Al controlador automático se lo puede definir como el mecanismo que mide el valor de la variable del proceso y opera para disminuir la desviación de esa variable respecto de un valor consignado. Una variable del proceso que es mantenida dentro de ciertos límites es llamada variable controlada. El controlador automático ajusta la variable controlada haciendo las correcciones a otra variable del proceso conocida como variable manipulada.

Los procesos se caracterizan por demorar y retardar los cambios efectuados a los valores de las variables del proceso haciendo que aumente en gran magnitud la dificultad de control.

Aquellos retardos se denominan retardos de tiempo del proceso.

Los retardos de tiempo, conjuntamente con la inercia, son provocados por tres propiedades del proceso: 1. Capacitancia. 2. Resistencia y 3. Tiempo de transportación o tiempo muerto.

Capacidad

Es la parte de un proceso que tiene la habilidad para almacenar material (o energía). Esta propiedad influye para que la capacidad retarde los cambios.

Capacitancia

Es el cambio en la cantidad de energía contenida por unidad de cambio de la variable en referencia.

Se puede observar la diferencia entre capacidad y capacitancia, al disponer de dos tanques de proceso de igual capacidad de almacenamiento, uno tal como el del lazo de control de temperatura y

otro más pequeño y lógicamente de mayor diámetro. La capacidad para los dos tanques es la misma, pero su capacitancia es diferente por unidad de nivel por ejemplo.

Resistencia

La parte de un proceso que se opone a la transferencia de energía o material entre capacidades o a través de un sistema.

Al introducir energía a una capacidad a través de una resistencia como el caso de nuestro lazo de temperatura: serpentines (R1, R2 o R3)-tanque de proceso, nos produce retardos de tiempo. Estos retardos de tiempo producidos por combinar Resistencia-Capacidad (R-C) son llamados retardos de capacidad o de transferencia.

Tiempo muerto o tiempo de transporte

Es el tiempo transcurrido desde que ocurre un cambio en la variable controlada hasta que la señal correspondiente es detectada por el controlador puede definirse como el tiempo requerido para llevar un cambio de un punto a otro punto en el proceso. Sin ser un retardo es el tiempo durante el cual no ocurre ningún cambio y su duración

depende de la velocidad a la cual el cambio es transportado y de la distancia hacia donde es llevado.

Constante de tiempo

Denominado al tiempo requerido para que la salida de un dispositivo con retardo de primer orden llegue al 63.2% de su valor final para un cambio de escalón en la entrada (carga o punto de ajuste), o puede definirse como el tiempo que necesita la variable controlada de un proceso en alcanzar el 63.2% de su variación completa a partir del instante en que se produce la acción de control. (Más adelante se explica en detalle).

Los sistemas que tienen Capacitancia (C) y Resistencia (R), se los conoce como sistemas R-C. El producto de la resistencia por la capacitancia tiene unidades de tiempo, y es conocido como la constante de tiempo del sistema ($\tau = RC$).

Disturbios del proceso

Desde el punto de vista de control automático, se consideran dos tipos de disturbios que difieren en la reacción de un proceso:

1. **Disturbio en la carga.**- Es un cambio en la energía o material de entrada a un proceso.
2. **Disturbio en la descarga.**- Es un cambio en la energía o material de salida de un proceso.

Variable Controlada

Cantidad o condición que se mide y que va a ser controlada para llevarlo a un valor deseado.

En nuestro caso, la temperatura del agua de mezcla es la variable controlada (T_{o1} o T_{o2}). Muchos factores pueden afectar la variable controlada, la temperatura ambiente, que rodea al tanque de proceso y a los serpentines R2 y R3, velocidad y presión del viento, temperatura y presión del agua caliente, etc.

Aunque las perturbaciones o cambios de carga son los más *importantes*, estos últimos no deben despreciarse y pudieran por si mismo tener que controlarse.

Medio Controlado

El proceso, la energía o material en el cual el valor de una variable va a controlarse. La variable controlada es una condición o característica del medio controlado. En nuestro caso el medio controlado, obviamente es el agua de mezcla (agua fría más agua caliente).

Variable Manipulada

Se conoce como variable manipulada a la condición o cantidad que es variada por el elemento final de control, de tal forma que afecte el valor de la variable controlada. El flujo de agua caliente a una temperatura constante es la variable manipulada en el lazo de control de temperatura.

Agente de Control

El agua caliente o agente de control es el proceso energía o material del cual la variable manipulada es una condición o característica en el lazo de control de temperatura.

Señal actuadora

Es la diferencia entre la señal de referencia y una señal relacionada con la variable controlada, en un tiempo determinado.

Desviación

Es la diferencia entre el valor de la variable controlada para un tiempo dado y el valor del punto de ajuste o de control de la variable controlada (set-point).

Desviación Estable

Se define desviación estable a la diferencia permanente entre el punto de control y el valor de la variable controlada. Esta característica es inherente al control de posición proporcional.

Acción de Corrección

Es la variación de la variable manipulada originada por el sistema de control.

Ciclaje

Variación periódica de la variable controlada.

Punto de Ajuste

Es la posición donde se coloca el mecanismo de control en el controlador.

Punto de Control

Es el valor de la variable controlada, al cual opera el control automático para mantenerlo, bajo cualquier condición de ajuste fijo.

Retro-alimentación

Es la señal que está relacionada con la variable controlada y que se compara con la señal de referencia para obtener una señal actuante.

Estado estable

Cualquier variable tal como: temperatura, velocidad, presión estática, flujo, nivel, presión diferencial, etc., que es mantenida a un valor estable o constante, o a la que se le permite una variación lenta y uniforme con el tiempo.

Estado transitorio

Es una condición anormal o temporal de la variable, cuyo cambio se efectúa errática o uniformemente con el tiempo.

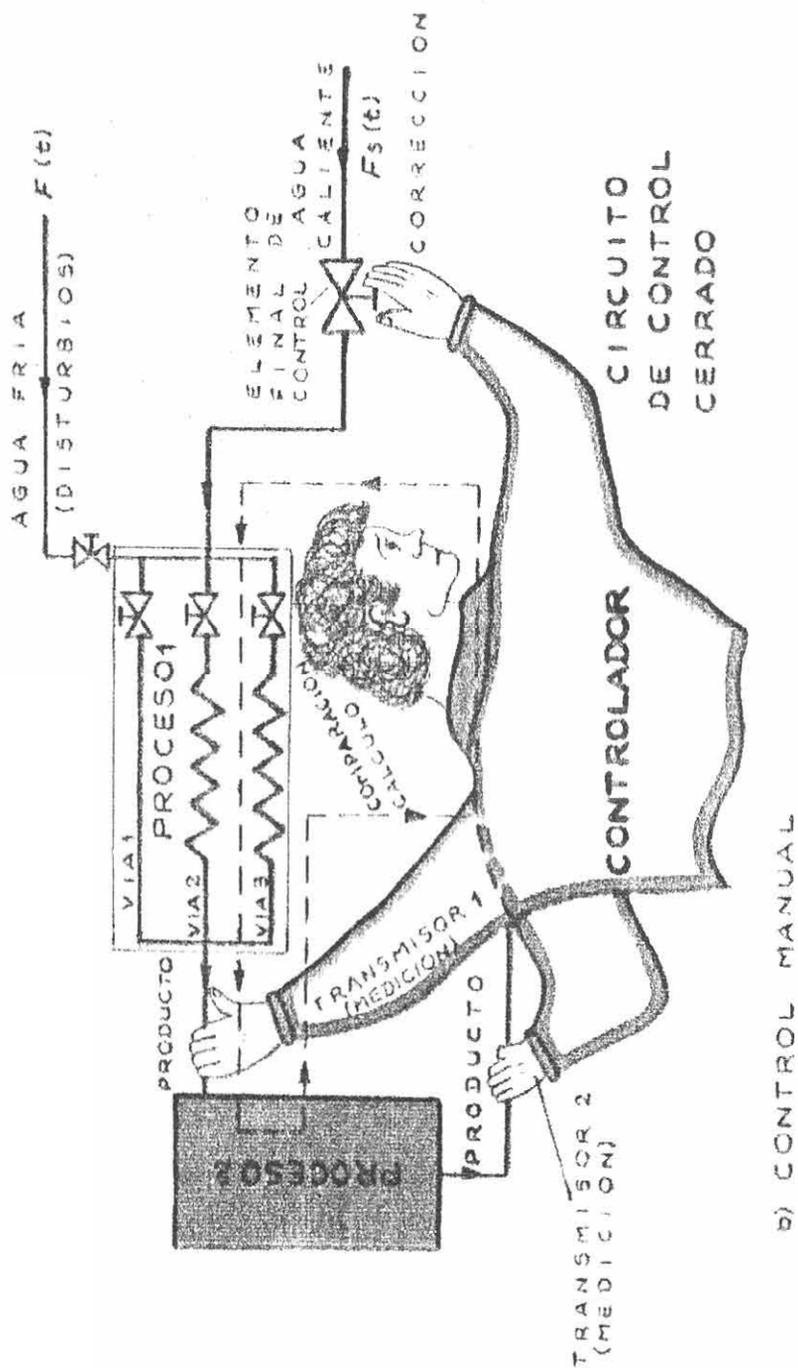
1.4 Modos de Control

1.4.1 Generalidades

Un lazo de control sencillo es el formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control. El controlador tiene como tarea estabilizar la variable en el valor consignado o deseado. Veamos como se aplica el lazo de control anterior a un lazo de control manual como se observa en la fig. 1.5, y derivado de nuestro lazo de control práctico.

El estudiante detecta con la mano la temperatura de salida del agua producida (fría más caliente o simplemente producto) y acciona con la mano derecha la válvula de agua caliente con un cierto flujo de agua fría a través de la tubería del mismo nombre. El objetivo es de mantener el agua a la temperatura deseada, a esta temperatura la llamamos punto de consigna.

Sí, con la temperatura de salida estable, aumenta el caudal de agua fría de entrada, obligatoriamente disminuirá la temperatura de salida, aunque ocurra al cabo de un determinado tiempo por efecto de la inercia del proceso; cuando el estudiante nota con la



b) CONTROL MANUAL

Fig. 1.5 CONTROL PRACTICO DE PROCESO

mano izquierda la disminución de la temperatura, lo compara con la del punto de consigna y calcula mentalmente cuantas vueltas debe dar a la válvula de agua caliente en el sentido correspondiente, para finalmente, realizar la corrección manual con la mano derecha.

Efectuada la corrección, el estudiante debe dar un cierto tiempo para obtener los resultados en la temperatura de salida del agua, y así, podrá determinar si la primera corrección o aproximación ha sido corta o larga y realizar una segunda aproximación o las veces que sean necesarias hasta concordar con la temperatura consignada.

Acondicionado a nuestro lazo de control establecemos el paralelismo tal como lo muestra la fig.1.7

Mano izquierda del estudiante = Transmisores, TIT1 o TIT2.

Cerebro del estudiante = Controlador, TRC.

Mano derecha del estudiante = Elemento final del control, FCV.

La fig.1.6, muestra un esquema preliminar más sencillo, muy análogo, que nos permitirá entender mejor lo descrito.

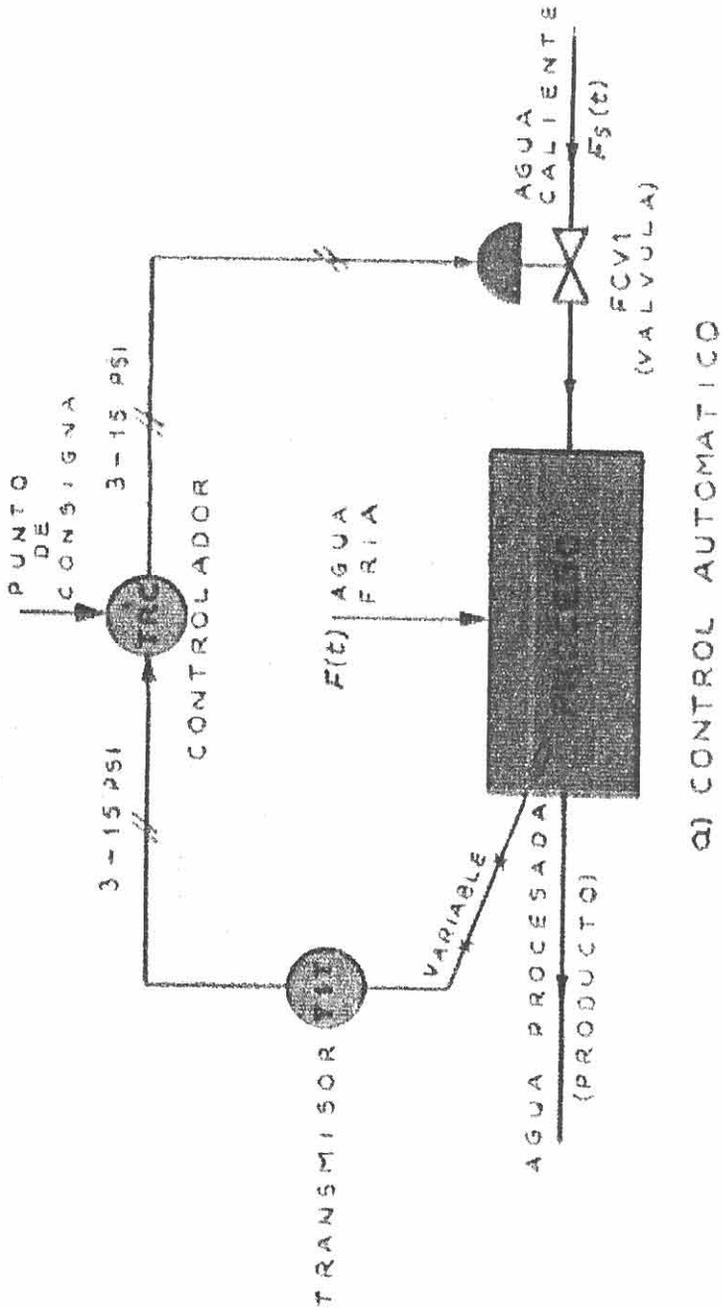


Fig. 1.6 CONTROL BASICO DEL PROCESO

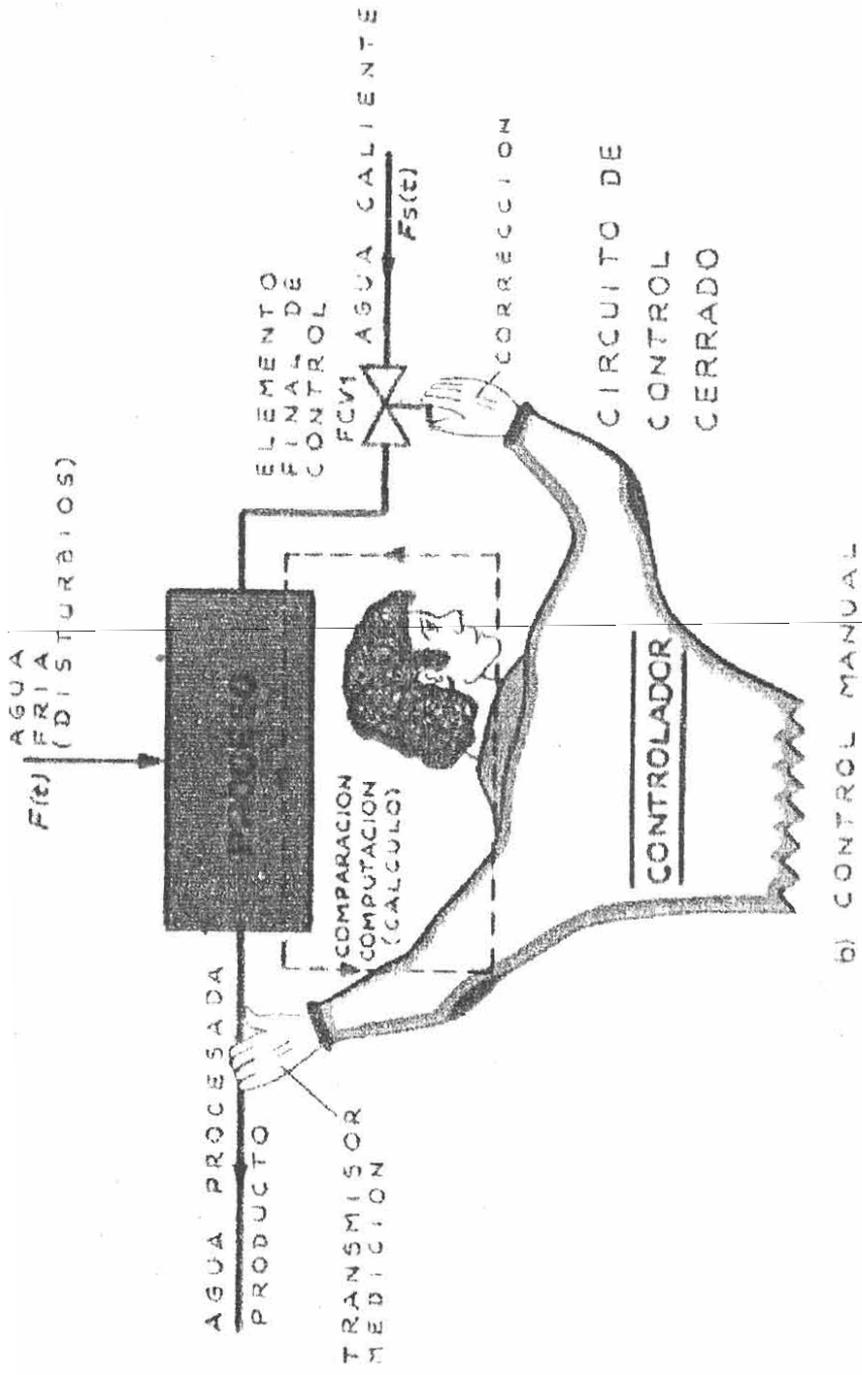
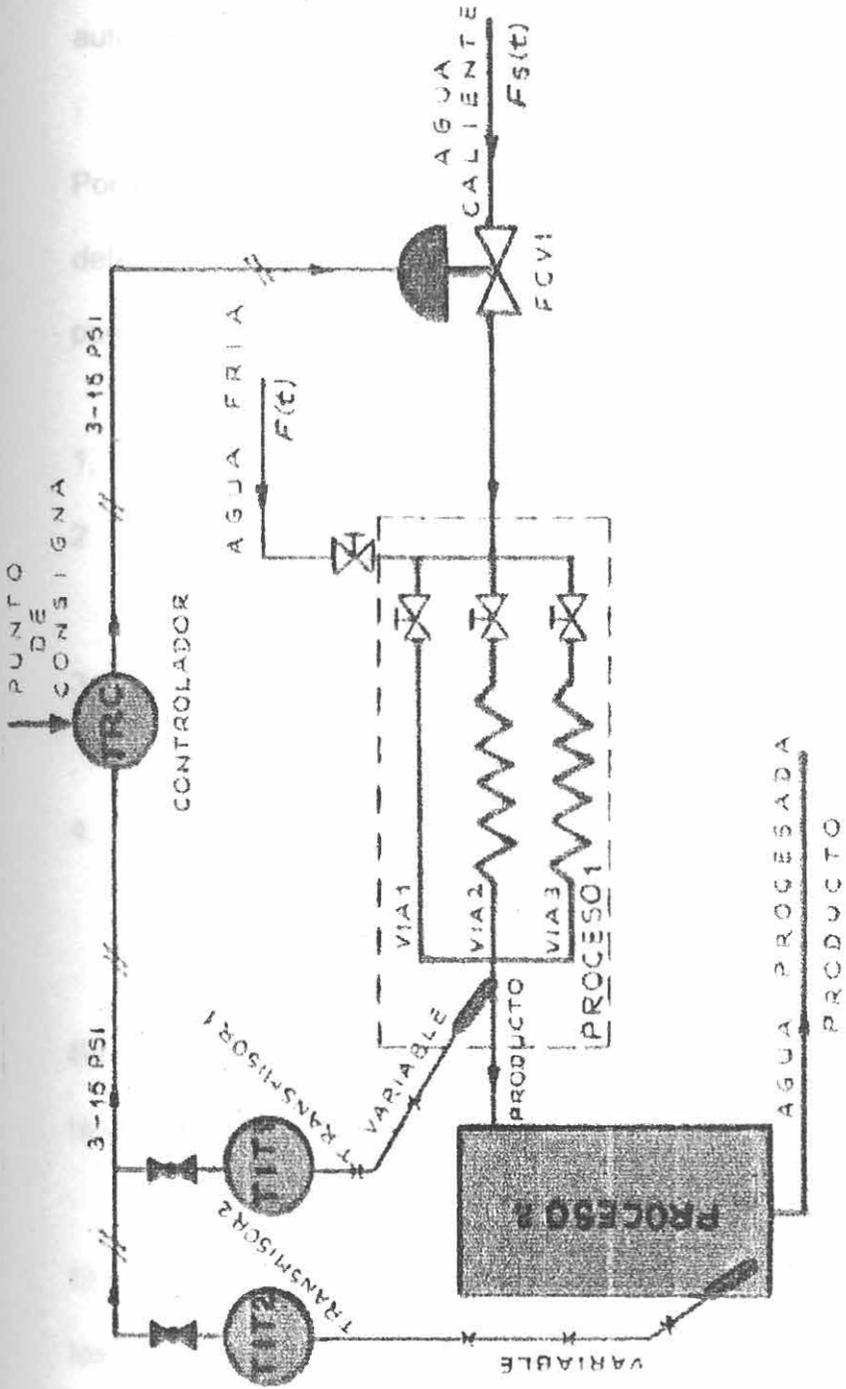


Fig. 1.6 CONTROL BASICO DEL PROCESO



QJ CONTROL AUTOMATICO

Fig. 1.7 CONTROL PRACTICO DE PROCESO

Para comprender lo que es un modo de control, utilicemos nuevamente la semejanza del control manual y el control automático.

Por ejemplo, cuando el estudiante (operador) en control manual detecta que la temperatura está por encima del valor deseado puede mover la válvula de agua caliente de modos distintos:

1. Cierra la válvula totalmente.
2. Cierra la válvula lentamente y a una velocidad constante mientras halla desviación de la variable controlada.
3. Cierra la válvula más cuando la desviación u error ocurre rápido.
4. Cierra la válvula una cierta cantidad por cada unidad de desviación.

Se puede usar otros métodos o combinaciones para manipular la válvula, según la habilidad del estudiante.

El modo de control es la forma como el sistema de control hace las correcciones con relación al error existente. El sistema de control, en control manual es el estudiante y en control automático es el instrumento controlador.

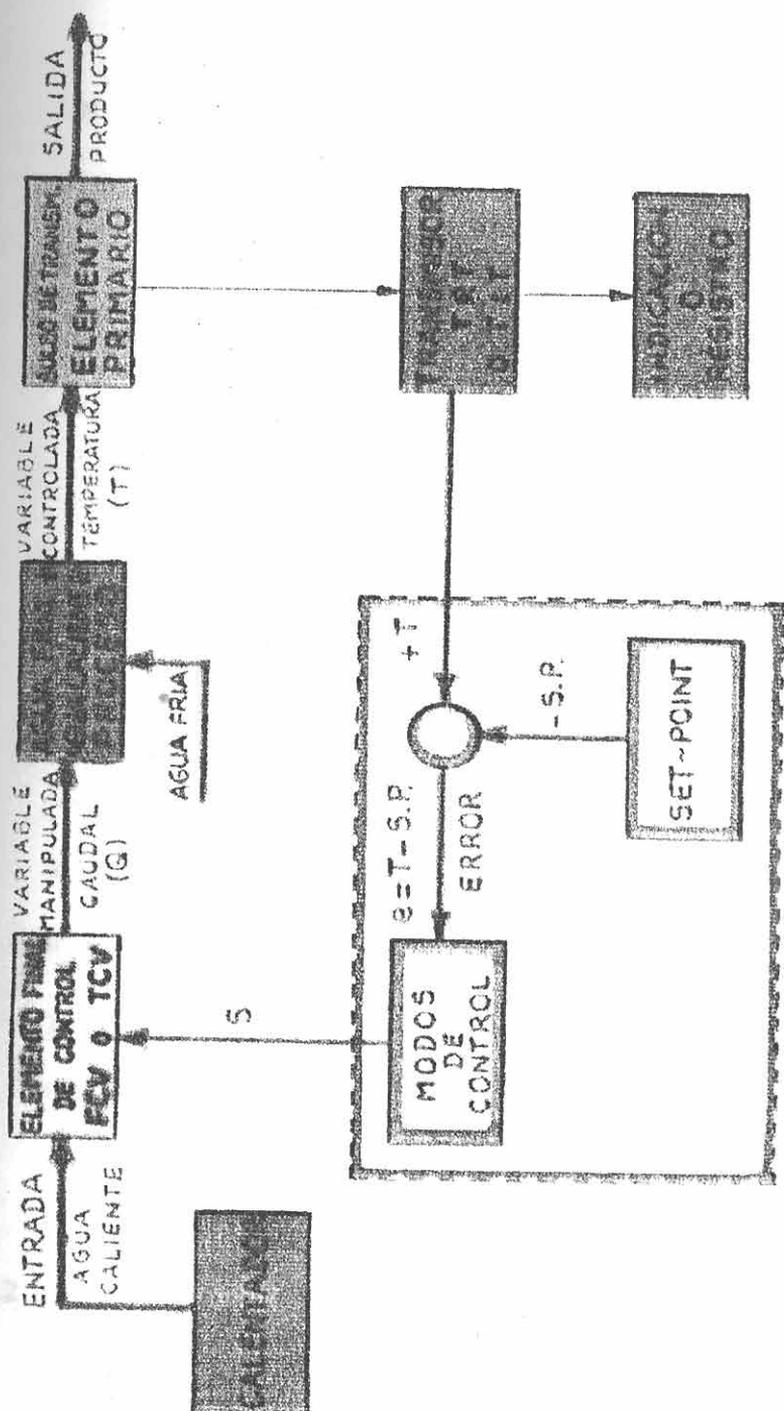
Para ambos casos el sistema de control corrige la desviación en un circuito de control cerrado con retro-alimentación. En la fig. 1.8, se muestra el diagrama de bloques del circuito en cuestión para un lazo de temperatura.

A continuación, los modos de control que más se encuentran en los circuitos industriales:

1. Dos posiciones (on – off, todo – nada).
2. Proporcional (P).
3. Integral (I).
4. Proporcional más Integral (PI).
5. Proporcional más Derivativo (PD).
6. Proporcional más Integral más Derivativo (PID).

Es importante entender las ventajas y limitaciones de cada modo de control además de sus características.

Así que, la operación es de dos posiciones cuando la señal correctora puede adoptar dos valores. En acción proporcional, integral o derivativa la señal correctora es un valor proporcional, integral o derivativo de la señal de error.



T - VARIABLE CONTROLADA e - ERROR O DESVIACION
 S.P. - VALOR DESEADO (SET-POINT) S - SEÑAL CONTROLADA

Fig. 1.8 LAZO CERRADO DE CONTROL RETROALIMENTADO

Estudiaremos los modos de control y el controlador, en la que nos interesará fundamentalmente la relación entrada– salida.

Un dispositivo común a todos los controladores es el comparador, el mismo que resta del valor de la variable controlada $T_{1/2}$ el valor deseado S.P. La diferencia obtenida constituye la señal de error del sistema. En resumen:

$$e = T - \text{S.P.} \quad (\text{equivalencias: } T=T_{1/2}, \text{ S.P.}=T_{1/2}^{\text{fijo}})$$

Cualquier valor deseado de la variable (dentro del rango) puede fijarse en el controlador a través de una perilla.

Cabe resaltar que en los controladores encontramos, además de los modos de control, el tipo de acción, que puede ser directa ó inversa, la cual depende de la relación entre la señal de medición y la señal de control. En acción directa un aumento en la señal medida (T ó su equivalente) produce un aumento en la señal de salida del controlador (S) o $M(s)$.

1.4.2 Modos de control de dos posiciones

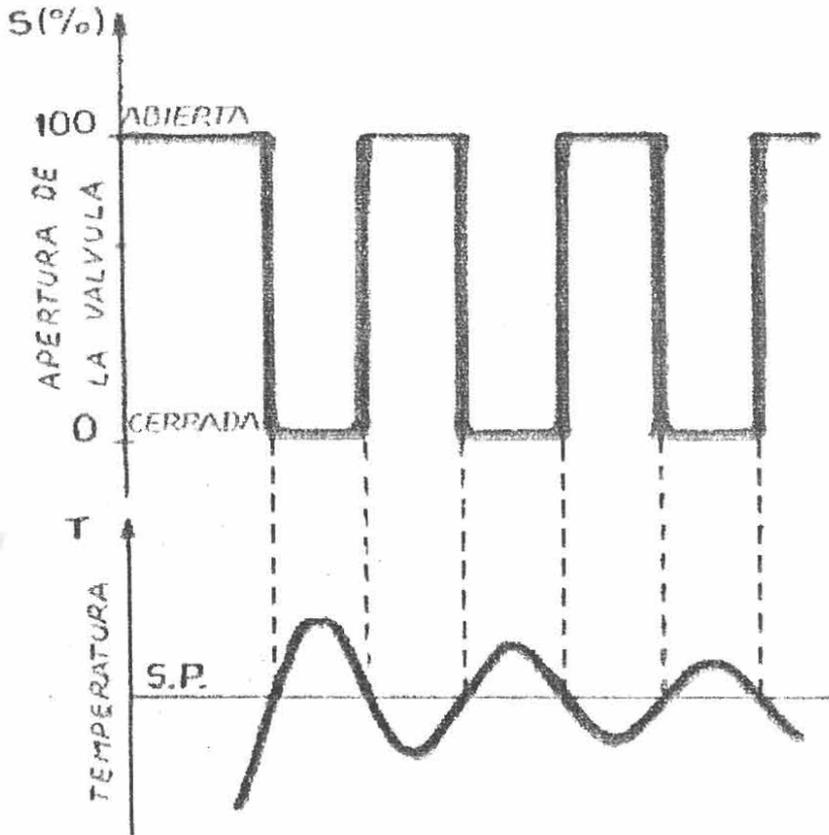
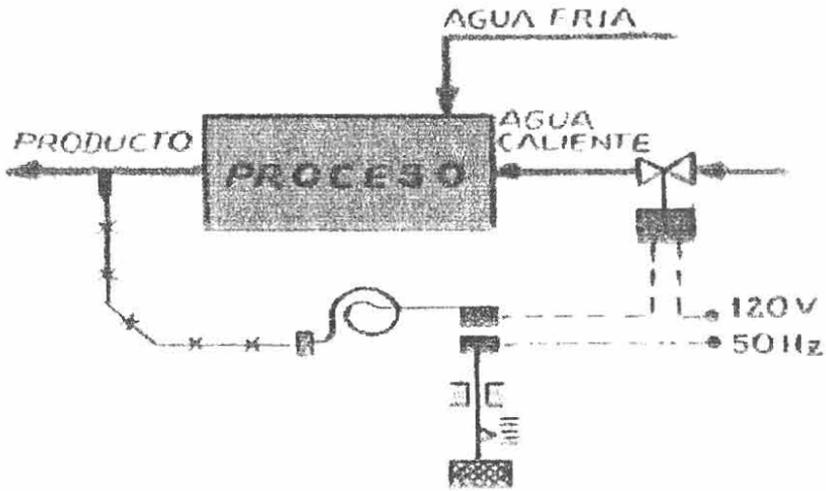
En un control de dos posiciones, el elemento final de control adopta una de solamente dos posiciones fijas posibles, en una

forma relativamente rápida, dependiendo si la variable controlada $T_{1/2}$, se encuentra por encima o por debajo del punto de consigna o valor deseado, $T_{1/2}^{\text{fijo}}$. En la práctica este tipo de control se caracteriza por su banda diferencial o zona muerta en la que el elemento final de control permanece en su última posición.

En la fig. 1.9, se muestra un ejemplo de un sistema de control de dos posiciones. La válvula de control estará abierta o cerrada completamente, para que ello ocurra, el actuador de la válvula debe recibir solo dos valores diferentes de presión, correspondientes a las dos únicas posibles señales de salida del controlador.

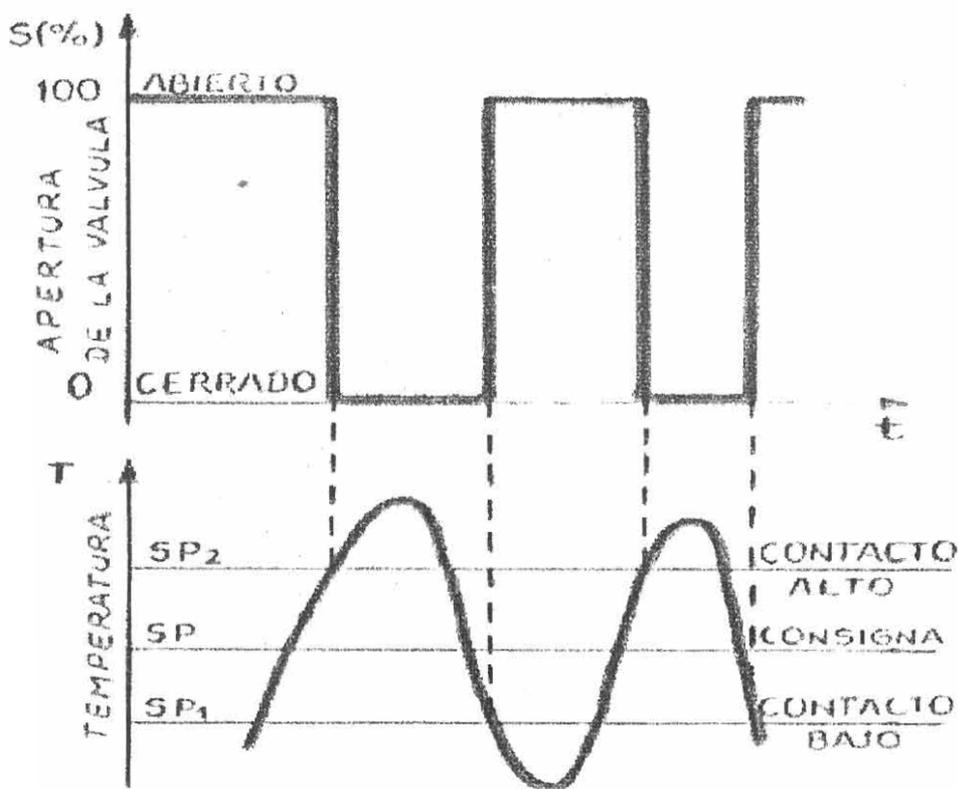
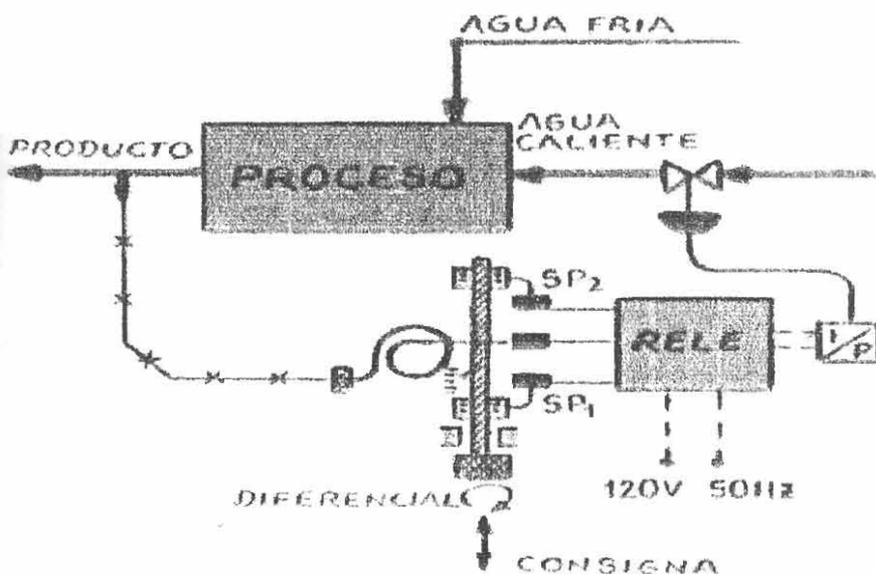
Cuando la temperatura se encuentra en el valor del punto de ajuste o valor deseado (set – point) o arriba, los contactos están cerrados y la válvula cierra, cuando la temperatura está por debajo del punto de consigna o ajuste, los contactos están abiertos y la válvula abre.

La fig. 1.10, muestra la relación entrada – salida de un controlador de dos posiciones. El punto de consigna S.P=50%.



a) CONTROL IDEAL

Fig. 1.9 CONTROL TODO O NADA



b) CONTROL REAL

Fig. 1.9 CONTROL TODO O NADA

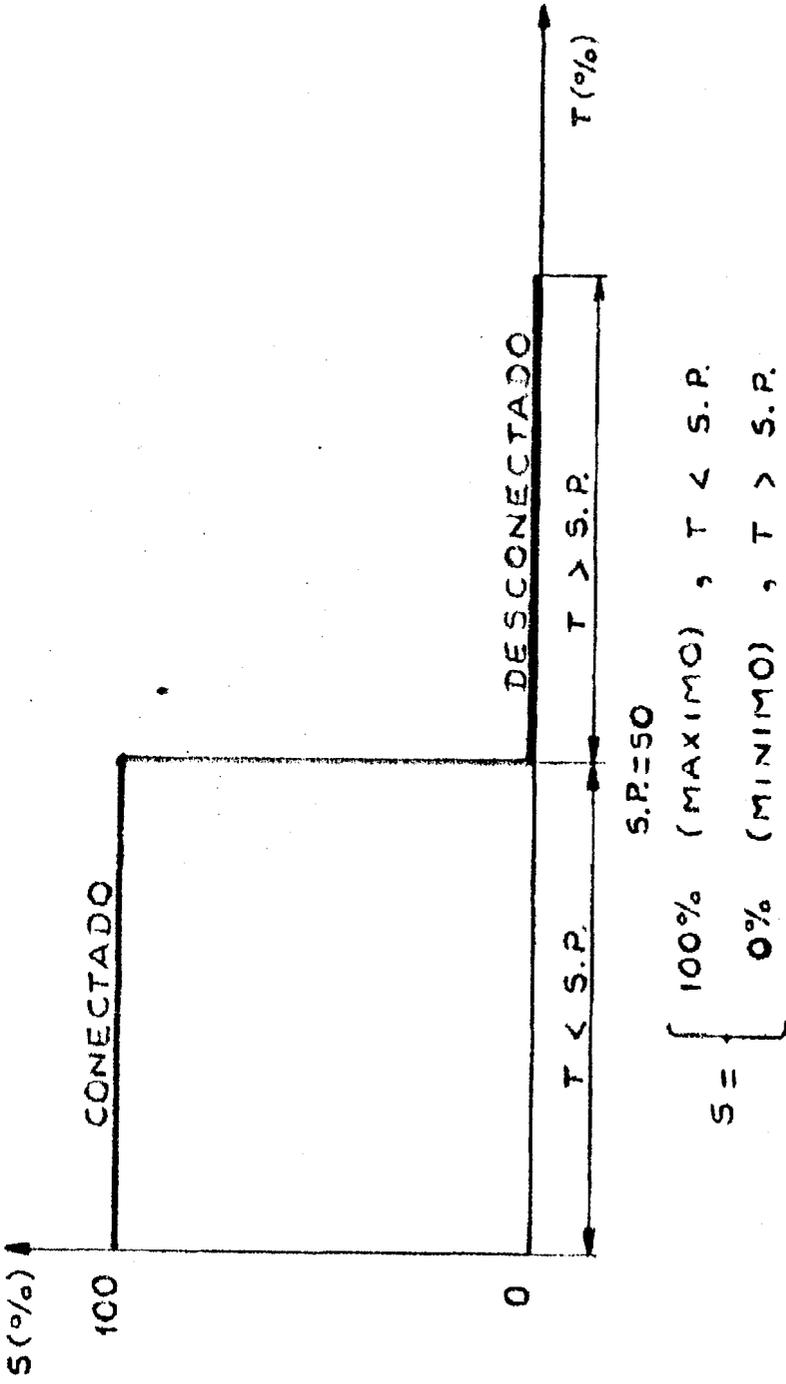


Fig. 1.10 RESPUESTA DE UN CONTROL DE DOS POSICIONES

Estos controladores se aplican en condiciones de **alarma paro** o arranque, y son favorables en las siguientes condiciones:

- No hay tiempos muertos ni atrasos en la transmisión.
- Las velocidades de reacción son lentas.
- No hay cambios grandes ni frecuentes de carga.

BANDA
DIFERENCIAL

Controladores de este tipo son: válvulas de seguridad, fusibles, relés, interruptores, termostato, etc.

Una desventaja importante de este modo de control **es que en** procesos cíclicos, se producen oscilaciones excesivas **las que** malogran el controlador y el equipo, y es en este momento **que la** banda diferencial tiene su utilidad, ya que corrige **las oscilaciones** excesivas. Se fijan dos puntos de ajuste, uno inferior **SP1** ($To^{fijo 1}$) y uno superior **SP2** ($To^{fijo 2}$) como se observa en la fig. 1.11, los que delimitan la zona muerta.

El control de dos posiciones no es más que un caso **especial del** control proporcional, con ganancia variable [ganancia igual a cero ($G = 0$) dentro de la banda diferencial y ganancia igual a

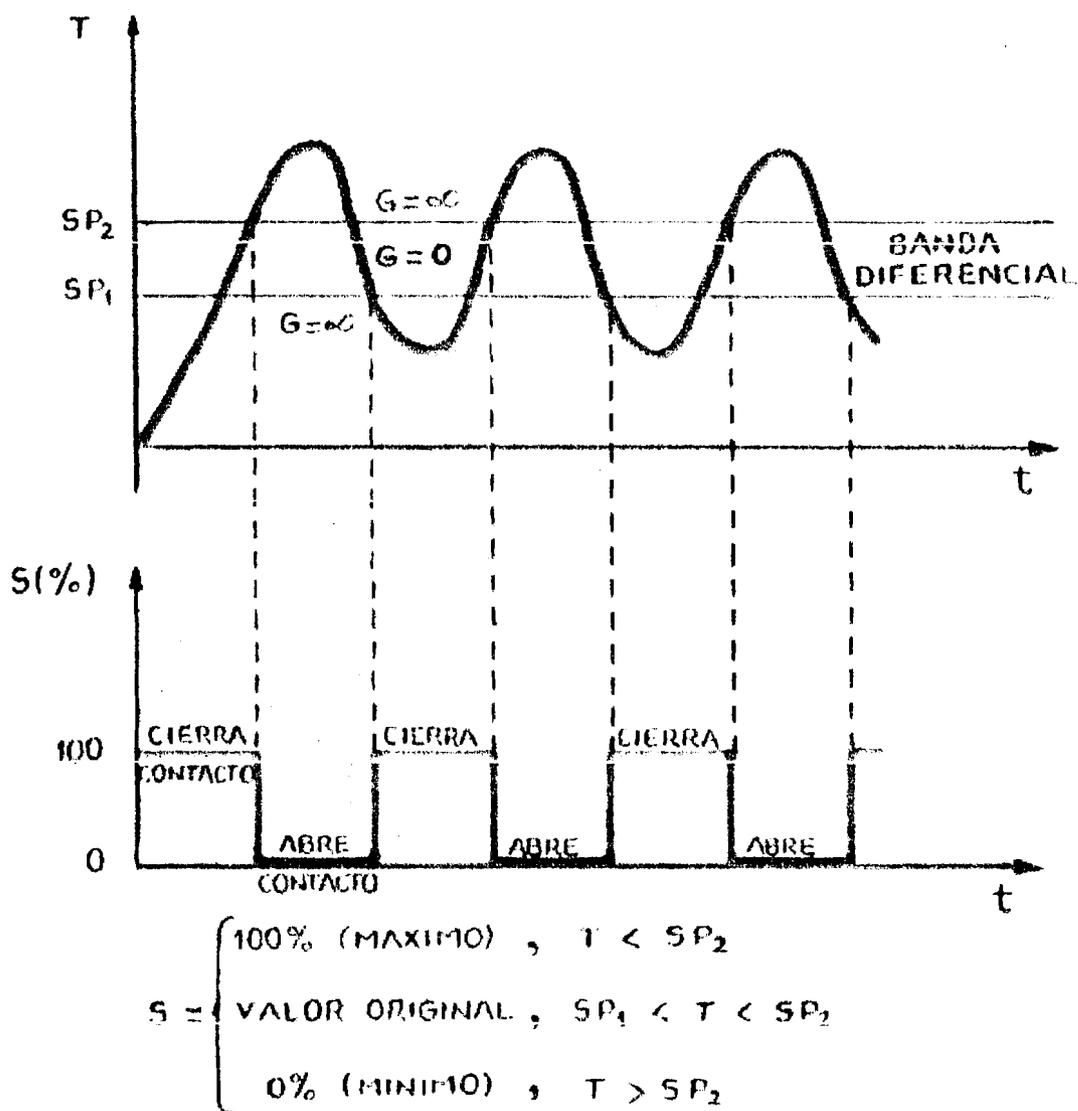


Fig. 1.11 RESPUESTA DEL MODO DE CONTROL DE DOS POSICIONES CON BANDA DIFERENCIAL

infinito ($G = \infty$) fuera de ella], y con memoria del último valor antes de entrar en la banda proporcional o zona muerta.

1.4.3 Modo de control proporcional

El modo de control proporcional presenta una relación lineal entre el valor de la variable controlada y las posiciones del elemento final de control o la salida del controlador es proporcional al error computado, siendo la constante de proporcionalidad la ganancia (G) del controlador o ganancia proporcional. Es decir:

$$S = G.e \quad (\text{equivalencia: } S = M(s))$$

De esta manera, la válvula se mueve de manera uniforme por cada unidad de desviación y la curva que obedece la válvula de control es semejante a la curva correspondiente de la variable.

La fig. 1.12a, muestra la relación entre la variable controlada y la posición de la válvula, en que la posición de la válvula varía proporcionalmente al error. Se observa que el modo proporcional, responde a la cantidad de desviación o error y no es sensible a la razón o duración del mismo.

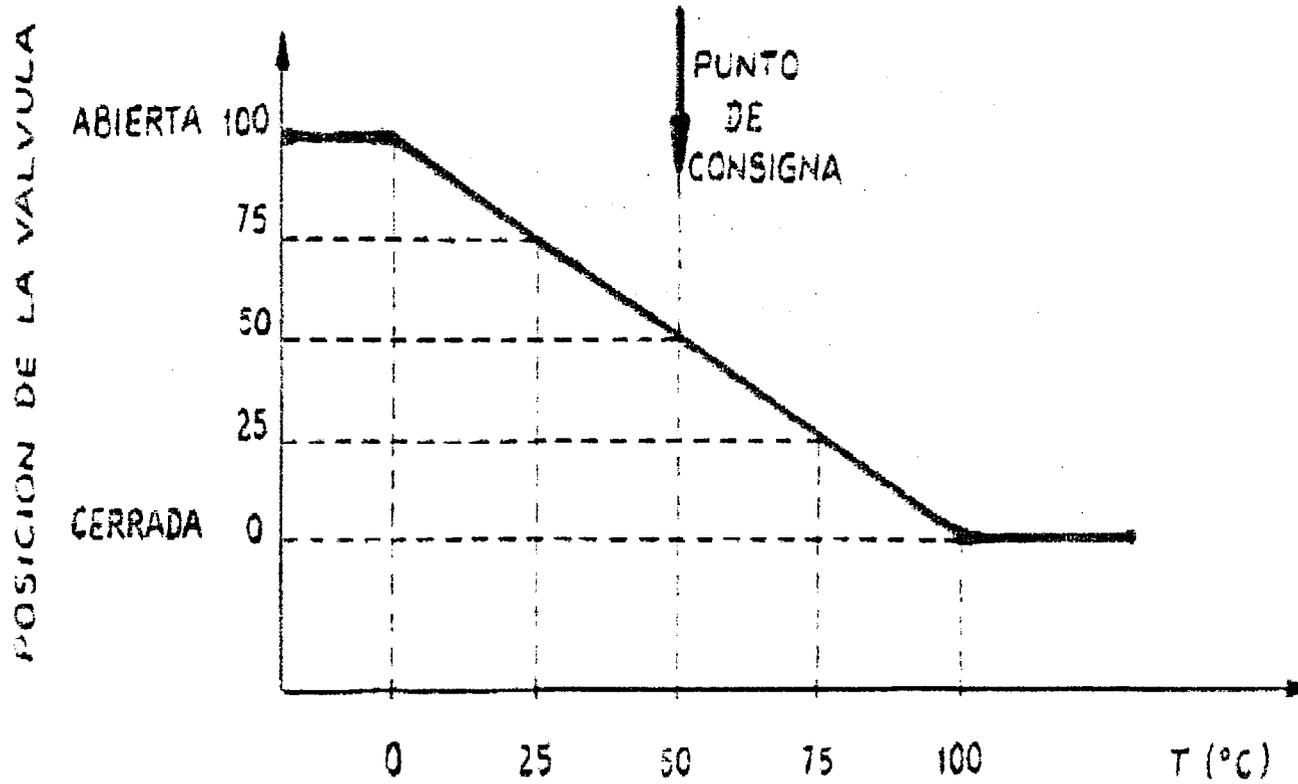


Fig. 1.12a RELACION VARIABLE CONTROLADA CON LA POSICIÓN DEL VASTAGO DE LA VÁLVULA EN MODO DE CONTROL PROPORCIONAL

En la fig. 1.12b, se verifica, que a los 2 o 4 minutos, cuando la variable controlada es regresada a su valor inicial, la válvula también es retornada a su valor inicial; es decir, no hay corrección de la válvula sin desviación.

La ganancia o sensibilidad como también se la conoce, puede ser variada con una perilla en el controlador.

Se suma una constante C a la ecuación anterior, la cual puede ser ajustable dependiendo de la condición del sistema, puesto que el error puede ser positivo, cero o negativo.

$$\begin{array}{l}
 S = G \cdot e + C \\
 \\
 S = G(T-S.P.) + C
 \end{array}
 \quad e \quad \left\{ \begin{array}{l} e > 0 \\ e = 0 \\ e < 0 \end{array} \right.$$

En control, identificamos la Banda Proporcional (**B.P.**), que es el inverso de la Ganancia (**G**) o sensibilidad y expresada en porcentaje resulta:

$$B.P.(%) = 100/G$$

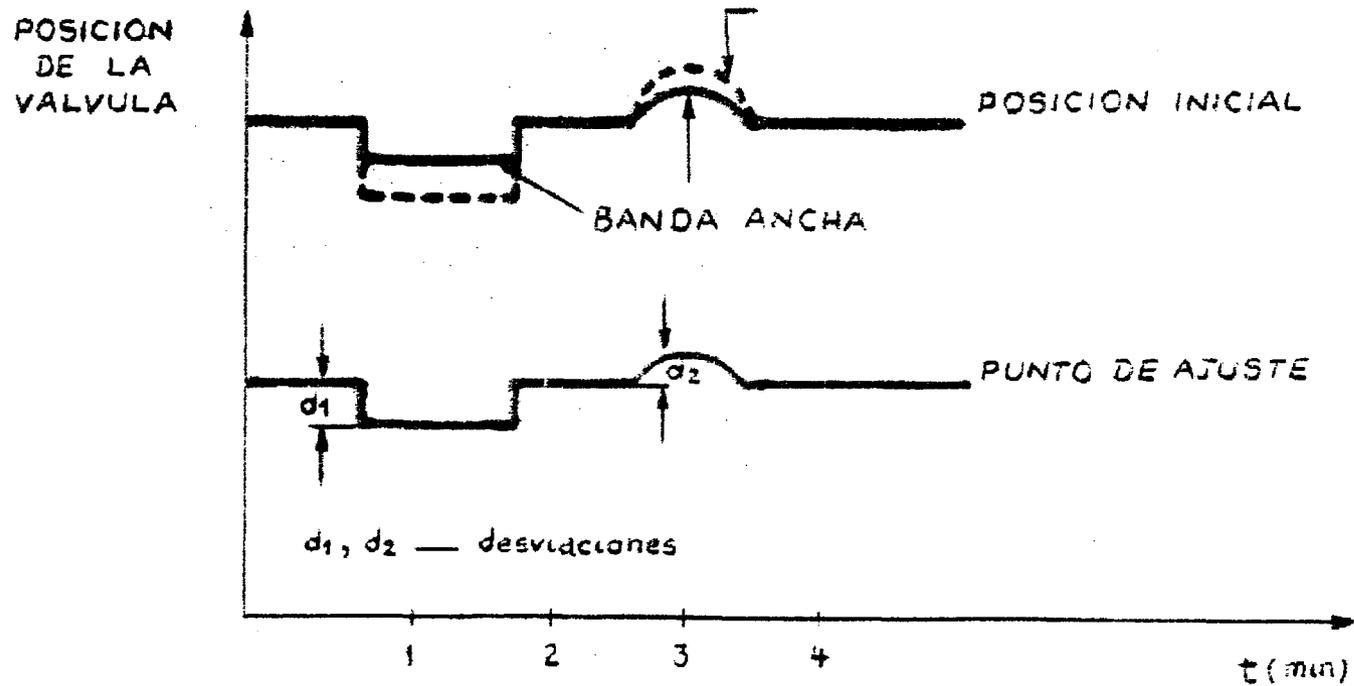


Fig. 1.12b COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE CONTROLADA (T), CON LA POSICIÓN DEL VASTAGO DE LA VÁLVULA (S), EN MODO DE CONTROL PORCIONAL

Se interpreta la Banda Proporcional como el porcentaje que debe variar la variable controlada $T_{\frac{1}{2}}$, para que el elemento final de control se desplace de una posición extrema a la otra. La salida del controlador se puede expresar entonces como:

$$S = 100 / B.P.(\%) [T - S.P.] + C,$$

o lo que es igual,

$$M(s) = 100/B.P.(\%) [T_{\frac{1}{2}}(s) - T_{\frac{1}{2}}^{fijo}(s)] + C.$$

De la ecuación anterior se desprende que la posición del elemento final de control (**S**) es directamente proporcional al error (**T – S.P.**), e inversamente proporcional a la Banda Proporcional (**BP**).

Al tomar C un valor del 50% de la señal de salida o de control, que es el valor más común, la ecuación anterior representa una familia de rectas con ordenada al origen del 50% y pendientes que dependen de la Banda Proporcional.

Banda proporcional

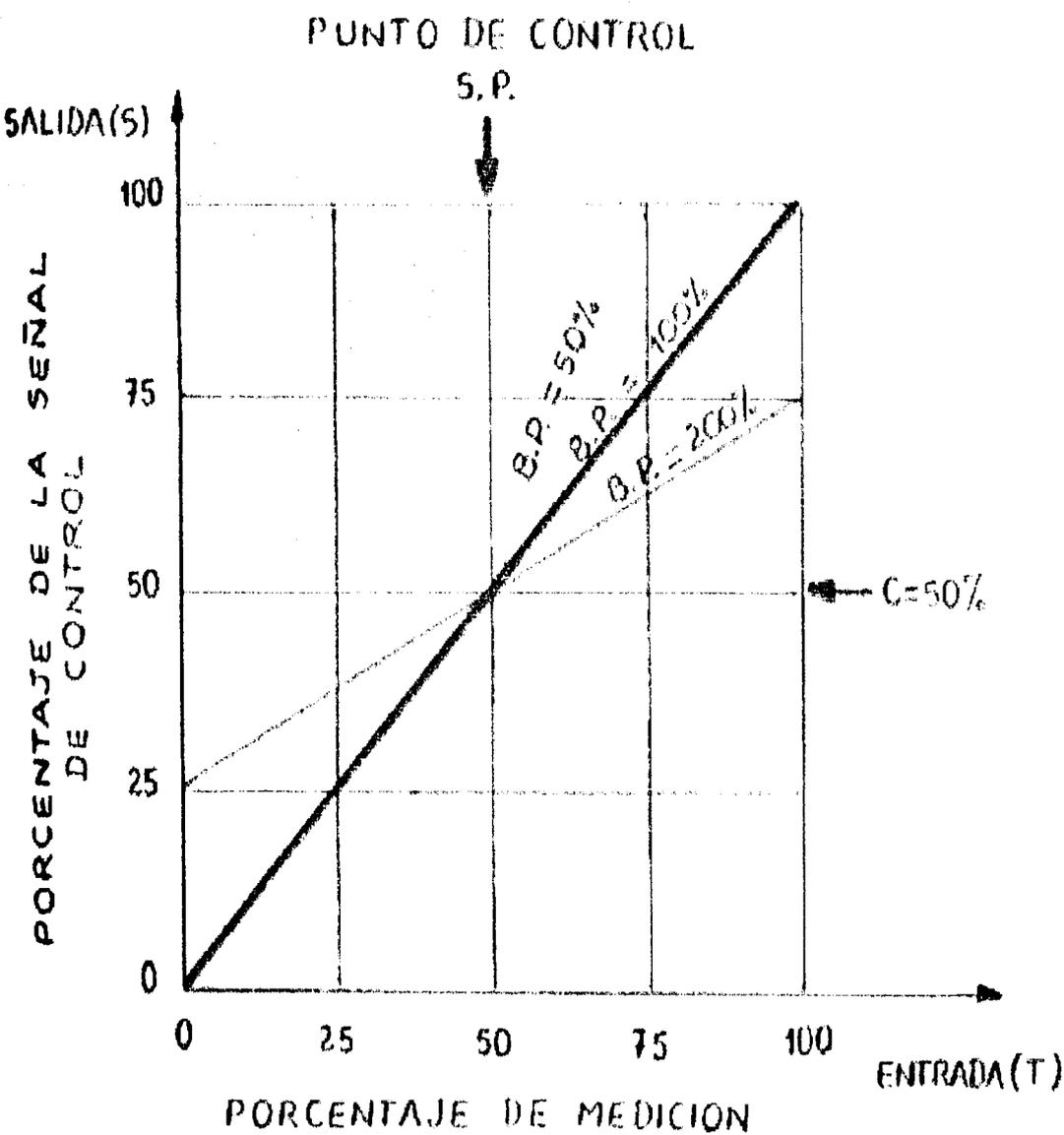
Es la variación o cambio en porcentaje o valor de la variable controlada necesaria para provocar la carrera total de la válvula

de control. Es decir, el rango de la variable controlada que corresponde al rango de operación completa del elemento final de control y es expresada como un porcentaje de su rango completo. Por ejemplo, si el rango completo del instrumento es de 100°C y toma un cambio de 50°C o 25°C para provocar la carrera total de la válvula, las Bandas Proporcionales serán de 50% y 25% respectivamente.

Los controladores industriales disponen de Bandas proporcionales que cubren el rango de menos del 1% hasta más de 200%.

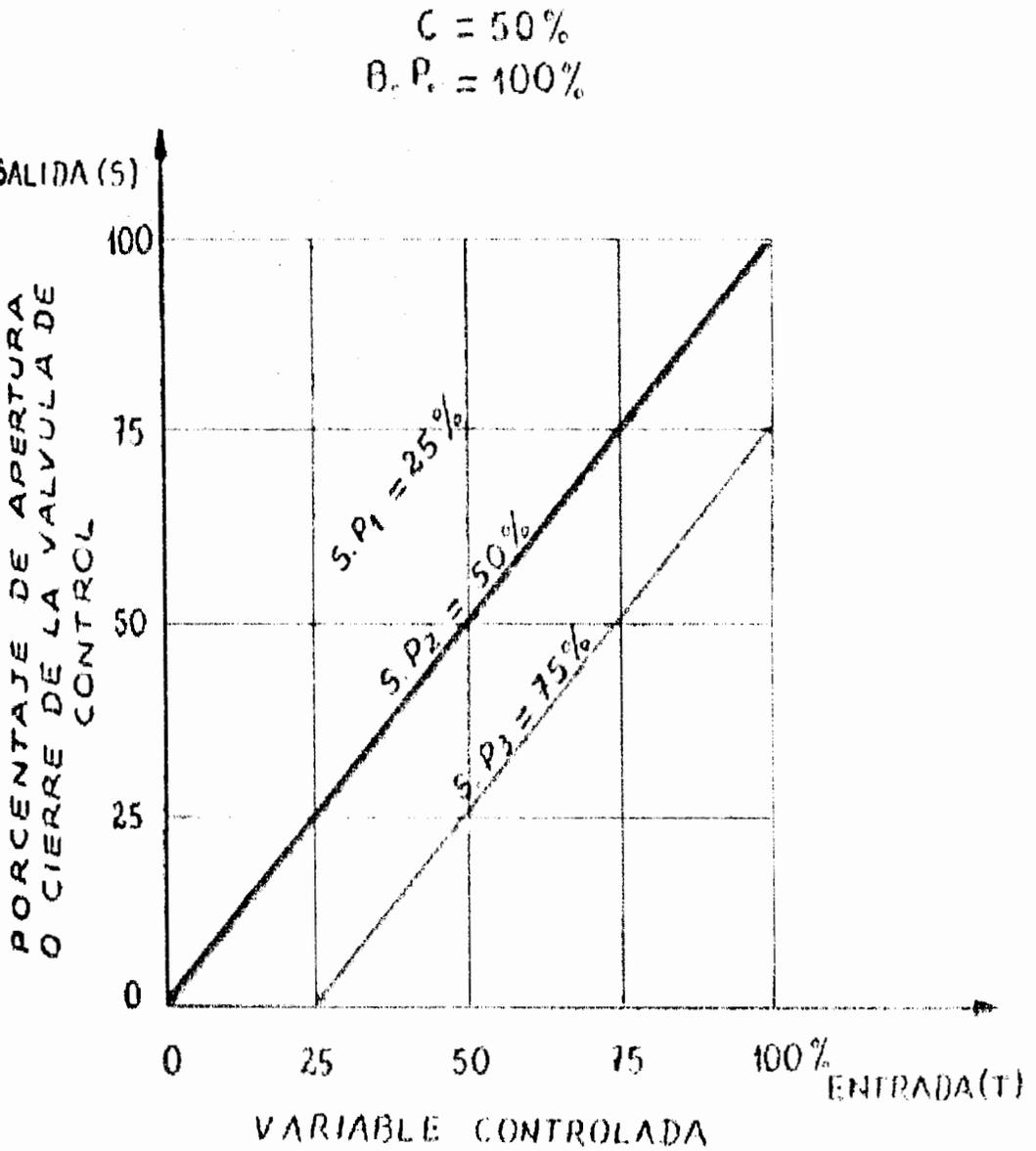
En la fig. 1.13a, se muestra el efecto de variar la **B.P.**, para el caso de **S.P.** = 50% y **C**=50%. Cuando la **B.P.**=50%, según la figura, una variación de la variable medida de 25 a 75%, entrega una variación de la salida del 100%. Cuando la **B.P.**=200%, una variación de la entrada de 0 a 100%, produce una variación de la salida de 25 a 75%, lo cual quiere decir que la válvula de control no abre, ni cierra completamente.

Se observa que las líneas se cortan siempre en un mismo punto, ya que el punto de consigna (**S.P.**) se encuentra en el



a) EFECTO DE LA VARIACION DE LA B.P.

Fig. 1.13 BANDA PROPORCIONAL



b) EFECTO DE LA VARIACION DEL S.P.

Fig. 1.13 BANDA PROPORCIONAL

50%. Se ha calibrado previamente el controlador para que cuando la señal de salida sea del 50%, la variable controlada esté en el 50% de su rango de variación.

Con la fig. 1.14, se puede entender mejor el concepto de Banda Proporcional. Se observa que podemos cambiar la abscisa por la ordenada y viceversa. Se nota que las bandas proporcionales mayores de 100% no pueden causar una carrera total de válvula de control, a pesar que se tiene un cambio de rango completo en la variable controlada ($T_{1/2}$).

La fig. 1.13b, muestra lo que acontece al variar el valor de ajuste (**S.P.**), manteniendo **C** = 50% y **B.P.** = 100%.

El cambio de set point, llamado Reajuste Manual, produce un desplazamiento paralelo de la recta correspondiente a **B.P.** = 100% lo que hace modificar la salida (**S**) del controlador, aumentándola o disminuyéndola.

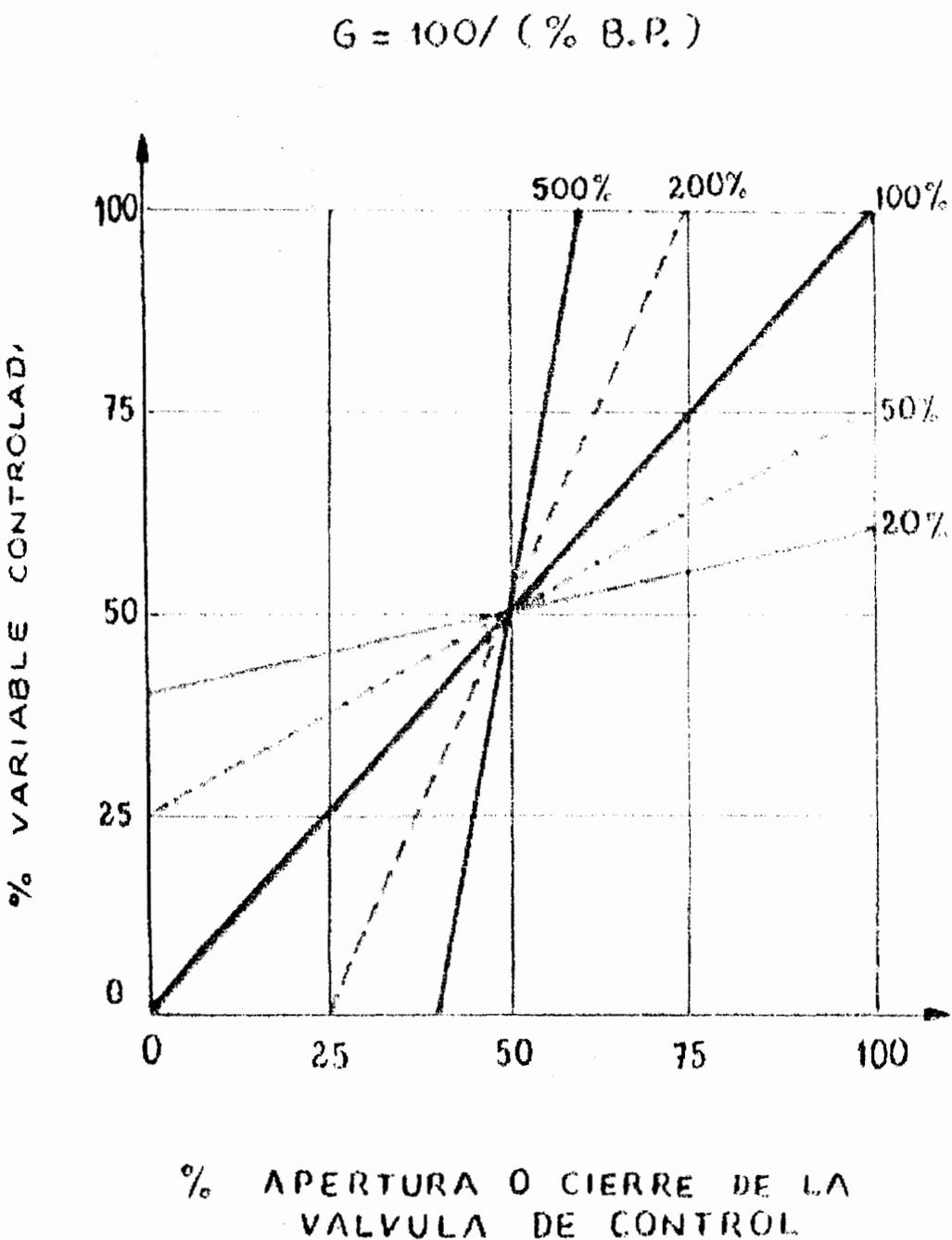


Fig. 1.14 BANDA PROPORCIONAL

Se observa que ante un error constante de:

a) $e = 5\%$

b) $e = 10\%$ y una B.P. = 100%, la salida (S) del controlador será:

a) $S = 100/100 [0.05] + 0.5$

$$S = 0.55 \quad \text{ó} \quad S (\%) = 55\%$$

b) $S = 100/100 [0.1] + 0.5$

$$S = 0.6 \quad \text{ó} \quad S (\%) = 60\%$$

Al disminuir la Banda Proporcional a B.P. = 50% y manteniendo C = 50%, para los casos anteriores tenemos:

a) $S = 100/50 [0.05] + 0.5$

$$S = 0.6 \quad \text{ó} \quad S (\%) = 60\%$$

b) $S = 100/50 [0.1] + 0.5$

$$S = 0.7 \quad \text{ó} \quad S (\%) = 70\%$$

En consecuencia, en control proporcional se tiene:

1. Para un mismo error, al disminuir la Banda proporcional [o aumentar la Ganancia (G), aumentará la salida (S) del controlador .
2. Para una misma Banda Proporcional [una misma Ganancia (G)], al aumentar el error, aumentará la salida (S).

Para un error del 10% cuando la Banda Proporcional varía entre 100% y 50% la salida estará entre 60 y 70%, lo que se puede corroborar en la fig. 1.13a.

Se considera al error, de manera general, variable en función del tiempo, por lo que la salida del controlador también lo será.

Ganancia

También conocida como Sensibilidad, describe la relación entre la entrada y la salida de un dispositivo de control. Matemáticamente es recíproca a la banda proporcional.

En algunos instrumentos, el ajuste de proporcionalidad se lo calibra en Ganancia o Sensibilidad por Banda proporcional.

De ahora en adelante, la ganancia del controlador del lazo de control de temperatura se reconocerá como K_c o $G_c(s)$ en gráficos y en el análisis del modelo matemático.

Desviación permanente

Cuando el controlador interacciona con el proceso se produce una característica inherente del controlador proporcional, que es

el corrimiento, desviación permanente o error de estado estable, según se observa en la figura 1.15. Suponemos una salida proporcional del controlador que efectúa una entrada $M(s)$ en el elemento final de control (apertura de la válvula), el cual provoca un aumento en escalón de flujo de agua caliente ($Q_c = F_s$) de 3 a 6 litros/min hacia el proceso para la condición de que el valor del punto de control sea 50°C y una ganancia dada K_{C1} , el error de estado estable o desviación permanente será e_1 , al alcanzar el estado estacionario la variable que se controla $T_{1/2}$. Si en la misma condición fija del punto de control aumentamos la ganancia a un valor K_{C2} , en el controlador, se ejecutará la acción de corrección proporcional que la recibirá la válvula de control, lo que probablemente, disminuya el flujo de agua caliente y haga que la variable controlada se aproxime un poco más hacia 50°C , manteniendo un nuevo valor el error de estado estable e_2 .

Cualquier cambio en la carga del proceso provoca una nueva posición del elemento final de control para corregir, pero el modo proporcional requiere un cambio en la desviación para producir la nueva posición del elemento final de control.

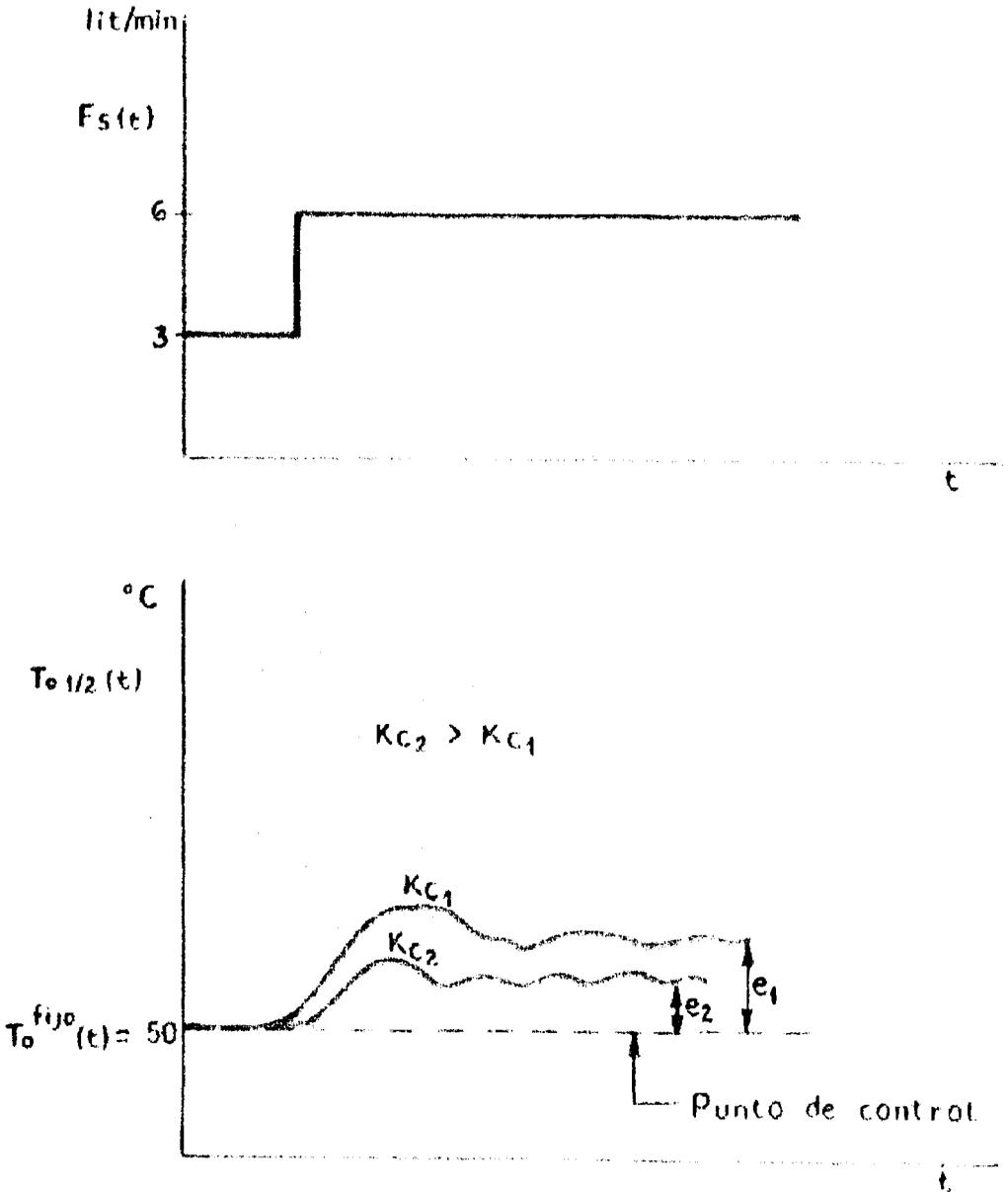


Fig. 1.15 COMPORTAMIENTO DEL MODO DE CONTROL PROPORCIONAL

En la figura 1.16, se muestra un gráfico carga, temperatura, y posición de la válvula para un proceso como el lazo de control de temperatura bajo el modo de control proporcional. La condición inicial podría ser, $T_{\frac{1}{2}}^{\text{fijo}} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$, encontrándose la variable controlada en este valor. Un instante después, tal como un minuto, ocurre un cambio de carga de escalón. Se observa que la temperatura no es regresada al valor deseado de $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, por el control proporcional, sino que se mantiene en un nuevo valor como $41 \text{ } ^\circ\text{C}$.

El modo de control proporcional puede producir una corrección exacta para solamente una condición de carga como el del escalón de la figura; en otras condiciones de carga habrá algún error. Este error es conocido como desviación permanente u Offset. El error permanente es de $9 \text{ } ^\circ\text{C}$ en el intervalo de 3 a 10 min.

Se puede eliminar el corrimiento observado, mediante el **reajuste manual** del punto de ajuste. En la figura última, al minuto 10, el punto de control es elevado manualmente hasta llevar la temperatura al valor deseado de $50 \text{ } ^\circ\text{C}$.

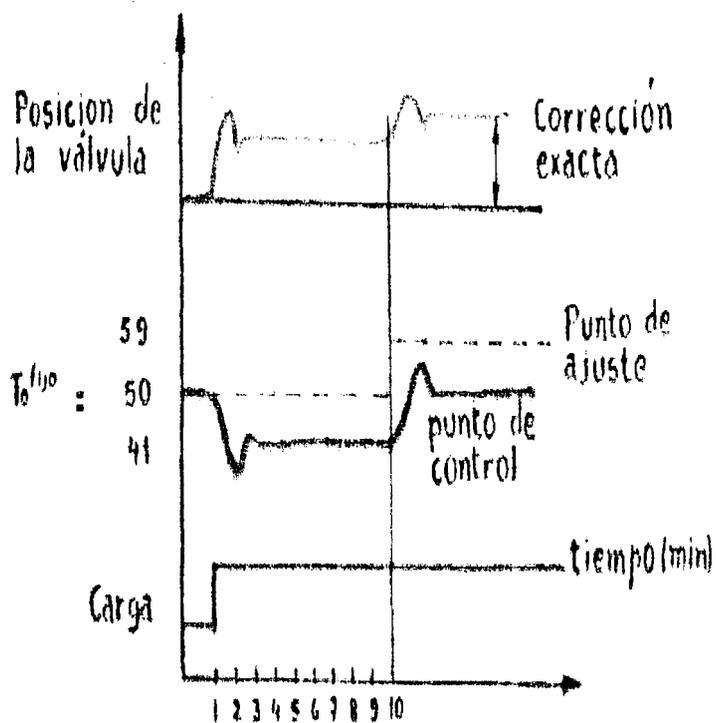


Fig. 1.16 COMPORTAMIENTO DEL MODO PROPORCIONAL

Se esclarece, sin embargo, que tal reajuste manual elimina a la desviación permanente exclusivamente para un simple valor de carga.

Se concluye que el modo de control proporcional tiene las siguientes características:

- Es capaz de aplicaciones y ajustes amplios,
- tiene la característica indeseable del corrimiento (Offset) a un cambio de carga constante,
- una velocidad de reacción lenta del proceso permite alta sensibilidad o ganancia,
- los retardos por transporte requieren baja ganancia.

En general, si el proceso tiene una constante de tiempo grande τ (en nuestro caso, $\tau = RC$. Capacidad C y Resistencia R , grandes), y pocos tiempos muertos la BP apropiada será pequeña (inferior al 10%).

Seguir estas recomendaciones para cuando podemos aplicar el control proporcional:

- No hay grandes cambios de carga,
- No hay retardos grandes por transporte, o tiempos muertos.
- La velocidad de reacción del proceso es lenta.

1.4.4 Modo de control integral

El modo de control integral (I) sirve para evitar el error característico del modo proporcional. El modo integral introduce el **reajuste automático** que es la repetición de la acción proporcional, hasta eliminar el corrimiento, sin importar la posición del elemento final de control. Dicha posición es cambiada a una razón la cual es proporcional a la desviación. En otras palabras, mientras más grande es la desviación, más rápido se mueve el vástago de la válvula.

Las unidades que generalmente utiliza son las repeticiones por minuto, lo que significa el número de veces que repite la acción integral el efecto proporcional.

La fig. 1.17, muestra la relación de temperatura a posición final de control característica del control integral después de un cambio de carga de escalón.

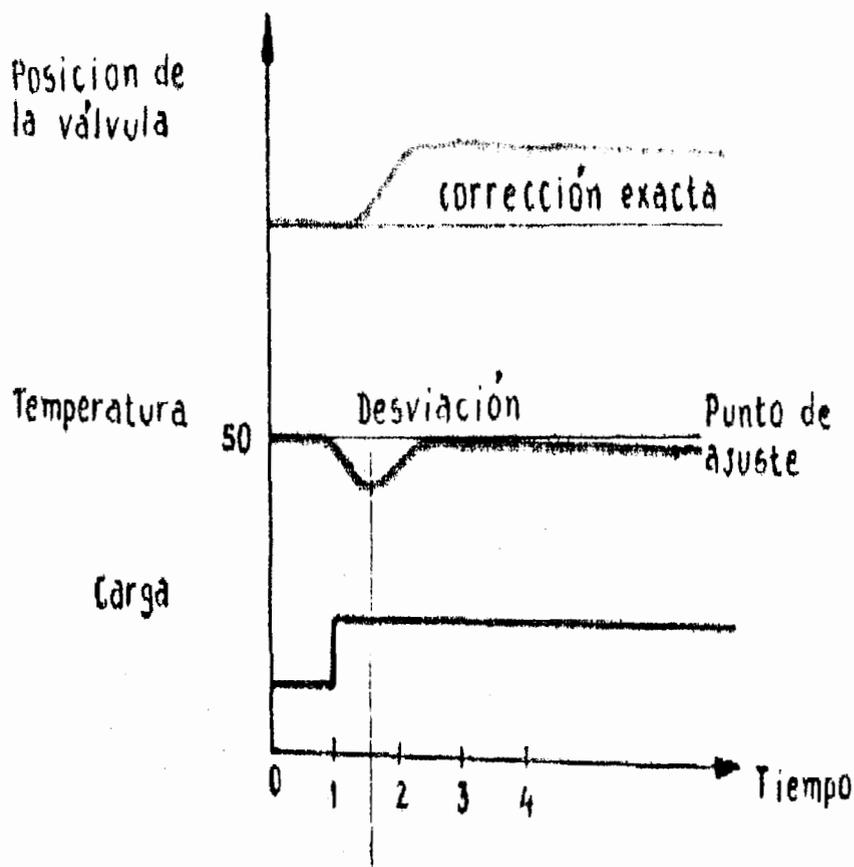


Fig. 1.17 COMPORTAMIENTO DEL MODO INTEGRAL

Se observa que, cuando la desviación es máxima (1.5 min.), la velocidad de la carrera de la válvula es máxima.

El modo integral tiende a generar inestabilidad ya que se satura si se usa en procesos discontinuos. Cuando el proceso es detenido, la variable medida cambia su valor considerablemente, haciendo que el controlador detecte un gran error, el cual es integrado llevando el controlador a saturación.

En resumen, la importancia primordial del modo de control integral es que mientras la desviación continúe, la corrección a la posición del elemento final continúa.

El control integral responde a la cantidad y la duración de tiempo de la desviación.

De esta manera, este modo de control continúa operando hasta que se produce una **corrección exacta**, para cada cambio de carga. Esta es una de las ventajas del modo integral sobre cualquier otro modo.

1.4.5 Modo de control proporcional más integral

Generalmente el modo de control integral se lo usa en combinación con el modo de control proporcional, formando el modo de control proporcional más integral (PI).

El modo integral o flotante tiene la única ventaja de ir corrigiendo la posición del elemento final de control hasta que desaparece la desviación. Al sumarse el modo integral al modo proporcional, la característica indeseable de desviación permanente (Offset) del modo proporcional puede ser eliminada. La adición del modo integral hace automáticamente lo que hace el reajuste manual.

A la acción de corregir el error mediante este modo de control se le llama **Reajuste (Reset)**.

La figura 1.18, muestra la posición de la válvula debido al modo proporcional combinado con el debido al modo integral.

En el tiempo 0, se observa una desviación por cambio de escalón. La componente del movimiento de la válvula debido al modo proporcional ocurre instantáneamente pero debido a la componente integral la válvula continúa moviéndose a una razón constante, sin que el proceso esté en control automático.

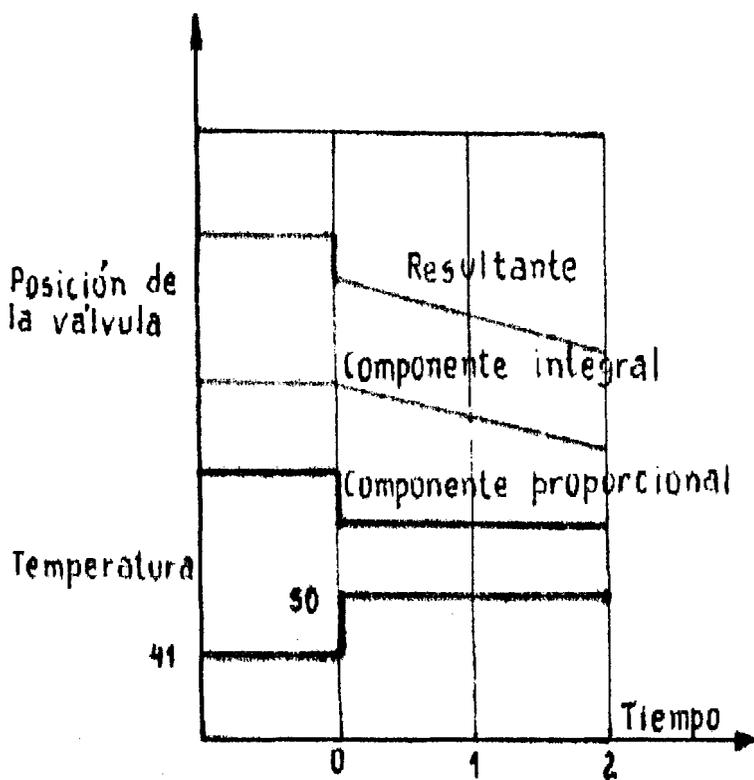


Fig. 1.18 COMPORTAMIENTO DEL MODO PROPORCIONAL MAS INTEGRAL

Una observación similar de las componentes de la posición de la válvula bajo control automático, podemos hacer sobre la fig. 1.19. En el tiempo 0, se experimenta un escalón de aumento de carga. El modo proporcional impone una corrección grande a la posición de la válvula al desviarse la temperatura y luego desaparece completamente al regresar la temperatura al punto de ajuste.

Se debe notar que la corrección exacta es ejecutada totalmente por la componente del modo integral.

El área P, bajo la curva de la componente proporcional, representa la energía agregada por el modo proporcional. El área I, representa la energía agregada por el modo integral. El área E, bajo la curva de la posición de la válvula resultante, representa el exceso de corrección de la corrección exacta.

El modo proporcional más integral ofrece un control sin error bajo todas las condiciones de carga, pero el modo integral por sí solo no aporta a la estabilidad del circuito de control.

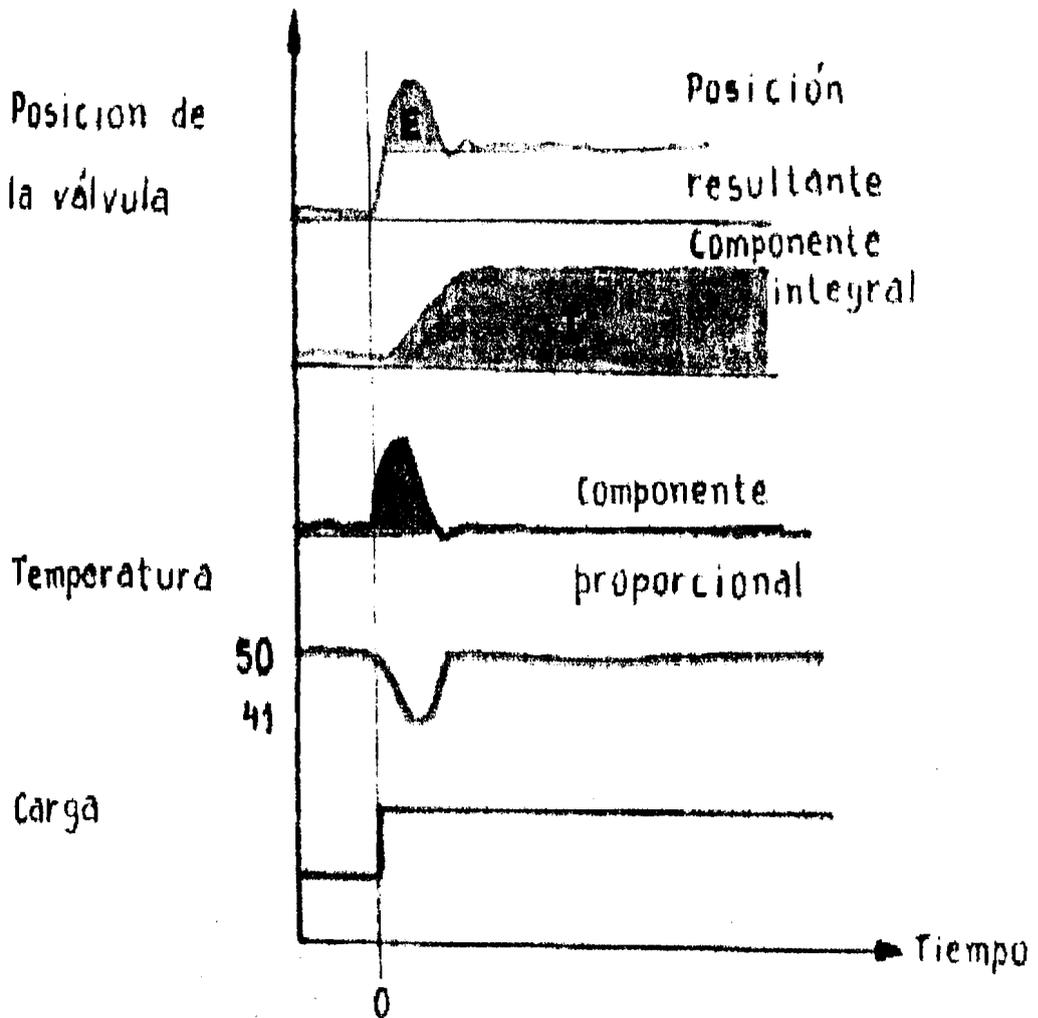


Fig. 1.19 RESPUESTA A UN CAMBIO DE CARGA DEL MODO P + I

Razón de ajuste integral

Conocida como "Reset Rate", ri , cambia la razón flotante de la componente integral.

Su unidad, como ya lo establecimos, son **las repeticiones por minuto**, e indica el número de veces por minuto en que el movimiento de la válvula es repetido por modo integral debido al modo proporcional.

En la fig. 1.20, se explica esta situación, aclarando que el proceso no está en control automático.

Al tiempo cero, se produce un cambio de escalón en la temperatura. La válvula inmediatamente cambia de posición una cantidad P debido a la componente proporcional y seguidamente se mueve una razón constante debido al modo integral.

La figura última anterior, nos muestra tres diferentes razones integrales. Al observar el gráfico, la razón integral puede ser calculada fácilmente.

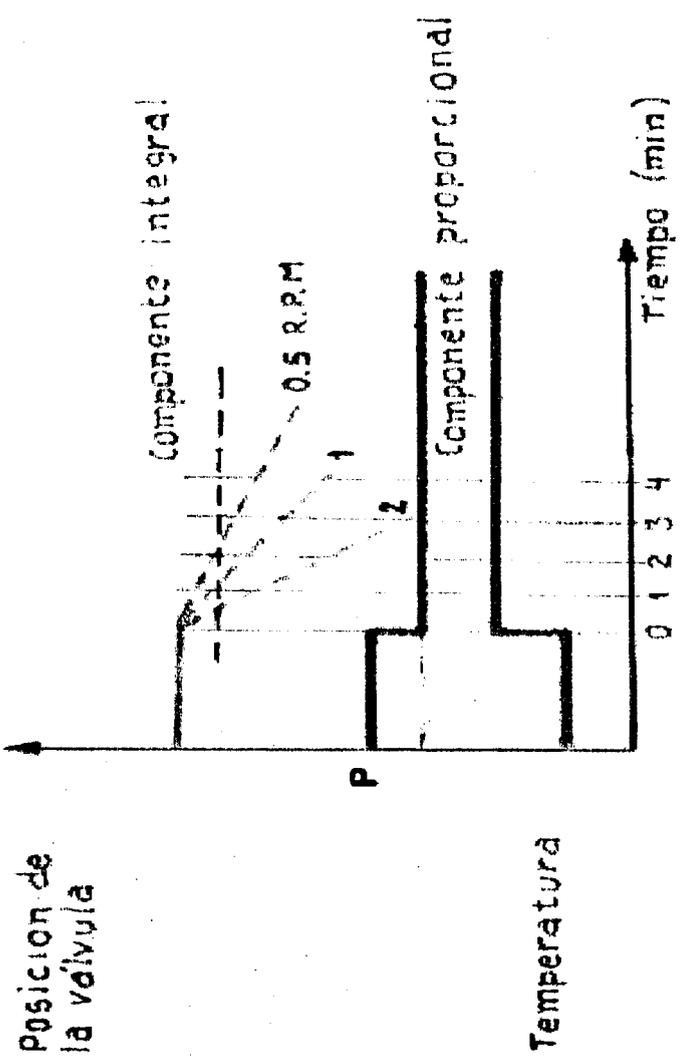


Fig. 1.20 RAZON DE AJUSTE INTEGRAL (REP/MINUTOS)

El movimiento de la válvula por el modo proporcional P es repetido por el modo integral en $\frac{1}{2}$ min. Este último valor es el denominado tiempo integral que es el recíproco matemático de la razón integral, por lo tanto la razón integral es 2 repeticiones por minuto.

La estabilidad de la variable controlada depende del ajuste del controlador. Cuando la velocidad de reajuste integral tiene un valor cero, la acción es puramente proporcional y se aprecia la existencia del corrimiento.

Si la velocidad de ajuste integral tiene un valor pequeño, la respuesta vuelve lentamente al punto de control, y el corrimiento finalmente es eliminado; por el contrario, al aumentar la velocidad de reajuste, la vuelta al punto de control es más rápida pero se vuelve más oscilatoria. Hay un valor crítico de las repeticiones por minuto, a partir del cual si se aumenta su valor, la respuesta se vuelve inestable.

La ganancia se puede ajustar separadamente manteniendo la velocidad de reajuste constante, aumentando o disminuyendo la

ganancia de manera que se elimine la desviación sin permitir que la respuesta se vuelva inestable.

En resumen, cuando existan retardos por transmisión o tiempos muertos en el sistema, se debe disminuir la velocidad de reajuste integral para evitar excesivas oscilaciones.

Finalmente, se utiliza el modo de control PI cuando la respuesta del proceso es rápida, como es el caso de flujo y presión. No obstante, no deben haber cambios grandes y frecuentes de carga.

1.4.6 Modo proporcional más derivativo

Algunos procesos presentan retardos considerables de transmisión. Para compensar aquello, es necesario que el controlador actúe inmediatamente que sienta un cambio o error, y que se anticipe al efecto que pudiera producir un cambio de carga en un proceso con tiempo de respuesta lenta. El modo de control que produce este efecto anticipatorio es el derivado.

Existe una relación lineal y continua entre la razón de cambio de la variable controlada y la posición del elemento final de control, lo que quiere decir que el movimiento de la válvula es

proporcional a la velocidad a la cual cambia la temperatura; mientras más rápido cambie la temperatura, más se mueve la válvula.

Podemos explicar mejor esta situación en la fig. 1.21, donde se dibujan por separado cada componente del movimiento de la válvula debido a cada modo.

Obsérvese, que el tamaño de la corrección del modo derivativo llamado "rate" es proporcional a la razón de cambio o pendiente de la curva de la variable controlada. Cuando la variable está cambiando más rápidamente ($t = 0$), la corrección por modo derivativo es la mayor. Cuando la pendiente de la variable es invertida ($t = 0.5$), su razón de cambio es cero, y la componente por el modo derivativo también es cero.

Cuando la variable está cambiando, alejándose, del punto de control, el modo derivativo suma la energía necesaria representada por el área D+, para oponerse a este cambio. Cuando la variable está cambiando hacia el punto de control, el modo derivativo resta la energía representada por el área D- para oponerse a este cambio.

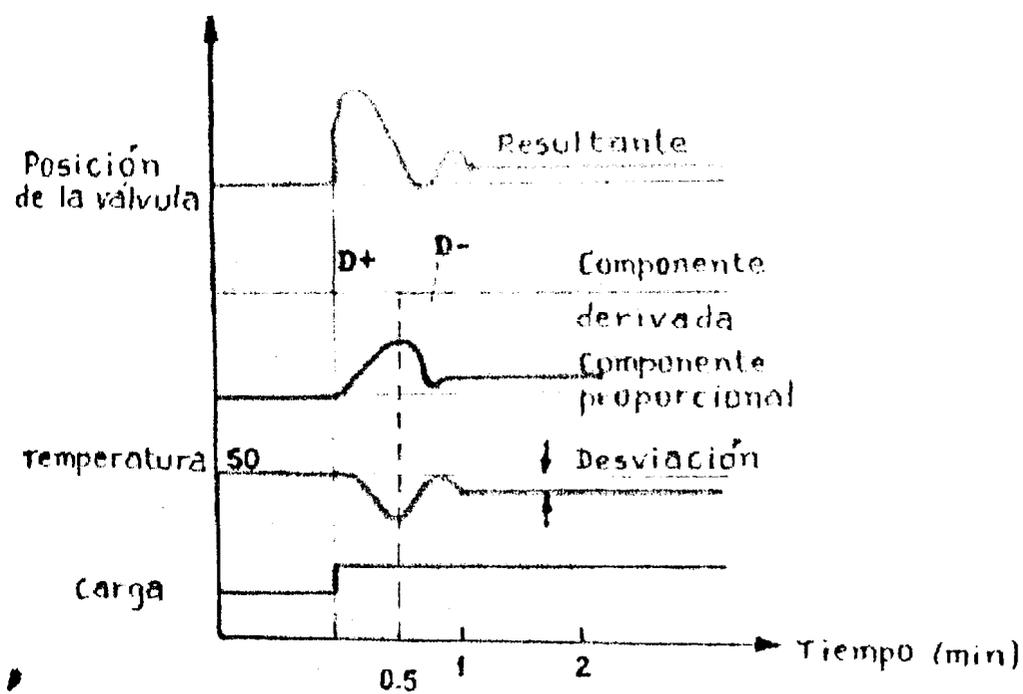


Fig. 1.21 COMPORTAMIENTO DEL MODO P+D

Consecuentemente, el modo derivativo tiene un efecto estabilizador grande en control. Sin embargo, después que la variable dejó de cambiar ($t = 1$), únicamente queda la corrección a la válvula debido al modo proporcional y el modo derivativo no tiene efecto sobre el corrimiento permanente (Offset).

En conclusión, el modo derivativo a pesar de oponerse a todos los cambios, tiene un gran efecto estabilizador instantáneo, pero no elimina las características indeseables de la desviación permanente o error constante del modo proporcional.

Tiempo derivativo

El tiempo derivativo también llamado "Rate Time", T_d , expresa en minutos el ajuste derivativo, por medio del cual la acción derivada se anticipa a la acción del modo proporcional sobre la válvula de control para controlar el proceso.

En la fig. 1.22, a continuación, se muestra gráficamente la acción derivativa de un proceso que no está en automático.

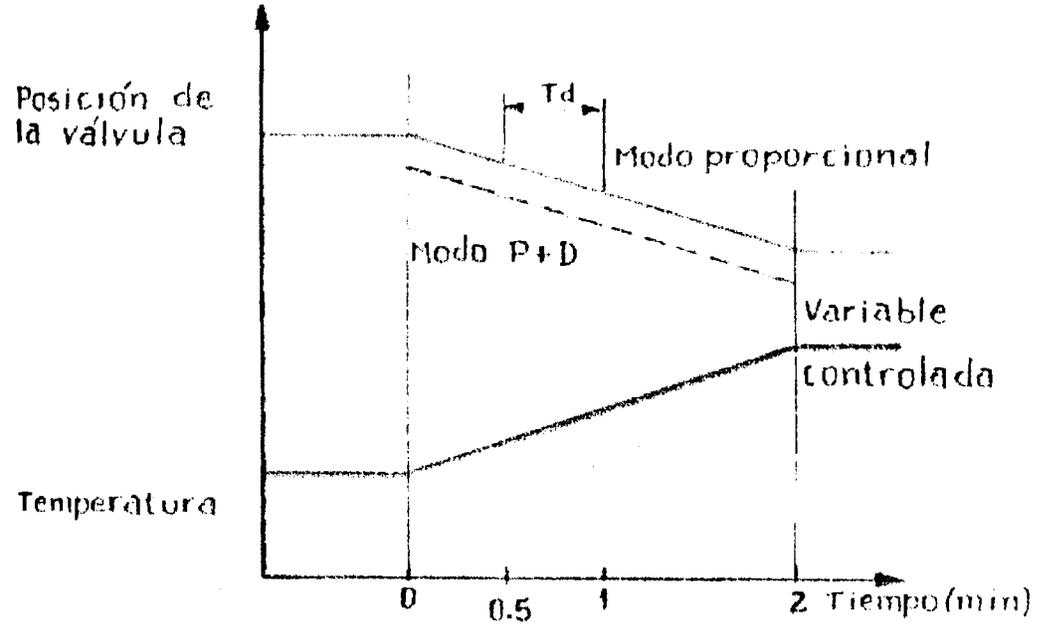


Fig. 1.22 ACCION DERIVATIVA (T_d)

La variable presenta una razón de cambio de 0 a 2 minutos. El modo proporcional produciría la posición de la válvula mostrada en la curva continua. En contraste, el modo proporcional más derivativo produciría esta misma posición de la válvula adelantada por un tiempo T_d , que el modo proporcional solo, como lo muestra la curva punteada.

Al tiempo T_d en cuestión, en minutos, es el tiempo derivativo y como puede observarse es de 0.5 min.

En general, el modo derivativo se usa en procesos donde existen retardos o tiempos muertos apreciables. Una aplicación muy común es en lazos de control de temperatura por los retardos causados en el aislamiento de las termocuplas, que son parcialmente compensados por la acción derivada.

Una desventaja, muy importante de la acción derivada es que amplifica cualquier ruido en la señal del proceso, produciendo fluctuaciones indeseables en la válvula de control. Es por esta razón que la acción derivada se usa en procesos no ruidosos como temperatura y presión de gases, pero no se usa en flujo, nivel o presión de líquidos.

1.4.7 Modo proporcional más integral más derivativo

Los controladores industriales generalmente tienen las tres acciones o modos de control descritos previamente, sus acciones pueden ser combinadas en cualquier momento para convertirse en controladores como: P, PI, PD ó PID, de acuerdo al proceso a controlar, obteniendo así todas sus ventajas (Recordar que r_i y T_d se pueden mover a voluntad, $r_i=0$ elimina el modo integral, $T_d=0$ elimina el modo derivativo).

Obsérvese la fig. 1.23, como muestra separadamente el movimiento de la válvula debido a cada modo de control después de un cambio de carga de escalón:

- La parte correspondiente al modo proporcional, corrige la posición de la válvula con una cantidad proporcional a la desviación y produce un incremento de energía representado por el área P.
- La parte correspondiente al modo integral (Reset), corrige la posición de la válvula con una razón proporcional a la desviación y entonces produce un incremento de energía permanente representada por el área I.

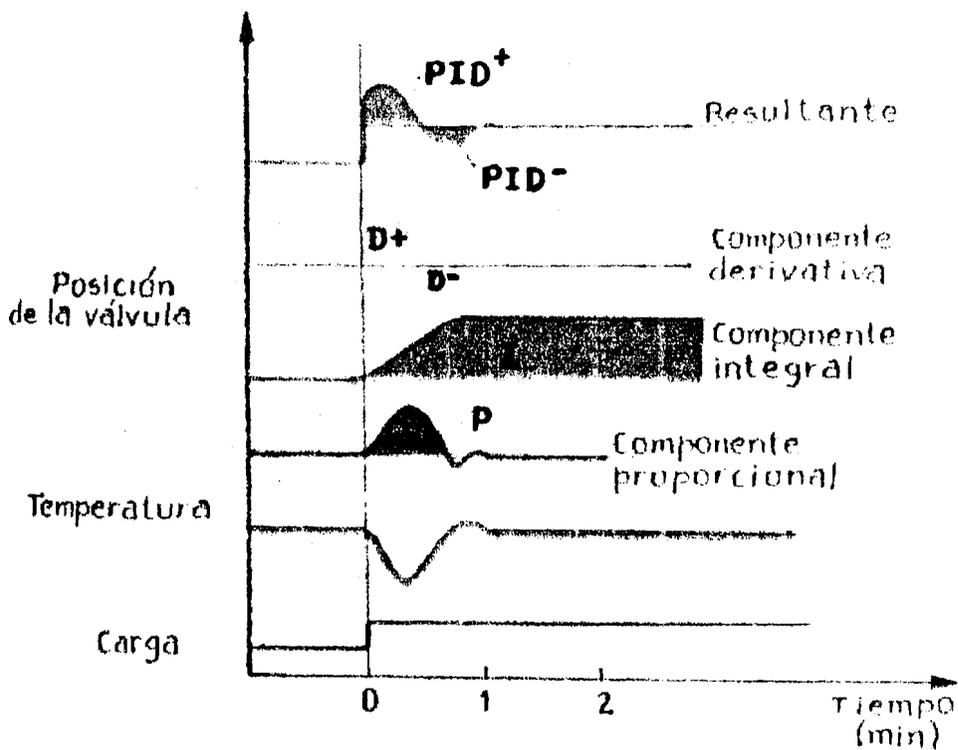


Fig. 1.23 COMPORTAMIENTO DEL MODO P + I + D

- La parte o componente correspondiente al modo derivativo (Rate), corrige la posición de la válvula con una cantidad proporcional a la razón de cambio de la variable a controlar.

La corrección derivativa primero suma la energía representada por el área D+ y después resta la energía representada por D-.

El resultado, es una curva de la posición de la válvula, que muestra inicialmente una corrección excesiva para oponerse al cambio de la variable al alejarse del valor deseado. Este exceso de energía es representado por el área PID+. Entonces menos de la corrección exacta es aplicada al regresar la variable al valor deseado. Esta energía menor que la exacta es representada en el área PID-.

Se observa que una vez que la variable se encuentra en el valor deseado los modos proporcional y derivativo no producen ninguna corrección; sólo el modo Integral produce una nueva corrección a la válvula que aprueba la nueva condición de carga.

A un proceso en particular, se le pueden hacer ajustes para lograr una respuesta estable y rápida, en presencia de retardos

por tiempo de reacción del proceso o por tiempos muertos. Inicialmente, puede ser necesario aumentar la ganancia o sensibilidad (G) y aumentar la velocidad de reajuste integral (r_i), siendo ambos efectos desestabilizantes, pero la presencia de acción derivada produce una acción rápida y estable.

Modos de control de acuerdo con las características de los procesos

Los lazos de control más comunes en las aplicaciones industriales son nivel, flujo, temperatura y presión. El tipo de controlador y los ajustes empleados para un cierto tipo de sistema son generalmente los mismos en otras aplicaciones similares. Por ejemplo, la mayoría de los lazos de control de flujo emplean controladores PI con baja ganancia y alta velocidad de reajuste, razón por la cual en un gran porcentaje de casos se pueden realizar los ajustes del controlador por tanteo, sin mucha dificultad.

Si el ajuste requiere de más precisión, será necesario recurrir a métodos experimentales probados como las reglas de Ziegler-Nichols, o a un modelaje matemático del proceso.

Los lazos de temperatura son por lo regular, lentos debido a los retardos causados por los sensores y por los retardos por transferencia de calor. Ellos usan generalmente controladores PID, los ajustes de la Banda Proporcional son moderados (50 a 100), dependiendo del Alcance o "Span" del transmisor, tamaños de válvula de control, etc. El tiempo integral T_i , en minutos por repetición, es del mismo orden de magnitud de la constante de tiempo del sistema ($\tau = RC$). El tiempo derivado T_d , se lo ajusta a un valor alrededor de un cuarto de la constante de tiempo, dependiendo de la cantidad de ruido existente.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS DE INSTRUMENTACION

2.1 Definiciones

Campo de medida o rango (range)

El conjunto o espectro de los valores de la variable medida que se encuentran dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida del instrumento; se define expresando los dos valores extremos.

Alcance (span)

La diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

Por las limitaciones materiales del dispositivo de medida y del sistema que se estudia, las mediciones en la práctica, siempre son objeto de algún error.

Exactitud (accuracy)

Es la fidelidad con que las lecturas o indicaciones de un instrumento se aproximan al valor real de la variable que se mide, y tiene que ver con la calibración del instrumento.

Precisión (precisión)

Es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento, y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio, y es una propiedad inherente del instrumento. Similarmente a la exactitud y la precisión se las puede expresar en:

- a) En tanto por ciento del alcance (% span), que es la forma más usual.
- b) Directamente en unidades de la variable medida.
- c) Tanto por ciento de la lectura efectuada.
- d) Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida.

El fabricante puede especificar la precisión en todo el campo de medida del instrumento, aunque en otras zonas de la escala exista otra, la misma que puede ser puesta a conocimiento del usuario.

Sensibilidad (sensitivity)

La relación de la señal de salida (respuesta, o reacción) del instrumento a la variable de entrada que se mide. O también, la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Es comúnmente conocida como la **ganancia** de un instrumento.

Resolución

Esta relacionada con la variación del valor medio a la cuál responderá el instrumento y es el valor mínimo a la cual se ha dividido la escala.

Otras definiciones adicionales son importantes en instrumentación y están puestas a consideración:

Zona muerta (dead zone o dead band)

El campo de los valores de la variable que no hace variar la indicación, o la señal de salida del instrumento, es decir, que no se produce su respuesta. Viene dado en tanto por ciento del alcance de la medida.

Repetibilidad (repeatability)

Se refiere a la reproducibilidad de las mediciones, es decir, cuando difieren entre sí, las lecturas o indicaciones sucesivas del instrumento. Otra definición dice, que es la capacidad de reproducción de las posiciones del índice del instrumento al hacer mediciones repetidas de valores idénticos de la variable en iguales condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Es considerado, en general, su valor máximo (repetibilidad máxima), y se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

Histéresis (hysteresis)

Se la conoce a la diferencia máxima que observamos en los valores indicados por el pointer o pluma del instrumento para un mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la

escala en los dos sentidos, ascendente y descendente. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

Las figs. 2.1 y 2.2, explican mejor los conceptos anteriormente expuestos.

2.2 Clases de instrumentos

a) De acuerdo a la función del instrumento tenemos

INSTRUMENTOS CIEGOS: Los que no presentan indicación visible de la variable.

INSTRUMENTOS INDICADORES: Con una pluma indicadora que señala en una escala graduada el valor de la variable, o si es digital muestra la variable en forma numérica con dígitos a través de una pantalla.

INSTRUMENTOS REGISTRADORES: de gráfico circular y de gráfico rectangular o alargado. Para nuestra aplicación, un gráfico circular de 30 minutos por revolución.

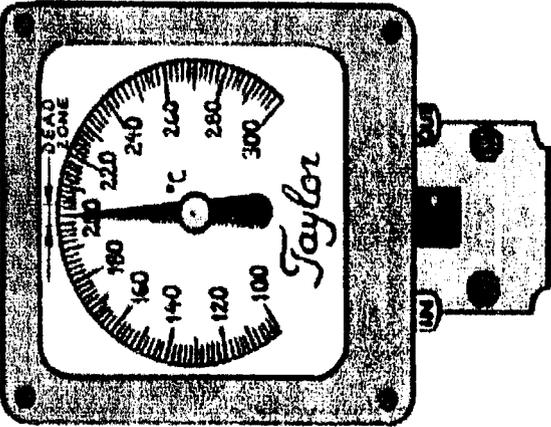
INSTRUMENTO	DEFINICIONES DE CONTROL
 <p data-bbox="666 1491 753 1739">TRANSMISOR INDICADOR DE TEMPERATURA</p> <p data-bbox="786 1411 873 1888">NOTA: COINCIDENTEMENTE EL ALCANCE ES IGUAL AL VALOR MEDIO DE LA ES- CALA.</p>	<p data-bbox="109 487 141 1232">- CAMPO DE MEDIDA (RANGE): (100-300) °C</p> <p data-bbox="218 526 251 1232">- ALCANCE (SPAN): 100-100 = 200 ; 200 °C</p> <p data-bbox="305 377 360 1232">- EXACTITUD (ACCURACY) a) $\pm 1\%$ SPAN $\rightarrow \pm 1\%$ (200 °C) $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; LECTURA: (200 ± 2) °C</p> <p data-bbox="404 417 458 1232">- PRECISION (PRECISION) b) $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; c) $\pm 1\%$ (200 °C) $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; d) $\pm 2/3\%$ (300 °C) $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p data-bbox="502 298 556 1232">- SENSIBILIDAD (SENSITIVITY) ENT: 100-300 °C, SAUDA: 3-15 PSI $\pm 51\%$ $\pm 1(15-3)$ PSI / (300-100) °C * 100 $\pm 1/2/200$ * 100 $\pm 0.6\%$ PSI / °C</p> <p data-bbox="611 874 644 1232">- RESOLUCION : 2 °C</p> <p data-bbox="698 675 753 1232">- ZONA MUERTA (DEAD-ZONE) $\pm 10\%$ DE 200 ± 10 * 200 / 100 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p data-bbox="797 596 851 1232">- REPETIBILIDAD (REPEATABILITY) $\pm 0.1\%$ DE 200 ± 0.1 * 200 / 100 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>

Fig. 2.1 DEFINICIONES EN CONTROL

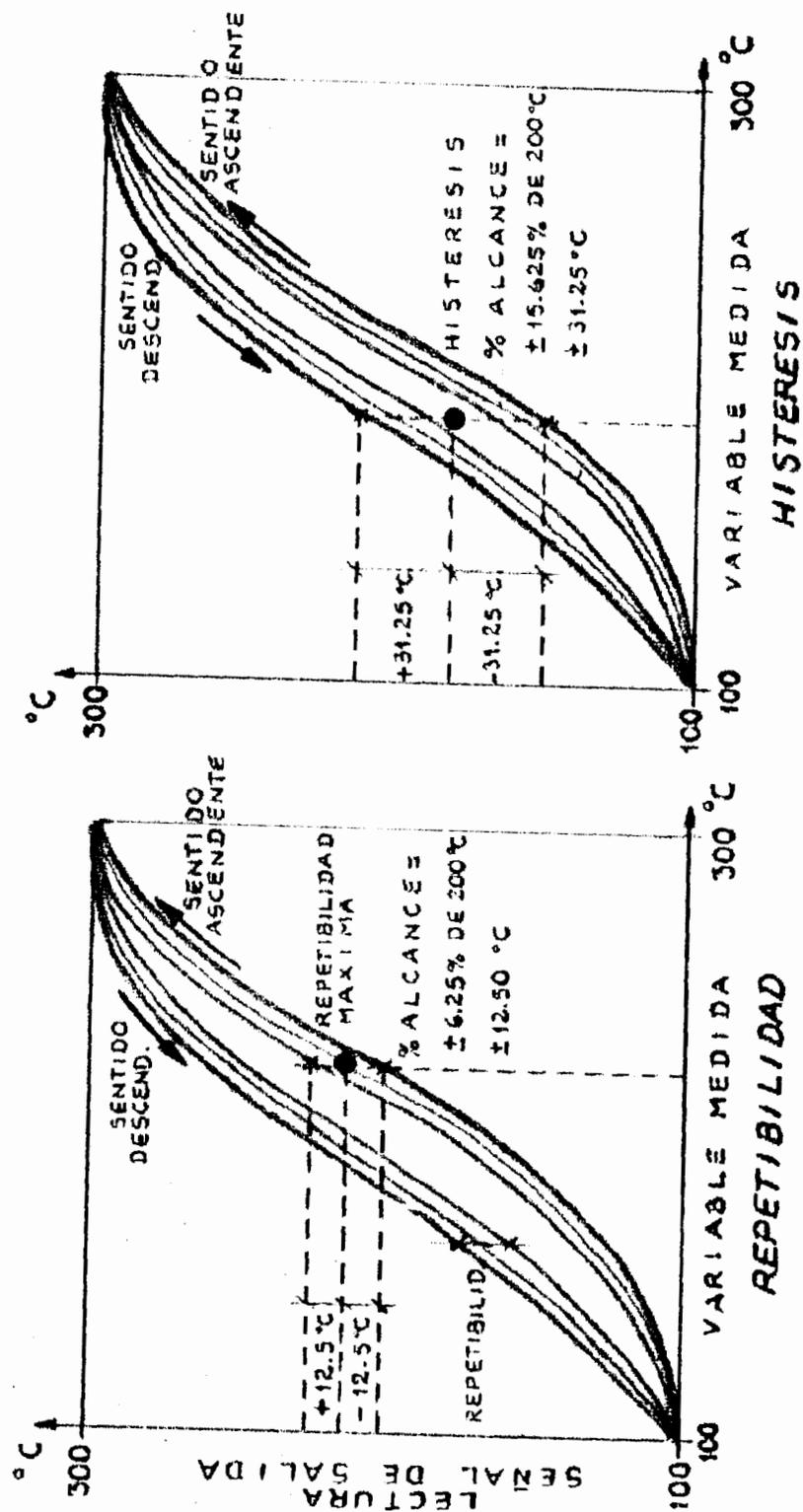


Fig. 2.2 DEFINICIONES EN CONTROL DE LOS INSTRUMENTOS

ELEMENTOS PRIMARIOS: Dispositivos en contacto directo con la variable.

TRANSMISORES: Transmiten la variable a distancia en forma de señal neumática o electrónica. En general a estos se conectan los elementos primarios.

TRANSDUCTORES: Modifican el tipo de señal de entrada. Son transductores un relé, un transmisor, convertidores tales como I/P o P/I (señal electrónica de entrada convertida en una señal neumática de salida y viceversa).

RECEPTORES: Reciben la señal de salida de los transmisores y la indican, registran o controlan. Entonces, un controlador es un receptor.

CONTROLADORES: Comparan la variable controlada con un valor deseado (en forma de señal equivalente) y ejercen o ejecutan una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

ELEMENTO FINAL DE CONTROL: Reciben la señal del instrumento controlador y reacciona modificando las condiciones

del fluido o agente de control. En el control neumático el elemento es un *servomotor neumático* o una válvula de accionamiento neumático; en un control electrónico, es un convertidor I/P (de intensidad de corriente a presión) que convierte la señal electrónica a neumática para alimentar un servomotor neumático y el control eléctrico utiliza un *servomotor eléctrico*.

2.2.1 Clases de instrumentos según la variable de proceso

Se clasifican en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, etc.

Utilizando las dos clasificaciones anteriores se pueden considerar la existencia de:

- Transmisores indicadores de temperatura.
- Controlador registrador de temperatura.
- Convertidores de corriente a presión y viceversa (I/P y P/I).
- Controlador electrónico para controlar la variable de temperatura.

- Elemento final de control compuesto por el convertidor I/P y la válvula de accionamiento neumático regula flujo, cuando el control es electrónico o simplemente esta última cuando el lazo es puramente neumático, los mismos que pueden ser parte de una instalación como el lazo de control de procesos de temperatura.

2.3 Errores

2.3.1 Generalidades

El error

El verdadero valor de una magnitud a medir jamás se puede determinar exactamente. Por ejemplo, en un manómetro con un rango, una resolución y una precisión de: 0 - 30, 0.1 y $\pm 0.25\%$ psi respectivamente, se lee un valor de 15.1 psi, no existe una seguridad absoluta de que ese valor medido corresponda a la magnitud en cuestión.

Tanto el instrumento de medida como el método de medición están sujetos a error. La diferencia existente entre los valores medidos leídos y el valor real se denomina error de medida.

2.3.2 Errores de medida en los instrumentos

Errores de medida en los valores leídos e instrumentos

Si de dos valores, consideramos uno como correcto y el otro como falso, el error es igual a la diferencia entre el valor falso y el valor correcto.

$$\mathbf{ERROR = V. FALSO - V. CORRECTO}$$

Para los valores medidos o resultado de la medición se tiene:

$$\mathbf{ERROR= V. MEDIDO EFECTIVO - V. MEDIDO TEORICO}$$

(Valor medido efectivo es el valor medido; y valor teórico es el que se considera como correcto).

Para el error de un instrumento con indicación de medida se tiene:

$$\mathbf{ERROR DE LA INDICACION = INDICACION EFECTIVA - INDICACION TEORICA}$$

(Indicación efectiva es la indicación observada en el instrumento; indicación teórica es la indicación que debería proporcionar un instrumento que estuviera exento de error).

A la relación de un error con respecto al valor correcto se le denomina error relativo:

$$\text{ERROR RELATIVO} = (\text{ERRONEO} - \text{CORRECTO}) / \text{CORRECTO}$$

En los instrumentos de medida, el error suele venir referido al valor teórico correcto.

El valor porcentual del error es cien veces el error relativo.

$$\text{VALOR PORCENTUAL DEL ERROR [\%]} = 100 (\text{ERROR RELATIVO})$$

2.3.3 Causas de los errores de medida

El valor medido puede resultar erróneo por diversas causas que intervienen al efectuar la medición. Las principales causas de error son:

- 1°- Error del instrumento. Ejemplos: división de la escala, desgaste, reacciones elásticas.
- 2°- Error durante la medición. Ejemplo: por la fuerza que se aplica en la medición (no neumática).
- 3°- Error por condiciones ambientales. Ejemplos: temperatura ambiental, vibración, polvo, etc.
- 4°- Error personal. Ejemplos: incorrecta posición de la observación; en lo posible perpendicular a la indicación.
- 5°- Error por imperfecciones del objeto o variable de proceso a medir.

El error y su división

El error se clasifica en **sistemático** o **casual**. Errores sistemáticos se presentan por causas asignables o detectables; pueden ser **estáticos** o **dinámicos**. Los estáticos se originan por limitaciones de los dispositivos medidores o por las leyes físicas que rigen su comportamiento. Por ejemplo, se introduce un error estático en la lectura de cualquier instrumento indicador cuando justo en la zona donde se desea conocer el valor de la variable a medir, notamos que no se produce respuesta alguna,

es lo que conocemos como **zona muerta**; el error de división de la escala del mismo instrumento. En resumen, cuando el proceso en que actúa el instrumento que efectúa las medidas está en condiciones de régimen permanente, y este puede ser, cuando se calibra los instrumentos con **aparatos patrón**.

Los errores dinámicos son causados por el instrumento, que no responde lo bastante rápido para seguir las variaciones de la variable que se mide, esto tiene que ver con lo que denominamos el **retardo**, el cual se debe a muchos factores, siendo unos de ellos la ubicación del instrumento respecto al sitio donde sensamos el valor de la variable; por ejemplo, el termómetro de una habitación no indicará la temperatura correcta de la misma hasta varios minutos después que se haya estabilizado en un valor constante (teniendo que ver con los conceptos de temperatura de estado transitorio y temperatura de estado estable). Se lo define como la diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento.

Los **errores casuales** son los originados por causas que no pueden establecerse debido a variaciones fortuitas del sistema, como fluctuaciones del rozamiento en el instrumento de medida,

pequeñas variaciones de temperatura ambiental, condiciones personales del observador, etc.

De entre los errores que provienen de la lectura del instrumento por el observador, tenemos:

Error de paralelaje, se produce cuando se efectúa la lectura (observador - instrumento) de modo que la línea visual de observación del índice no es perpendicular a la escala del instrumento. La importancia de este error radica en la separación entre el índice, la escala y del ángulo de inclinación de la línea de observación.

Para disminuirlo, algunos instrumentos tienen el **sector** graduado separado de la escala y a muy poca distancia del índice, y otros poseen un sector especular, con lo que la línea de observación debe ser perpendicular a la escala para que coincidan el índice y su imagen.

Error de Interpolación, se presenta cuando el índice no coincide exactamente con la graduación de la escala, y el observador redondea sus lecturas por exceso o por defecto.

Los errores últimamente citados (paralelaje e interpolación) no existen en los instrumentos de salida digital.

Consideraciones sobre los errores

El **error absoluto** se lo define como la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. La diferencia anterior será positiva cuando el valor real (valor correcto o exacto) de la variable sea mayor que el transmitido o leído (valor aproximado o erróneo), y será negativa cuando el real sea menor que el aproximado. **El error relativo** de la medida es el cociente que resulta de dividir el error absoluto por el valor real de la medida, es decir:

$$\xi = \text{ERROR ABSOLUTO} / \text{VALOR REAL}$$

Se observa que se establece una comparación entre el error real que se comete y el valor real de la variable con relación a la cual se comete; es la diferencia con el error absoluto que da solamente la idea del error cometido. Al igual que nos formamos un concepto muy exacto sobre la precisión con la que efectuamos la medida, o lo que es lo mismo, sobre la mayor o

menor aproximación con lo que el valor leído o transmitido se acerca al valor real.

Como el verdadero valor del error relativo es desconocido, se le sustituye por un límite superior aunque este límite sea mayor que el verdadero error relativo.

En general, las medidas efectuadas en instrumentación se consideran en errores relativos y están referidas al alcance de la medida. Un ejemplo lo constituye la forma como definimos la precisión en tanto por ciento del alcance, tal como se ve en el ejemplo de la fig. 2.1, en que el error relativo es del $\pm 1\%$, estando el valor real comprendido entre:

$$[200 + 1 (200)/100] \text{ } ^\circ\text{C} = 202 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$[200 - 1 (200)/100] \text{ } ^\circ\text{C} = 198 \text{ } ^\circ\text{C},$$

para una lectura de 200 $^\circ\text{C}$.

2.4 Medición de la temperatura

2.4.1 Generalidades

Las escalas más comunes de temperatura son:

- **Fahrenheit** o grados Fahrenheit [$^\circ\text{F}$],

- **Celsius** o grados Centígrados [$^{\circ}\text{C}$],

basados en los puntos de congelación y ebullición del agua (a la presión atmosférica standar).

Con ayuda de la fig. 2.3 encontraremos la ecuación de conversión de una escala a la otra, las relaciones son las siguientes:

$$(T^{\circ}\text{C} - 0)/100 = (T^{\circ}\text{F} - 32)/180$$

La relación anterior explica que las temperaturas leídas sobre las escalas Celsius y Farenheit corresponden al mismo porcentaje sobre ellas, de aquí que:

$$T^{\circ}\text{C} = 100/180 (T^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$T^{\circ}\text{C} = 5/9 (T^{\circ}\text{F} - 32)$$

La ecuación relaciona el valor equivalente de las temperaturas.

La temperatura tiene varias maneras de medirse, las más útiles son las siguientes:

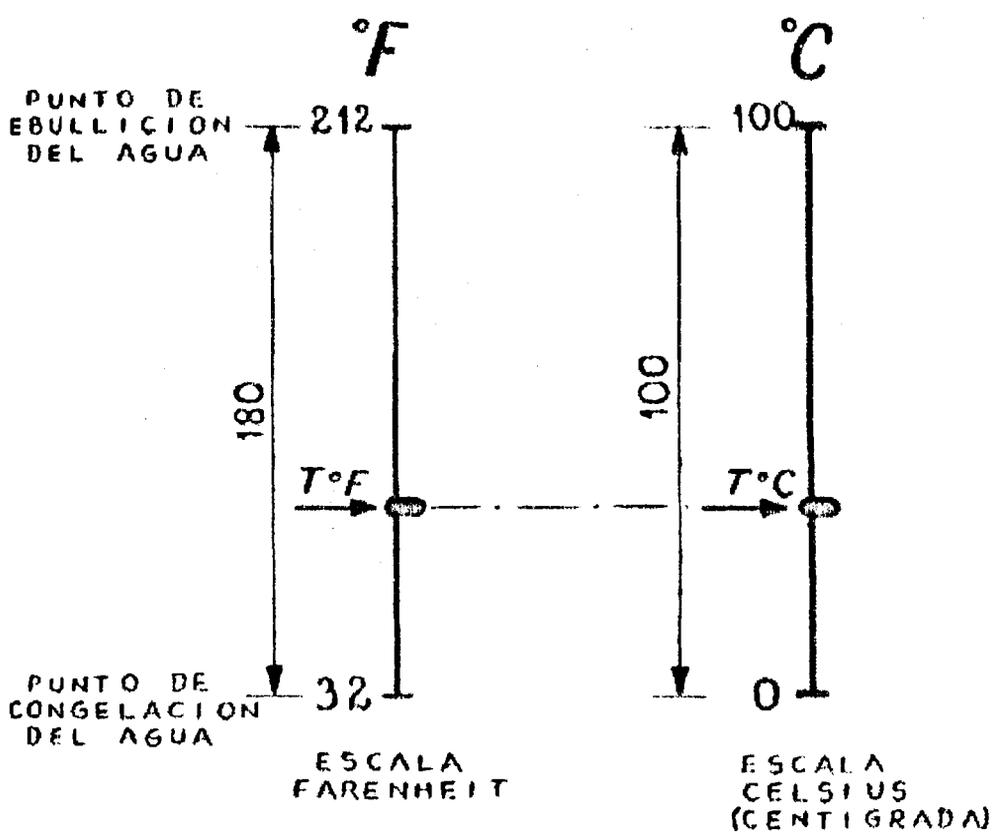


Fig. 2. 3 EQUIVALENCIAS ENTRE LA ESCALA FARENHEIT Y CELSIUS A LA PRESION ATMOSFERICA NORMAL

- Por expansión térmica de un gas (termómetro de gas). A volumen constante, la presión, p , de un gas ideal es directamente proporcional a la temperatura absoluta, T .

De manera que, $p = (p_0/T_0)T$. En la que p_0 , es la presión a cierta temperatura conocida T_0 .

- Por dilatación térmica de un líquido o un sólido (termómetro de mercurio, elemento bimetálico). La sustancia tiende a dilatarse con la temperatura. Por esta razón, una variación de la temperatura, $t_2 - t_1$, produce un cambio de longitud, $l_2 - l_1$, o un cambio de volumen $V_2 - V_1$. Así pues:

$$l_2 - l_1 = \delta_l (t_2 - t_1)l_1 \quad \text{o} \quad V_2 - V_1 = \delta_v (t_2 - t_1)l_1,$$

en que, δ_l y δ_v son los coeficientes de dilatación térmica.

- Por la presión, o tensión de vapor de un líquido (termómetro de bulbo de vapor). La tensión del vapor de todos los líquidos se aumenta con la temperatura.
- Por el potencial termoeléctrico (termopar). Al poner en contacto íntimo dos metales distintos se desarrolla un voltaje que depende de la temperatura en la unión y de los metales empleados. Al conectar en serie dos uniones con un

instrumento medidor de voltajes, el voltaje medido será muy aproximadamente proporcional a la diferencia de las temperaturas de las dos uniones.

- Por la variación de la resistencia eléctrica (termómetro de resistencia, termistor). Los conductores eléctricos experimentan una variación de su resistencia con la temperatura que se puede medir con un puente Wheatstone. La ecuación de Callendar se usa en trabajos de precisión, la que utiliza el platino como elemento de medición.

$$T = 100 (R_t - R_0)/(R_{100} - R_0) + k(t - 100)t$$

donde, t es la temperatura medida en $^{\circ}\text{C}$,

R_0 , R_{100} , R_t , son las resistencias del elemento de platino a 0, 100 y t $^{\circ}\text{C}$, respectivamente, y k , una constante cuyo valor es $1.5 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

- Por la variación de la radiación, utilizando pirómetros de radiación ópticos. Un cuerpo radia energía en proporción a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El principio se adapta particularmente a la medida de temperaturas muy altas en las que puede medirse, bien la cantidad total de

radiación o su intensidad dentro de una estrecha banda de longitudes de onda. En el primer tipo (pirómetro de radiación), se enfoca la radiación sobre un elemento sensible al calor (como un termopar) midiéndose su elevación de temperatura.

En el segundo tipo (pirómetro óptico), se compara ópticamente la intensidad de la radiación con la intensidad fija de un filamento calentado. Se hace variar la brillantez por medio de un control calibrado respecto de la temperatura, o bien, comparamos un filamento de brillantez fija con la fuente vista o a través de una cuña óptica calibrada.

Las fórmulas que se utilizan en el diseño o proyecto de estos instrumentos son las leyes de Stefan-Boltzmann y Wien:

$$\lambda_m = k_1/T \quad ; \quad q = k_2 \varepsilon A(T_2^4 - T_1^4)$$

donde :

λ_m , es la longitud de onda de la máxima densidad en μm o nm,

q , es el flujo de energía radiante en Btu/h (Wa),

A , superficie de radiación en pie^2 o m^2

ε , emisividad media de las superficies,

T_2, T_1 , temperaturas absolutas de las superficies radiadora y receptora en $^{\circ}\text{K}$ o $^{\circ}\text{R}$,

k_1 , tiene un valor de $5215 \mu\text{m. } ^{\circ}\text{R}$,

k_2 , tiene un valor de $0.173 \times 10^{-8} \text{ Btu}/(\text{h.pie. } ^{\circ}\text{R}^4)$.

Los sensores de radiación pueden producir mapas, fotografías e imágenes de televisión, que muestren imágenes de la temperatura. Pueden operar con resoluciones menores de 1°C y temperaturas inferiores a la temperatura ambiente.

Cambio en el estado físico o químico (Conos de Seger, placas de tempil). Las temperaturas a que las substancias se funden o inician una reacción química son frecuentemente conocidas y sus características son reproducibles. Existen productos comerciales que cubren una gama de dominio de temperatura (50 a 2000°C en intervalos de 2 a 40°C). El elemento sensor de la temperatura puede usarse como un sólido que se suaviza y cambia de forma a la temperatura crítica, o puede aplicarse como pintura, crayón o placa sobre una etiqueta que cambia el color o apariencia de la superficie.

En la mayoría de los casos el cambio es permanente; en algunos es reversible.

El termómetro de mercurio

Es el instrumento más empleado para medir temperaturas. A medida que aumenta la temperatura se dilata el mercurio contenido en la ampolla elevándose por el tubo capilar del vástago del termómetro. El intervalo útil se extiende de -30 a 900 °F (-35 a 500 °C). En muchas aplicaciones del termómetro de mercurio, el vástago no se expone a la temperatura que se mide y, por consiguiente, se requiere una corrección (a menos que haya sido graduado el termómetro por inmersión parcial). Existen constantes o fórmulas recomendadas para corrección que ha de añadirse a la lectura. La fórmula que se recomienda para la corrección K, es:

$$K = 0.00009t'(t_1 - t_2)$$

en la que:

t' , es el número de grados en que queda expuesto a la temperatura medida el filamento de mercurio en °F,

t_1 , es la lectura en el termómetro en °F,

t_2 , es la temperatura que existe a aproximadamente la mitad de la porción de vástago expuesta en °F.

Para los termómetros Celsius la constante 0.00009 se convierte en 0.00016.

En aplicaciones industriales, el termómetro es encasillado dentro de una cavidad o caja metálica protectora como el de la figura 2.4 o 3.4. Se le provee de una unión roscada de manera que el termómetro pueda instalarse en una vasija bajo presión. Idealmente, el sensor debe tener la misma temperatura que el fluido dentro del cual se inserta la envoltura. No obstante, la conducción del calor hacia o desde el tubo o pared de la vasija y la transmisión del calor por radiación pueden también influir en la temperatura del sensor. Por aquello, se puede hacer una aproximación para el efecto de error de la conducción mediante la siguiente ecuación:

$$T_{\text{sensor}} - T_{\text{fluido}} = (T_{\text{pared}} - T_{\text{fluido}})E$$

Esto, debido a un sensor insertado a una distancia $L - x$, del extremo de una cubierta de longitud de inserción L , $E = \cosh [m(L-x)] / \cosh mL$, donde $m = (h/kt)^{0.5}$; x y L están en pies o metros; h es la conductancia del fluido a envoltura en $\text{Btu}/(\text{h}\cdot\text{pie}^2\cdot^\circ\text{F})$ o su equivalente en unidades métricas $\text{J}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$; k es la

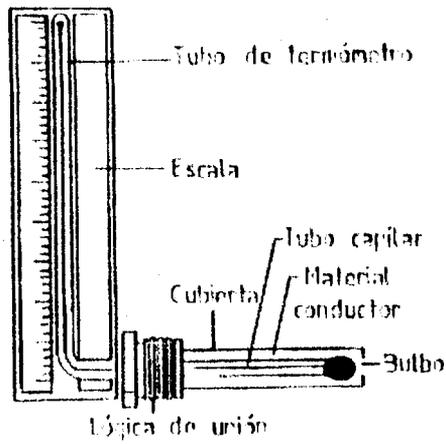
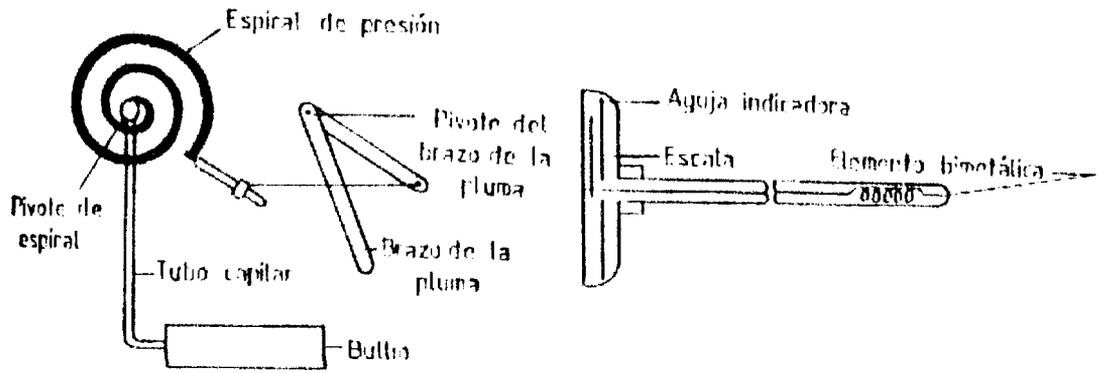


Fig. 2. 4 TERMOMETROS

conductividad térmica del material de la pared de la envoltura en $\text{Btu}/(\text{h.pie.}^\circ\text{F})$ o su equivalente en unidades métricas; y t es el grueso de la pared de la envoltura en pies o metros. Se supone que hay buen contacto entre el sensor y la pared de la envoltura. Los sistemas eléctricos basados en el termopar o en los termómetros de resistencia son aplicables cuando es necesario medir temperaturas distintas, cuando las distancias a que se transmitan sean largas o cuando se requieran respuestas sensibles y rápidas. El termopar se usa con altas temperaturas, y el termómetro de resistencia para temperaturas bajas cuando se requiere gran exactitud.

La selección del termopar (dado por tablas), depende de la gama de temperaturas, de la exactitud deseada y de la naturaleza de la atmósfera donde se lo va a utilizar. El voltaje del termopar se mide con un voltímetro (del tipo de deflexión), con un potenciómetro (del tipo balanceado en cero).

Se conecta el termopar (punta caliente) al instrumento con alambre del mismo material del termopar, asegurándonos que la punta fría esté dentro de la caja del instrumento, donde se puede aplicar efectivamente la compensación.

La figura 2.5, muestra un instrumento del tipo de deflexión. Una tira bimetalica proporciona un corrimiento nulo al resorte capilar del galvanómetro para compensar los cambios de temperatura en la punta fría, de tal manera que la escala del instrumento se calibra directamente a la temperatura del termopar. En el instrumento de potenciómetro el voltaje del termopar se compara con el voltaje de un potenciómetro calibrado con precisión (del tipo de corredera o cursor). La diferencia entre los dos es detectada por un amplificador electrónico muy sensible o por un galvanómetro. El error en la señal impulsa un servomotor que corrige la posición del contacto que corre sobre el alambre hasta que se obtiene el equilibrio.

El cursor está articulado mecánicamente al indicador o pluma registradora. La compensación en la punta fría se realiza por medio de un resistor sensible a la temperatura colocado dentro del circuito del potenciómetro. El voltaje aplicado a través del potenciómetro se comprueba periódicamente contra una celda patrón y se mantiene constante por medio de un circuito autonormalizador. El voltaje medido puede ser mostrado o registrado en forma analógica o digital. La conversión

automática de voltaje a temperatura puede construirse dentro del circuito.

El termómetro de resistencia emplea el mismo instrumento descrito anteriormente, omitiendo la compensación de la punta fría y el circuito de normalización. La ampollita resistiva forma una rama de un puente Wheatstone como el de la figura 2.6, el alambre con cursor forma la rama opuesta. Un desbalance del circuito produce un flujo de corriente a través del amplificador, que acciona el motor que a su vez impulsa el cursor a una nueva posición de equilibrio. En el equilibrio la relación entre las resistencias es $R_T = (R_1/R_2)(R_5+R_3+R_4)$, donde R_T es la resistencia del brazo designado del puente. El bulbo de la resistencia consiste en una bobina de alambre de cobre o de platino colocado dentro de un tubo metálico de protección.

El termistor tiene un coeficiente de resistencia a la temperatura muy grande y puede sustituirse en aplicaciones de poca exactitud o de bajo costo.

Empleando el selector pueden medirse cualquier número de temperaturas con el mismo instrumento. El selector conecta en

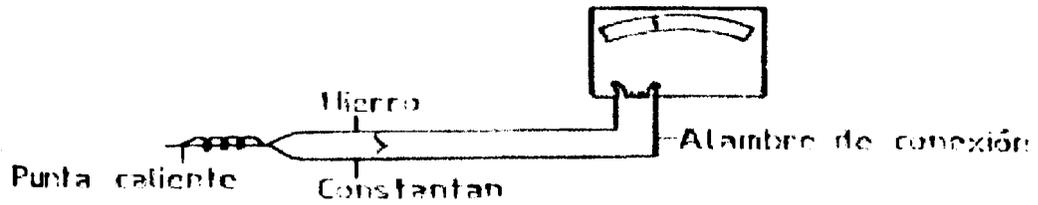


Fig. 2. 5 MEDIDOR DE TEMPERATURA CON TERMOPAR Y MILIVOLTIMETRO.

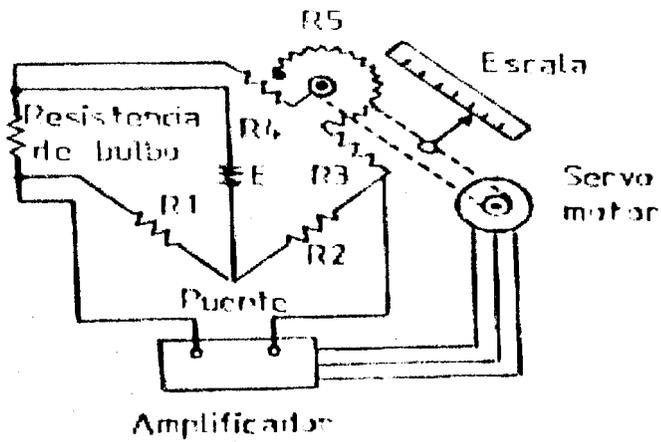


Fig.2.6 TERMOMETRO DE RESISTENCIA CON POTENCIOMETRO REGISTRADOR



orden cada termopar (o ampollita resistiva) al potenciómetro o circuito de puente. Cuando se alcanza el equilibrio, el registrador imprime el valor de la temperatura y el selector avanza a la siguiente posición.

Los pirómetros ópticos se aplican a la medición de altas temperaturas en el intervalo de 540 a 2760°C. En la figura 2.7, se observa uno de ellos. La superficie cuya temperatura se mide (blanco) es enfocada por medio de la lente sobre el filamento de una lámpara calibrada de tungsteno. La intensidad luminosa del filamento se mantiene constante conservando la circulación de una corriente constante. Se ajusta la intensidad de la imagen del blanco variando la posición del prisma óptico hasta que dicha intensidad aparezca igual a la del filamento. Una escala unida al prisma está graduada directamente con la temperatura del blanco. Se emplea un filtro rojo de modo que la comparación se hace con una específica longitud (color) de onda luminosa para que la calibración sea más reproducible.

Se utilizan otros diversos medios para atenuar la intensidad de la imagen como vidrios polarizados, prismas rotatorios, etc. En otro tipo de pirómetro óptico, se hace la comparación regulando y

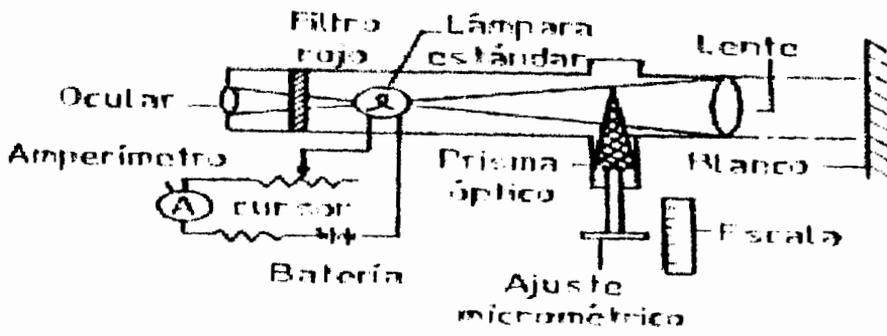


Fig. 2. 7 PIROMETRO OPTICO

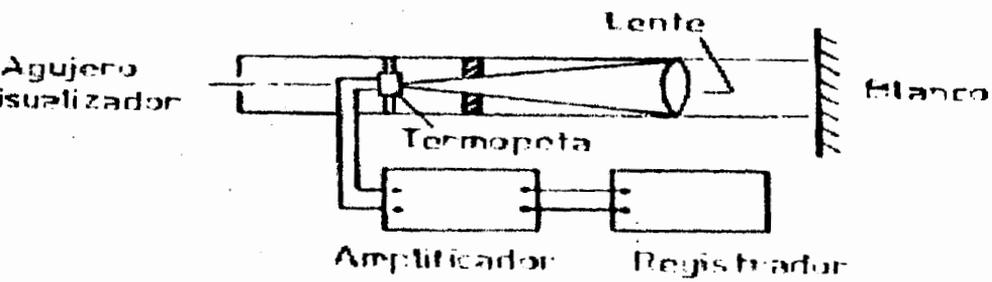


Fig. 2. 8 PIROMETRO DE RADIACION

ajustando la corriente que pasa por el filamento de la lámpara estándar. En este caso un amperímetro en serie se gradúa para leer directamente la temperatura. Puede conseguirse el funcionamiento automático comparando, con un par de celdas fotoeléctricas dispuestos en la red de un puente, las intensidades del filamento y de la imagen. Una diferencia en dichas intensidades produce un voltaje amplificado que mueve el cursor o el prisma óptico en el sentido conveniente para volver a cero la diferencia.

El pirómetro de radiación se aplica normalmente a mediciones de temperatura superiores a 540°C . Básicamente, no existe un límite superior; pero el límite inferior queda determinado por la sensibilidad y la compensación de la junta fría del instrumento. Se ha utilizado casi hasta la temperatura ambiente.

En la figura 2.8, se representa un tipo común de pirómetro de radiación, en el que una lente enfoca la radiación sobre un elemento térmico sensible. La elevación de la temperatura de dicho elemento depende de la radiación total que reciba y de la conducción de su calor lejos de él. La radiación está relacionada con la temperatura del blanco; la conducción

depende de la temperatura de la caja del pirómetro. En las aplicaciones normales, este último factor no es muy grande; sin embargo se añade al circuito una bobina compensadora para mejorar la exactitud.

La exactitud de los pirómetros ópticos y de radiación depende de:

1. La emisividad de la superficie examinada. Para aplicaciones a hornos cerrados, pueden suponerse condiciones de cuerpo negro (emisividad = 1). Para otras aplicaciones, hay que hacer correcciones por la emisividad real de la superficie (hay tablas de corrección para cada modelo de pirómetro).

Para mediciones en fluidos calientes, un tubo sumergido en ellos proporciona un blanco de emisividad conocida.

2. La absorción de la radiación entre el blanco y el instrumento. El humo, los gases y las lentes de vidrio absorben algo de la radiación y reducen la señal de entrada. Esto se corregirá utilizando un tubo encerrado (o purgado para blanco), o bien una graduación directa.
3. El enfoque del blanco sobre el elemento sensible.

CAPITULO 3

INSTRUMENTOS DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

3.1 Generalidades

En un instrumento existen tres partes esenciales: el elemento sensible, los medios transmisores y el elemento indicador. El elemento sensible responde directamente a la cantidad medida, produciendo un movimiento relativo, una presión o una señal eléctrica. Estos son transmitidos a través de mecanismos articulados, por una tubería, por líneas de la instalación eléctrica, etc., para que desvíen una aguja, o muevan una pluma, que indica el valor de la medida sobre una escala graduada, o sobre una gráfica de registro.

El instrumento puede ser accionado por medios mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos, ópticos, u otros energizantes.

3.2 Mediciones de presión y vacío

La presión está definida como la fuerza por unidad de área ejercida por un fluido. Los dispositivos normalmente miden la presión con respecto

a la presión atmosférica (un valor medio de $14.7\text{ lbf/pulg}^2=1.033\text{ kgf/cm}^2$)

$$p_a = p_m + 14.7,$$

donde p_a = presión total o absoluta y p_m = presión del calibrador, ambas en lbf/pulg^2 . Por convención, la presión a la que se encuentra el calibrador (\uparrow), y la de vacío (\downarrow), se refieren a presiones por encima y por abajo, respectivamente, de la atmosférica. Las unidades más comúnmente utilizadas son: lbf/pulg^2 , $\text{pulg de Hg (mercurio)}$, pie de agua , kgf/cm^2 , Bars y mm de Hg . En el sistema internacional (S.I.) la presión atmosférica media es **1.013 Bar**.

Los dispositivos de presión están basados en:

- medición de la altura de una columna de líquido equivalente,
- medición de la fuerza ejercida sobre un área determinada,
- medición de algún cambio en las características eléctricas o físicas del fluido.

Las mediciones de presión con los manómetros se basan en la siguiente relación:

$$p = (\omega)h = (\varphi g) h / g_c,$$

donde h es la altura del líquido de densidad φ y peso específico ω (supuestas constantes) soportadas por una presión p . De esta manera, la presión suele expresarse en términos de la altura o cabeza equivalente del líquido del manómetro, esto es, pulg. de H_2O o pulg. de Hg. Los fluidos más usuales en los manómetros son el agua o el mercurio, aunque se disponen de otros fluidos para escalas especiales.

3.2.1. Descripción de instrumentos de presión más importantes y auxiliares

Existe una gama considerable de instrumentos de presión, a continuación revisaremos los más importantes.

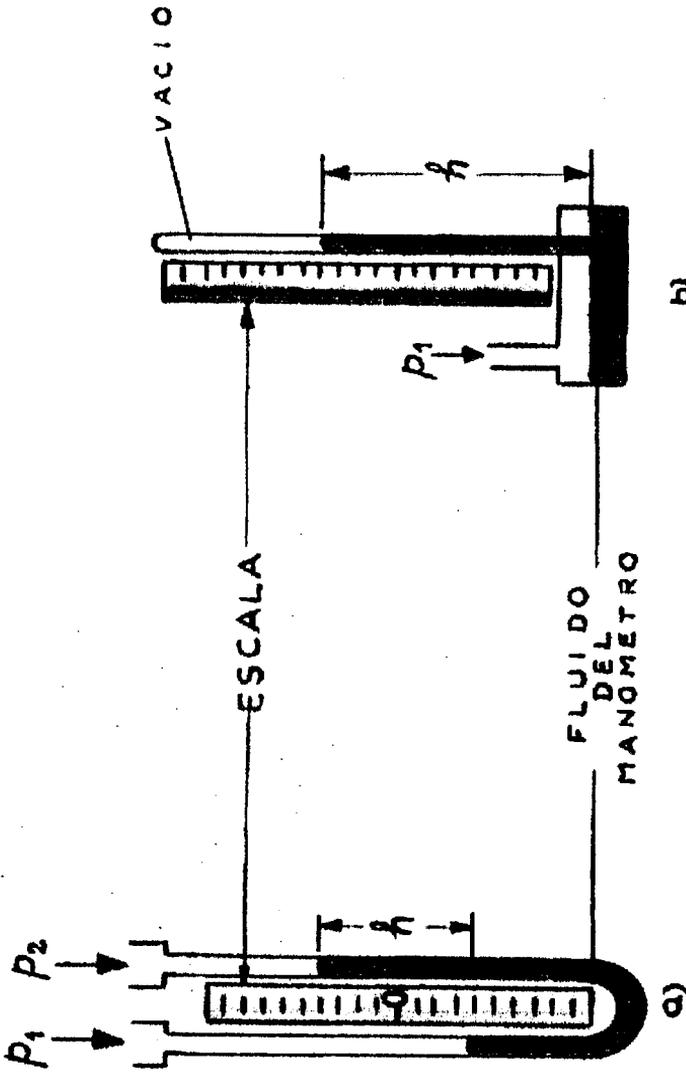
3.2.1.1 El Manómetro de tubo en "U". Con él obtenemos la diferencia de presiones $p_1 - p_2$ a través de la diferencia de niveles de un cierto fluido dentro de un tubo por el principio de vasos comunicantes.

Si p_2 es descubierto a la atmósfera, entonces la lectura sobre el manómetro indicará la presión manométrica de p_1 . Si hacemos vacío en el tubo correspondiente a la presión p_2 y se cierra ($p_2=0$), entonces la indicación

será la presión absoluta correspondiente a p_1 . Una versión común es el manómetro de tipo cubeta. La fig. 3.1, muestra los manómetros de tubo en "U" y el de tipo de cubeta. En el segundo caso, la escala es graduada especialmente para tener en cuenta las variaciones del nivel de la cubeta de forma que solamente se requiera la lectura en un solo tubo, y con él medimos la presión atmosférica que utiliza como fluido el mercurio.

La sensibilidad es aumentada inclinando los tubos del manómetro respecto de la vertical, utilizando líquidos manométricos de baja densidad o mediante la aplicación de ampliaciones ópticas o dispositivos sensibles a los niveles. En estos casos, la exactitud es influida por los efectos de la tensión superficial (lectura o indicación del menisco) y por las variaciones de la densidad del líquido (debidas a impurezas y cambios de temperaturas).

Es definición conocida, que la presión por el área sobre la cual actúa es igual a la fuerza ejercida. La presión puede actuar sobre un diafragma, un fuelle u otro



MANOMETROS: a) DE TUBO EN "U" b) DE CUBETA

Fig. 3. 1 MANOMETROS DE TUBO

elemento de área fija. Se puede medir esta fuerza por cualquier elemento para medir fuerzas; por ejemplo, la deformación de un resorte, la balanza pesadora, etc. Podremos equilibrar la presión desconocida con presión neumática o hidráulica, la misma que es medida con un manómetro. Usando diafragmas de distintas áreas, podemos atenuar o amplificar la presión, según el requerimiento; con esto podemos aislar también el fluido del proceso que puede ser corrosivo, viscoso, o de otra característica que produzca daño o avería.

3.2.1.2 El manómetro de tubo bourdon

Es el instrumento que más se utiliza para medir presiones, como el presentado en la fig. 3.2. Consiste de un tubo aplanado de bronce o acero para resortes, doblado en forma de circunferencia. La presión interior del tubo tiende a rectificarlo.

Como un extremo del tubo está fijo a la entrada de la presión, el otro se mueve proporcionalmente a la diferencia de presiones que hay entre el interior y el

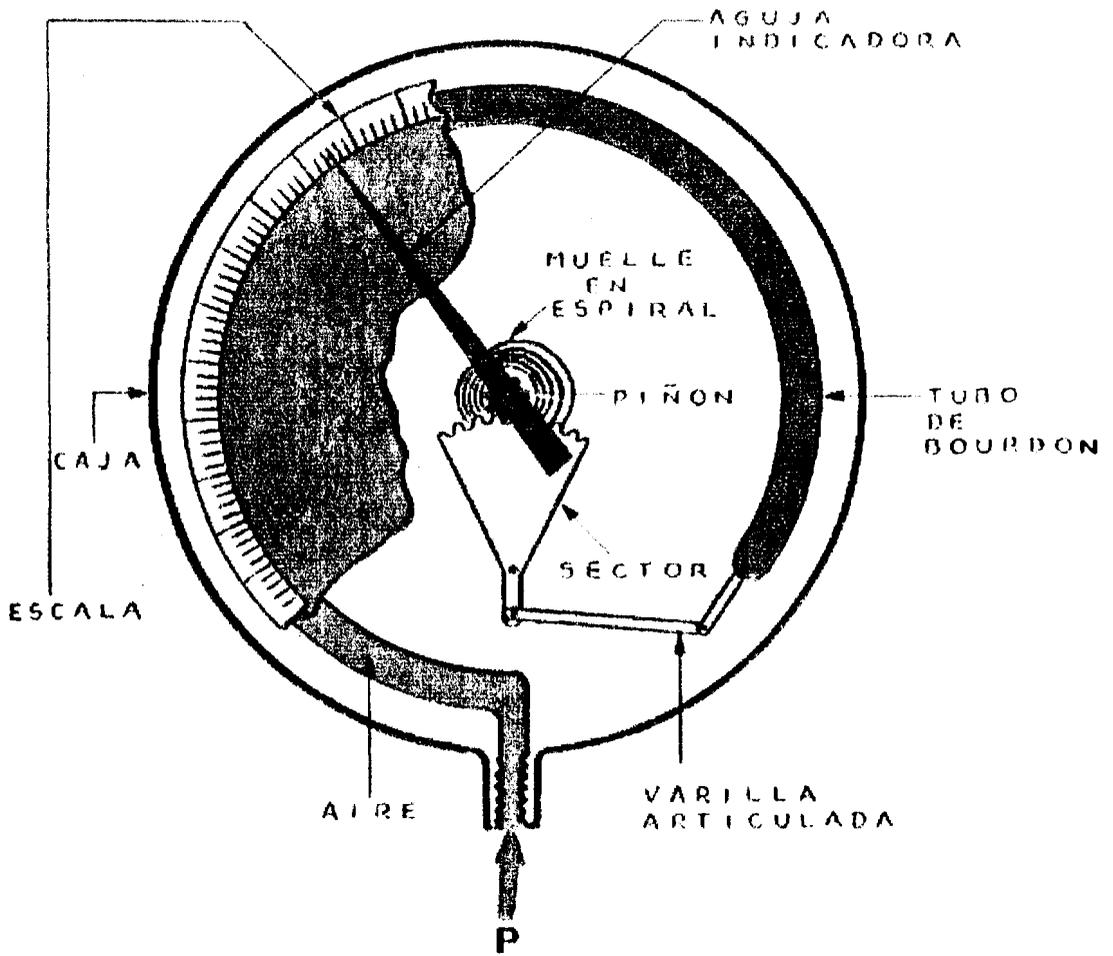


Fig. 3. 2 MANOMETRO DE TUBO BOURDON

exterior del tubo. Dicho movimiento hace girar la aguja indicadora por intermedio de un mecanismo de **sector y piñón**.

Para amplificar el movimiento, el curvado del tubo puede ser de varias vueltas formando **elementos en espiral** o hélice, como los que se usan en los instrumentos registradores de presión.

3.2.1.3 El manómetro de diafragma

La presión actúa sobre este en oposición a un resorte u otro miembro elástico. Por consiguiente, la **deformación del diafragma es proporcional a la presión**. Debido a que la fuerza aumenta con el área de los **diafragmas**, se pueden medir presiones pequeñas al **aumentar las mismas**. Los diafragmas pueden ser:

- metálicos, como latón o acero inoxidable por su alta resistencia mecánica y a la corrosión.
- no metálicos; como cuero, neopreno, caucho por su alta sensibilidad y gran deformación.

Con diafragmas rígidos o pocos flexibles, el movimiento tiene que ser muy pequeño para mantener la linealidad.

El manómetro de fuelle

Semejante al de diafragma en su funcionamiento, **cuya ventaja** es la de proporcionar mayor amplitud de movimiento. **La fuerza** actuante sobre el fondo del fuelle es **equilibrada por** la deformación del resorte (fig. 3.3).

El movimiento es transmitido al brazo de salida **que acciona una** aguja indicadora o una pluma registradora.

El movimiento (o la fuerza) del elemento de presión **puede ser** transformado en una señal eléctrica utilizando un **transformador** diferencial o un elemento medidor de deformación, **o también en** una señal de presión de aire a través de la acción de **una tobera** y un piloto. A continuación usamos la señal para **transmitirla,** registrarla o controlarla.

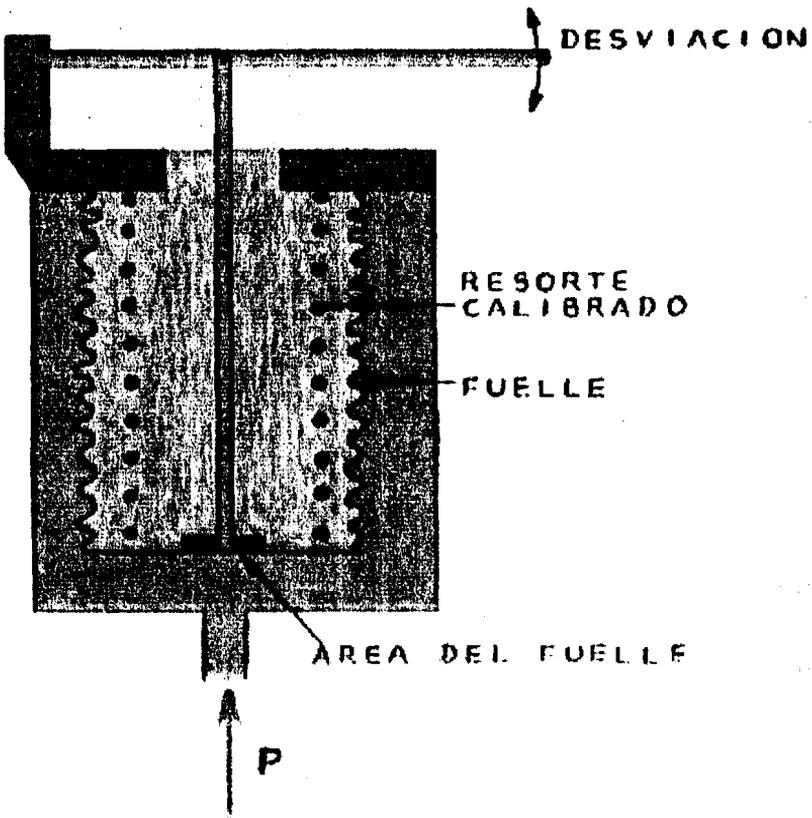


Fig. 3. 3 MANOMETRO DE FUELLE

3.2.1.4 El probador de peso muerto

Es un estándar calibrador de manómetros (ver fig. 5.10). A través de él, desarrollamos presiones hidráulicas conocidas por medio de pesas que se colocan sobre el émbolo de calibrado. Su capacidad varía entre 5 a 5000 lb/pulg² (0.3 a 350 bar). Para presiones bajas, sirven de referencia los manómetros de agua o de mercurio. Cuando tratamos con flujo de fluidos, nivel de líquidos, es importante medir la diferencia entre dos presiones. Para el caso del manómetro esto se hace directamente. Existen dispositivos para medir presiones que pueden ser utilizadas como instrumentos diferenciales, en los mismos que:

- 1) Hacemos la caja hermética a la presión de tal forma que la segunda presión se aplica exteriormente al elemento de presión;
- 2) Montamos dos elementos de presión idénticos de modo que los efectos producidos se opongan entre sí.

3.3 Descripción de operación de los instrumentos.

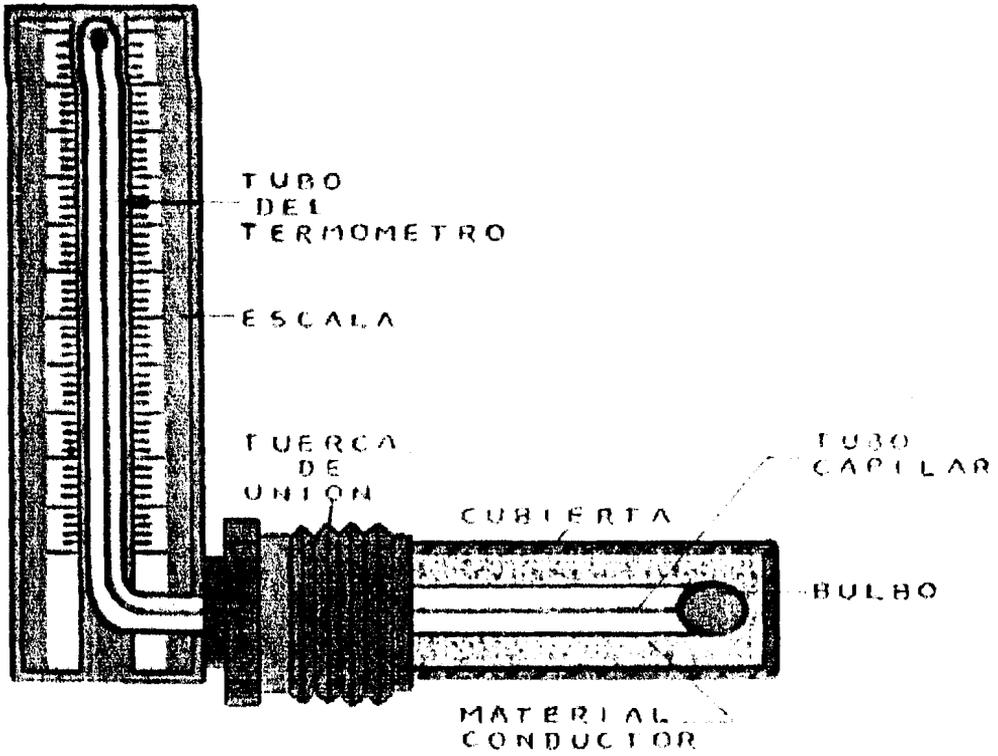
Seguidamente procedemos a describir la operación de los instrumentos más importantes que serán utilizados en el lazo de control de temperatura.

Preliminarmente identifique el instrumento que puede ser tal vez, el más importante, por ser el primero en estar directamente ligado con el proceso, por su capacidad y velocidad de información de lo que ocurre con la variable de proceso $T_{1/2}$ a los cambios que se efectúan en un instante dado. Este instrumento es conocido con el nombre de termómetro.

3.3.1 El termómetro industrial

El termómetro industrial utiliza básicamente, el principio de dilatación de un fluido dentro de un elemento sensor o bulbo como el de la fig. 3.4. Otras aplicaciones industriales tienen el elemento de resorte de presión como el de la figura 2.4.

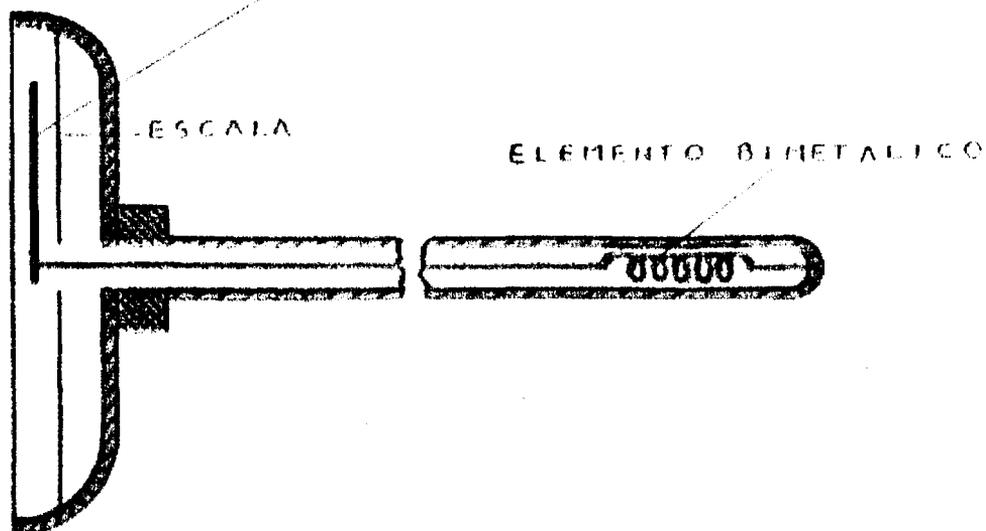
El fluido del bulbo puede ser sistema de mercurio, gas a presión como el nitrógeno, o un sistema de presión de vapor como un



0) TERMOMETRO DE CAJA METALICA

Fig. 3. 4 TERMOMETRO INDUSTRIAL

AGUJA INDICADOR A



b) MEDIDOR DE TEMPERATURA DE HELICE

Fig. 3. 4 TERMOMETRO INDUSTRIAL

liquido volátil. Los sistemas de mercurio y de gas tienen escalas lineales, pero han de compensarse para evitar errores por la temperatura ambiente. El tubo capilar puede tener hasta 61 metros de longitud, pero con considerable reducción en la velocidad de respuesta.

Existe una consecuencia del termómetro de bulbo y que particularmente debe ser llamado termómetro industrial, es el transmisor neumático de temperatura, que sirve para transmitir lecturas de temperatura de hasta 305 metros de distancia como el de la fig. 3.5. Este instrumento tiene las ventajas de ser muy rápido en las respuestas, es mas compacto, y por lo regular posee mayor exactitud. Observe el bulbo lleno de gas a presión que actúa sobre un diafragma.

Un incremento en la temperatura del bulbo aumenta la fuerza hacia arriba que actúa sobre el brazo principal que tenderá a girar en sentido de las manecillas del reloj, lo que hace que la chapaleta o deflector se acerque mas a la tobera, aumentando la contrapresión en esta. Esta última, actúa sobre el piloto, originando un incremento en la presión de salida, la cual aumenta la fuerza ejercida por el fuelle de reacción. El sistema retorna al equilibrio cuando el aumento de la presión en el fuelle

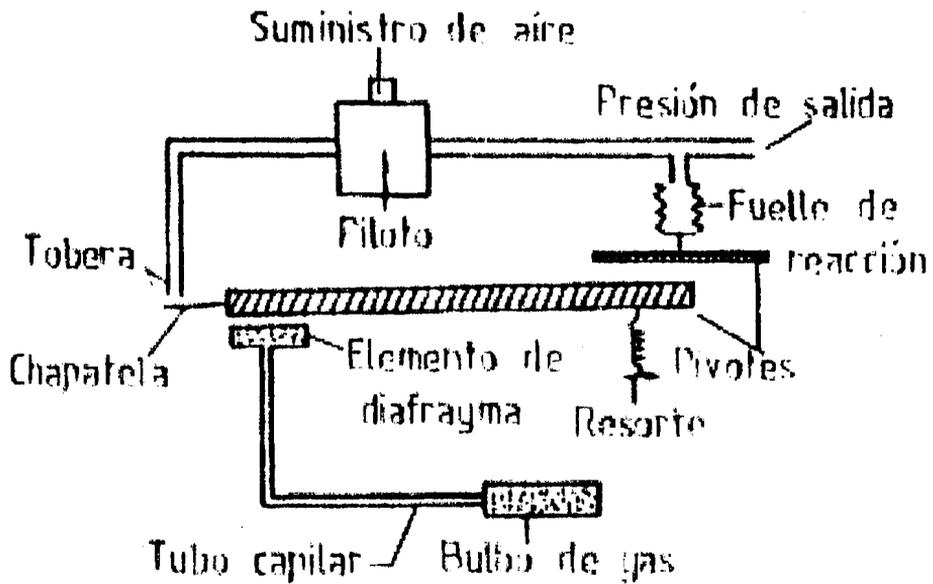


Fig. 3. 5 OPERACIÓN DEL TRANSMISOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA.

compensa exactamente la presión incrementada del diafragma. Como las relaciones de palanca son fijas, esto se traduce en una proporcionalidad directa entre la temperatura de la ampolla y la presión de salida de aire. Si se deseara precisión, se intercalan en el instrumento elementos compensadores que corrigen los efectos de las variaciones de la presión barométrica y de la temperatura ambiente.

Dentro del lazo de control de temperatura, la aplicación del termómetro industrial está en el termostato instalado a la salida del flujo de agua caliente a continuación del calentador de resistencias y del transmisor indicador neumático de temperatura.

3.3.2 Transmisores indicadores neumáticos de temperatura

Su operación es similar a la de los transmisores neumáticos conocidos, con la diferencia que la información obtenida del valor de la variable de proceso (en este caso de temperatura T_o), es indicada en una carátula graduada por intermedio de una aguja de acuerdo al rango definido por el diseñador o fabricante.

Como hemos visto, el transmisor, opera según el principio de balance o equilibrio de movimientos.

Con un sistema térmico o agente de proceso en contacto con el elemento primario o sensor (bulbo) del transmisor, se provoca un incremento o disminución de la temperatura del fluido de proceso, ocasionando que se desenrolle o envuelva el resorte del Bourdón con una rotación en contra o a favor del movimiento de las manecillas del reloj respectivamente. **Acompañe** la explicación con la fig. 3.6.

Por medio de la conexión del eslabonamiento el deflector se mueve hacia abajo hasta disminuir el espacio boquilla – deflector (en aumento de la temperatura T_o). Esto incrementa la presión atrás de la boquilla en la cámara, encima del diafragma, y ocasiona que el tubo de la boquilla y el pistón se muevan hacia abajo. El movimiento hacia abajo, restaura el espacio boquilla – deflector, mientras la fuerza opositora del resorte iguala la fuerza de la presión trasera de la boquilla. Esta creciente fuerza del resorte mueve el fuelle de balance de fuerzas y la desembocadura de la cámara de aire del tubo hacia abajo abriendo la válvula interior y aumentando la salida de presión.

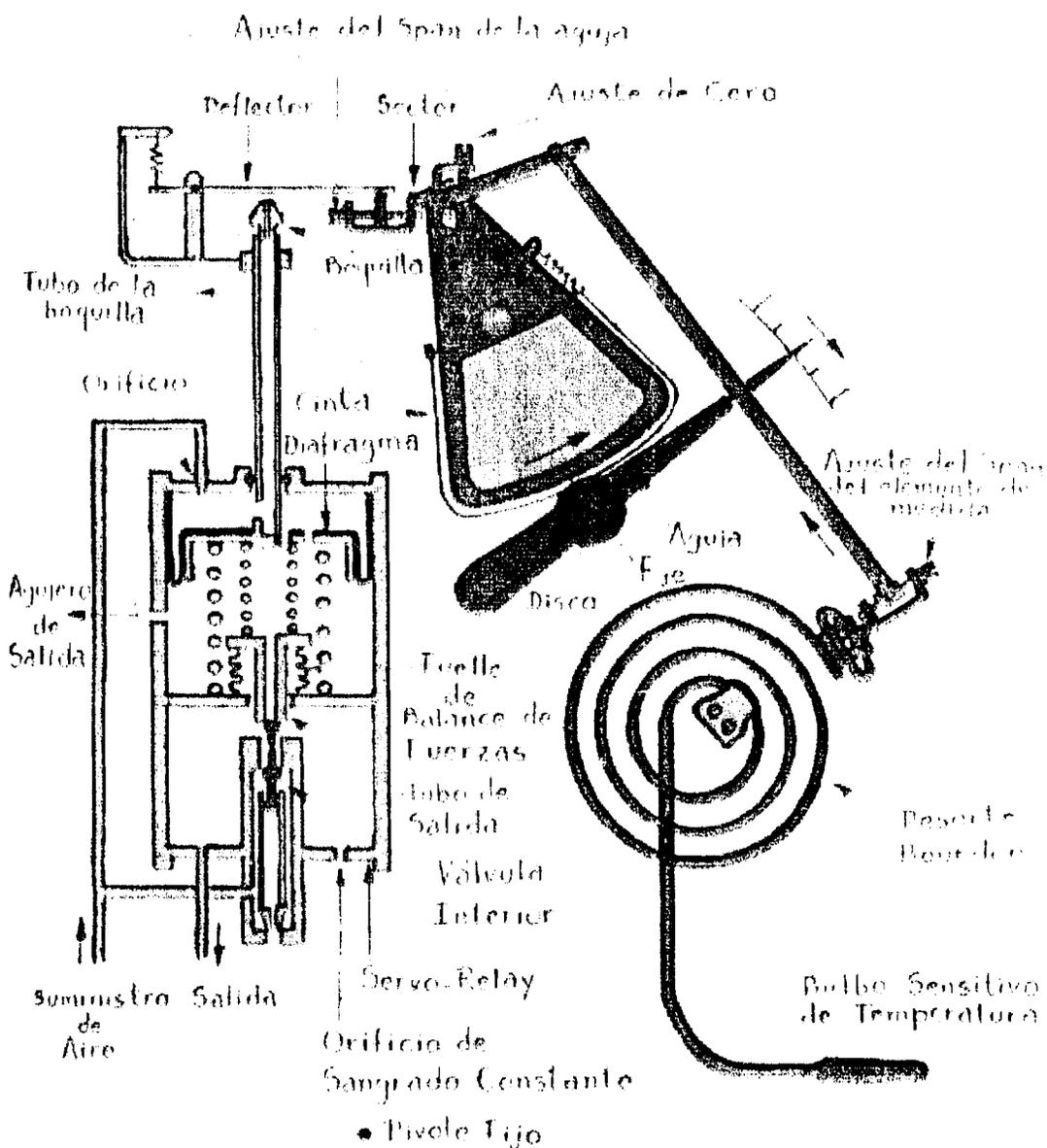


Fig. 3. 6a DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL TRANSMISOR

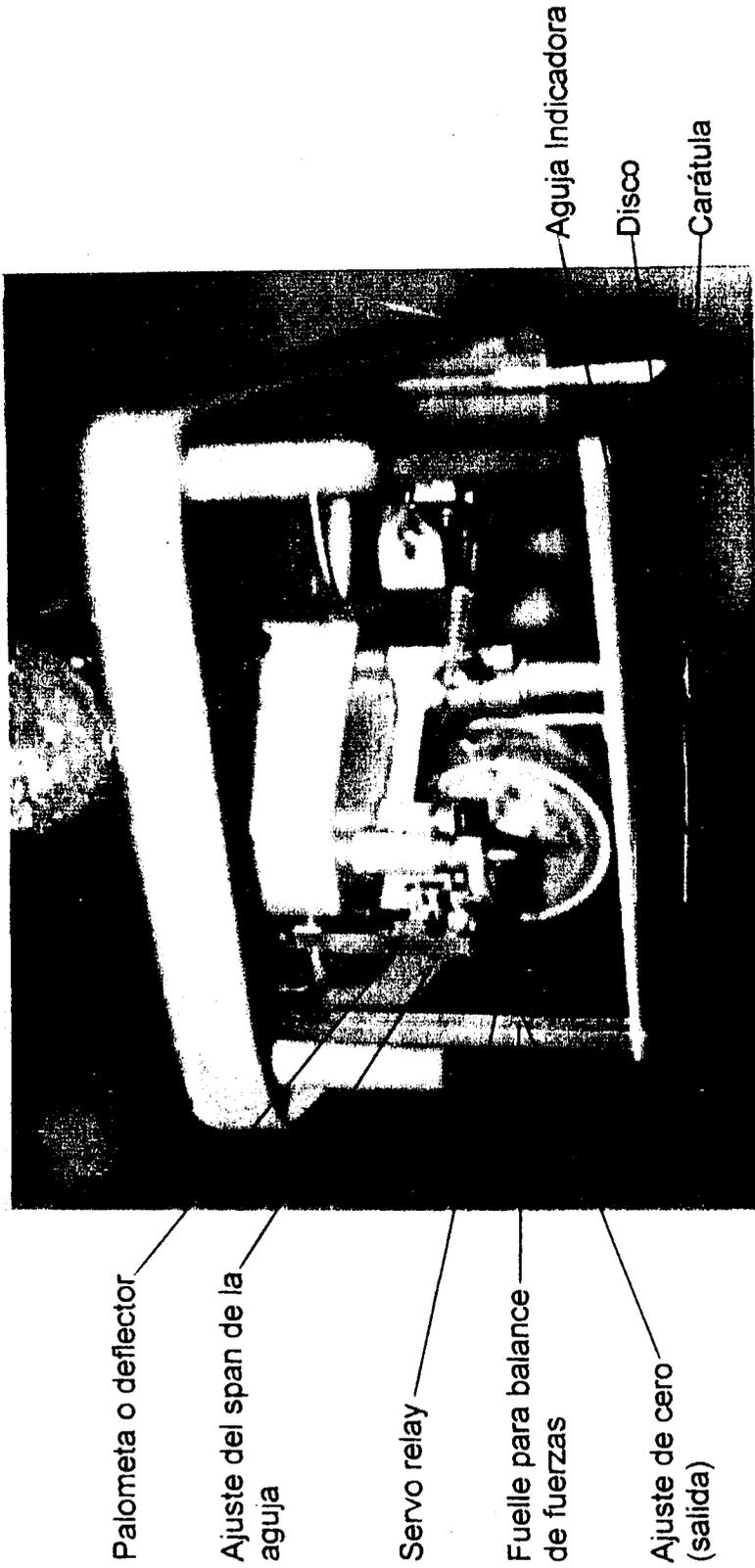
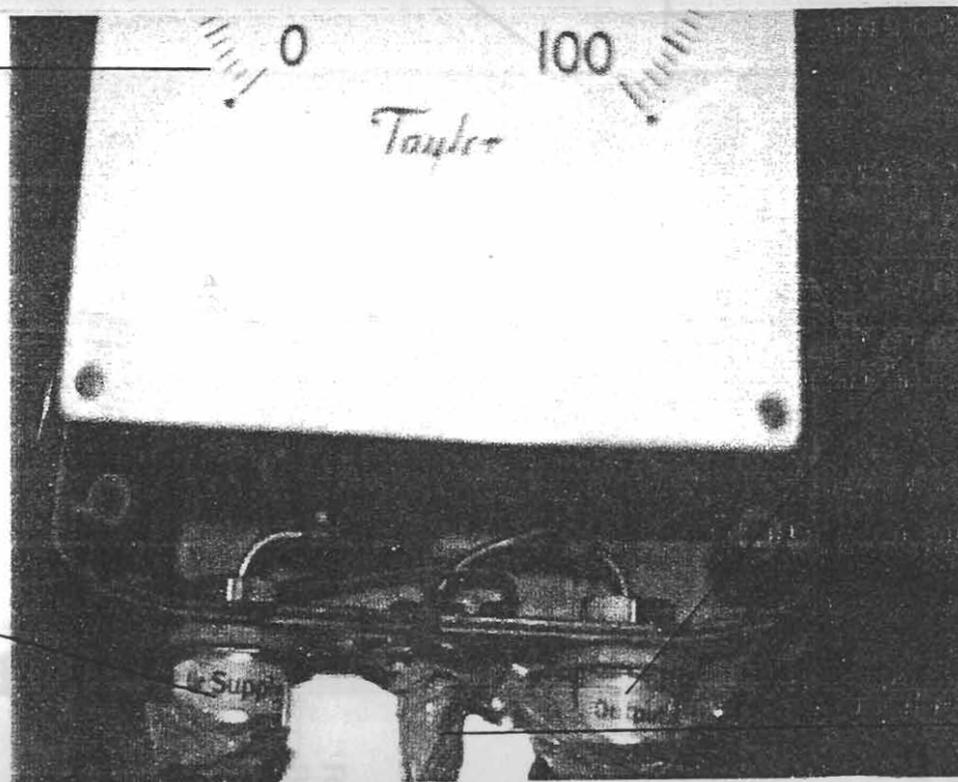


Fig. 3. 6b1 VISTA EN PERSPECTIVA SUPERIOR DEL TRANSMISOR INDICADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA

Carátula de
indicación



Señal de salida

Suministro de aire

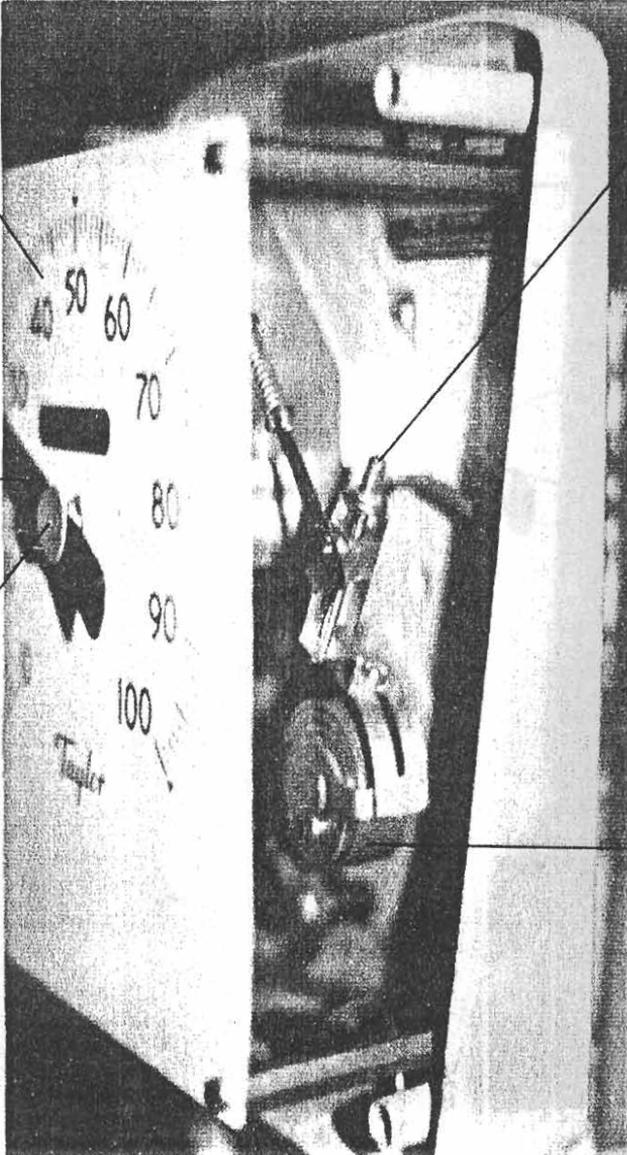
Señal de entrada

Fig. 3. 6b2 VISTA EN PERSPECTIVA INFERIOR DEL TRANSMISOR
INDICADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA

Carátula de
indicación

Aguja de
Indicación

Disco o
ajuste de
cero de
indicación



Ajuste del
span del
elemento de
medida
(salida)

Aguja de
indicación

Disco o ajuste
del cero de
indicación

Resorte
Bourdon

Fig. 3. 6b3

VISTA EN PERSPECTIVA LATERAL DERECHA DEL
TRANSMISOR INDICADOR NEUMÁTICO DE
TEMPERATURA

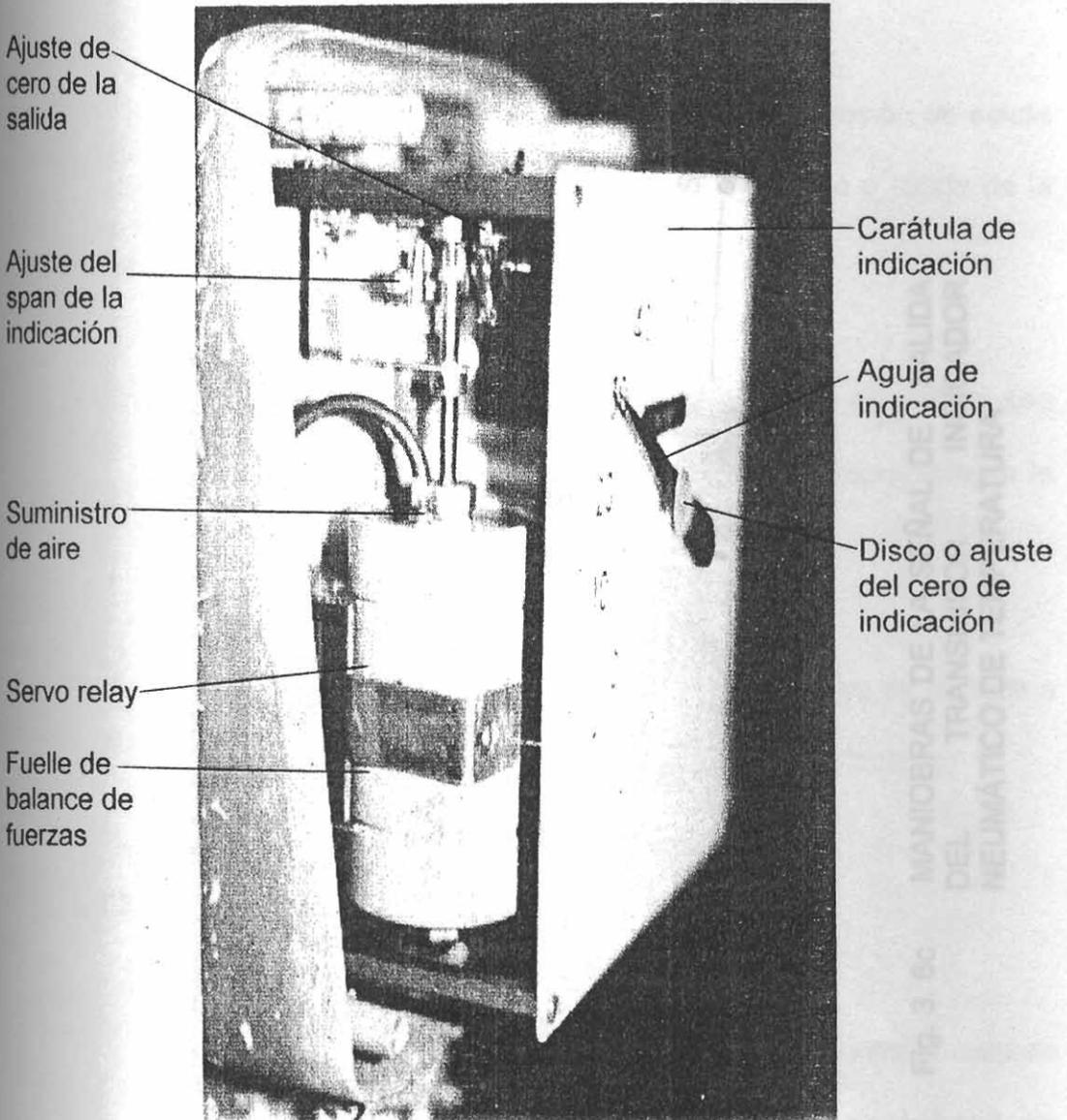
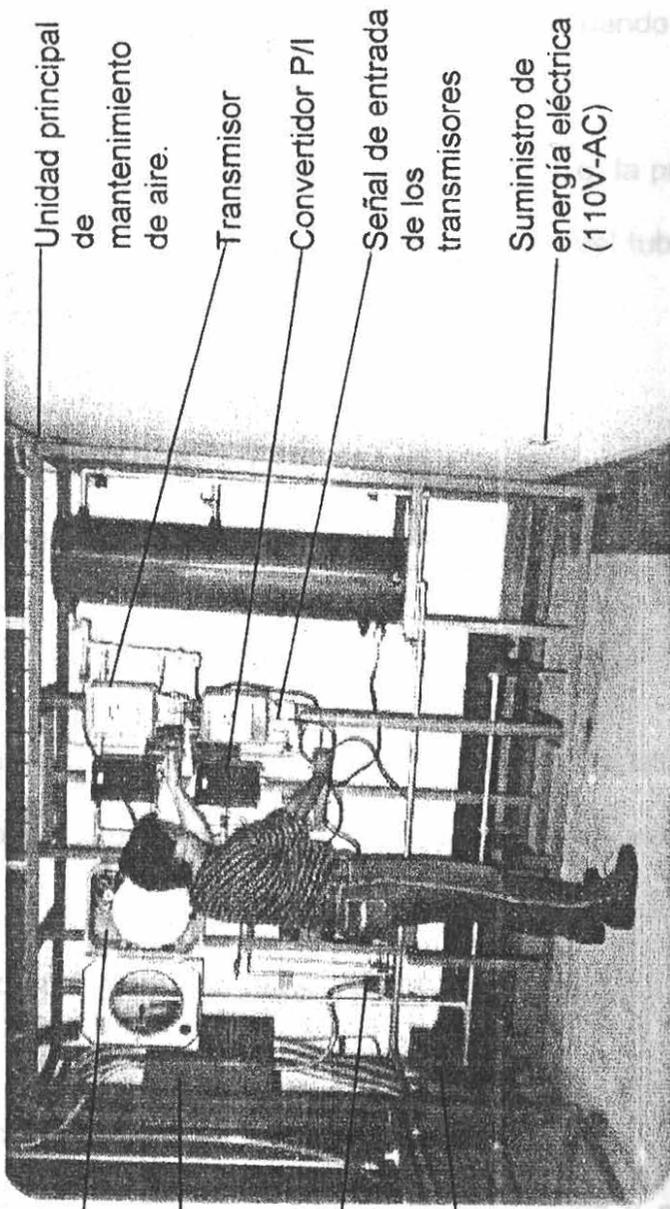


Fig. 3. 6b4 VISTA EN PERSPECTIVA LATERAL IZQUIERDA DEL TRANSMISOR INDICADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA



Controlador

Panel de control principal

Termostato

Instalación eléctrica del tanque calentador (peligro)

Unidad principal de mantenimiento de aire.

Transmisor

Convertidor P/I

Señal de entrada de los transmisores

Suministro de energía eléctrica (110V-AC)

Fig. 3. 6c MANIOBRAS DE LA SEÑAL DE SALIDA DEL TRANSMISOR INDICADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA

Fig. 3. 6c

La salida de presión del transmisor dentro del fuelle aumenta hasta que equilibre la fuerza de entrada actuando sobre el fuelle.

Cuando la temperatura del bulbo disminuye, la presión de salida disminuye por escape a través del orificio del tubo o salida de la cámara de aire.

El equilibrio es establecido cuando la presión de salida sea proporcional a la posición del deflector que es proporcional a la temperatura.

La aguja indicadora es manejada por un dispositivo de medida a través de un sector y una cinta conductora de movimiento.

3.3.3 Controladores de temperatura

En la industria se presentan diversos tipos de controladores de temperatura de acuerdo a la característica y personalidad del proceso a ajustar. Los controladores pueden ser de tipo neumático (Controlador registrador neumático de temperatura, **TRC**) fig. 3.7, electrónica (Controlador **MOD 30**) fig. 3.8 o los que se basan en microprocesadores.

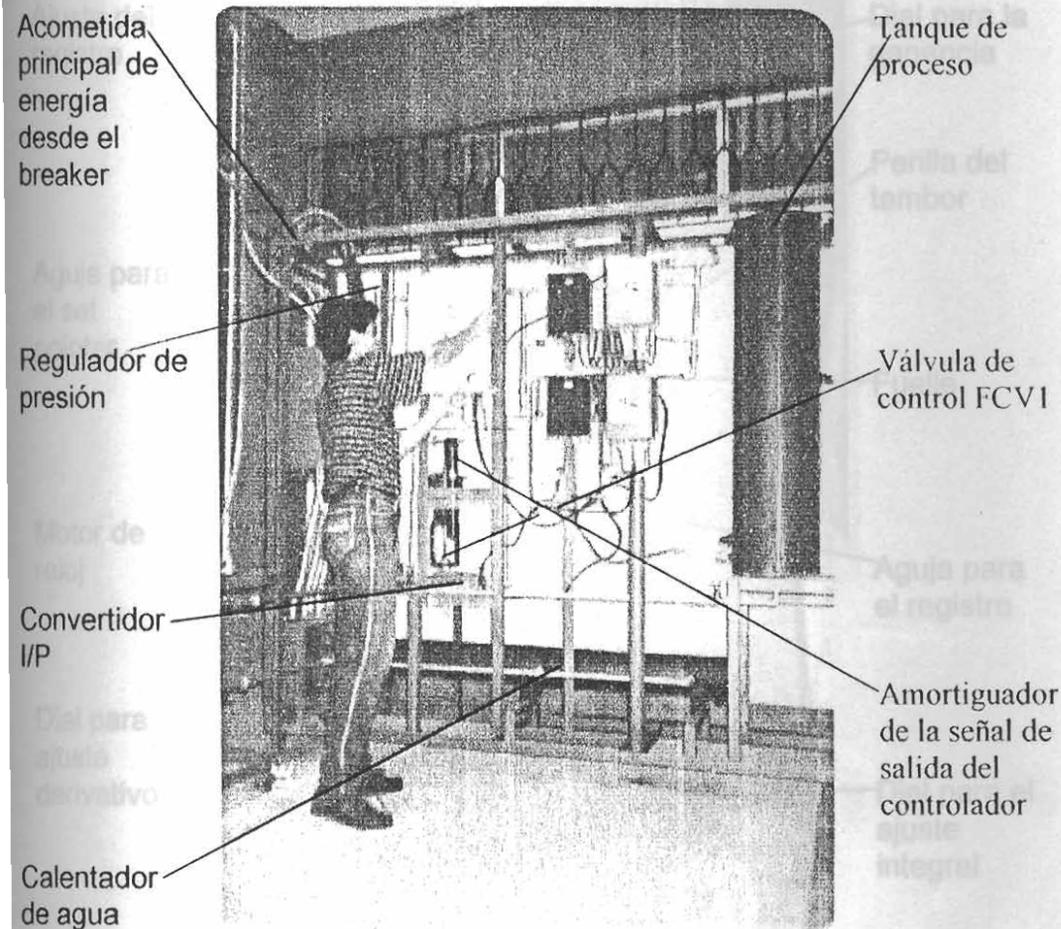


Fig. 3. 7a MANIOBRAS DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA

CONTROLADOR
 TEMPERATURA
 LA CARTA DE

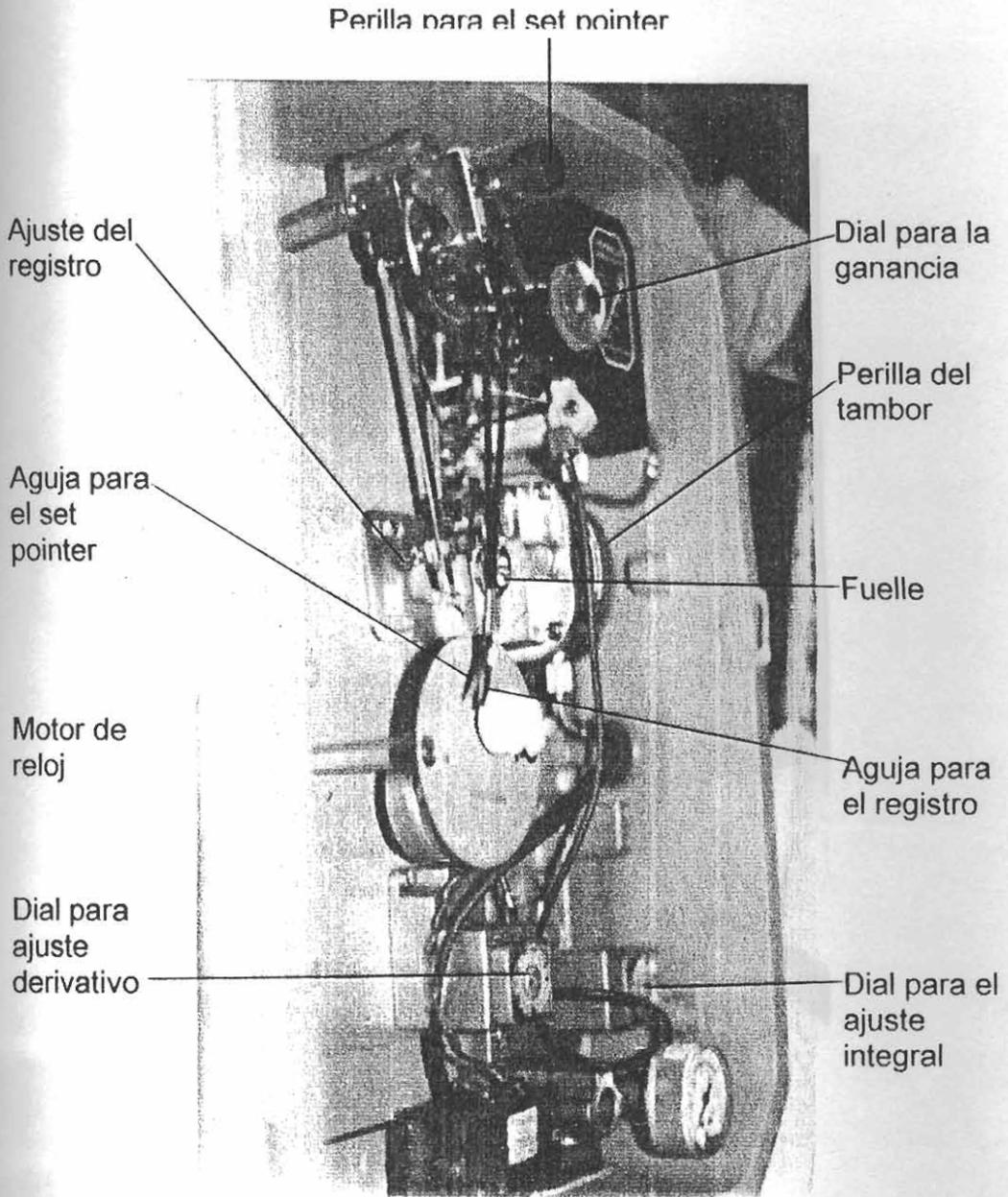


Fig. 3. 7b VISTA EN PERSPECTIVA DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA (DESCUBIERTO SIN EL PLATO Y LA CARTA DE REGISTRO)

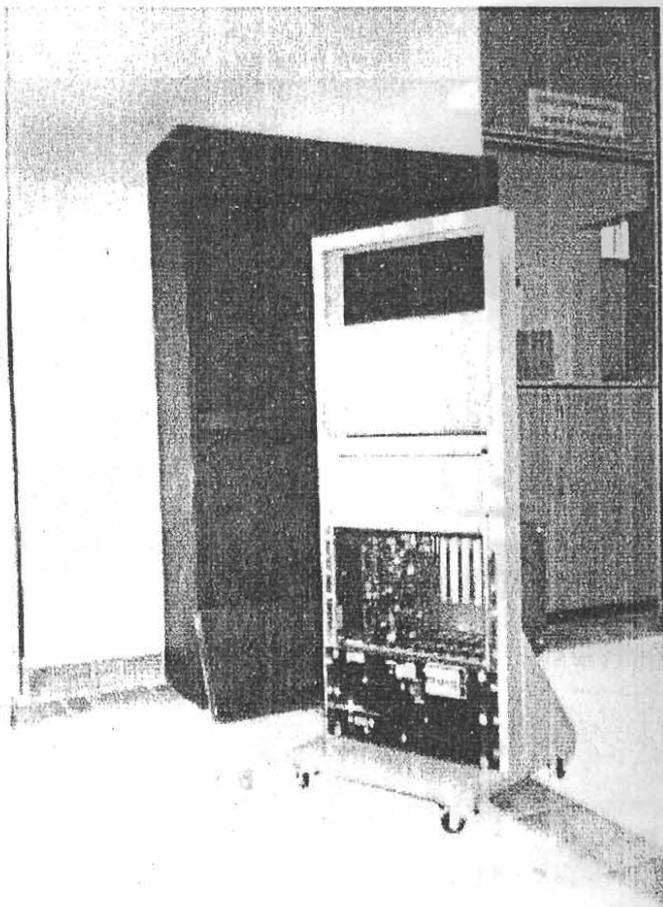


Fig. 3. 8a CONTROLADOR ELECTRÓNICO MOD 30
(VISTO EN PERSPECTIVA LATERAL)

(UNICO MOD 30
POSTERIOR)

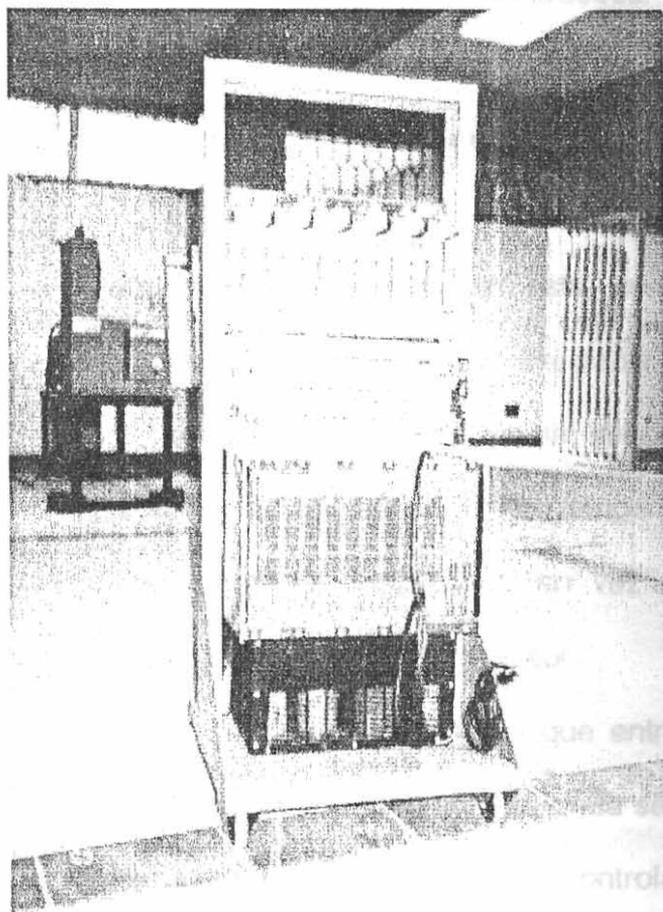


Fig. 3. 8b CONTROLADOR ELECTRÓNICO MOD 30 (VISTO EN PERSPECTIVA POSTERIOR)

El controlador de temperatura es el “cerebro” del circuito de control que toma la decisión introducida por nosotros sobre el valor de la temperatura T_o fijo a la que queremos que el valor de la variable T_o se encuentre el medio de proceso.

3.3.3.1 Controlador, registrador neumático de temperatura

Para seguir la acción de este controlador (TRC), asumimos que la unidad es arreglada como en la fig. 3.9; se asume también que la señal de entrada la proporciona el sensor de temperatura instalado directamente al controlador, en vez de la señal de entrada neumática del transmisor.

Si un incremento en la señal que entra al controlador reacciona como un incremento en la señal que sale del mismo estamos frente a un controlador de acción directa, como es la acción que debe predominar en el controlador del lazo de control de temperatura para controlar el valor T_o del proceso, operando una válvula de diafragma de acción directa con aire para cerrar sobre una línea de suministro de agua caliente. Asumimos primero que la temperatura en el aparato y

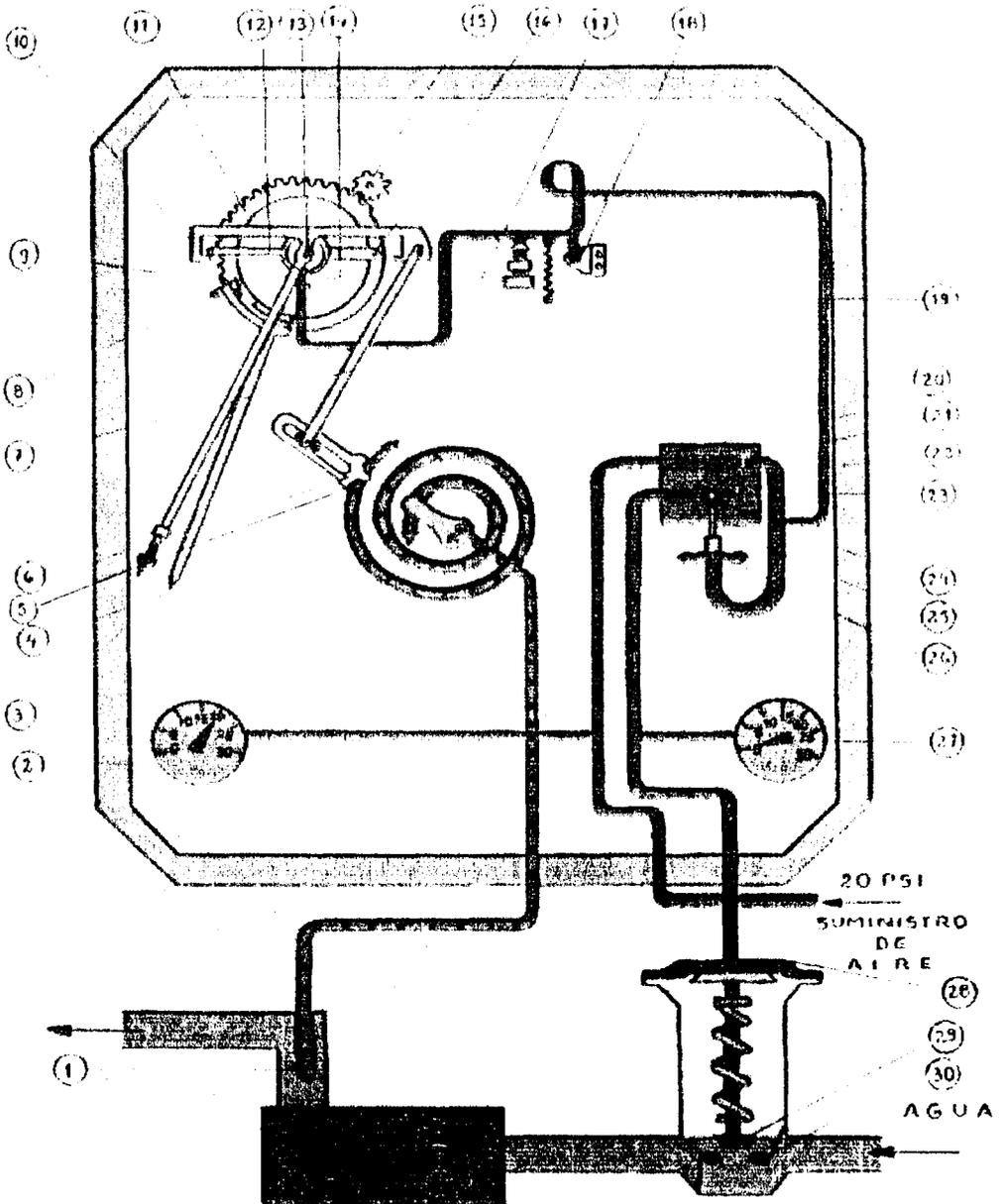


Fig. 3. 9 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL CONTROLADOR NEUMÁTICO TAYLOR (CON ALTA GANANCIA)

del proceso está debajo de aquella para la cuál el controlador es fijado (La pluma (3) está detrás del set - pointer (4)).

Desde que la temperatura es baja, el elemento primario o bulbo (1), la sensa y arrolla el resorte de tubo de Bourdon (5), el movimiento es transmitido por la abrazadora (6) a la varilla de conexión (7), y esta última por un eslabonamiento al brazo articulado (10); el empuje del eslabón (7) al brazo (10) vence al mismo hacia el final izquierdo, y se pierde el contacto con el deflector circular (12), esto hace que el deflector descansa sobre la boquilla (14). El aire entrando al tubo de la boquilla (19), del suministro de aire (20 psi.), a través del orificio (21) no escapa libremente desde la boquilla (14) y por esa razón sube la presión en la cámara capsular (26), soplándola. El pin (25) es levantado por la cámara capsular y la bola relay (23) (que también es levantada) sostiene el aire contra la parte superior del asiento de la válvula (22). El disco de la válvula (29) permanece en su posición más alta, permitiendo el flujo total de vapor hacia el proceso.

Al efectuarse la corrección, la pluma (3) tiende a igualarse con la posición del set - pointer (4), debido a que la temperatura del proceso aumenta, la cuál es detectada por el bulbo, lo que provoca que el Bourdon se desenrolle, jalando la varilla (7), trasmitiendo el movimiento al brazo (10), rotándolo en el sentido del movimiento de las agujas del reloj. Cuando la temperatura alcanza el punto fijo, el final izquierdo del brazo (10) levanta el deflector circular (12) que pivotea sobre el punto (16), lejos de la boquilla (14).

Aire escapa de la boquilla (14) y desinfla la cámara capsular (26) que baja la bola de relay (23) hacia el asiento inferior de la válvula (24). El máximo suministro de presión de aire entonces fluye hacia la válvula de diafragma cerrándola, y cuidando en mantener la temperatura del proceso en el punto deseado.

Procedimiento de marcha

1. Abrir la válvula de suministro de aire del controlador.

Al efectuarse la corrección, la pluma (3) tiende a igualarse con la posición del set - pointer (4), debido a que la temperatura del proceso aumenta, la cuál es detectada por el bulbo, lo que provoca que el Bourdon se desenrolle, jalando la varilla (7), transmitiendo el movimiento al brazo (10), rotándolo en el sentido del movimiento de las agujas del reloj. Cuando la temperatura alcanza el punto fijo, el final izquierdo del brazo (10) levanta el deflector circular (12) que pivotea sobre el punto (16), lejos de la boquilla (14).

Aire escapa de la boquilla (14) y desinfla la cámara capsular (26) que baja la bola de relay (23) hacia el asiento inferior de la válvula (24). El máximo suministro de presión de aire entonces fluye hacia la válvula de diafragma cerrándola, y cuidando en mantener la temperatura del proceso en el punto deseado.

Procedimiento de marcha

1. Abrir la válvula de suministro de aire del controlador.

2. Colocar el "Set - pointer" (2) o aguja fija detrás de la pluma de registro (3) girando la perilla (8) tal como muestran las figuras 1 y 2 del catálogo o fig. 3.10.
3. Determinar si es o no correcta la acción del instrumento.
 - a) Ajustar la aguja fija (2) a 1/8" debajo de la pluma de registro y notar la presión de salida.
 - b) Comparar esto con la acción de la válvula.
 - c) Ejemplo: Un controlador de temperatura, mantiene una temperatura constante en un baño de agua con una válvula de "aire para cerrar" sobre la línea de fluido o agente de control (en este caso agua caliente), aumentará la presión de salida de aire hacia su máximo valor cuando la pluma se mueve sobre el "set - pointer" o punto de consigna.
4. Si la acción es errónea, invertirla como se delinea bajo el título de ***cambio de acción del instrumento***.
5. Colocar la aguja fija (2) en el punto sobre la carta donde es deseado el control.
6. Poner en marcha el proceso.

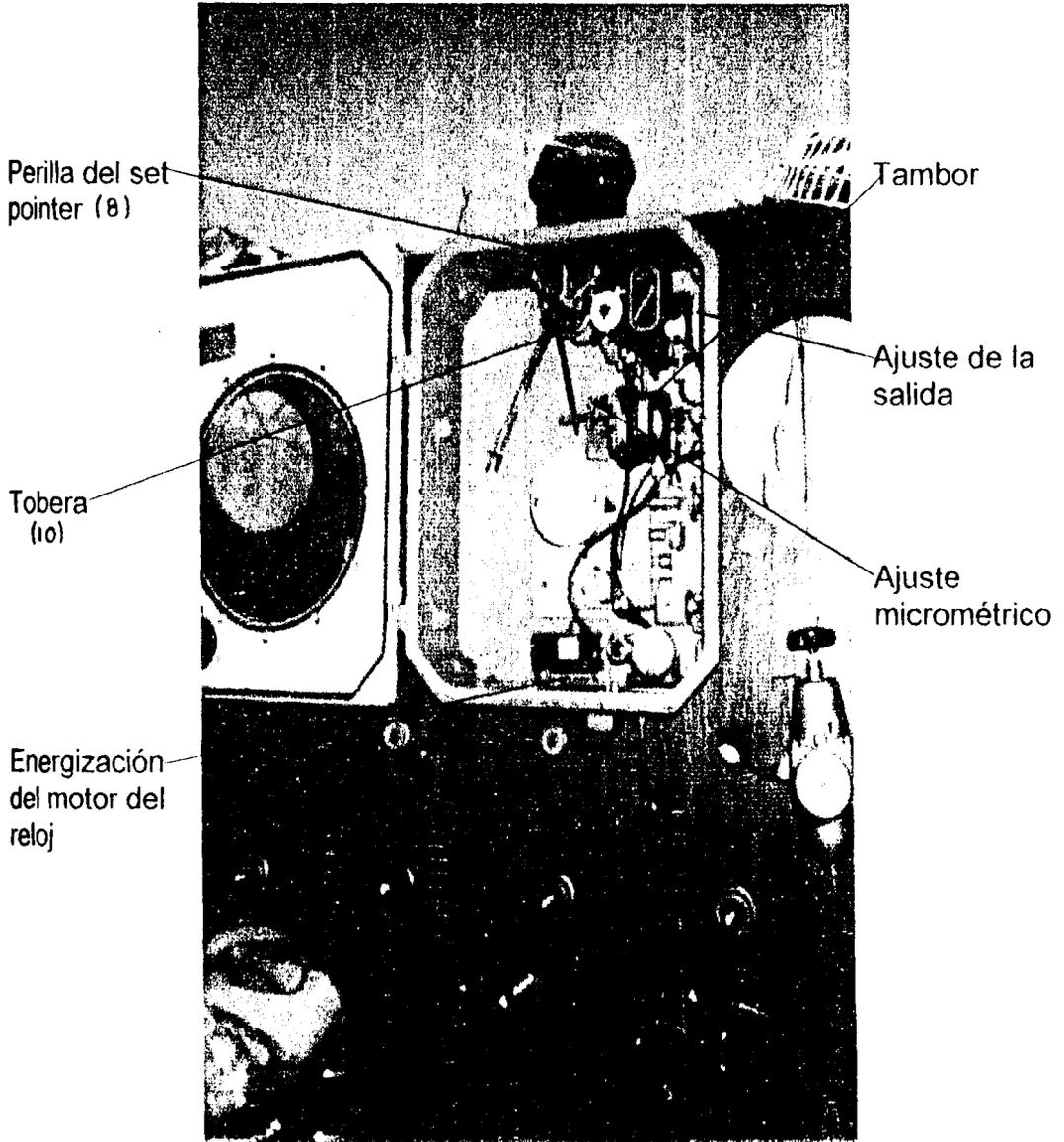


Fig. 3. 10a VISTA EN PERSPECTIVA DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA (DESCUBIERTO TOTALMENTE)

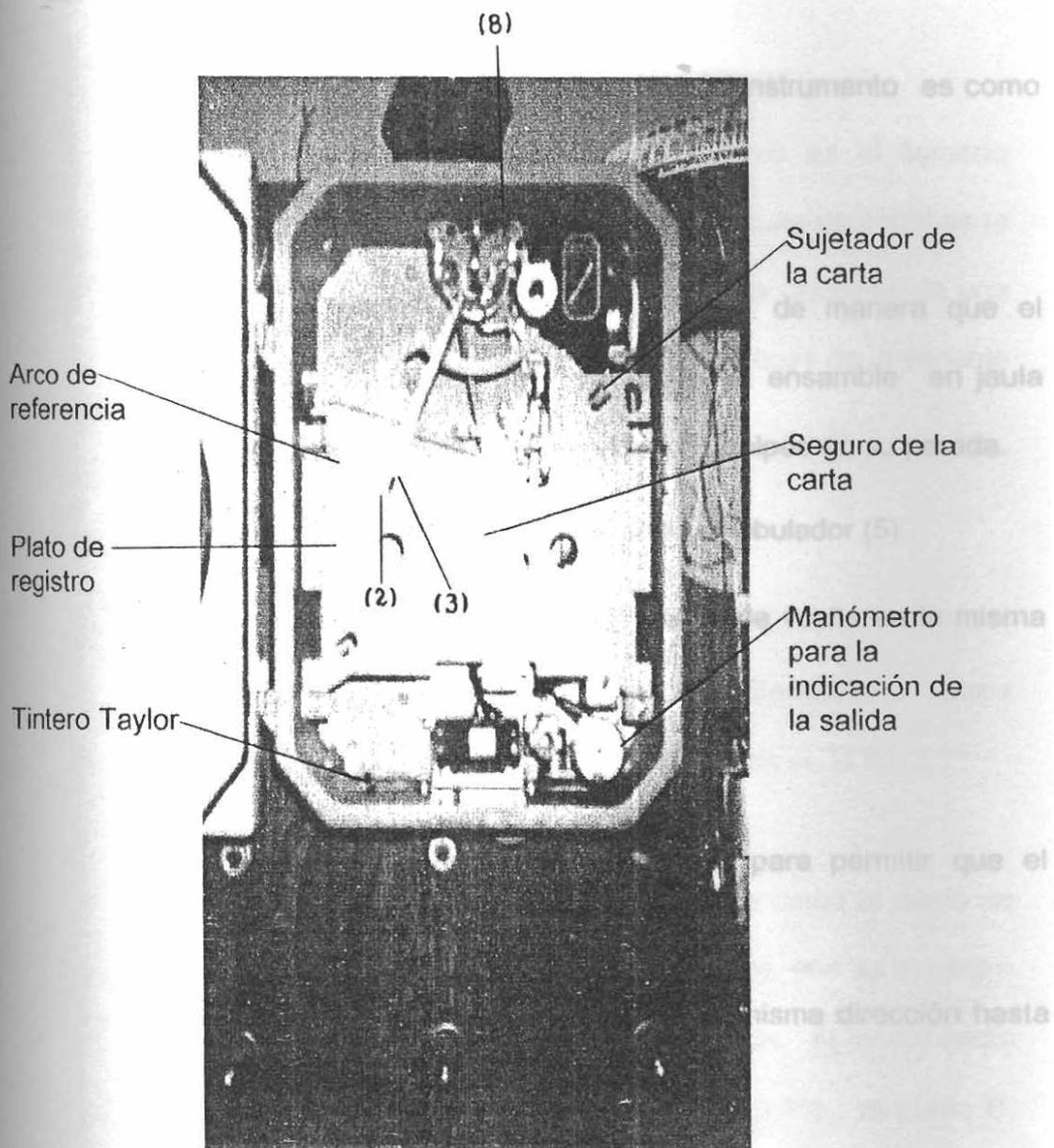


Fig. 3. 10b VISTA FRONTAL DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMÁTICO DE TEMPERATURA (DESCUBIERTO) CON EL PLATO DE LA CARTA DE REGISTRO

Cambio de acción del instrumento

El procedimiento de cambio de acción del instrumento es como sigue:

1. Girar la perilla (8) del "set - pointer" de manera que el indicador tabulador "tab" pase bajo el ensamble en jaula (cage) hasta que el "set - pointer" (2) golpee en su parada.
2. Elevar el pequeño resorte cerrando el tabulador (5).
3. Continuar girando la perilla (8) por $\frac{1}{4}$ de vuelta en la misma dirección.
4. Aflojar o soltar el tabulador (5).
5. Halar hacia abajo la boquilla (10) para permitir que el deflector pivotee en el claro.
6. Continuar girando la perilla (8) en la misma dirección hasta que cierre el tabulador relacionado.

Los controladores neumáticos poseen un sistema de comparación entre la variable y el punto de consigna para determinar el error que se introduce en el bloque controlador y

que da, según las acciones del instrumento, la señal de salida a la válvula o elemento final de control.

En los controladores de campo, este sistema es el llamado mecanismo diferencial, y en los aparatos miniatura de panel es la oposición de dos fuelles situados en los puntos opuestos de una palanca, y alimentados por las señales neumáticas de la variable y del generador del punto de consigna.

Mecanismo diferencial

Un esquema de uno de los mecanismos diferenciales típicos empleados en los instrumentos es el presentado en la fig. 3.11.

En la posición a) de la figura, tanto la variable como el punto de consigna se encuentran alineados y el punto o, que es el centro de la palanca AB está en posición determinada. Al mover hacia arriba el punto de consigna como en la fig. 3.11b., el punto B, subirá y el brazo del punto de consigna se separará del correspondiente a la variable, se elevará el punto o y alejará el obturador de la tobera puesto que la palanca oT bascula alrededor del punto R. Si la variable aumenta hasta alinearse

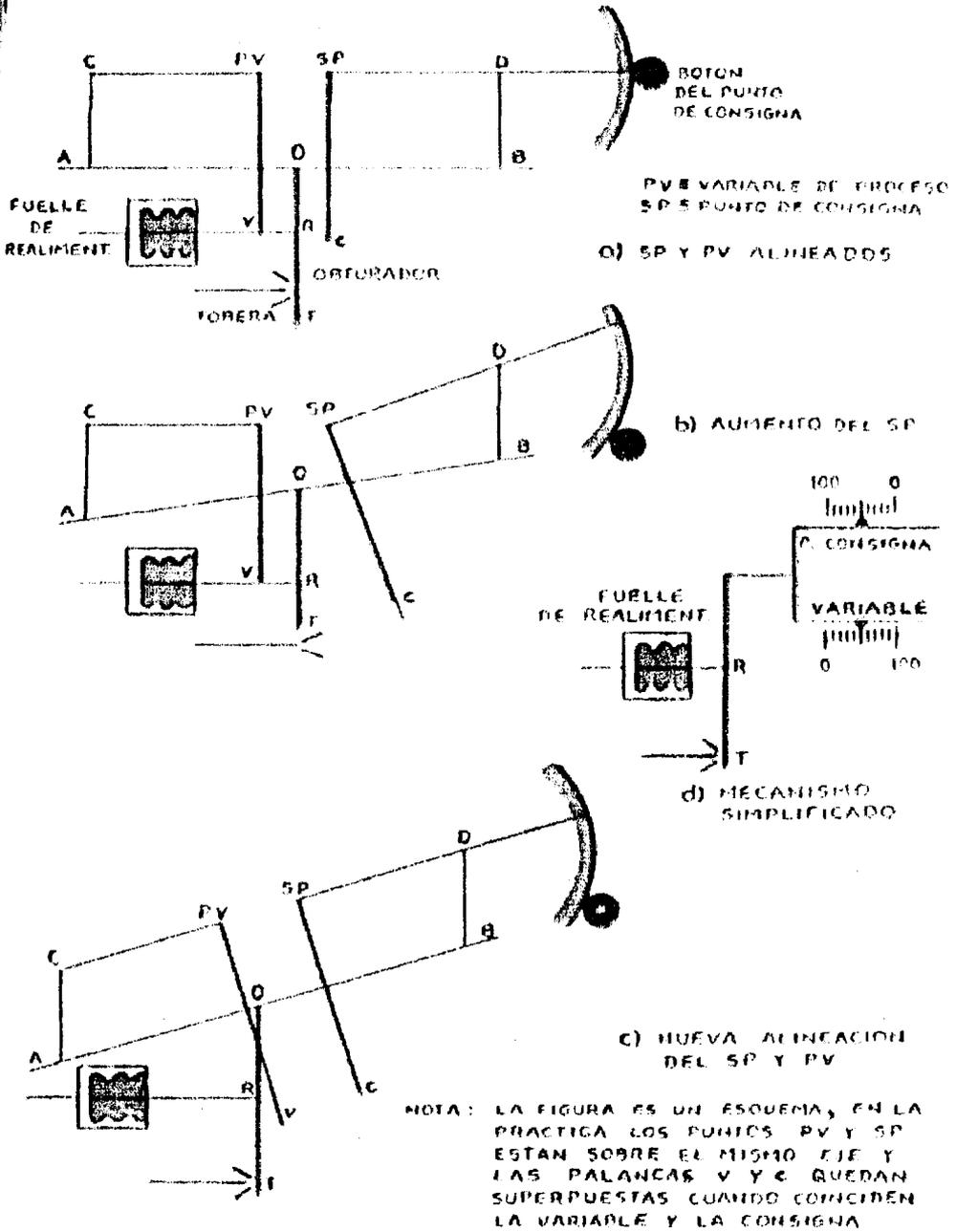


Fig. 3. 11 MECANISMO DIFERENCIAL

con el punto de consigna, el punto C y el punto A descienden y el punto o regresa a su posición inicial, a pesar que las nuevas posiciones de la variable y el punto de consigna sean distintas de las iniciales [fig. 3.11c.]. La tobera y el obturador volverán a tener la misma separación inicial.

3.3.4 Convertidores

La instrumentación industrial también utiliza los transductores llamados convertidores cuya función más importante es cambiar la naturaleza de la señal de entrada para convertirla en otra forma de energía equivalente a la señal de salida. Generalmente, estos instrumentos necesitan de una fuente energética llamada suministro de energía, el cual es de la misma naturaleza que la señal de salida. Con ellos podemos hacer una serie de combinaciones neumáticas y electroneumáticas que ayudarán a crear otras formas de control dentro de un lazo de control.

En un momento dado pueden llegarse a convertir en fuente de corriente directa en el rango de 4 a 20 miliamperios a partir de suministro de corriente alterna de 120 V. y entrada de aire de 3 a

15 psi, o fuente de presión de aire de 3 a 15 psi a partir de suministro de aire de 20 psi. y entrada de corriente directa de 4 a 20 miliamperios, escribiendo sobre los convertidores del lazo de control de temperatura (figs. 3.12 y 3.13).

3.3.4.1 Convertidor de presión a corriente

Pre-chequeo antes del arranque

Antes de poner el transductor en funcionamiento, asegurarse de instalar apropiadamente y en condición de operación para chequear lo siguiente:

1. El voltaje y la frecuencia están de acuerdo con los datos estampados en la placa de datos.
2. Las conexiones eléctricas son las correctas. Referirse al diagrama de conexión fig. 3.14.
3. La señal de entrada esté conectada en el puerto correcto fig. 3.15 y no hay ninguna fuga.

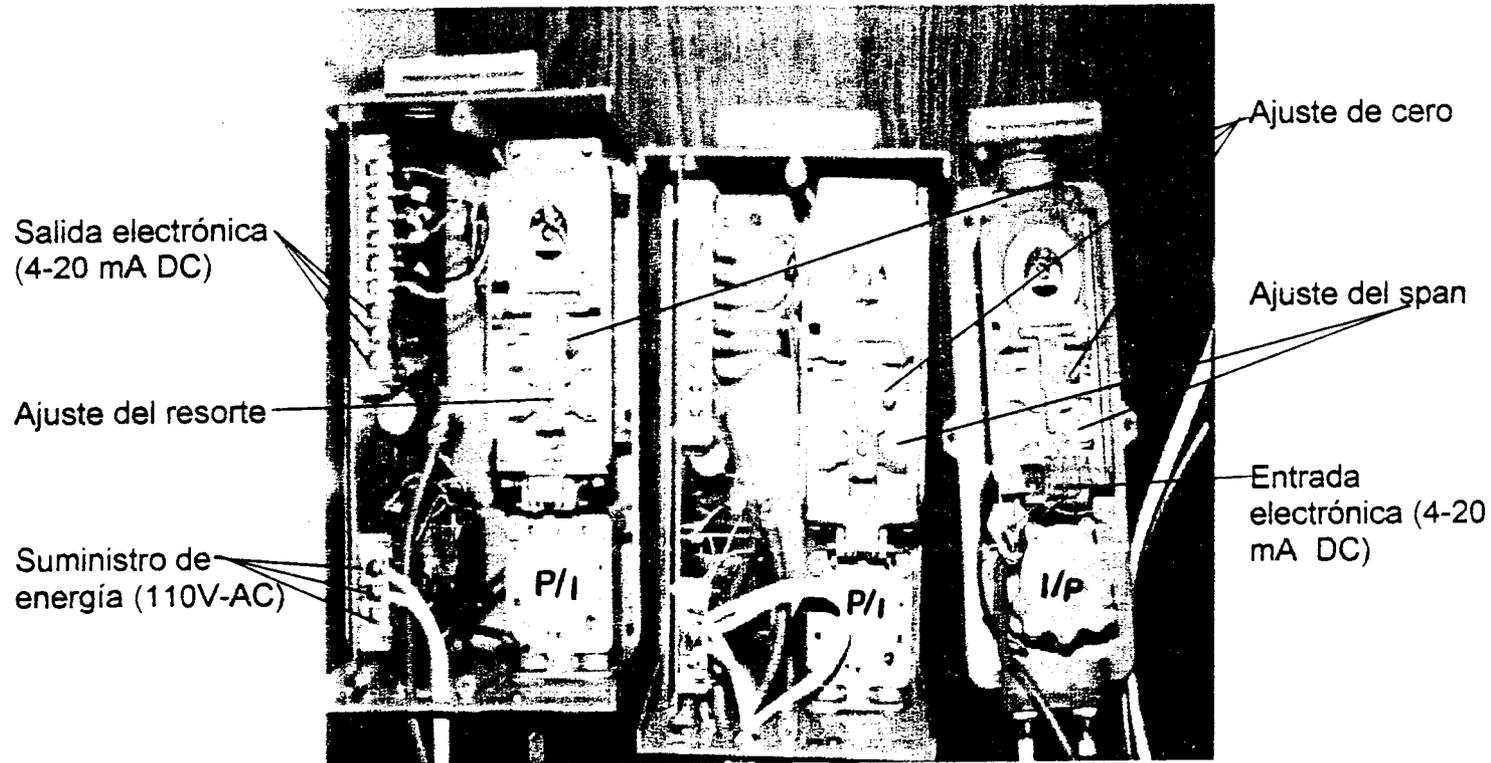


Fig. 3.12 CONVERTIDORES TAYLOR : 2P/I Y 1 I/P DESCUBIERTOS TOTALMENTE PARA OBSERVAR MECANISMOS Y CONEXIONES ELECTRICAS Y ELECTRONICAS

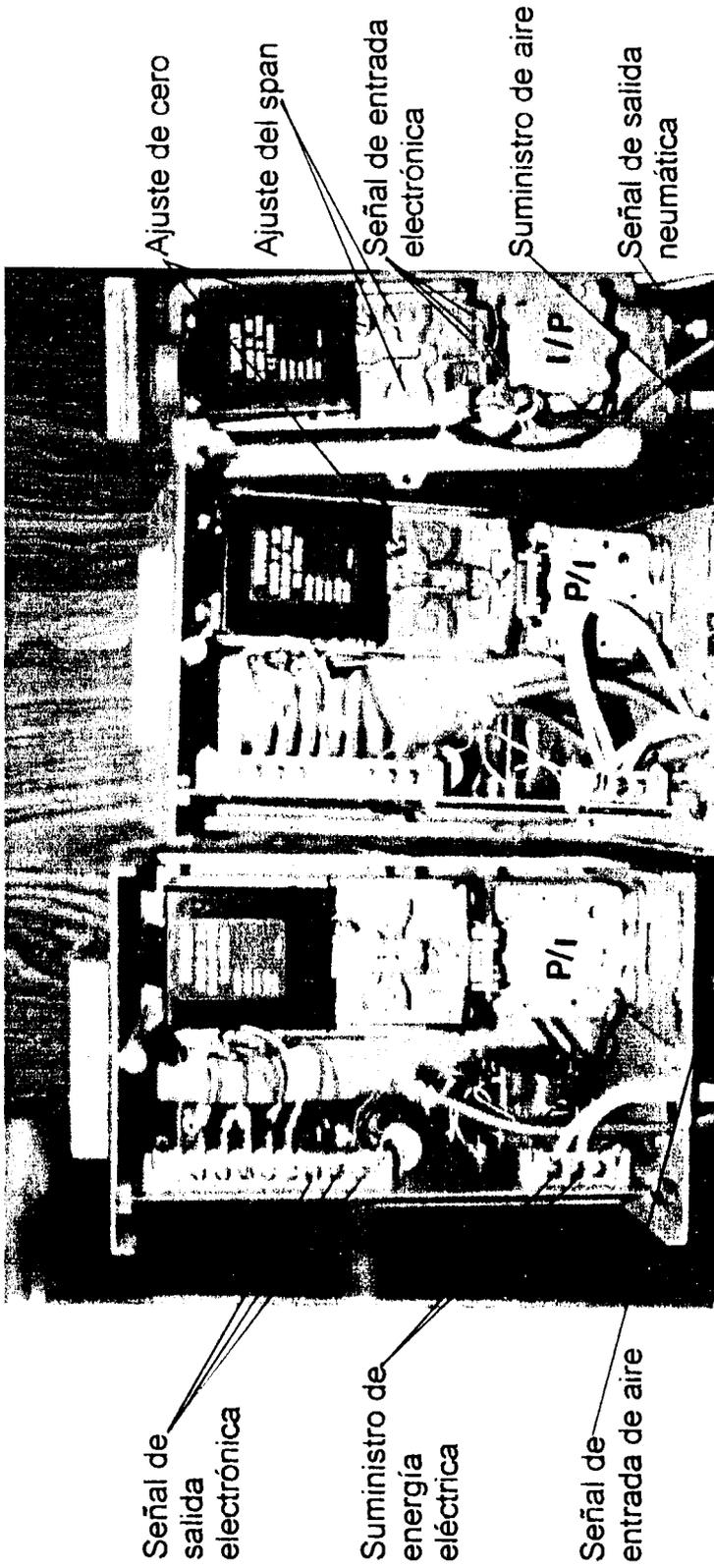
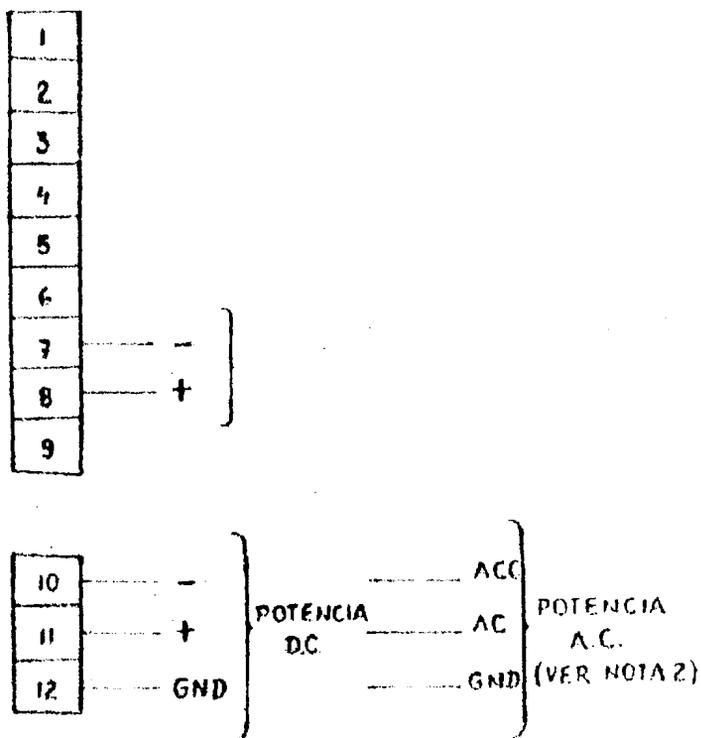


Fig. 3. 13 CONVERTIDORES TAYLOR: 2P/I Y 1 I/P
 DESCUBIERTOS EN VISTA FRONTAL PARA OBSERVAR
 MECANISMOS Y CONEXIONES ELECTRICAS Y
 ELECTRONICAS



NOTAS:

1. TODOS LOS CABLES DE SEÑAL SERÁN ENLAZADOS EN PARES
2. AC - CABLE CALIENTE LINEA VIVA
GND - CABLE DE TIERRA
ACC - CABLE COMUN. NEUTRO

OUTPUT (SALIDA):

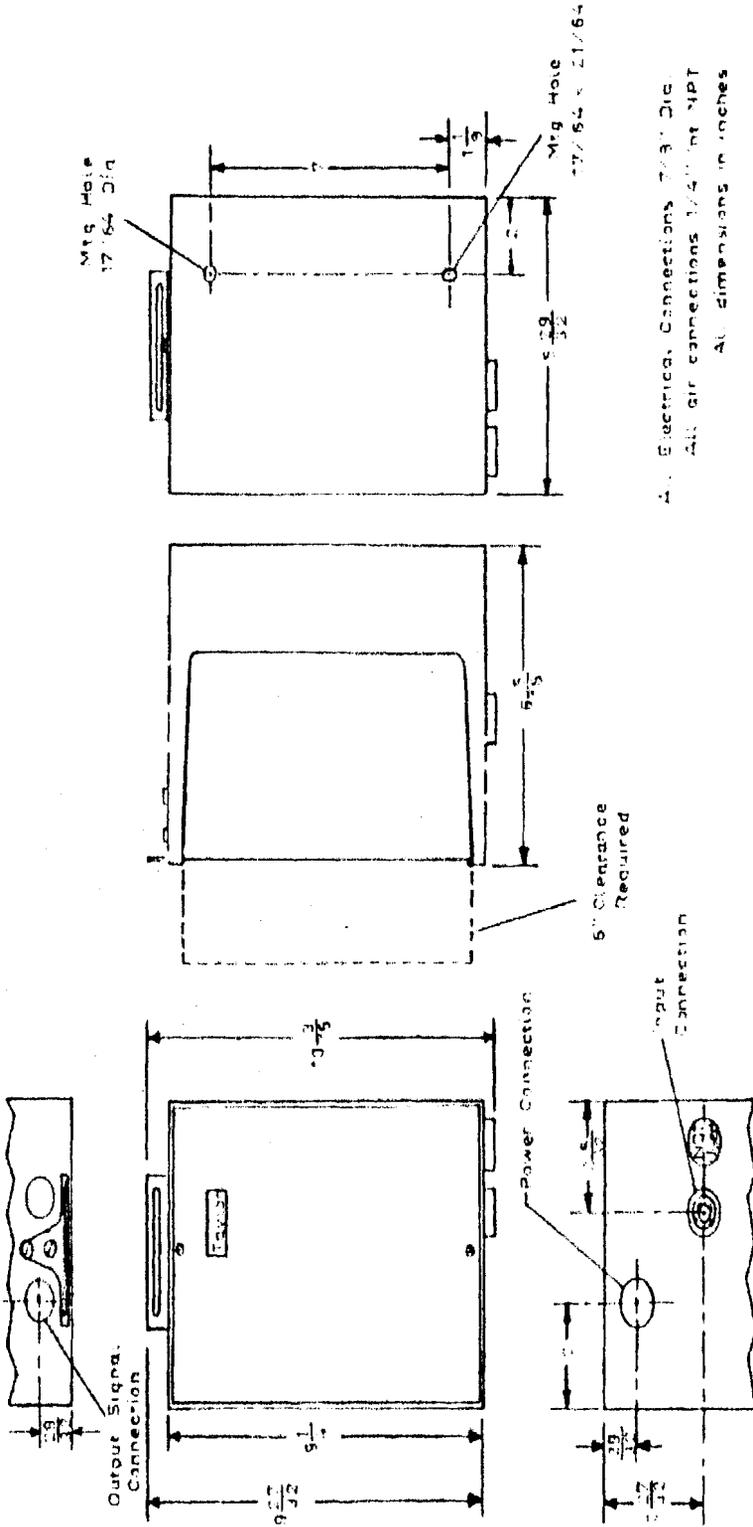
NO ES SISTEMA DE 2 CABLES.

4 A 20 mA DC

POTENCIA:

117 V, 60 Hz.

Fig. 3. 14 DIAGRAMA DE CONEXIÓN ELECTRICA DEL CONVERTIDOR P/I.



4. Electrical Connections 7/32" Dia.
 All air connections 1/4" Int NPT
 All dimensions in inches

Fig. 3. 15 MONTAJE Y CONEXIÓN DE LAS SEÑALES ELECTRICAS Y NEUMÁTICAS DEL CONVERTIDOR P/I

Descripción de funcionamiento u operación

El transductor opera en el principio de equilibrio de fuerzas. La fuerza desarrollada por los fuelles de entrada es equilibrada por la fuerza producida por la señal de salida de 4 a 20 mA. d.c. actuando sobre el transductor complementario. Un diagrama esquemático del transductor se muestra en la fig. 3.16.

Un incremento en la presión de los fuelles de entrada provoca que la palanca de fuerza pivotee.

Atado a la palanca de fuerza está el resorte de cero, la placa del detector y la bobina del transductor complementario.

El movimiento de la placa del detector varía la reluctancia del espacio de aire del detector.

Un oscilador excita el devanado primario del detector. La cantidad de esta energía que aparece en el devanado secundario del detector, depende de la densidad de flujo ligada a las bobinas y se relaciona directamente a la posición de la placa del detector.

La señal del devanado secundario del detector es amplificada por

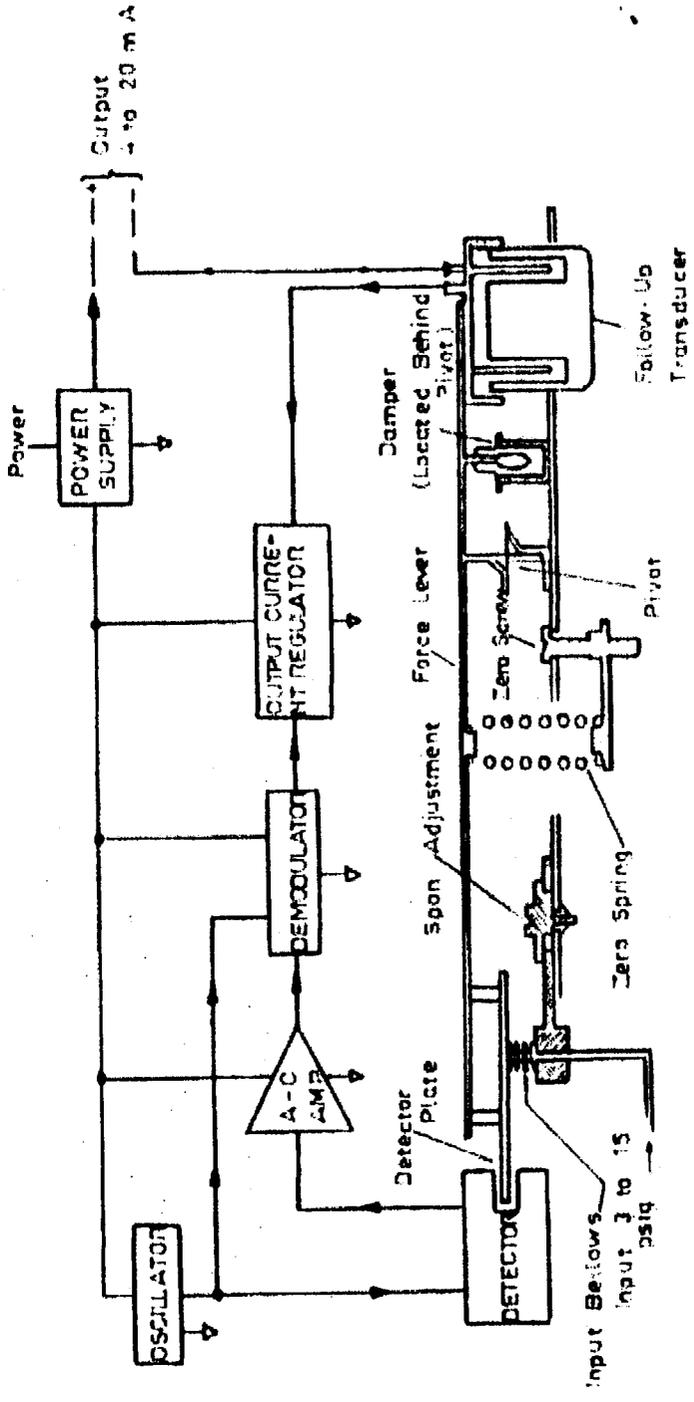


Fig. 3. 16 OPERACIÓN DEL CONVERTIDOR P/I

el amplificador a.c. y alimenta a la fase sensitiva del demodulador. El demodulador es hecho fase sensitiva por el oscilador. La señal de salida del demodulador determina la desviación o inclinación base de la corriente de salida del regulador, el cual regula la corriente de salida a través de su rango de 4 a 20 mA. d.c. La corriente de salida fluye a través del transductor complementario y hacia la carga de salida. La corriente de salida fluyendo a través del transductor complementario produce una fuerza suficiente para compensar la fuerza generada por los fuelles de entrada.

El tornillo de ajuste de cero comprime un resorte que inclina la palanca de fuerzas.

El rango es ajustado por un par de destornilladores de ajuste de levas. Estas levas posicionan los fuelles de entrada en la distancia requerida del pivote de la palanca de fuerzas.

3.3.4.2 Convertidor de corriente a presión

Transductor que convierte la señal de entrada de corriente en el rango 4 a 20 mA. d.c. en señal de salida

de presión de aire en el rango de 3 a 15 psi, existiendo para esto un suministro de presión de aire de 20 psi., recomendados.

Descripción de funcionamiento u operación

El transductor es instrumento de balance de fuerzas que balancea una fuerza electromagnética contra una fuerza de realimentación neumática. Un diagrama esquemático del transductor es presentado en la fig. 3.17.

La señal de entrada de corriente es aplicada al devanado del transductor de corriente a fuerza que es montada en un extremo de la palanca de fuerza. La palanca de fuerza pivotea sobre un elemento flexible. Un deflector ajustable es montado sobre el otro extremo de la palanca de fuerzas. La bobina del transductor es suspendida en el claro de un imán permanente. Como el flujo de corriente a través de la bobina del transductor aumenta, la bobina se mueve hacia arriba y afuera del claro del imán. Esto levanta a la bobina del brazo de la palanca de fuerza.

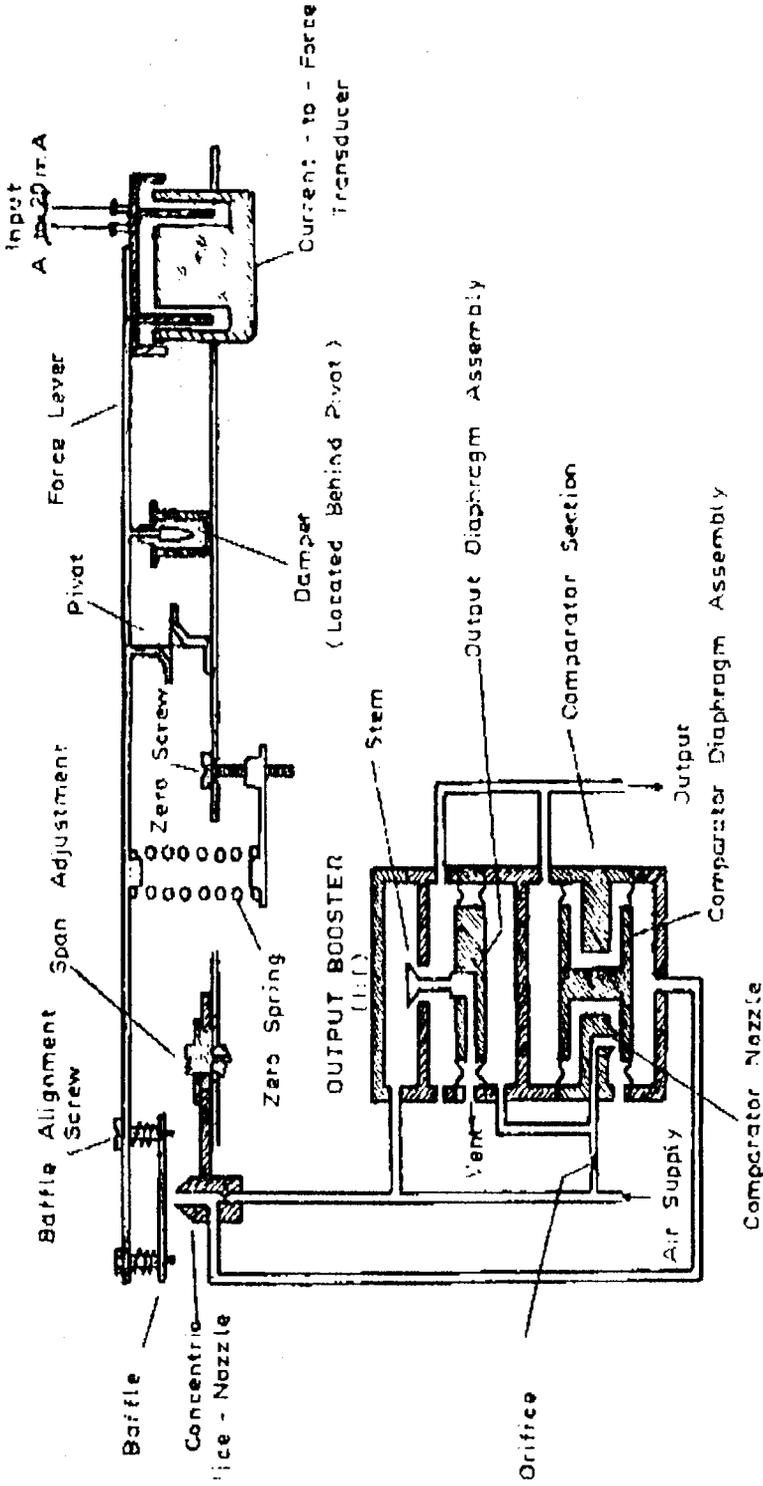


Fig. 3. 17 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL TRANSDUCTOR I/P

En el otro extremo del brazo de la palanca está el extremo del deflector con una boquilla ensamblada localizada debajo de él. La presión de aire desde la boquilla aplica una fuerza neumática al deflector que se opone a la fuerza electromagnética de la bobina del transductor. La presión trasera desde la boquilla es la presión de salida del transductor.

El ajuste de cero es un tornillo que comprime un resorte. El ajuste del rango es un par de destornilladores de ajuste de levas que posicionan la boquilla respecto al pivote de la palanca de fuerzas.

La señal de salida operará los demás instrumentos neumáticos. Cuando mayor capacidad de aire es requerida, el impulsor de salida 1:1 es usado.

En la fig. 3.18 se observa la disposición previa de las conexiones eléctricas y neumáticas del convertidor I/P, como se observa desde la parte externa y en la fig. 3.19 se presenta la diagramación eléctrica del convertidor como se instala en la parte interna.

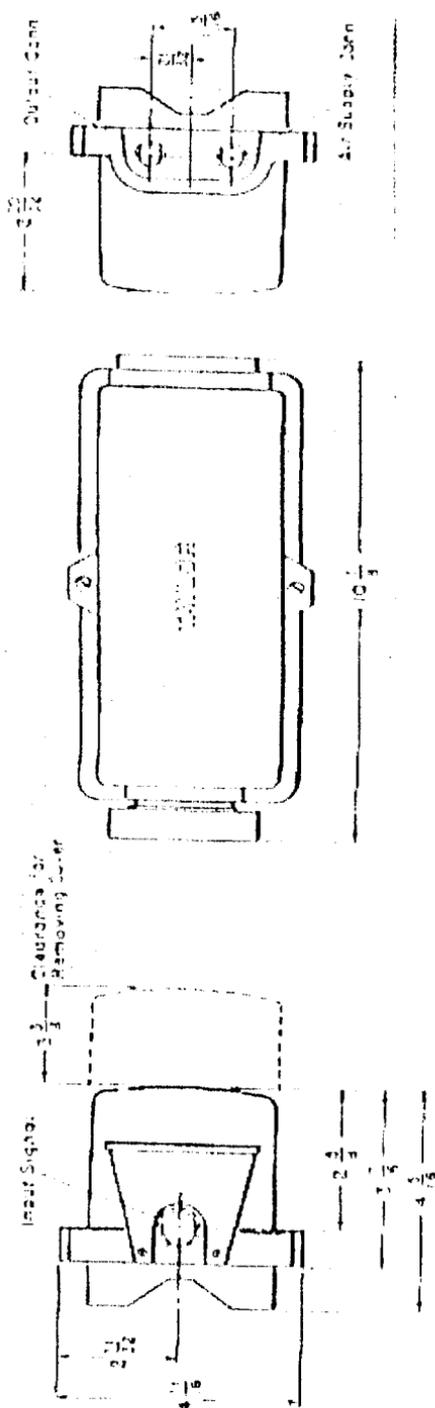
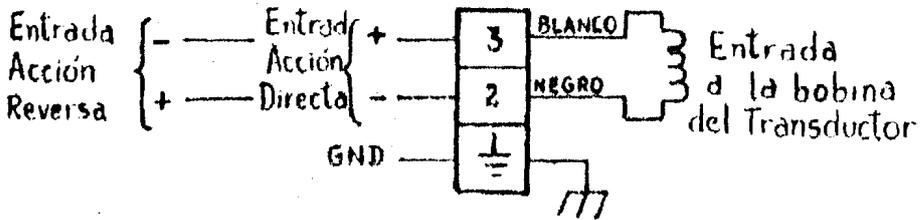


Fig. 3. 18 DISPOSICION DE LAS CONEXIONES ELECTRICAS Y NEUMATICAS DEL CONVERTIDOR I/P OBSERVADAS DESDE LA PARTE EXTERNA



Señal de Entrada:

- 4 a 20 mA d.c.
- 8 mA d.c. del Span son para dividir el rango de operación de la válvula ; 1401T solamente (Ver nota 2)

Notas:

1. Todos los cables de señal serán enlazados en pares
2. Algún Span de 8 mA entre los límites de 4 mA y 20 mA puede ser obtenido por ajuste del tornillo de cero.

Fig. 3. 19 DIAGRAMA Y ESQUEMA DE CONEXIÓN ELECTRICA DEL CONVERTIDOR I/P

3.3.5 Reguladores de presión neumáticos

En la fig. 3.20 se presentan los reguladores de presión de aire utilizados en el lazo de control de temperatura.

El objetivo principal de los reguladores de presión en el montaje de circuitos de aire comprimido es el de mantener estables las condiciones de funcionamiento requeridas, a pesar de la variación de las condiciones de presión primaria y de caudal.

Las características de un regulador de presión se refieren a la regulación y al caudal (fig. 3.21). La primera determina que el regulador proporcione una presión de utilización constante, no obstante, las variaciones de la presión primaria P_1

Las características de caudal dicen de la capacidad del regulador para mantener la presión secundaria constante P_2 , a pesar de las variaciones en el caudal de aire comprimido. De aquí que, cuanto más grande es la diferencia entre la presión primaria y la presión secundaria, es más favorable la característica de caudal. Por esta razón, no se debe conectar en serie varios reguladores.

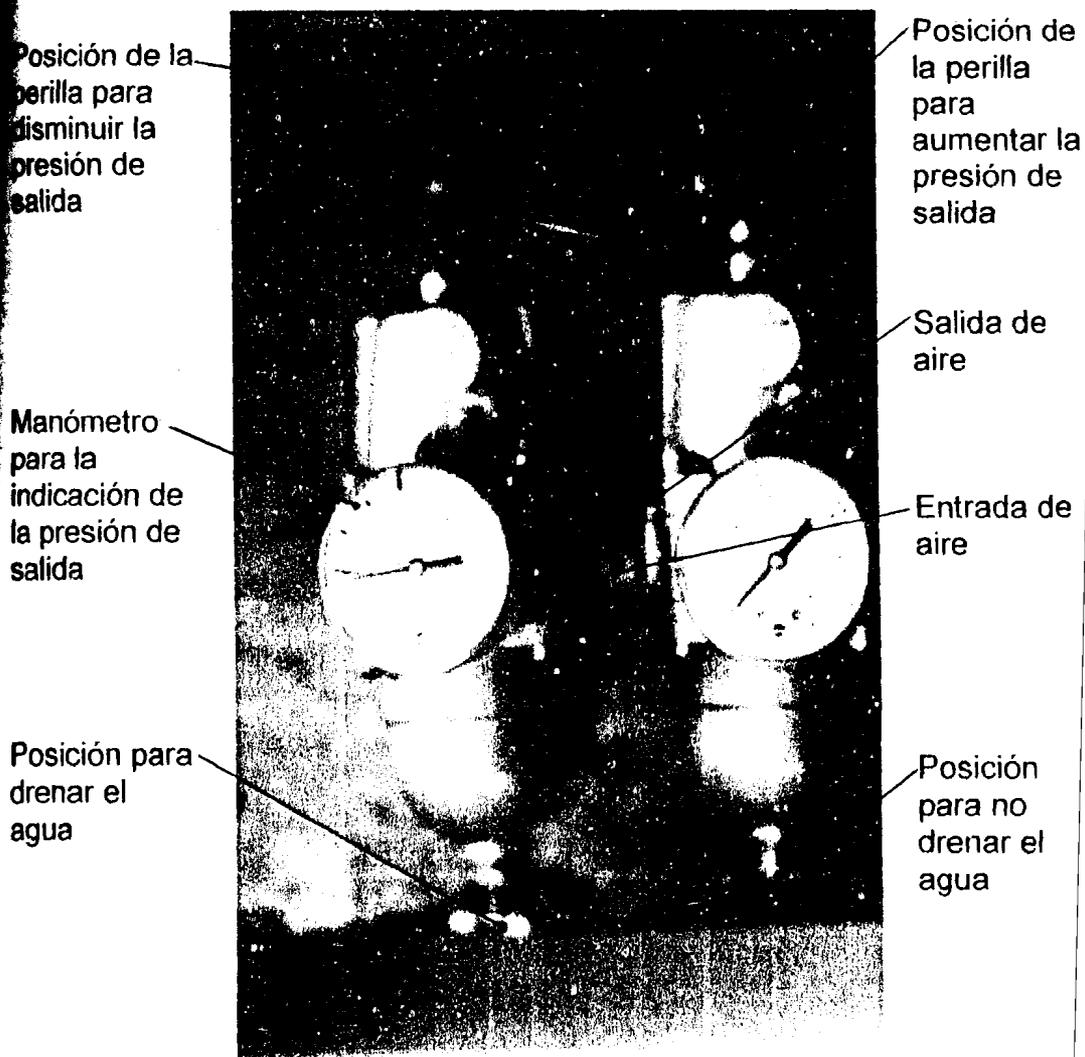


Fig. 3. 20 REGULADORES DE PRESION NEUMÁTICOS TAYLOR

Los muelles de los reguladores deben ser seleccionados de tal forma que permita el ajuste de la presión regulada del modo más conveniente, teniendo en cuenta que, si un elemento accionado por el aire es obligado a trabajar a la presión normal de entrada (presión primaria), en vez de hacerlo a la que le corresponde (presión secundaria), se experimenta excesivo desgaste de los órganos constructivos de tal elemento y un desperdicio grande de aire comprimido.

Descripción de operación de los reguladores de presión

Observase la fig. 3.21, donde se explica de una manera clara el comportamiento de un regulador de presión.

Los elementos principales para el funcionamiento de este regulador son:

- Un diafragma flexible que controla una válvula mediante una pequeña espiga,
- Y un muelle presionado contra el diafragma por un tornillo regulador.

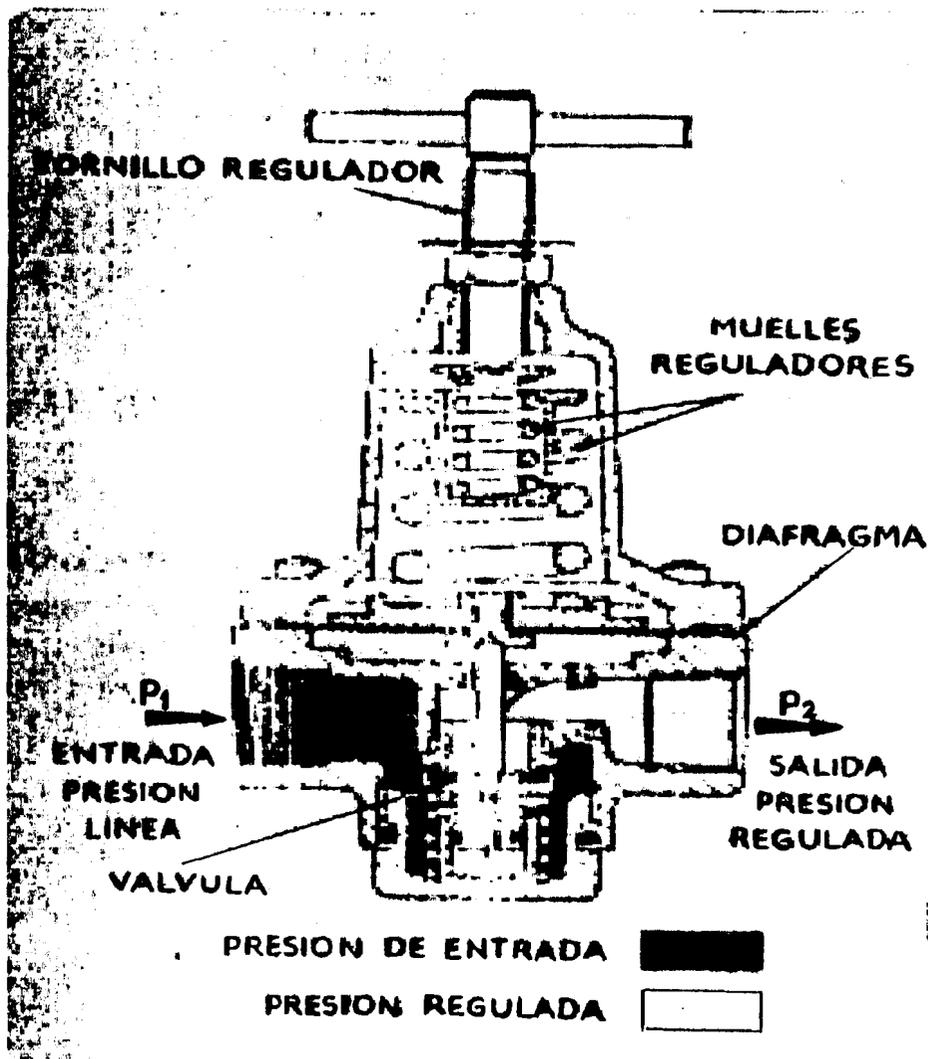


Fig. 3. 21a DISPOSICION INTERIOR DE UN REGULADOR DE PRESION



Fig. 3.21b DESPIECE DE UN REGULADOR DE PRESION TAYLOR

La cara del diafragma que recibe la presión del fluido es comunicada con el interior del orificio de salida, de manera que la presión regulada actúa sobre el diafragma.

Cuando el tornillo de regulación se afloja completamente no se aplica ninguna carga sobre el muelle regulador y consecuentemente, se cierra la válvula de paso. Contrariamente, al avanzar el tornillo de ajuste hacia el interior, se aplica una carga al muelle regulador que se transmite a la válvula a través del diafragma y del vástago de unión, abriéndose dicha válvula.

Cuando la presión regulada aumenta, aumenta la presión contra el diafragma, forzándolo a comprimir el muelle hasta que la carga ejercida por este es igual a la carga ejercida por la presión regulada. Si no hay demanda de caudal, este estado de equilibrio continuará con la válvula cerrada, pero si se produce un consumo en la presión regulada, el estado de equilibrio aparecerá con la válvula abierta en la medida necesaria para compensar la demanda, manteniéndose así la presión regulada.

Se han diseñado y fabricado reguladores de presión, del cual existen modelos con escape y sin escape (fig. 3.22). Este último discrepa del primero porque permite reducir la presión regulada al retroceder el tornillo de ajuste, e impide automáticamente la formación de una presión excesiva, según se observa en el detalle superior de la figura.

Otros como el regulador de presión Taylor posee este mecanismo en la parte inferior, a la vez que funciona como purga.

Los reguladores de presión poseen dos funciones o relaciones conocidas como "característica de caudal" y "característica de regulación". Las características de caudal establecen la relación entre la presión regulada y el caudal o cantidad de fluido que circula a través del regulador, siendo la presión secundaria independiente del caudal.

En teoría, la curva debería ser una recta horizontal. No obstante, en la realidad los reguladores de presión tienen una característica de caudal horizontal entre ciertos caudales, y fuera de ese margen ya no se cumple esta ley. Un regulador de

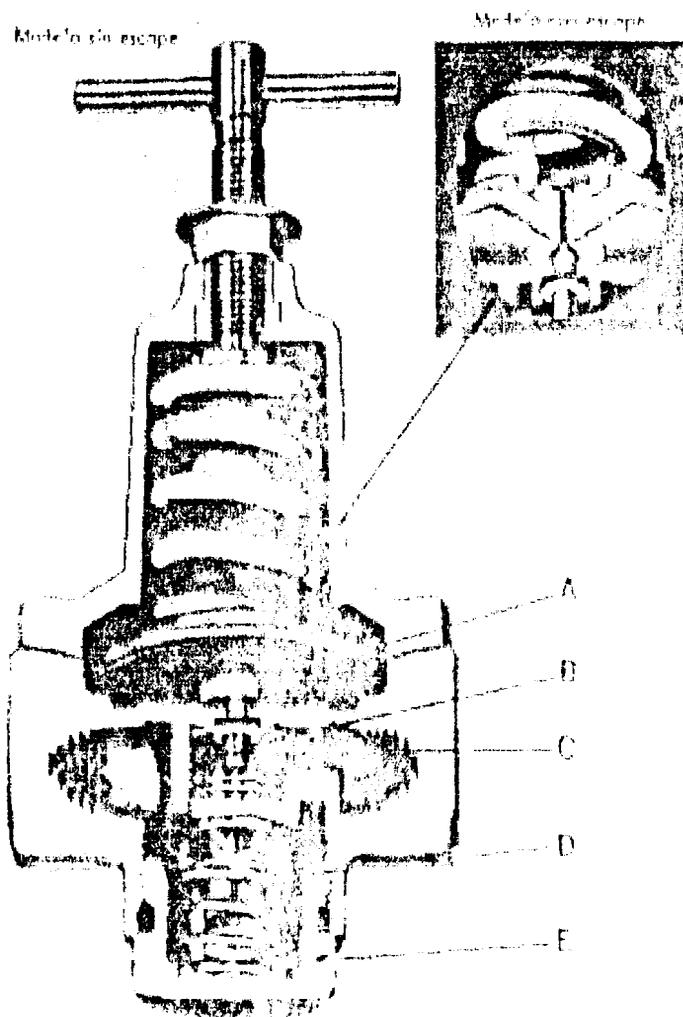


Fig. 3. 22 SECCION DE REGULADOR DE PRESION

presión será mejor cuando la curva de estrangulamiento para el regulador de presión totalmente abierto, en toda la gama de caudal, da una curva máxima próxima a la ideal.

La figura 3.23, a continuación, indica las características de caudal de un regulador de presión, para determinados valores de presión primarias.

Las características de regulación establecen la relación entre la presión regulada o presión de salida o secundaria y la presión de suministro o primaria. Idealmente, la presión secundaria no debería sufrir alteración alguna aunque la presión de suministro varíe sensiblemente. Sin embargo, las condiciones ideales nunca se obtienen con exactitud en la práctica.

El regulador de presión que asegure una presión regulada ampliamente constante, a pesar de las variaciones de la presión primaria, es el más acertadamente elegido.

La figura 3.24, indica las características de regulación de un regulador, dentro de la gama de curvas de máxima estabilidad

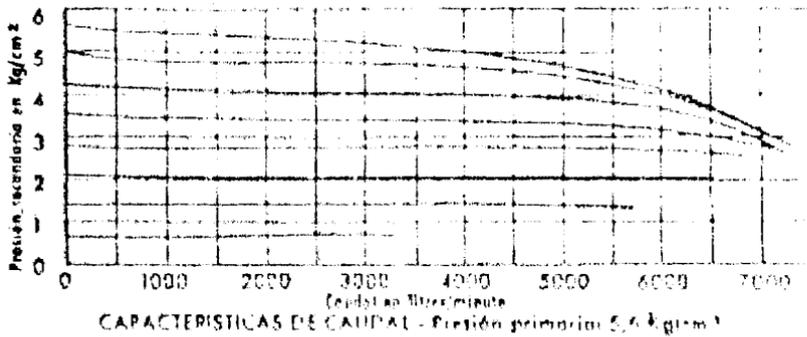
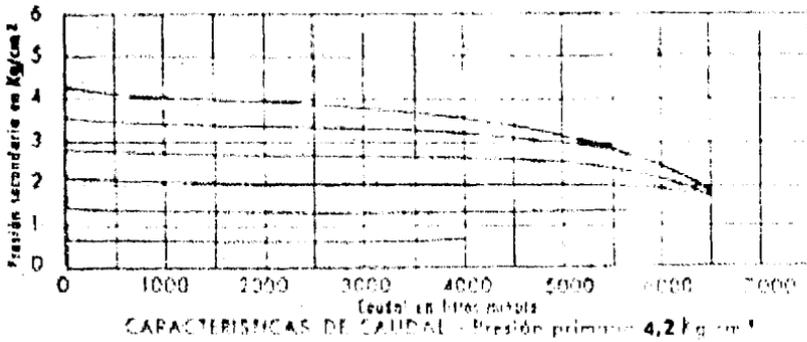
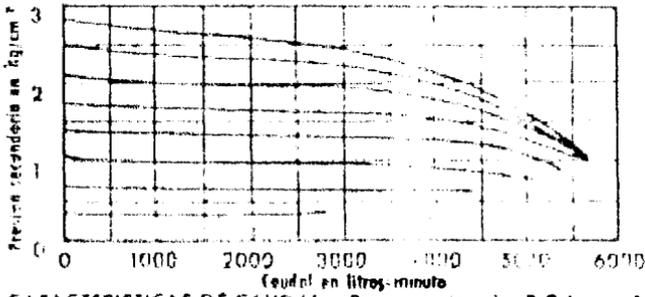


Fig. 3. 23 CARACTERÍSTICAS DE CAUDAL DE UN REGULADOR DE PRESIÓN

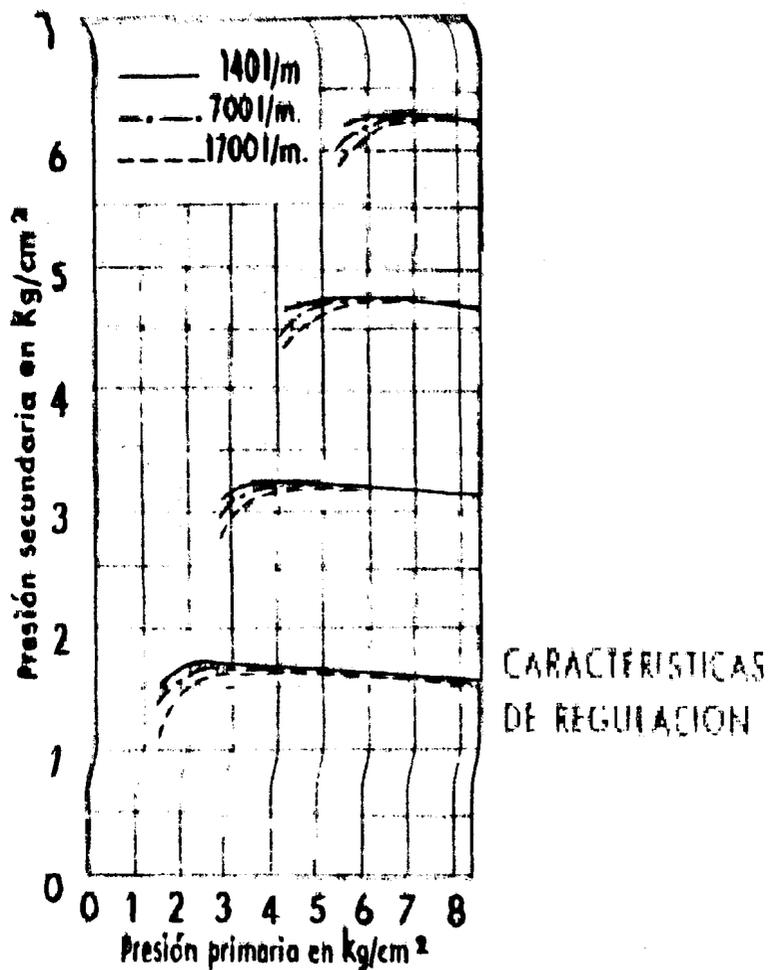


Fig. 3. 24 CARACTERÍSTICAS DE REGULACIÓN DE UN REGULADOR DE PRESIÓN

de presión obtenible, expresada en función del caudal y siendo el parámetro la presión primaria.

Recomendación: En caso de grandes diferencias de presión entre la presión primaria y la presión secundaria, no conectar sucesivamente dos reguladores de presión. La utilización de un regulador único tiene la ventaja de una mayor estabilidad en la presión secundaria.

Se recomienda elegir el tamaño del regulador de manera que en la tubería resulte un máximo de velocidad de aire de unos 25 a 30 m/s después del regulador.

Funcionamiento de los filtros para aire comprimido

Las figuras 3.25 y 3.26 sirven para indicar el funcionamiento de un filtro para aire comprimido y la de un filtro de purga manual respectivamente. La figura 3.27, indica un filtro pero con purga automática.

Se observa en la fig. 3.25, para eliminar los contaminantes del aire comprimido como líquidos y sólidos, el aire ingresa en el

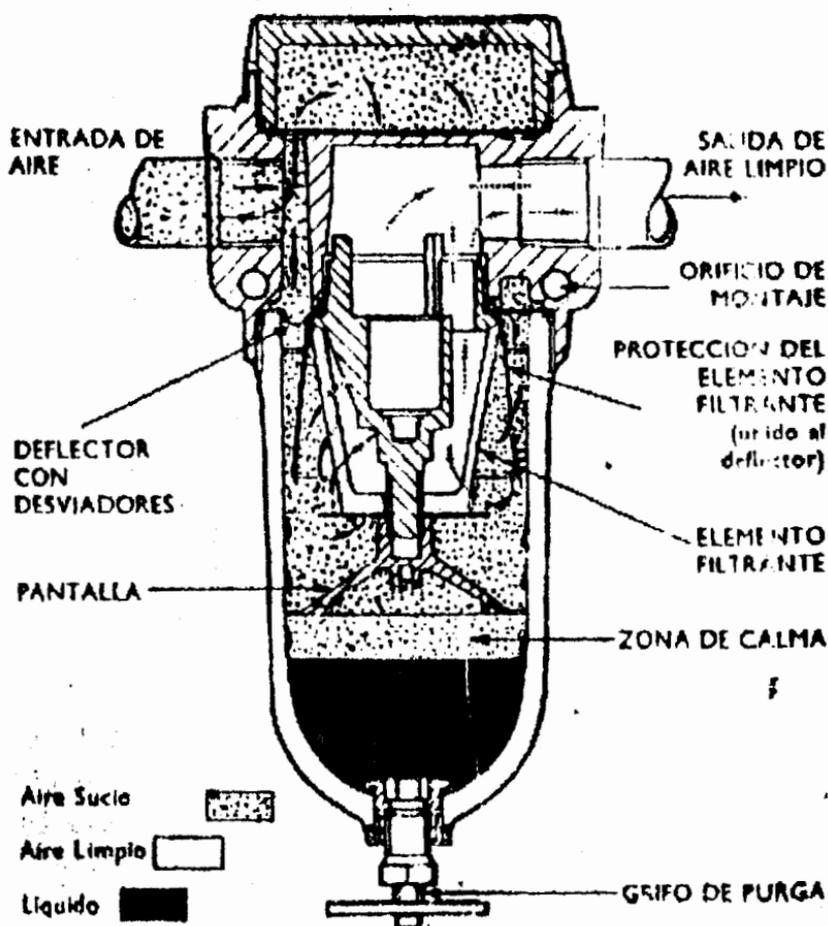


Fig. 3. 25 FUNCIONAMIENTO DE UN FILTRO DE AIRE

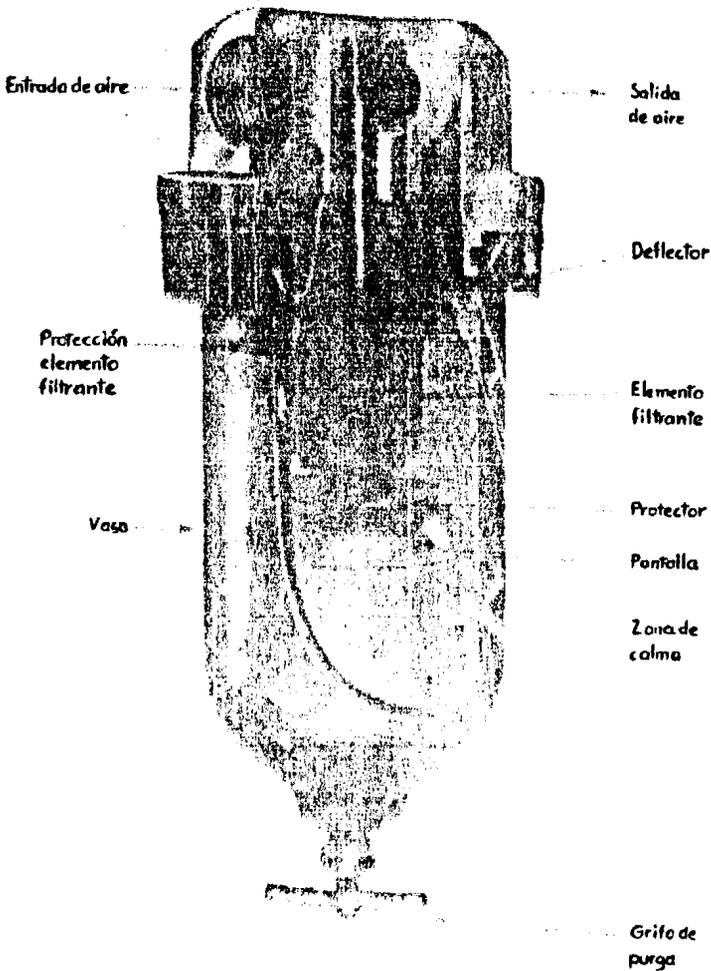


Fig. 3. 26 FILTRO PARA AIRE COMPRIMIDO DE PURGA MANUAL

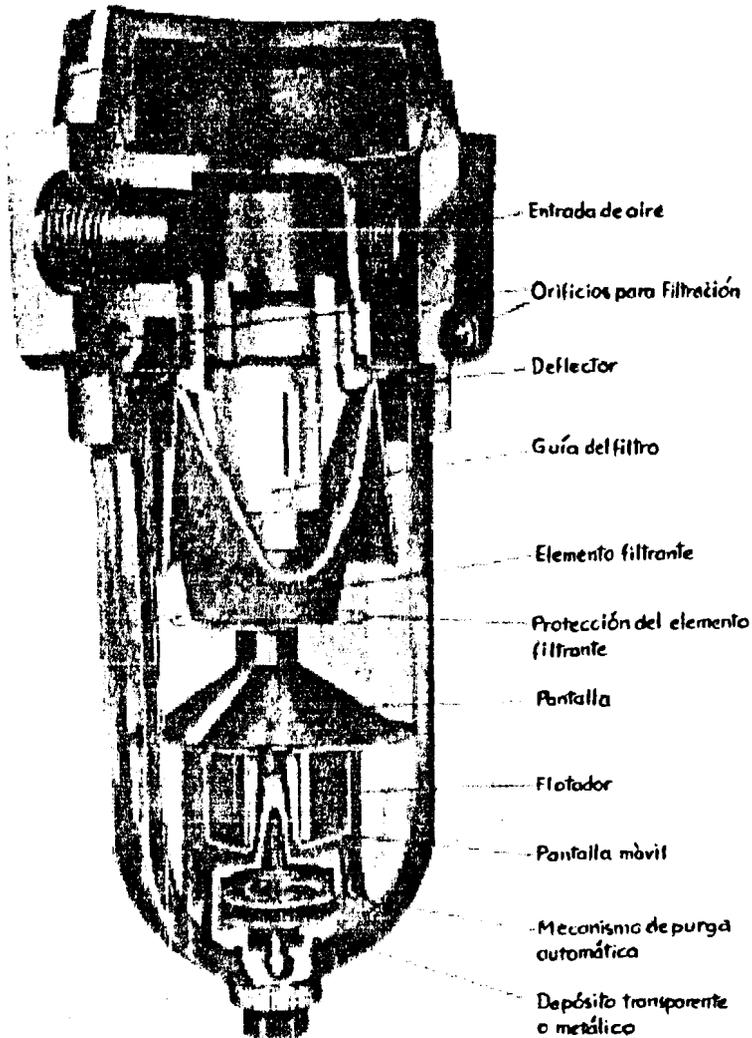


Fig. 3. 27 **FILTRO PARA AIRE COMPRIMIDO
DE PURGA AUTOMÁTICA**

reservorio a través de chapaletas direccionales y origina una corriente centrífuga que impulsa las partículas líquidas hacia la pared interior del reservorio del filtro. Desde aquí, los líquidos se precipitan hasta la "zona de calma" en la parte inferior del depósito, donde una pantalla separadora impide que la turbulencia del aire los haga retornar hacia la corriente de aire. Los contaminantes acumulados son evacuados al exterior mediante la simple apertura de la purga.

En su camino hacia la salida el aire es obligado a atravesar el elemento filtrante que elimina los sólidos que lleve el aire.

En la fig. 3.27 se indica un modelo con purga automática, donde los líquidos acumulados se vacían automáticamente.

Existe toda una gama de filtros de purga manual y purga automática, de acuerdo a los diferentes diámetros de tubería requeridos y a instalar.

3.3.6 Válvula solenoide

Antes de describir la operación de la válvula solenoide definamos brevemente lo que es un solenoide. Se trata de un electroimán

donde se produce un campo magnético por una corriente eléctrica.

Un solenoide es un devanado helicoidal de alambre aislado donde el sentido del devanado puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda. Los solenoides pueden presentarse entre los más importantes como solenoides sencillos, solenoides blindados con hierro, etc.

El solenoide con vástago tiene una varilla o barra de hierro movable, llamada macho o vástago. Cuando se excita la bobina, la varilla se magnetiza y la acción mutua del campo del solenoide sobre los polos creados por el vástago hace que el vástago se mueva hacia dentro del solenoide. La fuerza de tracción se vuelve de cero sólo cuando coinciden los centros magnéticos del vástago y del solenoide. Si la carga está conectada al vástago, este efectuará trabajo hasta que la fuerza que debe contrarrestar sea igual que la fuerza que el solenoide ejerce sobre el vástago. Si se desee una tracción intensa al final de la carrera del vástago, puede agregarse un tope, ver fig. 3.28.a.

Puede obtenerse un imán mecánicamente más resistente con el uso de un solenoide blindado con hierro, fig. 3.28.b, en el cual se ha arreglado una trayectoria de hierro para retorno del flujo.

La válvula solenoide es un dispositivo de la familia de los accionadores que se instala en un sitio formando un circuito neumático de control para interrumpir, desviar o permitir el paso de aire comprimido hacia un determinado punto del circuito. Básicamente se instalan para producir fallas en un punto del circuito de control.

Se energiza el solenoide que provoca la energía mecánica necesaria en la válvula para producir la desviación del aire comprimido que circula en la línea neumática y a través de ella.

Según el diseño de la válvula la desviación del aire puede producirse hacia otra línea instalada en la válvula o como fuga hacia la atmósfera sin causar la disminución de presión a la entrada en la válvula.

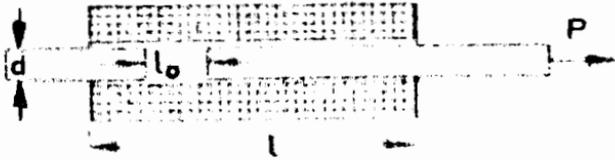


Fig 3. 28a SOLENOIDE CON TOPE

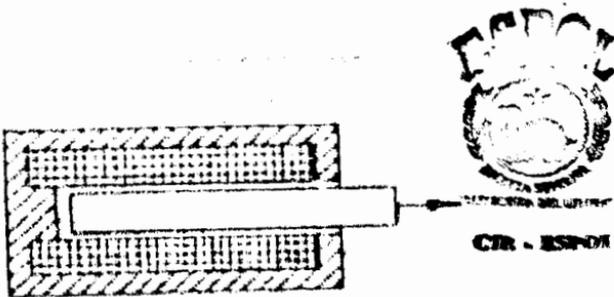


Fig. 3. 28b SOLENOIDE CON BOBINA BLINDADA CON HIERRO

3.3.6.1 válvula solenoide servopiloteada

La válvula solenoide servopiloteada es una consecuencia mecánica de la válvula solenoide, pero con la novedad que se agrega un servopilotaje o suministro adicional de aire comprimido (a mayor presión), que ayuda a la conversión en energía mecánica (con el movimiento de los mecanismos internos de la válvula) a partir de la energización de la bobina del solenoide.

CAPITULO 4

DESCRIPCION DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

4.1 Generalidades

El lazo de control de temperatura es el prototipo de un sistema de control que constituye la parte importante de muchas plantas industriales donde el principal objetivo es la optimización de operaciones y beneficios que el control automático ofrece. En tal virtud, se construyó este sistema para simular pruebas que pudieran ocurrir en la práctica, tener una idea de los problemas que se puedan presentar, estudiar la manera de enfrentarlos, para finalmente elegir la mejor solución.

El **sistema total** mencionado lo constituyen el **sistema a controlar** y el **lazo de control** en sí.

El **sistema a controlar**, lo conforman todo el sistema "no inteligente" (sin control) desde la operación de bombeo en el suministro de agua hasta la operación de drenaje. El circuito lo conforman en su orden:

sac1) el suministro de agua con su tubería y válvulas manuales de compuerta,

sac2) el tanque de reserva con el elemento de proceso (agua),

sac3) la bomba de succión, instalada a continuación del tanque de reserva,

sac4) el tramo de tubería y válvula manual de compuerta para retorno al tanque de reserva del suministro de agua en sobrepresión,

sac5) los tramos de tuberías, válvulas (check, manuales: de compuerta y globo), y accesorios instalados antes de sac6,

sac6) el tanque calentador,

sac7) los tramos de tubería, válvulas (check, manuales: de compuerta y globo) y accesorios antes del primer proceso a controlar, más el tramo de tubería y accesorios antes del segundo proceso a controlar desde sac6,

sac8) el primer proceso a controlar, que lo integran las tres opciones o vías de acceso por donde circulará el fluido de proceso. Dichas vías se presentan como serpentines, dos de los cuales tienen forma helicoidal y recta cuya finalidad es la de medir y comparar la respuesta en condiciones rápidas,

sac9) el segundo proceso a controlar, o tanque de proceso con su fluido de proceso en condiciones consideradas lentas,

sac10) los tramos de tuberías, accesorios y válvulas manuales de compuerta hasta la descarga al tanque de reserva o al ambiente desde sac9.

Cabe destacar que dentro de este sistema, se han instalado un termostato eléctrico de dos posiciones, a la salida del tanque calentador para seguridad del mismo y un medidor de flujo del tipo rotámetro para regular y determinar la cantidad de: agua caliente a la salida de la válvula de control y agua que circula en el sistema en general.

El **lazo de control**, lo conforman todo el equipo de instrumentos, conexiones: neumáticas, eléctricas, electrónicas y accesorios que hacen posible el control de los procesos dentro del sistema a controlar. Nace desde las fuentes de suministro neumáticas o electrónicas y eléctricas.

Si el **lazo de control de temperatura** es de tipo **neumático**, la fuente de suministro utilizada es de naturaleza neumática y eléctrica. La fuente de suministro de aire es un compresor eléctrico, el cual proporciona el fluido o caudal y la presión de operación requeridos de acuerdo a la necesidad de cada uno de los instrumentos existentes en

el lazo. La presión fijada en el compresor debe ser mucho mayor que la presión de operación de los instrumentos, para garantizar que en ellos obtendremos el suministro deseado, debido a las pérdidas que se producen en las cañerías y accesorios que forman el circuito. Además que, se debe considerar que las válvulas servopiloteadas trabajan a una presión de operación superior a la de suministro de los instrumentos.

El circuito de control empieza desde el compresor hasta el cierre de dos válvulas neumáticas que impiden el paso de aire hacia los lazos de control de presión y caudal en el siguiente orden:

- Iz1) compresor de aire, con sus válvulas de drenaje,
- Iz2) tramos de tubería con sus accesorios hasta la entrada del laboratorio de controles antes de la unidad de mantenimiento general, con su válvula de compuerta y drenaje antes de Iz3,
- Iz3) unidad de mantenimiento neumática general, con regulador de presión de aire. A continuación, se construyó una bifurcación del suministro de aire hacia la entrada del lazo de control de presión y hacia el lazo de control de temperatura,
- Iz4) tramos de tubería, cañería y accesorios con sus válvulas de paso cada uno hasta la entrada de los lazos de control mencionados en Iz3,

lz5) tramo de cañería, filtro, accesorios y válvula neumática de bola, que permiten la toma de suministro general dentro del lazo de control de temperatura y bloqueo del paso de aire hacia el lazo de control de caudal,

lz6) tramos de cañería, válvula de paso neumática, filtro, y primer regulador de presión de aire con sus accesorios, que representan la primera toma de aire de suministro hacia algunos instrumentos de control que utilizaremos en el circuito,

lz7) tramos de cañería y segundo regulador de presión de aire con sus accesorios, que representan la segunda toma de aire de suministro hacia los restantes instrumentos de control y toma del servopilotaje de las válvulas que producirán las fallas en el circuito de control,

lz8) todos los instrumentos de control que son en su orden: transmisores, controlador y válvula que se utilizarán en el circuito eléctrico-neumático, más los convertidores de corriente a presión y viceversa que operarán en el circuito electroneumático con la computadora y el control electrónico. El estudio del circuito eléctrico-neumático será básicamente una de las herramientas para el objetivo de nuestras pruebas,

lz9) todos los otros tramos de cañerías, válvulas neumáticas servopilotadas, válvulas de paso neumáticas y accesorios que servirán para cerrar el circuito de control. En ellos se incluyen los tramos de

cañerías que llevan la señal de salida y de entrada entre los instrumentos.

4.2 Esquemas principales

4.2.1 Sistema a controlar

Referirse a la figura 4.1

4.2.2 Lazo de control

Referirse a la figura 4.2

4.3 Descripción y funcionamiento

4.3.1 Sistema a controlar

El sistema a controlar lo podemos definir de dos maneras:

- a) de *circuito abierto*,
- b) de *circuito cerrado*,

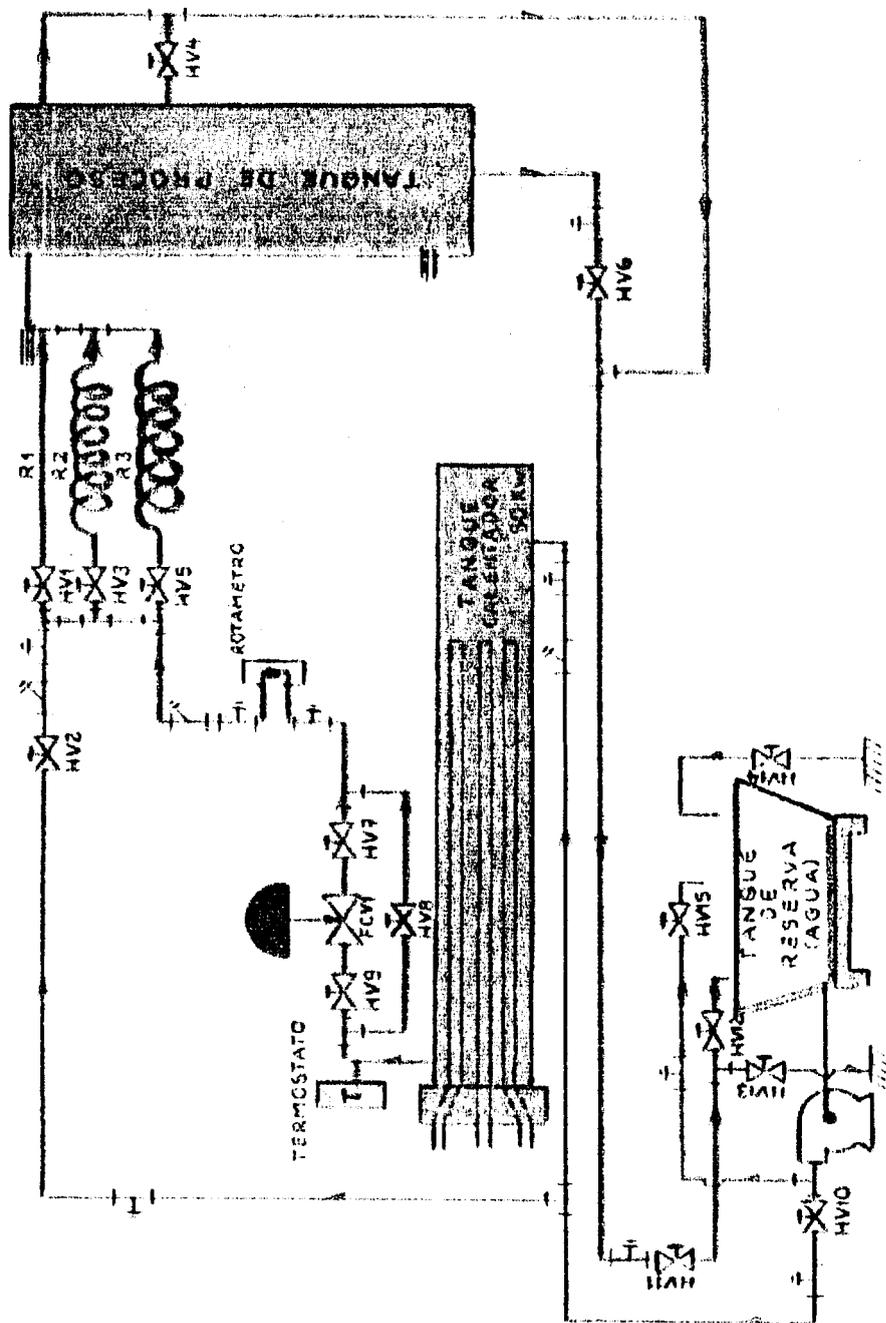


Fig. 4. 1 SISTEMA A CONTROLAR

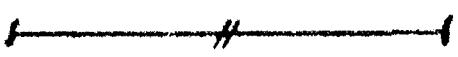
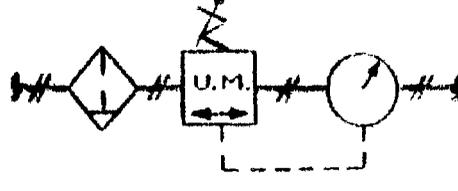
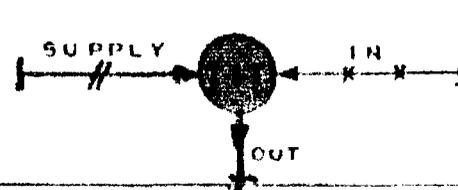
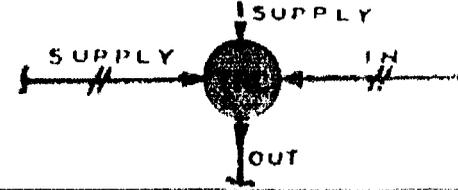
Nº	DESCRIPCION	DESIGNACION Y REPRESENTACION
1	ELEMENTO PRIMARIO	
2	ALTERNATIVA NEUMATICA	
3	ALTERNATIVA ELECTRICA	
4	ALTERNATIVA ELECTRONICA	
5	VALVULA DE PASO NEUMATICO CON SEÑAL NEUMATICA	
6	REGULADOR NEUMATICO DE PRESION	
7	TRANSMISOR INDICADOR DE TEMPERATURA	
8	CONTROLADOR REGISTRADOR DE TEMPERATURA	

Fig. 4.2b DESCRIPCIÓN, DESIGNACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PANEL DE CONTROL DE TEMPERATURA

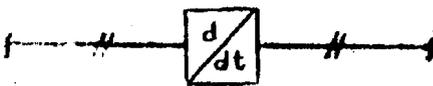
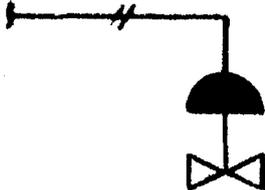
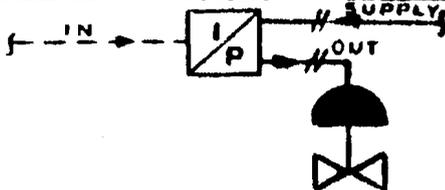
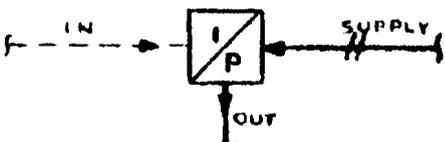
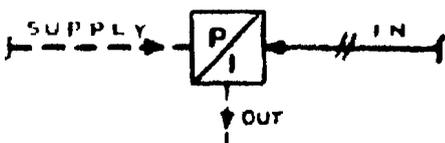
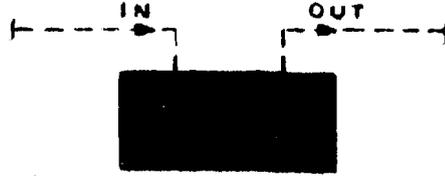
Nº	DESCRIPCION	DESIGNACION Y REPRESENTACION
9	PRE-ACTUADOR ESTABILIZADOR	
10	ELEMENTO FINAL DE CONTROL VALVULA DE CONTROL DE FLUJO DE ACCIONAMIENTO NEUMATICO FCM	
11	ELEMENTO FINAL DE CONTROL OPCION DE CONTROL ELECTRONICA	
12	CONVERTIDOR DE CORRIENTE DC A PRESION NEUMATICA CON SUMINISTRO DE AIRE	
13	CONVERTIDOR DE PRESION NEUMATICA A CORRIENTE D.C. SUMINISTRO DE CORRIENTE A.C.	
14	CONTROLADOR ELECTRONICO DE CORRIENTE D.C.	

Fig. 4.2b DESCRIPCIÓN, DESIGNACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PANEL DE CONTROL DE TEMPERATURA

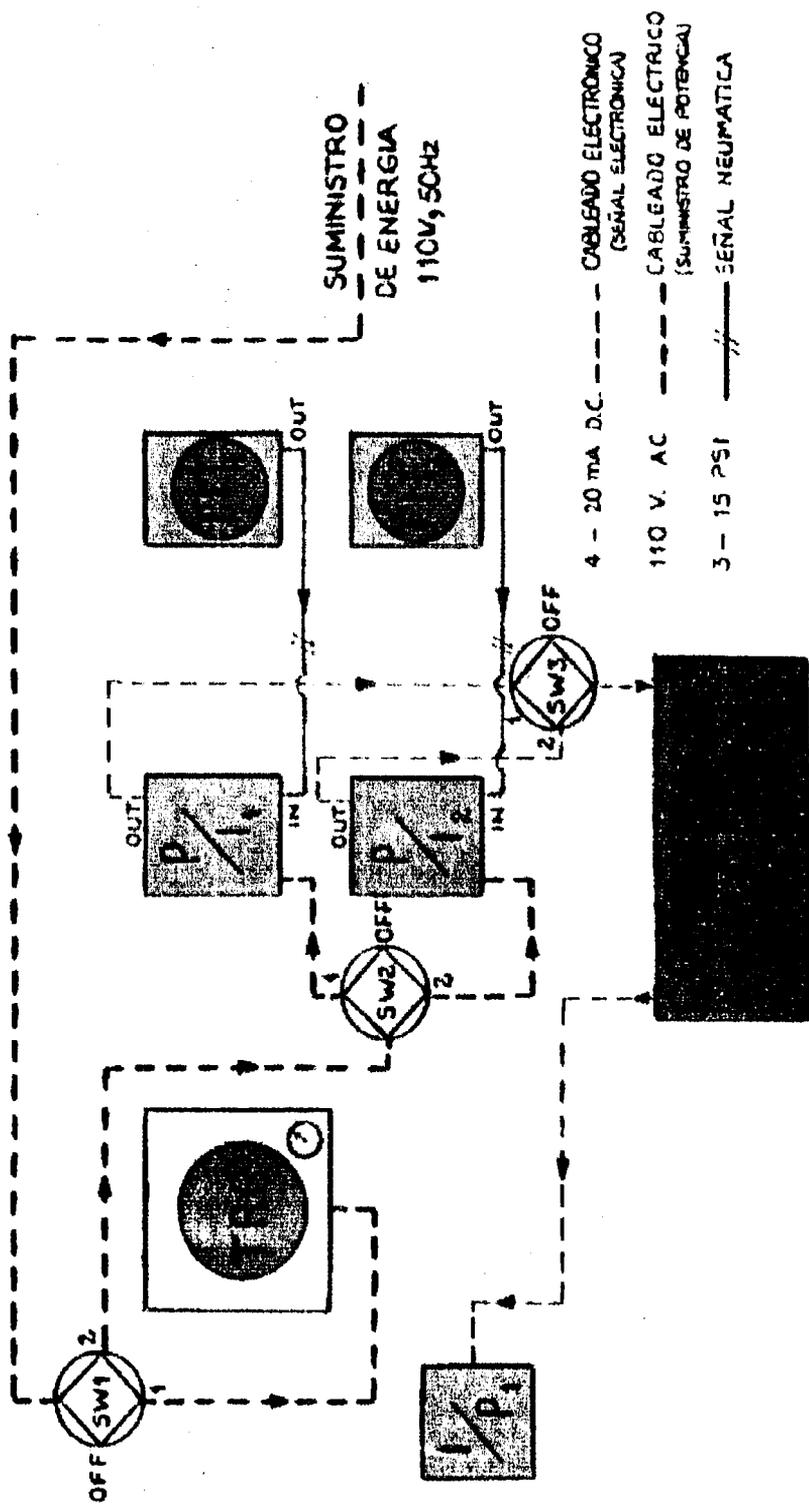


Fig. 4. 2c CONEXIONES ELECTRICAS Y ELECTRONICAS DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

En **circuito abierto**, participan todos los elementos descritos en los literales sac del numeral 4.1, pero, funcionando con la **descarga a la calle** del fluido de proceso (no es recogido en el tanque de reserva). En **circuito cerrado**, también existe tal relación, pero, funcionando con la **descarga hacia el tanque de reserva**.

El sistema a controlar lo conforman los siguientes elementos armados en una estructura metálica de 251cm*200cm*51cm sobre cuatro carruchas soldadas, fabricada con ángulo de 4cm*2mm de espesor:

- 1) Bomba marca: Franklin Electrical, de 0.5 HP, 3450 r.p.m y 115/230V.
- 2) Tanque de depósito (reserva) de Eternit, para almacenamiento de agua con capacidad de 1m³ de color azul.
- 3) Tanque calentador cilíndrico, construido con plancha de acero de 3 mm, de 16cm de diámetro y longitud 168.5 cm, con tres resistencias eléctricas internas en forma de "U", cuya capacidad es de 30 kw, empernado a la estructura y aislado térmicamente.

- 4) Recipiente de almacenamiento cilíndrico (llamado **proceso**), construido con plancha de acero de 2 mm de espesor, de 31.7 cm de diámetro y longitud 124.5 cm, soldado a la estructura; con sencilla tapa metálica circular, pedazo de tubo de pvc instalado en la carga del proceso, dos boquillas soldadas para colocar el control visual de nivel.
- 5) Válvulas de compuerta manuales de paso de flujo, para tubería de acero galvanizada, **HV**:
- nueve válvulas taiwanesas, de $\frac{1}{2}$ " de diámetro,
 - cuatro válvulas marca: NIBCO, de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, con las siguientes inscripciones: T-113, 125 SWP, 200 WOG,
 - una válvula marca: NIBCO, de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, con los siguientes registros: T-113, 125 SWP, 200 WOG,
 - una válvula marca: NIBCO, de 1" de diámetro, con las siguientes inscripciones: T-113, 125 SWP, 200 WOG,
- 6) Válvulas de globo manuales, para tubería de acero galvanizada, **HV**, reguladoras de flujo: una de 1" y otra de $\frac{1}{2}$ ".

7) Tres válvulas check (paso en un solo sentido), para tubería de acero galvanizada de $\frac{1}{2}$ " de diámetro marca NIBCO, con las siguientes inscripciones:

- una válvula: 125 SWP, 200 WOG,
- dos válvulas: 300 SWP, 600 WOG.

8) Accesorios y tuberías de acero galvanizada en diámetros de:

- codos de 90° : 26 de $\frac{1}{2}$ " , 2 de $\frac{3}{4}$ " , 3 de 1" , 2 de 2" ,
- T: 22 de $\frac{1}{2}$ " , 4 de 1" , 2 de $\frac{3}{4}$ " ,
- Y: 1 de $\frac{1}{2}$ " ,
- uniones universales: 1 de $\frac{3}{8}$ " , 13 de $\frac{1}{2}$ " , 2 de 1" , 1 de 2" ,
- reducciones: 1 de 1- $\frac{1}{2}$ " a 1" , 1 de 1" a $\frac{3}{4}$ " , 10 de 1" a $\frac{1}{2}$ " , 1 de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " , 1 de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{8}$ " .

Se instalaron accesorios "T" de $\frac{1}{2}$ " con sus reducciones a $\frac{1}{4}$ " y tapones, sirven para medir la presión de agua en determinados puntos donde eventualmente se colocarán dos manómetros con rosca de $\frac{1}{4}$ " .

9) Tuberías y cañerías en diámetros de:

- de $\frac{1}{2}$ " . Long. aprox.: 23 m.

- de $\frac{3}{4}$ " . Long. aprox.: 0.4 m.
- de 1" . Long. aprox.: 1. 7m.
- de 2" . Long. aprox.: 0.3 m.
- 1 serpentín de cobre 5/16" O.D. Long. apróx.: 5.34 m. con sus conectores y reducciones desde tubería de $\frac{1}{2}$ ".
- 1 serpentín de cobre 3/8" O.D. Long. apróx.: 6.62 m. con sus conectores y reducciones desde tubería de $\frac{1}{2}$ ".

10) Aislamiento:

- pares de $\frac{1}{2}$ canutos de lana de vidrio para tubería de $\frac{1}{2}$ " galvanizada en longitud de 4m y mantas del mismo material para el tanque calentador, de acuerdo al cálculo de espesor óptimo. En el montaje se utilizó como forro, retazos de lienzo pegado con cola blanca y capas de pintura de caucho color blanco hueso.

El **sistema a controlar** del lazo de Temperatura, dispone de 18 válvulas manuales, entre las que se encuentran 2 válvulas de globo para regular el flujo de agua y 16 válvulas de compuerta de simple apertura y cierre. Aquellas, instaladas, enumeradas y codificadas en el tablero del panel principal. La simbología utilizada para su reconocimiento es **HV#**, donde el símbolo "#", se reemplazará por el número de la

válvula que queremos describir; por ejemplo la válvula manual 1, se identificará como **HV1**, y así sucesivamente.

La descripción y funcionamiento de las válvulas en todos los lazos asociados, igual que aquellos, es independiente, trabajando uno a la vez. Esto, es apropiado para el entendimiento, no mecanizado de cada sistema. Las válvulas HV10 y HV15 son para tubería de 1", HV16 para tubería de $\frac{3}{4}$ " el resto para tubería de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. HV10 y HV2 son las dos válvulas de globo reguladoras de flujo, la primera se encuentra instalada en el suministro de agua después de la bomba de 1"; y la segunda, en la entrada de agua fría de mezcla, al primer proceso, con $\frac{1}{2}$ " de diámetro. La ubicación de las válvulas check que son para evitar el retorno de agua, las sobrepresiones, y los choques térmicos, es la siguiente: en el retorno de agua caliente desde el calentador, en el retorno de agua caliente de mezcla desde el primer proceso (en su entrada), y a la entrada de agua fría de mezcla al primer proceso o retorno de agua fría.

Sobre las "T" galvanizadas, 11 son para tomar lecturas manométricas, 10 con sus reducciones de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ " de

diámetro, con sus tapones de $\frac{1}{4}$ " y una con las siguientes reducciones: 1" a $\frac{3}{4}$ " de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ ".

De las reducciones galvanizadas, 5 están soldadas al tanque de proceso, 2 soldadas al tanque calentador, 2 instaladas en el sistema de tuberías después de la válvula de suministro de agua de 1" de diámetro, 1 en el retorno al tanque de reserva cuando hay sobrepresión en la bomba.

En cuanto a la válvula neumática de control de flujo que pertenece al lazo de control y que enlaza el sistema a controlar será identificada en el tablero del panel como **FCV1** o **TCV1**.

4.3.1.1 Funciones de las válvulas HV# y FCV1

Válvula HV1: Permite o restringe la entrada de agua hacia la mezcla en el **primer proceso**, por la **opción1** o serpentín **R1**(se trata de tubería de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, la misma que se encuentra aislada térmicamente). En este punto o válvula se encuentran el agua fría y caliente que siguen por dos caminos diferentes.

Válvula HV2: Permite o restringe el paso de **agua fría**, única vía de llegada hacia la mezcla. Viene bifurcada hacia la tubería del tanque calentador y hacia la tubería de entrada a la mezcla a través de una "Y" que nace del tanque de suministro o de reserva, pasando por la bomba y por la válvula HV10.

Válvula HV3: Entrada del flujo de agua hacia la mezcla en el **primer proceso** en **R2**, o serpentín de enfriamiento de cobre de 5/16" de diámetro u **opción2**, según el tablero del panel central.

Válvula HV4: A través de ella se permite o restringe la salida del agua del **tanque de proceso** o **segundo proceso**, por medio de una tubería que nace de un orificio practicado en la superficie lateral a 0.70 m desde el fondo de dicho recipiente.

Válvula HV5: Podemos permitir o anular el paso de agua mezclada hacia el serpentín de enfriamiento de cobre **R3**, u **opción3**, de 3/8" de diámetro, perteneciente al **primer proceso**.

Agua mezclada circulará a través de las **3 opciones** del **primer proceso**, abriendo cualquiera de las válvulas correspondientes (una a la vez), la señal de entrada de temperatura será obtenida por el sensor del transmisor indicador neumático **TIT1**, información obtenida antes de ingresar el fluido al **segundo proceso**. El objeto de pasar el agua mezclada a través de los serpentines es el de observar la respuesta a través de ellos.

Las válvulas HV1, HV3 y HV5 se definen como el punto de encuentro o *punto de mezcla* de aguas fría y caliente.

Válvula HV6: Permite o obstruye el flujo de salida o flujo de retorno desde el tanque de proceso por un orificio practicado en la cara transversal en el fondo del tanque.

Válvula HV7: Cierra o abre el paso del flujo de agua caliente en la vía: **calentador de agua - HV9 - FCV1- HV7**, constituyéndose en la última válvula

por donde circula el agua caliente por la vía de la válvula de control de flujo hacia el punto de mezcla antes del rotámetro.

Válvula HV8: Acceso de agua caliente directamente desde el calentador hacia el punto de mezcla sin pasar por la vía de la válvula de control FCV1. Puede desempeñar la función de una válvula no automática de las de globo, controlada manualmente de acuerdo al requerimiento detectado por la vista o el tacto. Se la puede utilizar cuando el sistema esté funcionando a través de ella, mientras se da mantenimiento, se calibra o desmonta FCV1; entre tanto, se encuentra en stand-by, cerrada.

Válvula HV9: Es parte de la unidad de mantenimiento que permite, ajustar, calibrar o desmontar la válvula FCV1 para ajuste mayor, y permite o restringe el flujo de agua caliente desde la salida del calentador en la vía hacia la válvula de control.

Válvula HV10: De las del tipo de globo *regula flujo*.

A través de la cual suministramos agua *fría* al sistema, *relativa al proceso*, que será dirigida hacia la bifurcación por una "Y" de $\frac{1}{2}$ " galvanizada, la misma que entregará agua "fría" al calentador y a la entrada de los dos procesos. En resumen, regula el flujo de agua de suministro estabilizando el sistema. Se encuentra instalada en este orden: a continuación del retorno de agua para depresión de la bomba, la salida de esta y el tanque de reserva. Cuando trabajamos, con el lazo de temperatura o los lazos de presión, caudal y nivel, se deberán cerrar las válvulas para el acceso de agua de suministro hacia dichos lazos.

Válvula HV11: Permite o restringe el paso del flujo de agua de retorno que viene del tanque del segundo proceso y que pasa previamente por las válvulas HV6 y HV4 ó HV6 solamente, si el nivel en el tanque de proceso no ha alcanzado la altura del orificio practicado en la pared lateral del tanque o simplemente cuando queremos descargar el

tanque, sin considerar el nivel en él. Aisla el sistema de control de caudal y nivel con el de temperatura, minimizando los errores de control del sistema primeramente citado, ya que por la descarga del mismo y por el principio de vasos comunicantes, cuando está en funcionamiento se descarga agua hacia el lazo de temperatura.

Válvula HV12: Entrega el agua de proceso al tanque de suministro. El agua que viene de los procesos es el *retorno*. El retorno podría llegar hasta el tanque de suministro como a la tubería de desagüe. Si el retorno es a la tubería de desagüe (a la calle), el sistema es de circuito abierto, en el otro caso es de circuito cerrado.

Válvula HV13: Entrega el agua de retorno desde el proceso directamente hacia el desagüe. Las válvulas HV12 y HV13 son de retorno de agua y están ubicadas a continuación de la válvula HV11 en el retorno. Estas pueden estar abiertas para

descargar el agua del proceso a la calle o al tanque ó a la calle y al tanque de suministro.

Válvula HV14: Por cuyo intermedio, permitimos o cerramos el paso de agua fresca al tanque de suministro de acuerdo al requerimiento del sistema o la necesidad del caso. Se encuentra muy próxima al tanque de suministro.

Para efectos de evitar una posible sobrepresión en las tuberías o en el tanque calentador por estrangulamiento de flujo, debido al cierre de alguna válvula en el sistema ya que la bomba trabaja continuamente sin protección contra las altas presiones (presostato). Desahogamos el sistema desde una bifurcación a continuación de la salida de la bomba de tal manera que parte del caudal bombeado regrese al tanque de reserva cuando ocurren estas sobrepresiones (otra salida emergente es abriendo la válvula HV8 si se cerrara permanentemente FCV1), y se controlan las presiones mediante *tomas* de presiones instaladas

a lo largo del sistema. Aquello permite tener control de las presiones de operación, de las válvulas manuales de flujo y evitar que se dañen por golpeteo.

Al respecto de la bifurcación, es practicada en la línea de alimentación de agua en el lazo de control de temperatura, sin alimentación hacia los otros lazos de control y para retorno del exceso a la reserva. En tanto que, cuando se desee trabajarlos, la bomba envíe todo su caudal, cerrando la válvula de retorno y abriendo las correspondientes.

Se utilizan tres válvulas adicionales en el orden a la reserva, HV15, HV16 y HV17. La primera, permite al flujo desde la bomba, dirigirse hacia el lazo de control de presión, siendo esta para tubería de 1" en diámetro. El flujo de agua hacia el citado lazo no se le debe permitir llegar al interior de su tanque de proceso, cuando es el requerimiento, por dicho motivo, se instaló la válvula HV16 para tubería de $\frac{3}{4}$ " en diámetro, que cierra el paso de suministro

por dicha vía. A continuación, y antes de la instalación de la válvula precedente, se construyó otra bifurcación, que permite el retorno del agua desviada en primera instancia, hacia el tanque de reserva. Se instaló previamente, otra válvula para tubería de $\frac{1}{2}$ " HV17, por si se requiere, no regresar el agua hacia la reserva y que continúe su marcha hacia el sistema de presión.

En todo caso, si el objetivo es reducir el caudal para cualquiera de los lazos, la bifurcación practicada desahogará a la bomba, ya que siempre trabajará al caudal para la que fue diseñada y cualquier restricción en una válvula elevará la presión en la bomba y en las tuberías.

Válvula HV18: Del tipo de las de bola, para tubería galvanizada de diámetro 1", permite o cierra el paso de flujo de agua hacia el sistema de caudal y nivel.

Con el objeto de optimizar el funcionamiento del sistema se instalaron tres válvulas check, para

evitar retornos de agua caliente o fría que producirían eventuales errores de funcionamiento, choques térmicos bruscos, altas temperaturas y contrapresiones en mecanismos, en la siguiente disposición:

- 1) Antes de la entrada del flujo de agua fría al tanque calentador,
- 2) A la salida del agua caliente desde el calentador y antes de la entrada al punto de mezcla,
- 3) En la bifurcación del agua fría antes del encuentro con el punto de mezcla.

Válvula de control FCV1: De accionamiento directo para control de flujo neumática, de la marca Taylor, de aire para cerrar o normalmente abierta, es conocida como elemento final de control. Se encuentra instalada entre las válvulas manuales que permiten su mantenimiento, cerrándolas, y abriendo la válvula HV8, que permite el paso normal de agua caliente en el sistema sin control automático.

La acción de la presión de aire que viene del controlador, debido a la corrección que este deberá realizar por el error detectado en la variable controlada, será transmitida a la válvula de control para abrir o cerrar el orificio a través del cuál circulará el agua caliente de acuerdo al flujo requerido para efectuar la corrección.

La velocidad de circulación del agua fría y en consecuencia indirectamente su temperatura se controlan a través de la válvula manual HV2. La velocidad de circulación del agua caliente se regula por la válvula TCV1 o FCV1 bajo el control del controlador TRC de registro de temperatura. Este control recibe una señal de alguno de los transmisores de temperatura TIT1 ó TIT2, dependiendo de la apertura de las válvulas de paso neumáticas de bronce NV5 ó NV6 respectivamente. El sensor de TIT1 está instalado en el fin de los serpentines R1, R2 y R3, que llevan la mezcla de agua caliente y fría justo antes de que esta entre en el recipiente C1 o tanque de proceso; mientras que

el bulbo de TIT2 está instalado en el fondo del citado recipiente. Cuando se está trabajando con TIT1 el efecto de variar los retardos de propagación se puede estudiar interponiendo una u otra de las tres longitudes de tubo entre el punto de encuentro del agua caliente y fría y TIT1. Cuando se está utilizando TIT2 tiene lugar un retardo de propagación como consecuencia del volumen de agua contenido en C1.

4.3.2 Lazo de control

La tabla 4.1, a continuación nos ayudará a identificar los instrumentos utilizados en el lazo de control de temperatura. Se escribirá el número, la descripción, la cantidad existente y su abreviatura según la bibliografía, lo conforman los siguientes instrumentos de la marca **Taylor**.

N°	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	ABREVIATURA
1.	Transmisor Indicador neumático de temperatura	2	TIT1 TIT2
2.	Controlador Registrador neumático de temperatura	1	TRC
3.	Transductor o convertidor de presión de aire a corriente	2	P/I1 P/I2
4.	Transductor o convertidor de corriente a presión de aire	1	I/P1
5.	Válvula neumática regula flujo para control de temperatura	1	FCV1 TCV1
6.	Regulador de presión de aire	2	Reg.1 Reg.2

TABLA 4.1

1. El transmisor indicador neumático de temperatura

Su campo de medida se encuentra comprendido entre los 0°C hasta los 100°C y una resolución (mínima división) de 1°C, lo cual quiere decir que su alcance o Span es de 100°C, con acción directamente proporcional por efectos de la expansión del gas dentro del resorte Bourdon.

2. El controlador registrador neumático de temperatura

Su campo de registro es de 0 hasta 100% (0 a 100°C) de la escala de la variable a controlar, por lo tanto un alcance del 100% (100 °C) y su resolución de 1% (1°C) del alcance.

Tiene instalado un reloj de registro, que mueve indefinidamente, en funcionamiento, un plato circular sobre el cuál se coloca la carta de registro con una frecuencia de rotación de 30 minutos por revolución (suministro de energía eléctrica al motor del mismo de 117V y 60 Hz.).

Ejecuta la acción directa o inversamente proporcional, de acuerdo al movimiento vertical rotacional de la perilla de un tambor neumático ubicado sobre el lado superior derecho del control, con ella balanceo la salida, regulándola en cualquier tipo de acción.

Una perilla con la escala graduada ajusta la sensibilidad o ganancia y está ubicada sobre el lado superior derecho cerca de la regulación de la salida.

De acuerdo a las pruebas realizadas podemos establecer una escala aproximada entre la ganancia y la sensibilidad utilizada por el control. Observar tabla 4.2

Sobre la parte inferior dentro de la escala del control, se encuentran instalados dos discos graduados. El del lado derecho, ajusta las repeticiones por minuto, r_i , de corrección de la acción integral, que van desde 0 hasta 200, avanzando en dirección del movimiento de las manecillas del reloj y cerrándolo o encerándolo en dirección contraria a este movimiento hasta el tope. El disco que se encuentra hacia el lado izquierdo, corresponde al ajuste de la acción derivativa, T_d o τ_d , en minutos, graduados en un campo de medida de 0 a 20 minutos; el movimiento contrario al de las manecillas del reloj aumenta los minutos, en tanto que, el movimiento a favor de las manecillas del reloj, disminuye los minutos, encerándose en el tope.

3. El transductor neumático de presión de aire a corriente directa

Convierte la señal de presión de aire enviada desde un instrumento como transmisor en el rango de 3 a 15 psi, para convertirla a señal de corriente directa correspondiente a 4 hasta 20 mA. Su acción es de naturaleza directa, con suministro de energía eléctrica de 117V, 60 Hz. hacia el mismo.

La señal de salida del convertidor P/I es receptada por un control electrónico **MOD 30**, el cual similarmente al control neumático, procesa y envía otra señal electrónica al convertidor I/P, que se traduce a señal neumática hacia la válvula de control.

4. El transductor de corriente directa a presión de aire

Convierte la señal de corriente directa, enviada desde algún instrumento en el rango de 4 a 20 mA, a presión de aire correspondiente, de 3 a 15 psi. Su acción es de naturaleza directa, con suministro de aire de 20 psi.

5. La válvula regula flujo de acción neumática para control de temperatura

Es una válvula de acción directa, regula flujo, con aire para cerrar en el rango de 3 a 15 psi. Posee una escala graduada donde se observa el porcentaje de apertura o cierre de la válvula de acuerdo a la posición de la aguja indicadora incorporada al vástago de la misma. Se controla la temperatura en puntos establecidos, mediante la regulación del flujo de agua caliente a través de la misma.

6. El regulador de presión de aire

Como su nombre lo indica, regula la presión de salida de aire, disminuyéndola o aumentándola, desde y hasta un cierto valor menor o igual a la presión máxima de salida.

Se le incorpora un manómetro, que indica la presión en la salida del mismo, el cuál es de un campo de medida de 0 a 30 psi. La perilla del tornillo de la parte superior regula la presión, aumentándola cuando la giramos en dirección del movimiento de las manecillas del reloj, y disminuyéndola en el sentido inverso.

BANDA PROPORCIONAL BP(%)	SENSIBILIDAD S	GANANCIA G
100	1	1
50	2	2
25	4	4
12.5	8	8
6.25	16	16

TABLA 4.2

Una prueba de calibración con uno de los manómetros de comparación indicó una ligera descalibración de los manómetros de los reguladores, se observó el error de indicación en la carátula, siendo constante en todo el rango, por lo que se debió extraer la aguja indicadora con el extractor de agujas y colocarlo en la posición correcta, según la indicación patrón.

Una descalibración mayor ocurriría si se permitiera una salida de aire en el regulador, superior de los 30 psi de presión.

4.3.2.1 Instalación del termostato

La instalación del termostato tiene el propósito de proteger el calentador, y más exclusivamente de evitar su sobrecalentamiento, quemar las resistencias, torcer o fundir el tanque calentador.

Precaución: El excesivo calentamiento indefinido e incontrolado provoca que el agua se transforme totalmente en vapor, lo que eleva las presiones en el interior del tanque y ayuda a su colapso, además que, vapor no es de nuestra utilidad. En lo posible setear el termostato a una temperatura inferior de la de ebullición del agua con una franja no muy corta.

El termostato de seguridad, además de servirnos de protección, nos da una idea de la temperatura de agua caliente que obtendríamos a la salida del calentador, controlándola a voluntad según el requerimiento nuestro. Consiste de una bobina que acciona unos contactos cuyo suministro de energía es de 120 V, de acuerdo al movimiento térmico del fluido en el interior del bulbo. La señal de control de abre y cierra

contactos energiza o desenergiza la botonera de accionamiento para abre y cierre del circuito trifásico de las resistencias.

La franja de temperatura puede ser regulada por intermedio de una perilla y su escala general es en °F.

La instalación del bulbo debe ser tal, que pueda sentir el valor real de temperatura del agua circulando alrededor con un margen de error muy pequeño; para esto, se permite que el flujo de agua sea perpendicular a la dirección del eje central cilíndrico del bulbo, de manera que su punta sea la que realice la función sensora, sin obstruir el paso del agua a través de la tubería. Por transferencia de calor, este se transfiere por conducción, convección, y radiación. Para nuestras condiciones de instalación del bulbo, tenemos conducción y convección garantizándonos un margen de error pequeño del valor real de temperatura. En resumen, se debe acomodar el sensor, de manera que la corriente de agua que fluye, apenas roce su punta.

Una prueba preliminar del termostato, empieza verificando que las válvulas manuales de flujo estén completamente cerradas antes de la marcha del sistema a controlar, abriendo la válvula HV10, HV8, HV1, HV6, HV11, y HV13 sobre la marcha para carga al proceso y desagüe a la calle. La regulación es moderada para no tener un descontrol en la carga. Se fijó el set-point para temperaturas y franjas diferentes observándose en cualquiera de los transmisores que, con el aumento de la franja se aumenta el intervalo de control de la temperatura de salida del flujo de agua del calentador, además que mediante una tabulación nos damos una idea de la temperatura existente en los puntos de medición para una temperatura fija. Se observa variaciones de indicación considerables en el transmisor TIT1, mientras que en TIT2, la indicación es con tendencia a la estabilidad.

4.3.2.2 Conexiones neumáticas

A la entrada del lazo se instaló la **Unidad de mantenimiento o primer regulador de aire** con sus

accesorios para tubería de acero galvanizada de 1/2" en diámetro, con el fin de proporcionar aire de mejor calidad, lo más limpio y seco posible, a la presión de entrada de los lazos y las válvulas servopiloteadas.

Se instalaron dos reguladores de presión para proporcionar la presión de suministro exacta hacia los instrumentos utilizados en el lazo. La ubicación es la siguiente:

Reg. 1. Desde la línea principal de suministro, a continuación de un filtro y antes de las válvulas neumáticas que permiten o restringen el suministro de aire a los transmisores.

Reg. 2. Desde la línea principal de suministro, después de otro filtro y antes de las válvulas neumáticas que permiten o restringen el suministro hacia el controlador neumático y el convertidor I/P1.

El caudal o consumo de aire requerido depende de cada instrumento y es análogo a lo que sucede con la

energía eléctrica que se suministra a los instrumentos de esa naturaleza. El caudal de aire que requiere un instrumento neumático y la cantidad de corriente que necesita un instrumento eléctrico o electrónico para su funcionamiento se determina por el calibre de cañería o conductor utilizado. La analogía se extiende para la presión de aire y el voltaje utilizado en los instrumentos, ya que una presión fuera de la normal o superior a la estipulada por el fabricante podría resultar en serio perjuicio al instrumento, ya que está diseñado para una determinada presión máxima que va de acuerdo al calibre y material de cañería utilizado.

Se instalaron dos filtros secadores para aire en la siguiente disposición:

- 1) En el suministro de aire hacia los transmisores y antes del primer regulador de presión.
- 2) En el suministro de aire hacia el controlador y el convertidor I/P1 y antes del segundo regulador de presión.

Se instalaron tres electroválvulas servopiloteadas para aire en la siguiente ubicación:

En el trayecto,

- 1) Suministro de aire a los transmisores.
- 2) Salida de la señal de aire desde los transmisores TIT1 o TIT2 y entrada de señal al controlador.
- 3) Salida de la señal del controlador neumático TRC y entrada a la válvula FCV1.

Se instalaron válvulas neumáticas cañerías y accesorios de cobre para $\frac{1}{4}$ " en diámetro u equivalente, que conjuntamente con los equipos ya citados cierran el lazo de control de temperatura.

4.3.2.3 Válvulas neumáticas

El lazo de control de temperatura posee **12** válvulas de paso neumáticas para cañería de cobre de $\frac{1}{4}$ " en diámetro, su función es de abrir y cerrar el paso de aire desde la unidad de mantenimiento y en el interior del

circuito de control, distribuidas según los esquemas principales.

De acuerdo al diseño, fabricación e instalación de la instrumentación, según los catálogos, el montaje del circuito de control se realiza con cañería de cobre o equivalente con sus accesorios, que soporten los requerimientos de presión y caudal.

Las válvulas son hechas de bronce y no regulan el flujo, simplemente permiten o restringen el paso de aire a presión, ya que son del tipo de **bola**.

La válvula neumática que se conecta en el lazo de control e instalada en el sistema a controlar es la regula flujo de agua con accionamiento de aire para cerrar, la cual tiene un comportamiento que será estudiado posteriormente. El aire que envía el control de temperatura hacia la cabeza del vástago, luego de un procesamiento previo, puede originarse desde el controlador neumático o desde el controlador electrónico; en el segundo caso, el control electrónico

MOD 30 acompañado de una computadora, recibe la señal desde los convertidores P/I y la envía al convertidor I/P1 y este a la válvula de control.

Válvula NV1. Entrada del suministro de aire desde la Unidad de Mantenimiento con cañería de $\frac{1}{4}$ " de cobre. Se encuentra en la trayectoria de la línea principal después de la citada unidad y a la entrada del lazo de control.

Válvula NV2. Permite o bloquea el paso de aire hacia el regulador #1 (Reg. 1), que suministra aire a los transmisores TIT1 y TIT2.

Válvula NV3. Permite o anula el paso de aire desde Reg. 1 hasta el TIT1. El aire que es permitido pasar a través de esta válvula es de suministro del instrumento mencionado.

Válvula NV4. Da acceso o restringe el paso de aire desde el Reg. 1 hasta el suministro de aire del TIT2.



Obsérvese que las válvulas descritas hasta aquí, son de suministro de aire.

Válvula NV5. Salida del TIT1 hacia la señal de entrada del control.

Válvula NV6. Salida del TIT2 hacia la señal de entrada del control.

Se destaca que para las válvulas NV5 y NV6, la toma de señal en el control es de acción directamente proporcional en el rango de 3 a 15 psi y la señal de salida desde los transmisores es de la misma *naturaleza*.

Válvula NV7. Se encuentra en el trayecto de la salida del TIT1, hacia la toma de señal neumática del transductor P/I1. Dicha señal es también proporcional de 3 a 15 psi, para una salida eléctrica de 4 a 20 mA, que es tomada por el controlador MOD 30, el mismo que entrega una señal procesada al transductor I/P1, que convierte nuevamente la señal eléctrica en

neumática de 3 a 15 psi, accionando la válvula de control de flujo FCV1.

Válvula NV8. Se encuentra en el trayecto de la salida del transmisor TIT2, hacia la entrada de la señal neumática del convertidor de presión a corriente P/I2. De la misma forma que en el caso anterior, la señal tomada por el transductor es de tipo neumática proporcional de 3 a 15 psi, para convertirse en señal electrónica de 4 a 20 mA, la cual es tomada por el control MOD 30; este, entrega una señal electrónica al I/P1, el mismo que entrega una señal neumática proporcional de 3 a 15 psi al elemento final de control.

Como podemos notar, la señal neumática inicial de los transmisores puede ser a elección, es decir que podemos utilizar cualquiera de los dos transmisores de acuerdo al nivel de líquido en el tanque de proceso o al requerimiento presentado. En cuyo caso, utilizaremos el correspondiente convertidor de presión a corriente, cuando el control automático utilizado es con corriente; caso contrario, no se utilizarán los convertidores ni el

control electrónico y damos paso al control automático puramente neumático que lo conforman los transmisores, el controlador registrador y la válvula para flujo de agua.

Válvula NV9. Salida del controlador neumático hacia el instrumento que ejecuta la acción derivativa, que comunica a la FCV1. Aquella se sitúa en esta trayectoria, se encuentra antes de la válvula de control de flujo y después del instrumento de la acción derivativa o amortiguador de oscilaciones de la señal de salida del control. Es una válvula de tipo selectivo, que deberá estar cerrada cuando funcione el control electrónico.

Válvula NV10. Se ubica en el trayecto de la salida neumática del transductor I/P1 hasta la válvula de control de flujo. Es una válvula de tipo selectivo, y debe estar cerrada, cuando funcione el control neumático.

Válvula NV11. Permite o restringe el suministro de aire desde el regulador Reg. 2, hacia el control neumático.

Es también, una válvula de tipo selectivo, debiendo estar cerrada cuando no funcione el control neumático.

Válvula NV12. A través de ella, se permite el suministro de aire desde el Reg. 2, hacia el transductor I/P1. Seleccionamos la posición abierta, cuando trabaje el control electrónico.

En resumen, debemos asegurarnos de abrir las válvulas de paso neumáticas que vamos a utilizar o donde se requiere el acceso de aire, y verificar que, donde no se requiere del mismo, cerrar el acceso desde ellas. Esto es, antes de dar marcha al sistema y de acuerdo a la prueba que se quiere realizar.

Los reguladores de presión de aire, toman el suministro desde la **línea principal** de aire, con cañería de $\frac{1}{4}$ " en diámetro.

La línea principal, con cañería de $\frac{1}{4}$ " en diámetro, se instaló en la parte superior del lado posterior de la estructura del panel, recorre los sistemas de control en

forma horizontal. De aquí, se abastece el lazo de control con aire a una presión alrededor de los 50 psi, cuando se requiere que las válvulas servopiloteadas *funcionen, por el contrario, la regulación en la unidad de mantenimiento de aire sería de alrededor de 30 psi, y la máxima presión para el funcionamiento de los instrumentos es de 22 psi (con 20 psi recomendados);* pero, debido a pérdidas por rozamiento, posibles fugas, curvaturas de cañerías, válvulas y demás accesorios, la presión regulada en la unidad de mantenimiento podría ser ligeramente superior a 30 psi. Sin embargo, por la instalación de las válvulas para producir las fallas se regula a 50 psi, según la recomendación. Dicha presión cae dentro del rango que el compresor proporciona.

Finalmente, se instalaron, una válvula de paso neumática de cobre para cañería de $\frac{1}{4}$ " en diámetro que impide/permite, el paso de aire hacia el lazo de control de caudal y nivel; una válvula de compuerta de $\frac{1}{2}$ " en diámetro para tubería galvanizada, a continuación de la unidad de mantenimiento de aire,

que impide/permite su paso hacia el lazo de control de presión.

Precaución

Se recomienda, asegurarse, antes y después de utilizar el circuito neumático que la presión de salida desde los reguladores sea la mínima hacia los instrumentos, de esta manera, al abrir la válvula de paso que entrega el aire de suministro a una presión probablemente superior de los 22 psi. recomendados para los equipos, se reduzca, evitando dañarlos. Esto es logrado, girando la perilla, en dirección contraria al movimiento de las manecillas del reloj, casi hasta el tope. Una vez abierta la válvula neumática de paso correspondiente, regulamos la presión de aire en dirección del movimiento de las manecillas del reloj a 20 psi, asegurándonos, que aquella será la presión de suministro del instrumento, con un caudal que es regulado o tomado por el mismo instrumento.

También, una descalibración y perjuicio mayor se experimentará, si se permite una regulación de aire superior a los 30 psi de presión desde los reguladores de presión.

4.3.2.4 Válvulas solenoides servopilotadas

Las válvulas de solenoide servopilotadas están situadas en las distintas líneas neumáticas entre los transmisores y el controlador, entre el controlador y la válvula de control FCV1, y entre la línea principal de alimentación de aire desde el regulador #1 (Reg. 1) hacia el suministro de los transmisores; cuando trabajan introducen pérdidas de aire en las líneas o tramos de conexión, originando así fallos en el funcionamiento del sistema. Las válvulas se actúan mediante pulsadores situados en un panel secundario, en la vecindad del panel principal de control.

Utilizamos un arreglo o instalación eléctrica para energizar las bobinas del solenoide de cada una de las válvulas que permitirán accionar los mecanismos

internos mecánicamente a través del servopilotaje. Su energización es con pulsadores del tipo de enclavamiento con empuje hacia adentro, los mismos que desenergizan efectuando un **pequeño** giro hacia la derecha para su desenclavamiento. La instalación eléctrica es como se muestra en la figura 4.3.

Introducción de averías

El accionamiento de los pulsadores que controlan las distintas válvulas de solenoide en el pupitre del instructor, dará como resultado fallos en el funcionamiento del equipo de control. Los efectos son los que se describen a continuación:

SE1.

El pulsador actúa una válvula de solenoide que introduce una pérdida de aire en la línea procedente de la salida de los transmisores TIT1 ó TIT2 hacia la toma de señal de registro del controlador de temperatura TRC (uno a la vez). Si se conecta el transmisor TIT2 al registro TR1, mientras el control de registro de

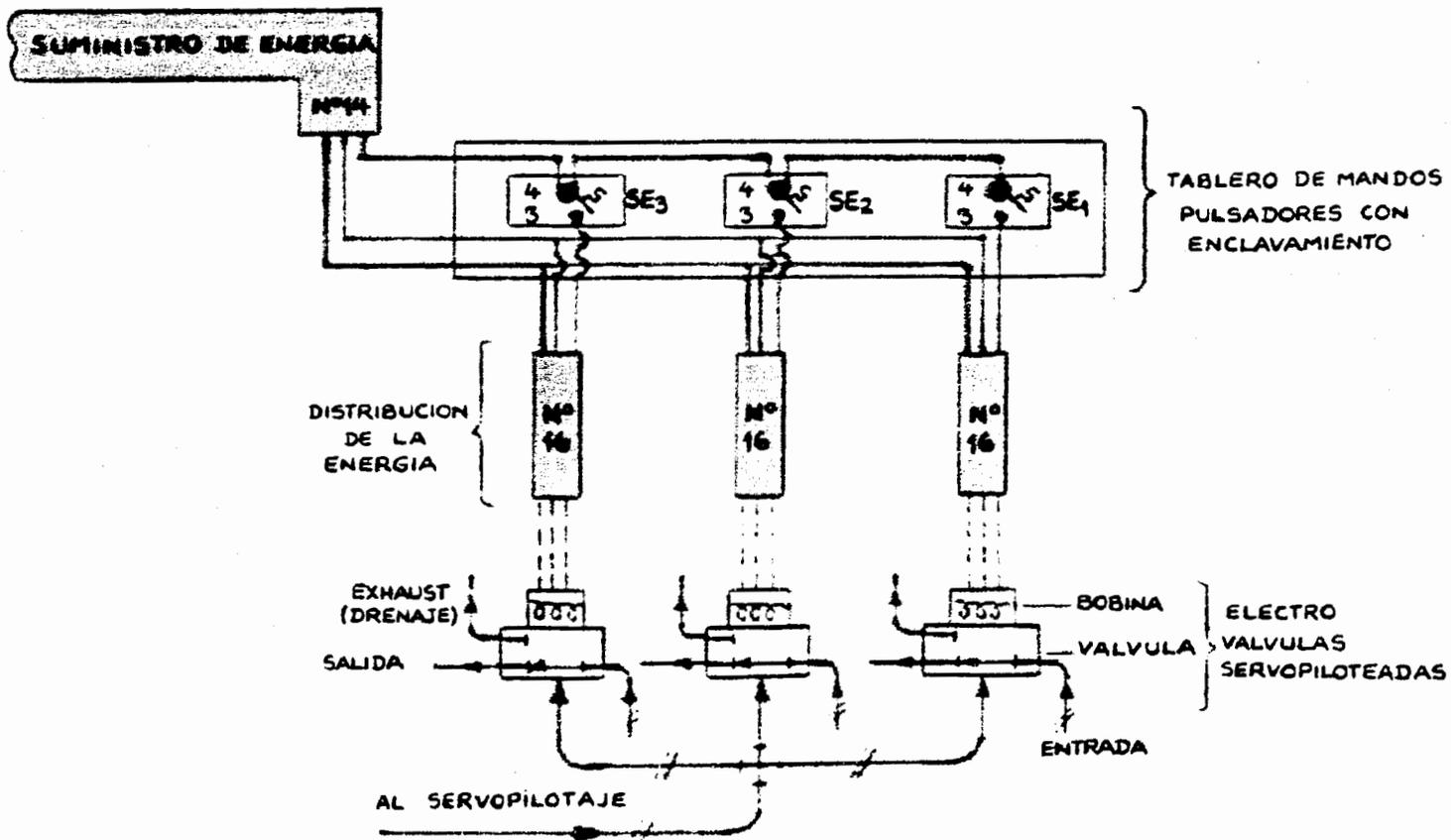


Fig. 4. 3 DIAGRAMA ELECTRO - NEUMÁTICO DE LAS ELECTRO - VALVULAS

temperatura TRC está bajo el control de TIT2, entonces TR1 indicará que aparentemente la temperatura del agua en el recipiente C1 ha caído a un mínimo, incluso aunque TIT2 continúe informando que el agua está cerca de la temperatura establecida y aumentando poco a poco, y que la temperatura de suministro se eleva debido a que el controlador detecta una baja en la señal desde TIT2, lo cual hace que aparezca una señal de error y corrección dirigida hacia la válvula FCV1, abriéndola indefinidamente hasta eliminar la avería. Si TRC está bajo la indicación de TIT1, y si la falla ha sido eliminada, cerrará la válvula de control, dando por resultado una temperatura de alimentación mínima, indicada correctamente por TIT1 en TR1. Sin embargo, TIT2 indicará que la temperatura en el recipiente es muy elevada con tendencia al descenso.

Al contrario, si se conecta el registro TR1 al transmisor TIT1 mientras el control de registro de temperatura TRC está bajo la señal de TIT1, entonces, TR1 registrará una baja de temperatura en el agua de suministro, aunque aquella y la del tanque C1 se

eleven indefinidamente por verificación de la indicación de los transmisores, debido al error que aparece y que debe ser corregido. Esta acción de corrección la realiza el controlador por la falla producida desde la salida de TIT1 que inmediatamente es transmitida a la válvula FCV1, abriéndola, para corregir un falso error y cerrándola, si es que la avería ha sido corregida.

SE2.

Este pulsador interrumpe la señal procedente de la línea de suministro de aire desde el regulador #1 (**Reg. 1**) hacia la entrada de suministro a los transmisores TIT1 y TIT2.

Cuando tenemos trabajando los transmisores TIT1 ó TIT2 con el controlador TRC, al producir la avería pulsando SE2, el registro TR1 experimentará un descenso de la temperatura, debido a que no hay suministro de aire hacia los transmisores y por consiguiente, no hay señal de salida hacia el controlador. Por lo tanto, la señal proporcional desde los transmisores siempre será 0 psi para cualquier

indicación desde ellos, observada en el registro TR1 del control. Cuando esto sucede, y con el lazo neumático funcionando, se manifiesta un error permanente en TRC, el cual debe ser corregido, abriendo la válvula FCV1, debido a este error, produciéndose una elevación de la temperatura, indicada en los transmisores pero con superioridad en TIT1. Como el error persistirá hasta que se anule la avería, no habrá una nueva corrección y continuará elevándose la temperatura de agua de mezcla, por los conductos R1, R2, ó R3 (por lo menos hasta la temperatura permisible, que tiene que ver con la temperatura de seguridad del termostato, instalado a la salida del calentador), indicada en TIT1 y la temperatura del agua dentro del tanque de proceso C1 indicada en TIT2.

Cuando la avería se corrige, vuelve la señal desde los transmisores (una a la vez) hacia el controlador, y se registra la verdadera temperatura a controlar, produciéndose la acción de corrección respectiva, lo que se traduce en un cierre de la válvula FCV1, debido

a la temperatura elevada indicada y registrada, si esta es mayor que la temperatura consignada. Caso contrario, se abrirá la válvula de control.

SE3.

Pulsador que introduce una avería desde la señal de salida del controlador a la válvula regula flujo para control de temperatura. La pérdida de la señal debido a la introducción de la avería produce que el vástago regrese a su posición normalmente abierta (NA) y, al igual que la situación anterior, se eleve la temperatura continua e indefinidamente a una temperatura menor o igual a la temperatura de seguridad del termostato. A pesar que el controlador está enviando su señal de corrección, pero que es interceptada por la acción de la válvula solenoide.

No se experimenta ningún control de la variable a controlar debido a que, aunque el controlador envía la señal de corrección, no se corrige el error porque se inhibe la acción de la válvula de control.

Suprimida la falla, el error se corrige y la temperatura disminuye tanto para la indicación en los transmisores como para el registro en el controlador, dependiendo de si la temperatura a controlar estaba por arriba o por debajo del valor consignado.

Las válvulas solenoides funcionan con un servopilotaje del orden de 50 psi. de presión de aire.

Precauciones

Si hubiera alguna posibilidad de que hayan variado estos ajustes desde la última vez que se utilizó el sistema completo, se giran los reguladores totalmente *en el sentido contrario al de las agujas del reloj*, para dar una presión de salida mínima, hacia el interior del lazo de control, antes de abrir las válvulas de alimentación de aire.

4.3.3 Pre-marcha del lazo de control

Los siguientes son los pasos previos para dar marcha al lazo de control de temperatura.

- 1) Se verifica que los elementos para hacer funcionar el compresor estén en buen estado y reemplazarlos si es necesario.
 - Revisar las bandas, poleas, filtro de aire, filtro de aceite, instalaciones eléctricas del motor y demás accesorios.
 - Cerciorarse que, las bandas estén lo suficientemente templadas, de manera que no haya deslizamiento entre ellas y las poleas.
 - Verificar el alineamiento entre poleas. Las poleas estén lo suficientemente y correctamente ajustadas, con el fin de que estas no produzcan vibración y ruido.
 - La calidad y cantidad de aceite, en el motor del compresor estén en su punto, de manera que podamos obtener el mejor funcionamiento previniendo desgastes y sobrecalentamientos. El cambio para cada tiempo de

funcionamiento y tipo de aceite es sugerido por el instructivo del motor del compresor.

- El nivel de aceite del motor del compresor es fácilmente observado a través de una ventana circular de vidrio, ubicada cerca del mismo.
- Drenar el agua existente en el tanque de almacenamiento de aire del compresor. Esta operación se realiza antes de cada prendida del compresor, abriendo una válvula de purga ubicada en la parte inferior del tanque.

- 2) Drenar todas las demás partes que impliquen esta acción.
- 3) Se cierra la válvula de compuerta que permite el paso de aire comprimido desde la descarga del tanque de almacenamiento del compresor, con la finalidad de evitar presiones altas en alguna línea, donde no se ha tenido la precaución de cerrar el paso de aire; o después de alguna prueba, al dejar regulada la presión de aire a una muy alta, con el consiguiente daño o deterioro de algún equipo.
- 4) Pulsar el botón de color verde en la botonera de arranque del motor del compresor instalada sobre la pared más cercana a

aquel. Esperar unos cuantos minutos hasta que cargue, por lo menos a la presión mínima inferior del automático de accionamiento del motor del compresor. Se verifica la presión de suministro desde aquí, mediante el manómetro instalado en la parte superior hacia el lado izquierdo del tanque (vista hacia la pared más cercana).

- el set-point superior del compresor es de 155 psi, cuando esto ocurre, el tanque de almacenamiento de aire se ha cargado a esta presión y el presostato envía su señal para bloquear la carga anulando el suministro de energía.
- el set-point inferior del compresor es de 75 psi, contrariamente, el tanque de almacenamiento de aire se ha descargado y el presostato acciona el suministro de energía para empezar la operación de carga.

5) Verificar que la unidad de mantenimiento esté regulada para distribuir una presión mínima, esto se logra girando la perilla de regulación (parte inferior), en dirección contraria al movimiento de las manecillas del reloj. Cerrar todas las válvulas de acceso de aire dentro y fuera del lazo de control.

- 6) Se abre la llave de acceso de aire, desde el compresor hacia la unidad de mantenimiento, antes de los lazos de control.
- 7) Girar las perillas de regulación de la presión de aire en los reguladores del lazo de control, a la posición mínima posible, en dirección en contra del movimiento de las manecillas del reloj. De esta manera la regulación de la presión de suministro es desde una presión mínima o cero.
- 8) Se regula el acceso de aire desde la unidad de mantenimiento, se regula la pérdida de presión al valor mínimo, de tal manera que se pueda obtener la presión de aire lo más cercana a la presión de operación del servopilotaje de las válvulas solenoides (del orden de los 50 psi), girando la perilla correspondiente en dirección del movimiento de las manecillas del reloj.
- 9) Se abren las válvulas de paso neumáticas NV1 y NV2, ubicadas a continuación de la regulación principal y hacia el interior del lazo antes del regulador #1.

La presión de aire que llega a los reguladores internos, obtenida en la regulación principal, será un tanto menor debido a las pérdidas que se experimentan.

- 10) Girar las perillas de los reguladores internos, Reg. 1 y Reg. 2. para elevar la presión de salida desde aquellos hasta 20 psi recomendados para el suministro de aire de los instrumentos.

Hasta aquí el lazo de control de temperatura estará listo para entrar en funcionamiento.

- 11) Se llena el tanque de reserva con agua fría, abriendo la válvula HV14.
- 12) Una vez lleno el tanque de reserva, se cierra la válvula HV14.
- 13) Situar en posición "ON" (prendido) los breakers de la caja empotrada sobre la pared posterior al lazo de control de temperatura, que energizan las líneas acometidas L1, L2 y L3 a los terminales de entrada de las resistencias del calentador sin que se cierre el circuito.

- 14) Se conecta la bomba para su funcionamiento según su placa de indicación de conexiones y el suministro o toma de corriente instalado en la pared más cercana.
- 15) Energizar los sistemas de control del calentador y bomba, desde el panel de control de las resistencias instalado en la cara izquierda de la estructura (visto de frente). Un switch selector montado sobre la puerta en la parte externa ejecuta esta acción, el cual hace que se prenda un foco con luz de color roja. Las figuras 4.4 y 4.5, presentan un plano de las conexiones eléctricas de la bomba y calentador.
- 16) Accionar el botón de color verde en la botonera de marcha de la bomba instalada sobre la estructura en la parte frontal del panel del lazo de control de caudal y nivel. En este instante, la bomba comienza a funcionar
- 17) Fijar la temperatura y franja del termostato T_c aproximadamente al requerimiento.
- 18) Se abre la válvula manual de flujo HV10, regulándola, lo que nos permite el suministro de agua desde el tanque de reserva hacia el sistema. Regular el flujo de suministro de agua Q_{c+F} , a través de la bomba, a circuito abierto o circuito

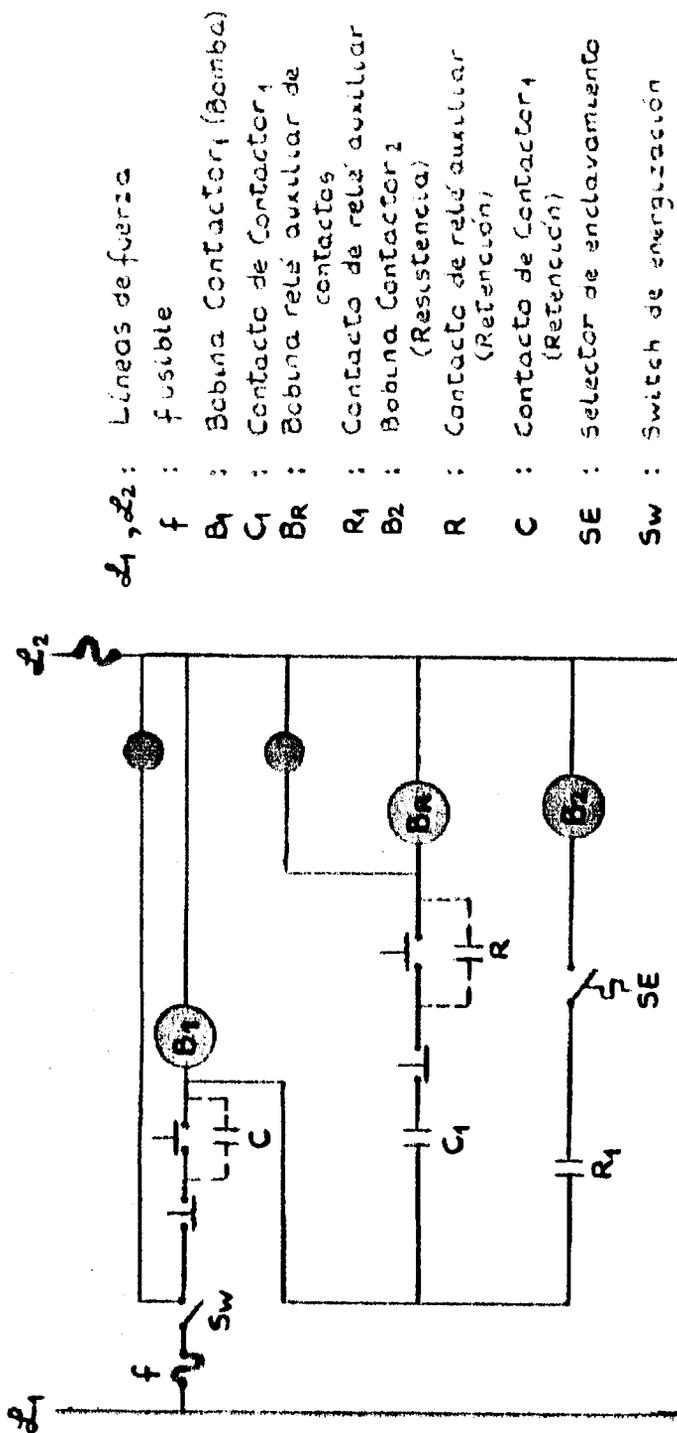


Fig. 4. 4 DIAGRAMA DE CONTROL DE CIRCUITO BOMBA – CALENTADOR DE AGUA

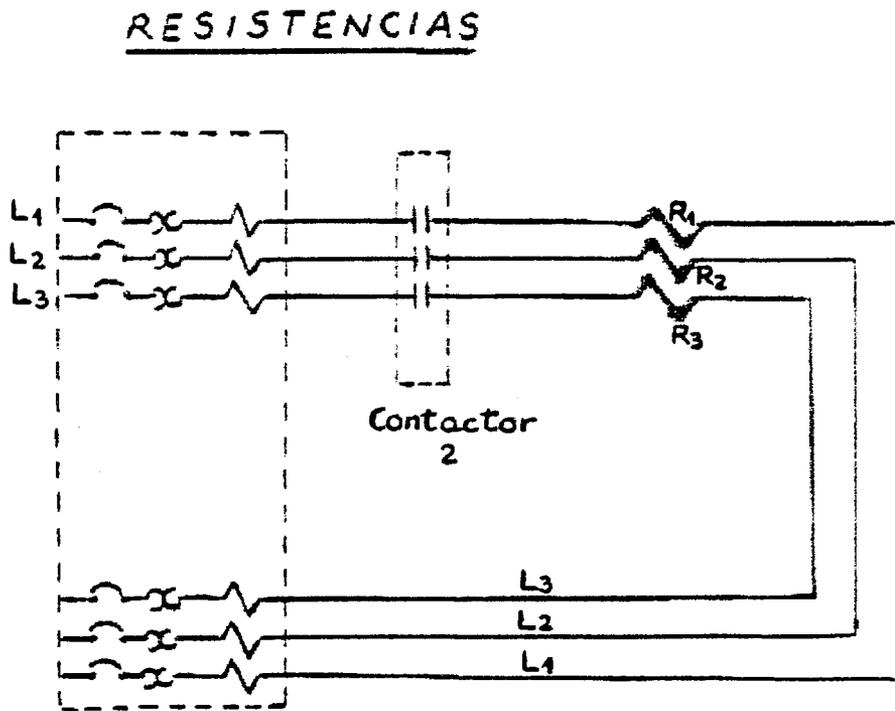
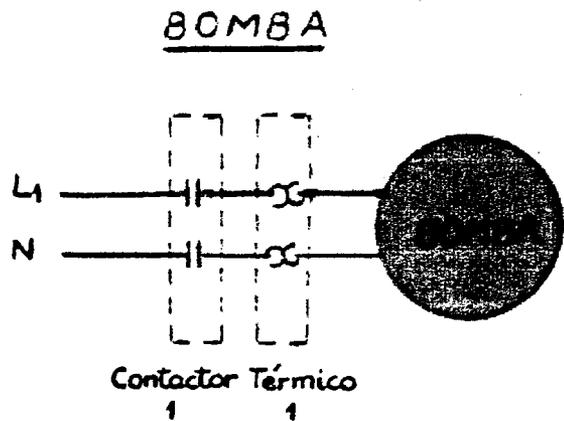


Fig. 4. 5 DIAGRAMA ELECTRICO DE FUERZA DE LA BOMBA Y RESISTENCIAS DEL CALENTADOR DE AGUA

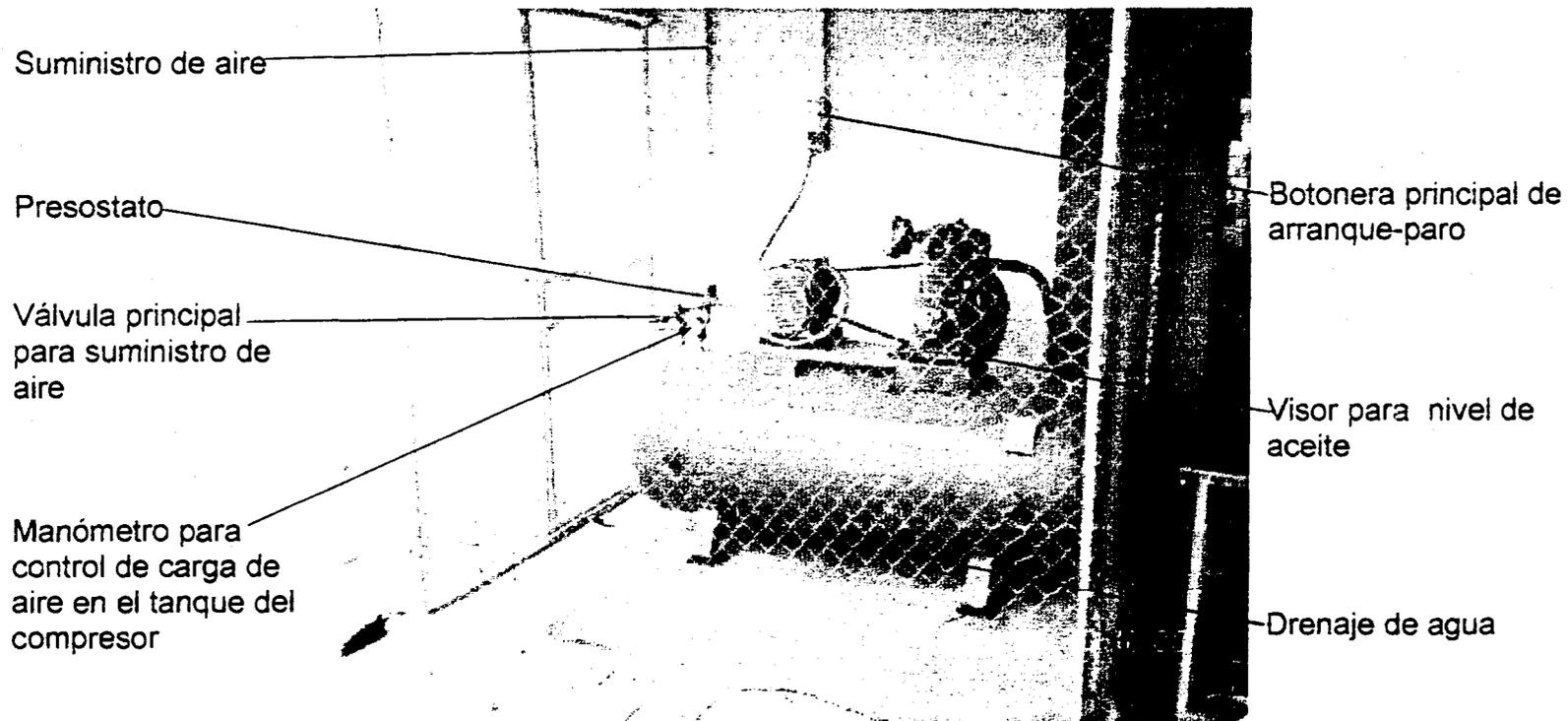


Fig. 4.6 CONEXIONES NEUMÁTICAS Y ELECTRICAS DEL COMPRESIOR

cerrado, desde la válvula HV10 de manera que el flujo inicial de alimentación hacia el proceso sea de la misma magnitud que el flujo de descarga desde este, cuando se trabaja con el control de temperatura del agua en el tanque de proceso. Inicialmente tratar de mantener una columna de agua de 40 cm, visto en el medidor de nivel del tanque instalado en el panel.

Asegurarse de tomar promedios de tiempos de carga y descarga en columnas de agua de 10 cm., estos promedios deben coincidir.

- 19) Se pulsa el botón verde del panel de control de resistencias y un foco con luz de color verde se enciende, lo que nos indica que energizamos o prendemos las resistencias. Antes debemos asegurarnos que hay agua en el interior del calentador.
- 20) El resto de válvulas manuales HV, deben estar completamente cerradas, hasta que el sistema esté listo para entrar en funcionamiento.

- 21) Observar el flujo de agua caliente y regularlo. Cuantificar dicho flujo a través del rotámetro instalado en la vía de flujo de agua caliente **Qc**.
- 22) Verificar que todos los switches del panel del lazo de control de temperatura estén conectados en posición cero o neutral.
- 23) Conectar la energía de suministro de los instrumentos y del tablero de control de las electroválvulas solenoides (110 V. 60 Hz), con un enchufe que sale desde la parte inferior derecha del panel de control de temperatura hacia la toma de energía más cercana.
- 24) Verificar que los instrumentos estén funcionando correctamente.
- 25) Para cada prueba, verificar que se coloque una nueva carta de registro Taylor y que el tintero funcione correctamente

El sistema completo está listo para funcionar.

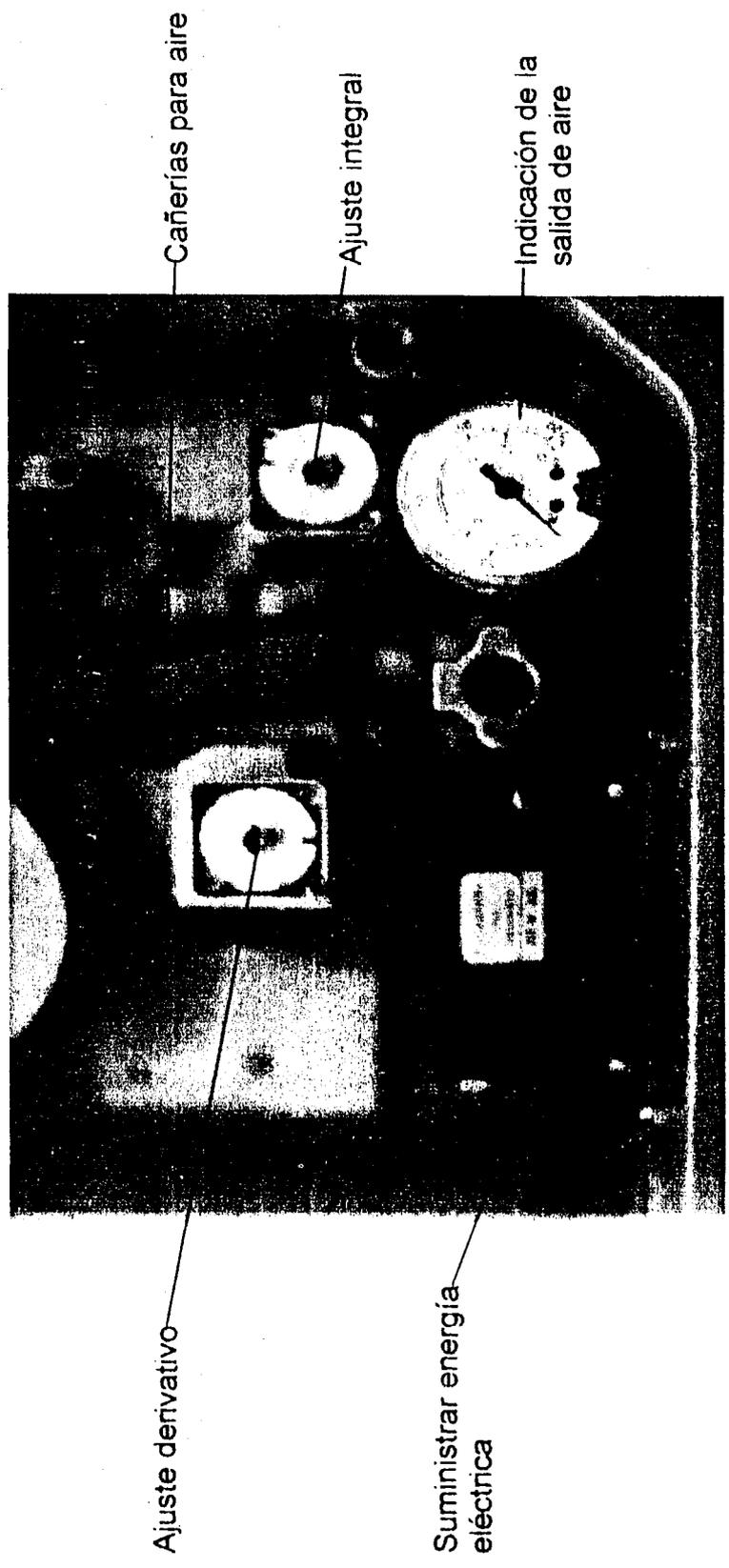


Fig. 4. 7 CONEXIÓN ELECTRICA DEL RELOJ DEL CONTROLADOR NEUMATICO

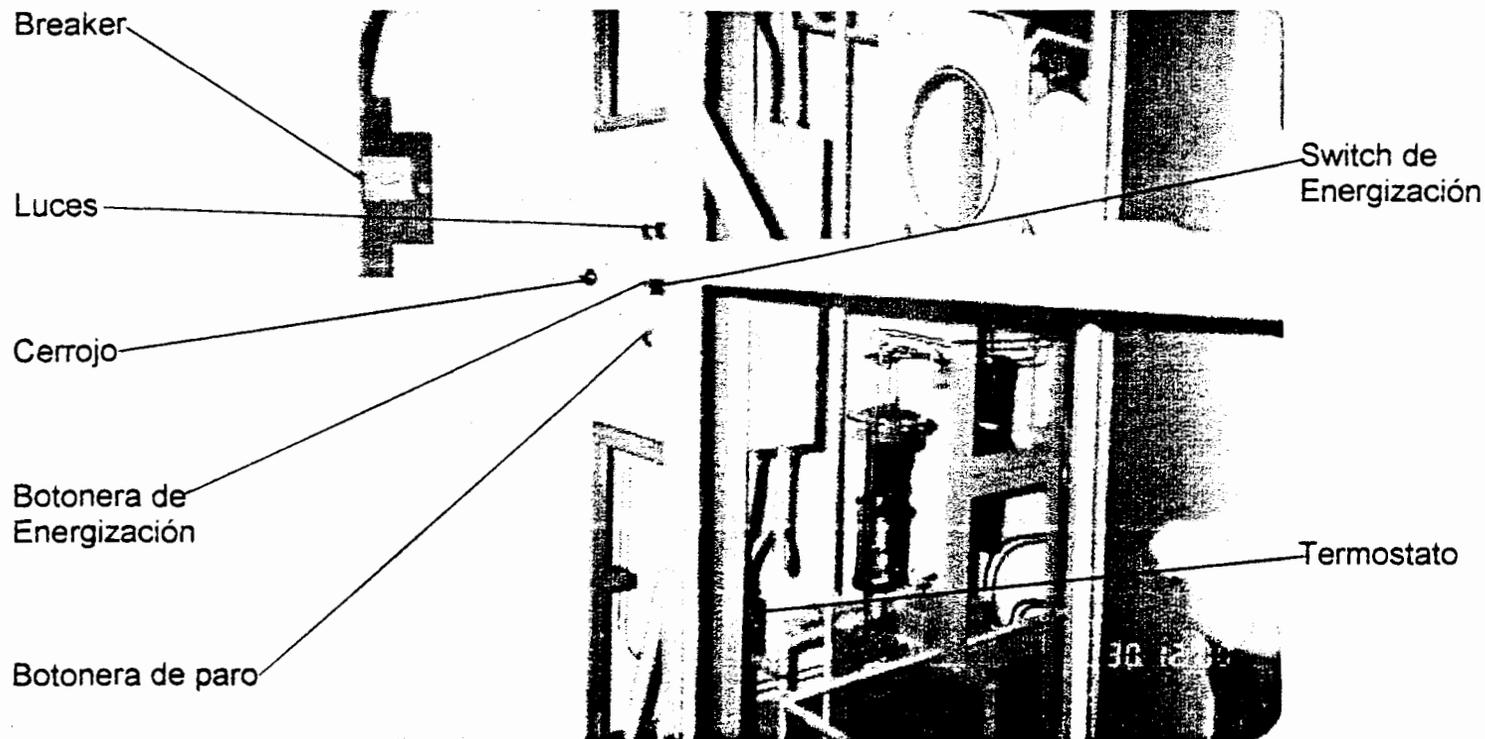


Fig. 4. 8 TABLERO DE CONTROL ELECTRICO PRINCIPAL DE LA BOMBA, CALENTADOR, TERMOSTATO

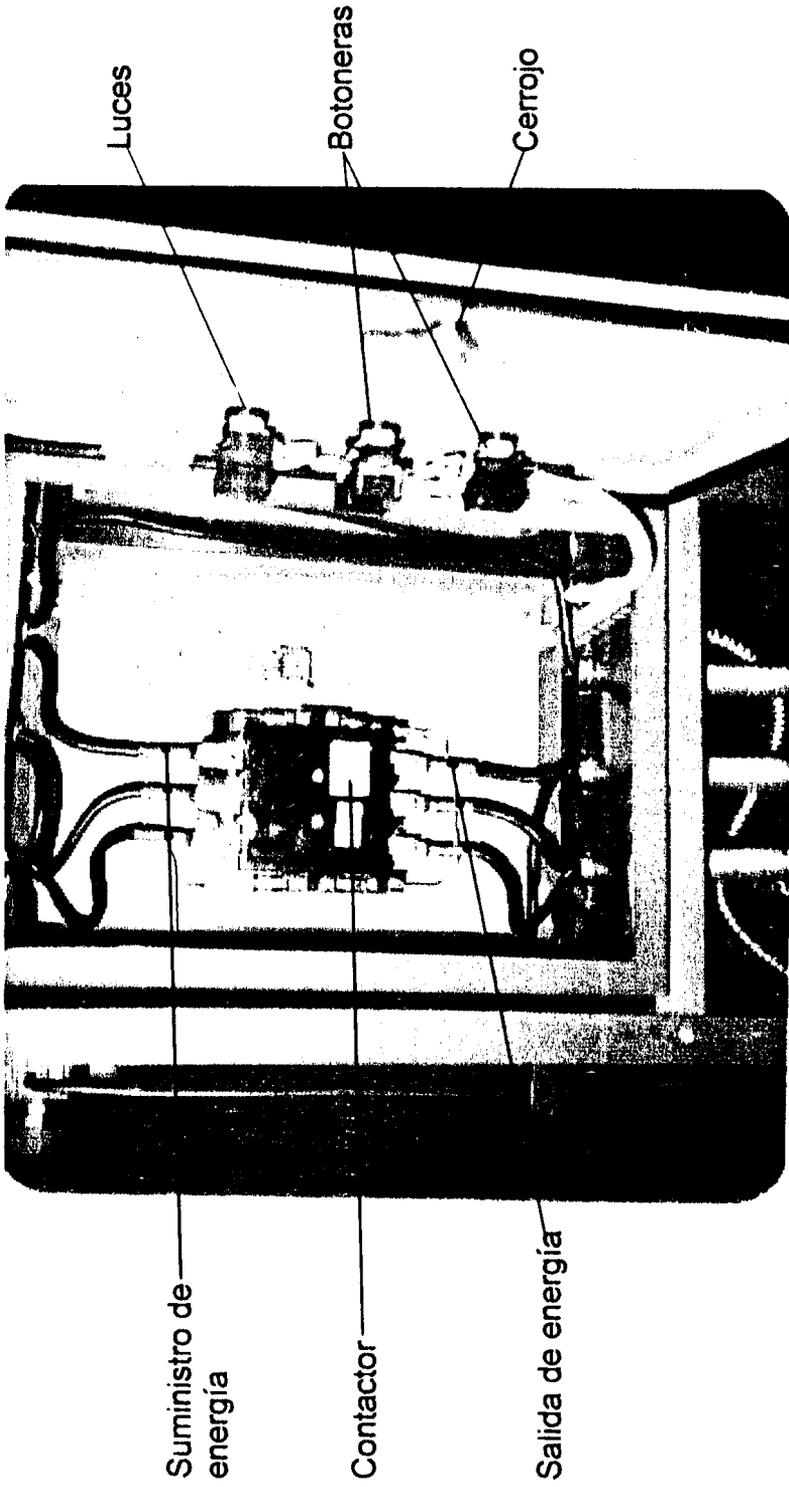


Fig. 4.9 PANEL PRINCIPAL DE CONTROL ELECTRICO (DESCUBIERTO)

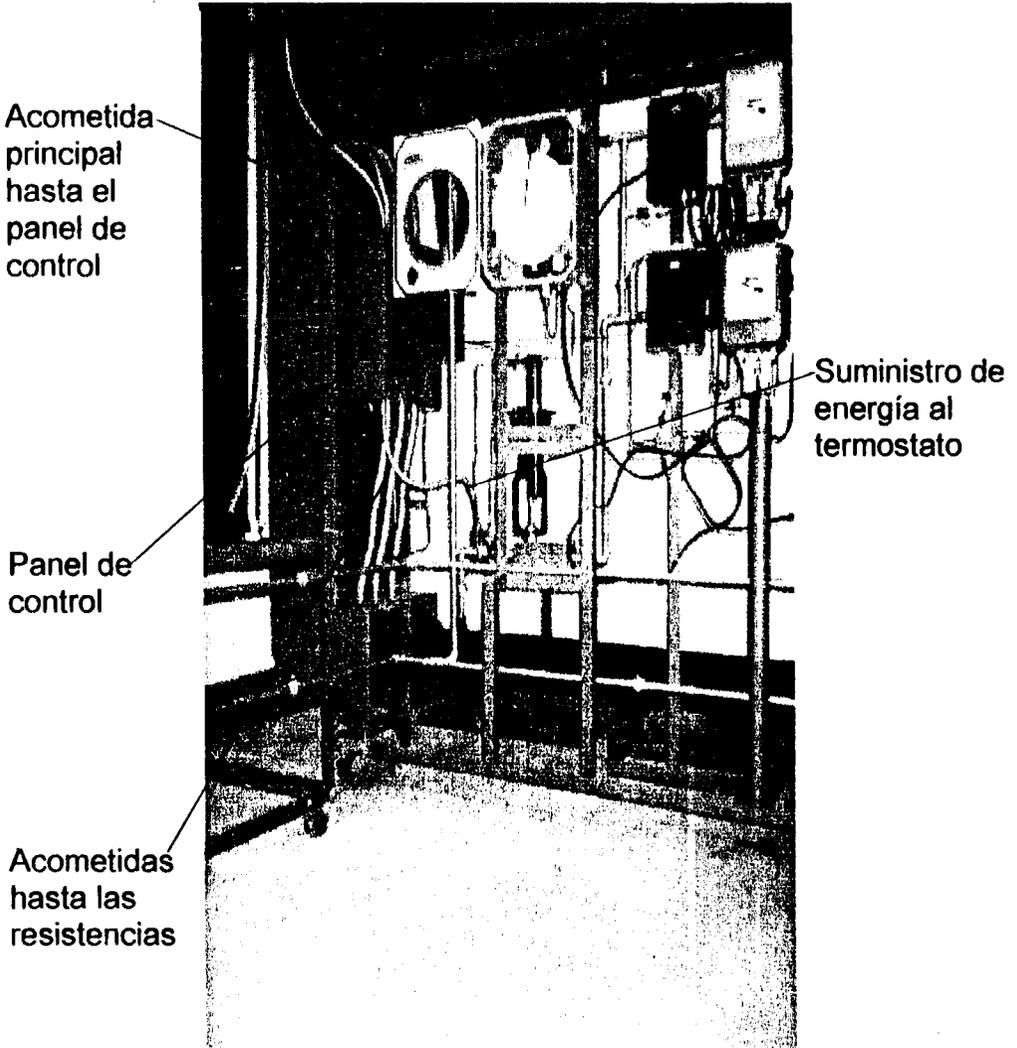


Fig. 4. 10 CONEXIONES ELECTRICAS DEL CALENTADOR

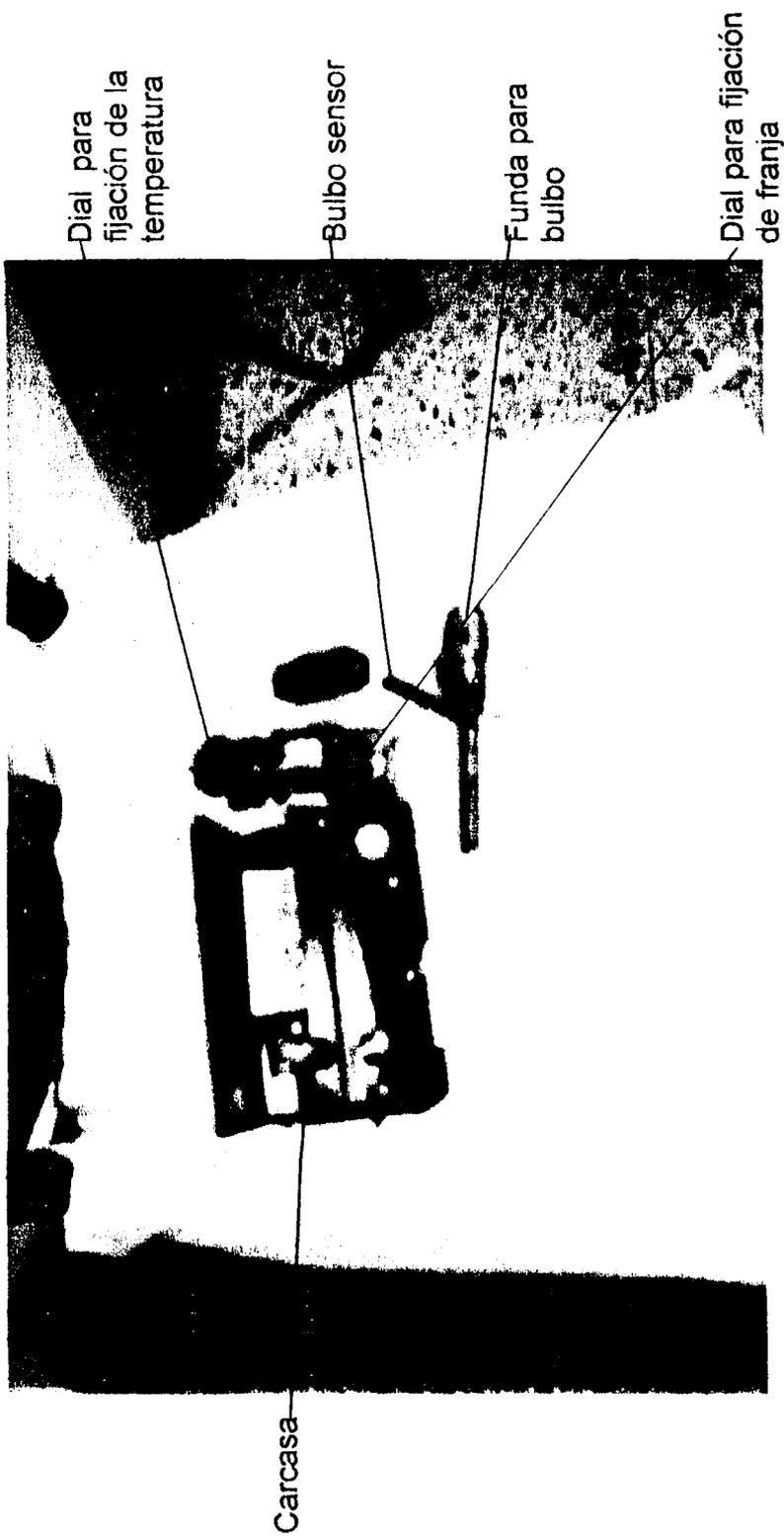


Fig. 4.11 DESPIECE DEL TERMOSTATO

4.3.4 Lazo de formación de control de proceso

Se sugiere que, antes de intentar ningún aspecto más adelantado de trabajo, se debe exigir que los estudiantes lleguen a estar totalmente familiarizados con la puesta en marcha, funcionamiento y parada, según los procedimientos que se describen más adelante. Obsérvese que pueden darse algunas diferencias de detalle en función de la instrumentación exacta que esté incorporada.

Módulo de servicio: Puesta en marcha

El módulo de servicio proporciona el aire comprimido seco y limpio que es necesario para el funcionamiento del sistema de control neumático y el suministro de agua para el recipiente C1.

A continuación, verificar que:

Se comprueba el nivel de aceite del compresor de aire.

Se abre el suministro de agua fría.

Se cierra el disyuntor.

Se desplaza el control de presión del compresor a la posición "automático". El compresor empieza en ese momento a cargar el receptor.

Se extrae la humedad del receptor del compresor mediante la válvula situada en la parte de abajo del extremo de la derecha del receptor.

Carga del sistema con agua

Se cierran las válvulas HV4, HV6, HV7, HV8, HV9, HV11, HV12, HV13, HV16.

Se abren las válvulas HV10, HV2, HV14, HV15, HV17. Está lista la alimentación de agua y las válvulas de vaciado están cerradas.

Se abren las válvulas HV8, ó HV7 y HV9 cuando el agua entra a los procesos a través del calentador del módulo de servicio que se encontrará apagado.

Se cierra la válvula HV7.

Se abren las válvulas de calor y frío del módulo de servicio.

Estas son: HV1, HV3, HV5 y HV2.

Encendido de la alimentación de aire para el sistema de control

Se abre la válvula de aire del receptor del compresor del módulo de servicio.

Se abre la válvula de alimentación de aire en el extremo superior del lazo de control.

Se regulan las presiones de alimentación de aire para los distintos sistemas de control y el servopilotaje de las válvulas solenoides (alrededor de 50 psi), por medio de los mandos de la **Unidad de mantenimiento** y de los tres reguladores situados cerca de las válvulas de alimentación de aire, según se indica.

Funcionamiento del lazo de control de Temperatura

Si se desea, el lazo de control de temperatura puede actuarse con la bomba de circulación parada y el resto del circuito sin actuación.

Se ajusta la alimentación de agua caliente a la velocidad correcta, asegurándose de que la válvula HV10 esté abierta.

Se sitúa el conmutador SW1 en la posición MAN.

El control de registro de temperatura TRC, estará recibiendo una señal de TIT1 cuando abrimos el paso de aire desde la válvula NV5.

Se abre la válvula HV1 y se cierran las HV3 y HV5. En ese momento hay una longitud de tubo mínima entre el punto de mezcla del agua caliente y fría y el transmisor de temperatura TIT1, dando un retardo de propagación mínima. Obsérvese la respuesta del sistema a las variaciones de la temperatura del punto de referencia manifestado en TRC.

Se repiten estas observaciones con la válvula HV3 abierta y las válvulas HV1 y HV5 cerradas. Obsérvese el efecto de aumentar el retardo de propagación.

La misma acción del párrafo anterior con la válvula HV5 abierta y las válvulas HV1 y HV3 cerradas.

Se cierra la válvula NV5 y se coloca en la posición abierta la válvula NV6. El control de registro de temperatura, en ese

momento recibe señales del transmisor de temperatura TIT2 instalado en el fondo del recipiente C1.

Se repiten las observaciones anteriores, verificar la respuesta mucho más lenta del sistema.

Procedimiento de parada

Se conmutan todos los controles a manual (MAN) y se ajustan las salidas a cero.

Se ponen en posición "O" o neutral los switches SW1, SW2, SW3 del panel de control de temperatura.

Se para la bomba de circulación.

Se corta la alimentación de energía al panel de control por medio del disyuntor de la parte posterior. Automáticamente se desenergiza la bomba y por consiguiente se abre el circuito de las resistencias del calentador.

Se cierra la válvula de alimentación de aire NV1, situada en el extremo izquierdo superior de la parte posterior del lazo y se

cierra la válvula de alimentación de aire en el receptor del compresor.

Se abre el disyuntor principal en el módulo de servicio.

Se cierra la alimentación de agua fría.

Se extrae la humedad del receptor de aire.

Si se desea se retorna el agua del proceso.

Utilización de los registros

Se recomienda que, cuando los estudiantes han terminado el programa de familiarización expuesto anteriormente, pasen una segunda vez con los distintos registros funcionando con el propósito de estudiar el comportamiento real de los controles.

La mayor parte de los registros patentados funcionan a velocidades alternativas; una velocidad baja típicamente es de 20 mm/h y una superior de 10 mm/min. La velocidad de respuesta del lazo de formación es mucho más alta que la de una instalación típica comercial y los registros se harán funcionar en general a velocidad alta a efectos de demostración.

Los gráficos producidos por los distintos registros son los siguientes:

Registro de temperatura TR1

Temperatura del agua al entrar en el recipiente C1 según las indicaciones del transmisor de temperatura TIT1, o bien la temperatura de la masa de agua en el recipiente C1 según las indicaciones del transmisor de temperatura TIT2.

Registro de temperatura TR2

Este registro se puede emplear con varias finalidades. Puede registrar la temperatura percibida por cualquiera de los dos transmisores TIT1 y TIT2 que está facilitando información al control de temperatura TRC.

Alternativamente, se puede acoplar a la línea de salida de alguno de los controles, permitiendo así el registro simultáneo de la señal de entrada al control y su correspondiente salida. Este registro simultáneo permite un análisis completo del comportamiento del control.



Administración del lazo completo

Después de haber dedicado tiempo suficiente a los ejercicios descritos anteriormente, los estudiantes estarán lo suficientemente entrenados para poner en marcha y seguir el funcionamiento de los equipos mientras se mantienen los valores especificados de:

temperatura de alimentación de agua al recipiente C1,
temperatura del agua en el recipiente C1.

A continuación deben conseguir experiencia en la administración de la planta cuando alguno o todos estos valores se modifican.

Antes de poner en marcha el sistema completo

Observar que todas las válvulas de alimentación de agua para los sistemas de presión, caudal y nivel, estén cerradas.

Se comprueba la alimentación de tinta para las plumas del registrador (véase las instrucciones del fabricante).

Puesta en marcha del sistema de control

Se sitúan todos los controles en la posición manual (MAN) y se hacen girar los controles manuales a la posición de cerrado (O).

Se cierra el disyuntor en la parte posterior del panel de control principal.

Se conecta la bomba principal de circulación utilizando el pulsador verde del panel.

Se ventila la bomba de circulación principal por medio de HV12, HV13 y HV14, abriendo las dos últimas y cerrando la primera.

Se comprueba que la válvula HV8 esté cerrada.

Se conecta el calentador de agua y se regula la velocidad de circulación de agua caliente, empleando las válvulas HV2 y HV7 con el flujómetro del módulo de servicio.

La válvula FCV1 se cierra como lo muestran los indicadores de actuación de las válvulas. Se debe observar la correspondencia que hay entre las variaciones en las presiones de control con los actuadores de las válvulas. FCV1 es una válvula normalmente

abierta y la presión de control aumenta de 0.2 a 1.0 bar a medida que la válvula se desplaza de las posiciones de totalmente abierta a totalmente cerrada, a medida que el caudal disminuye desde el máximo a cero.

Conmutación de control Manual a Automático

Para que esta operación se realice suavemente es necesario que el valor seleccionado se acople con la velocidad de circulación controlada manualmente. Se alinea el indicador de ajuste con el indicador del receptor en la escala indicadora por medio del mando de control de ajuste.

Se conmuta de manual (MAN) a automático (AUTO).

Se observa el funcionamiento del control y se anota su respuesta a las variaciones en la velocidad de circulación tomada.

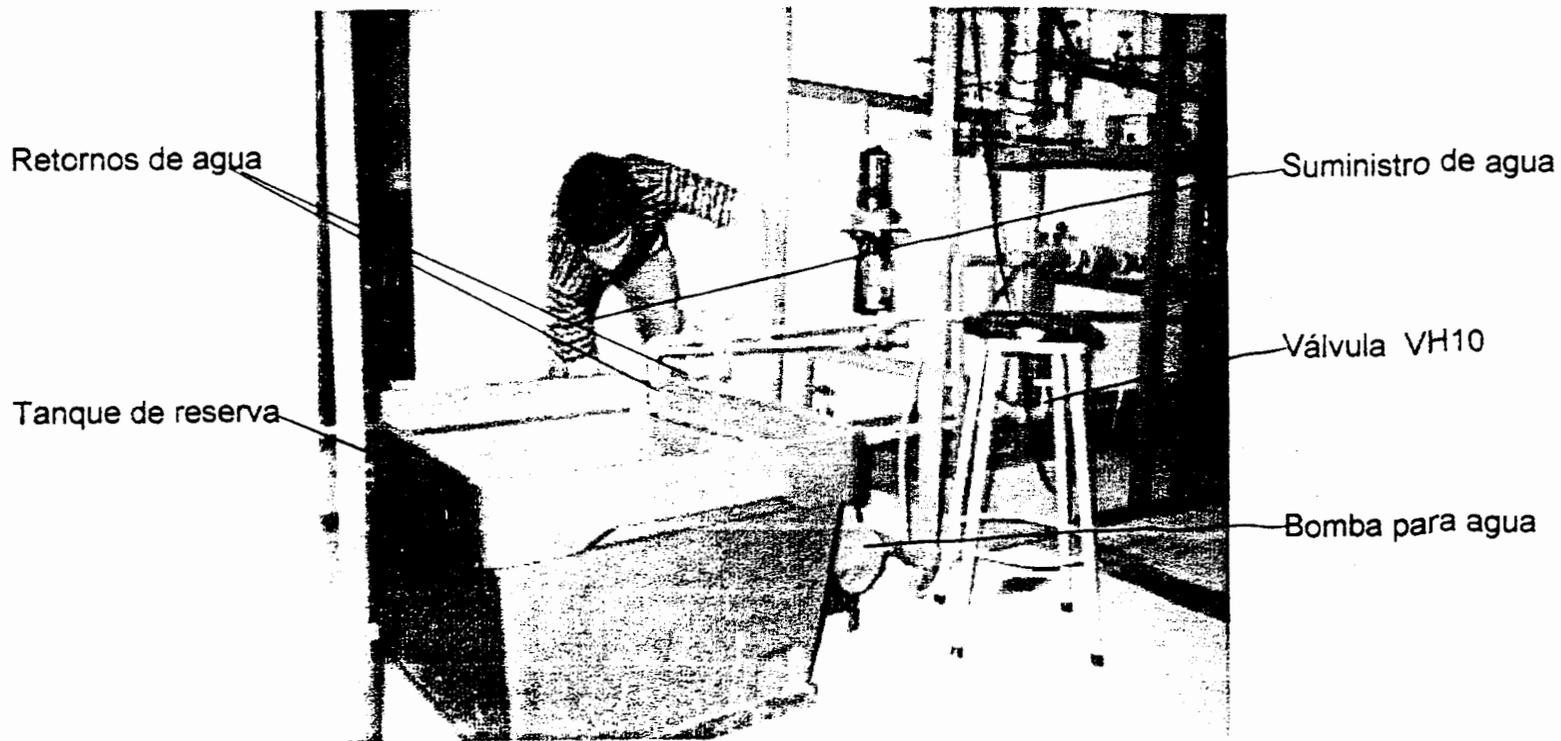


Fig. 4. 12a MANIOBRAS DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

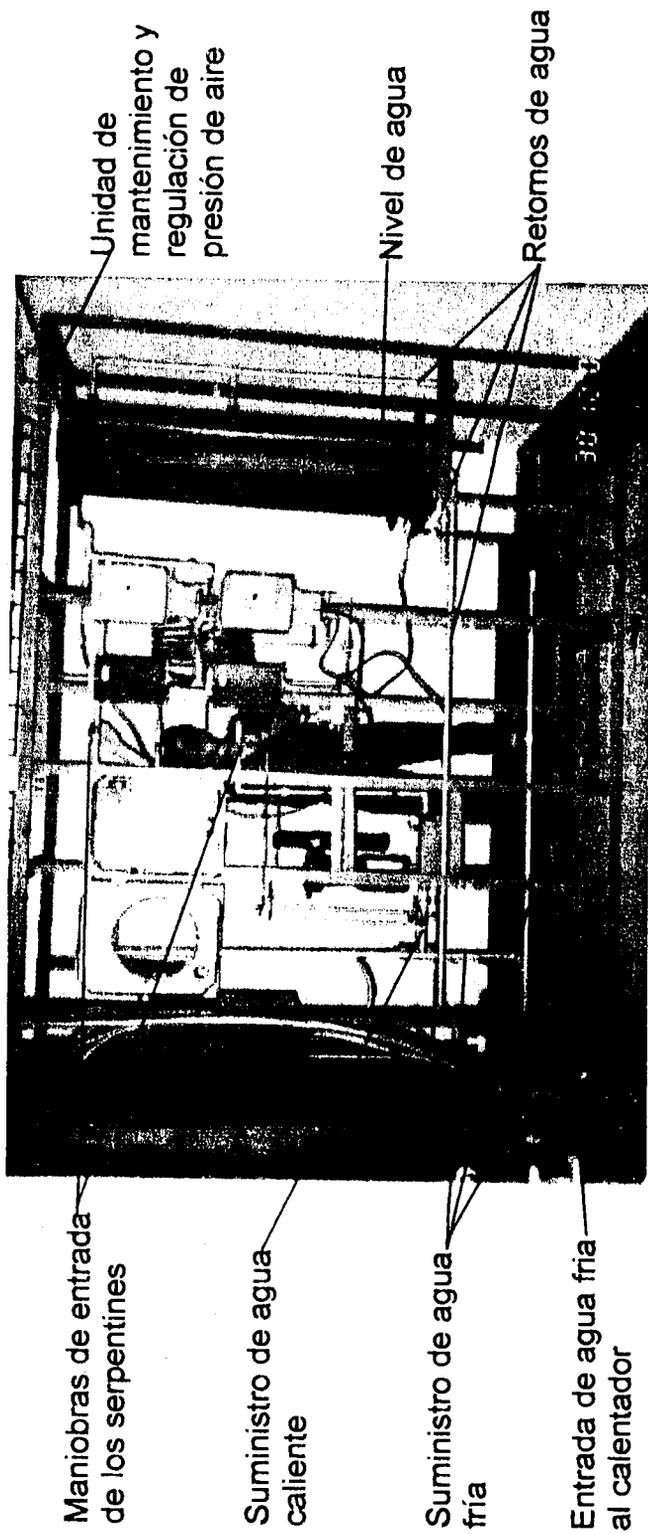


Fig. 4. 12b MANIBRAS DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

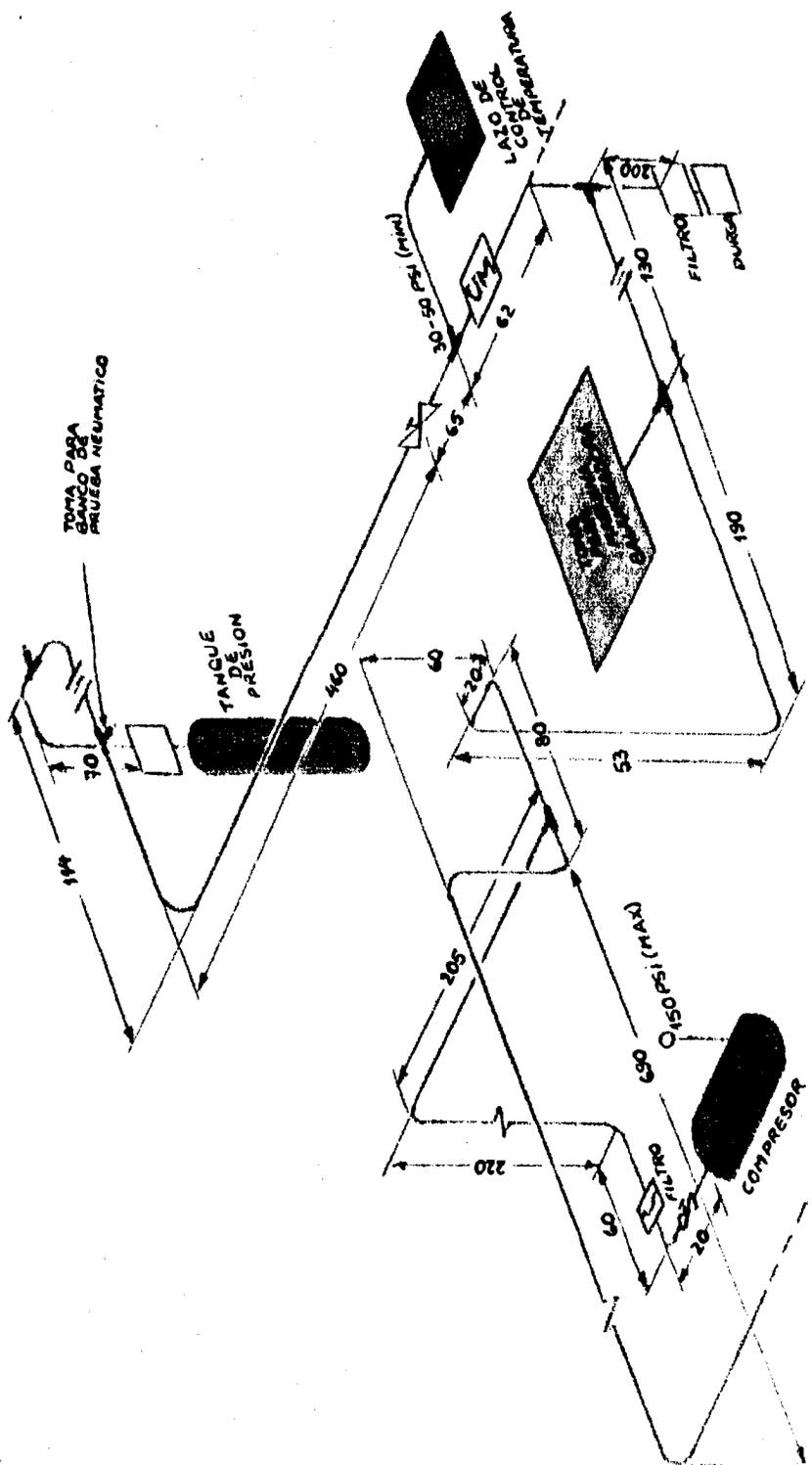


Fig. 4. 13 INSTALACION DE LA TUBERÍA PRINCIPAL DEL AIRE