



T  
629.83  
PICS  
V.2

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

**“SIMULADOR DE CONTROL PARA  
PROCESOS  
DE TEMPERATURA“**

**TOMO II**

**TESIS DE GRADO**

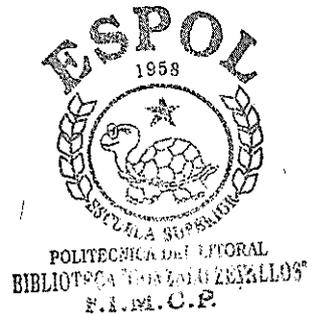
Previa a la Obtención del Título de:  
**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

**LUIS GABRIEL PICO SALTOS**

Guayaquil - Ecuador

Año - 2001



*Adriano Rojas*  
*Rojas*

## CAPITULO 5

### CALIBRACION DE LOS INSTRUMENTOS DEL LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA.

#### 5.1 Generalidades

Hemos comprobado que los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso.

En la ejecución de estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del instrumento. Por ejemplo; presión del proceso (como el suministro de aire regulado a través de un manómetro de alta precisión) a lectura de presión en la escala de un manómetro (que se quiere calibrar); temperatura real a señal de salida neumática en un transmisor neumático de temperatura; señal electrónica (4 - 20mA D.C. → corriente directa o continua) de entrada a señal neumática de salida (3 - 15 psi) en un convertidor I/P (intensidad a presión); señal de entrada neumática a posición del vástago del obturador en una válvula de control; señal neumática de presión (3 - 15 psi) a señal de salida electrónica (4 - 20mA D.C) en un convertidor P/I (presión a intensidad); señal neumática de entrada en un controlador

registrador de temperatura (3 - 15 psi) a señal de salida de presión también neumática; etc.

Esta relación se puede encontrar en las partes internas del instrumento, en particular cuando éste es complejo como en el caso de un instrumento controlador para montaje en panel, el cual está compuesto por varios bloques: unidad de punto de consigna (valor fijado que se desea de la variable de medida), unidad de mando manual, unidad de control, etc. En la unidad de punto de consigna existirá entre la posición del botón de mando o indicación de posición y la señal de salida a la válvula de control. Finalmente, en la unidad de control estarán ligadas la señal de error (diferencia entre el punto de consigna y la variable) y la señal de salida a la válvula de control relación que será función de las acciones que posea el controlador.

En la figura 5.1, se puede apreciar estas funciones en varios tipos de instrumentos.

Existirá una correspondencia entre la variable de entrada y de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada, el instrumento estará efectuando una medición correcta. Es de

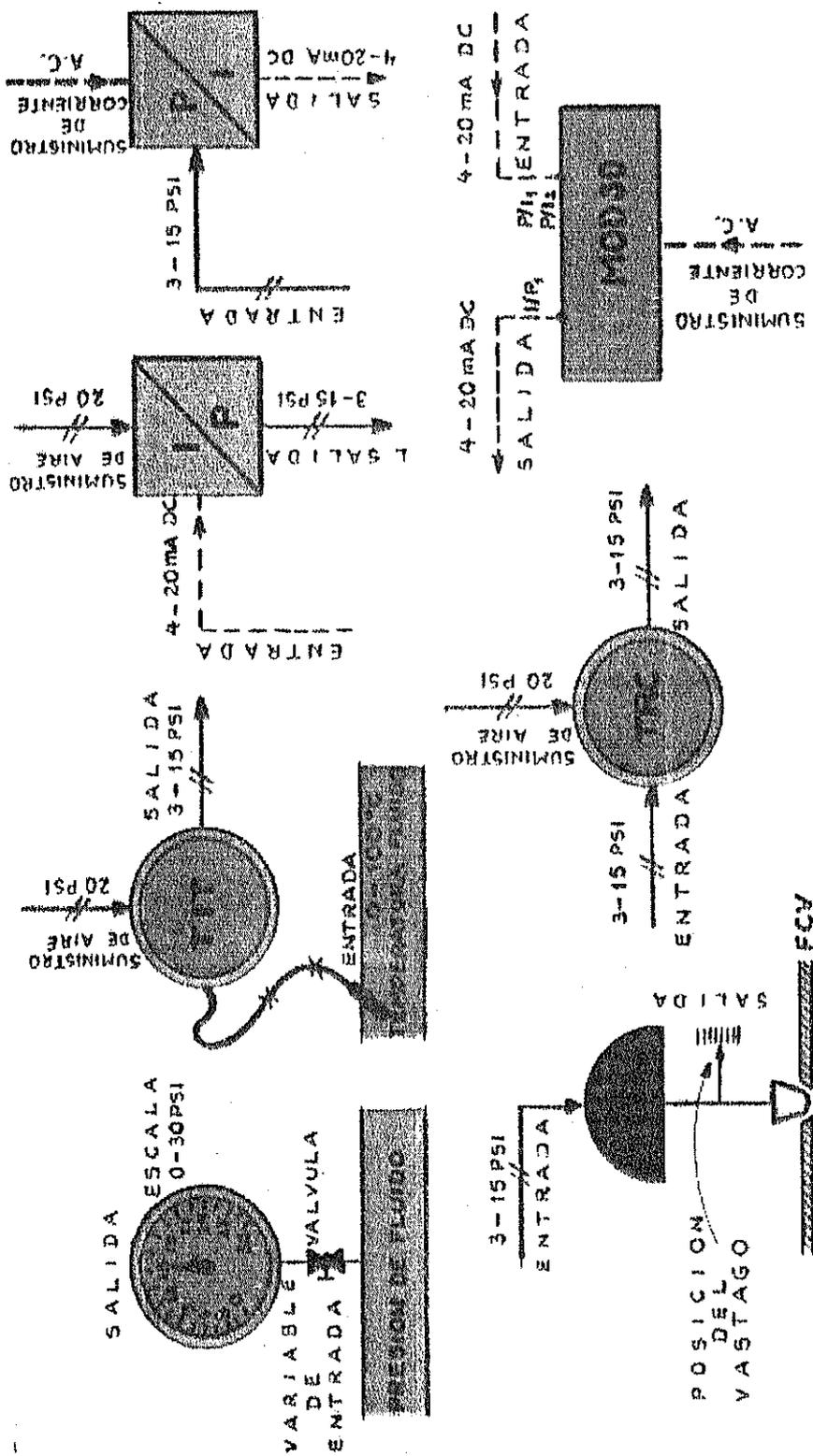


Fig. 5.1 RELACION SALIDA - ENTRADA EN VARIOS TIPOS DE INSTRUCCIONES

señalar, que los instrumentos determinan en general valores inexactos en la salida que se apartan en mayor o menor grado del valor verdadero de la variable de entrada, lo cuál constituye el error de la medida.

Como ya lo expresamos anteriormente, el error de la medida es universal e inevitable y acompaña a toda medida aunque éste sea muy elaborada, o aunque se efectúe un gran número de veces.

Es decir, el valor verdadero no puede establecerse con completa exactitud y es necesario encontrar unos límites que lo definan, de modo que sea práctico calcular la tolerancia de la medida.

## **5.2 Errores de los instrumentos**

Un instrumento es considerado bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicador registrado o transmitido, está comprendida entre los límites determinados por la precisión del instrumento.

En instrumentos ideales (sin errores), la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida, y los

valores de lectura del aparato se presentan de una manera lineal. La figura 5.2, nos muestra dicha relación.

Si el instrumento a considerarse es un transmisor neumático, cuando el índice adopte las posiciones 0, 25, 50, 75, y 100% de la escala, las señales de salida correspondientes serán: 3, 6, 9, 12, y 15 psi respectivamente. Si se tratase de un instrumento electrónico, las señales de salida serían 4, 8, 12, 16 y 20 mA. D.C. respectivamente. A los instrumentos que se agrupan dentro de este tipo de relación se los denomina de "**Acción directa**".

En condiciones estáticas de funcionamiento, las desviaciones respecto de la relación lineal indicada, dan lugar a los errores de calibración, de los instrumentos, si es que dichas desviaciones no superan la precisión dada por el fabricante del instrumento consideraríamos al mismo como calibrado, aunque no coincidiera exactamente la curva **variable - lectura** con la recta ideal.

Las desviaciones de la curva **variable real - lectura** de un instrumento típico, como el mostrado en la figura 5.2, con relación a la recta ideal representan los errores de medida del aparato. Esta curva puede

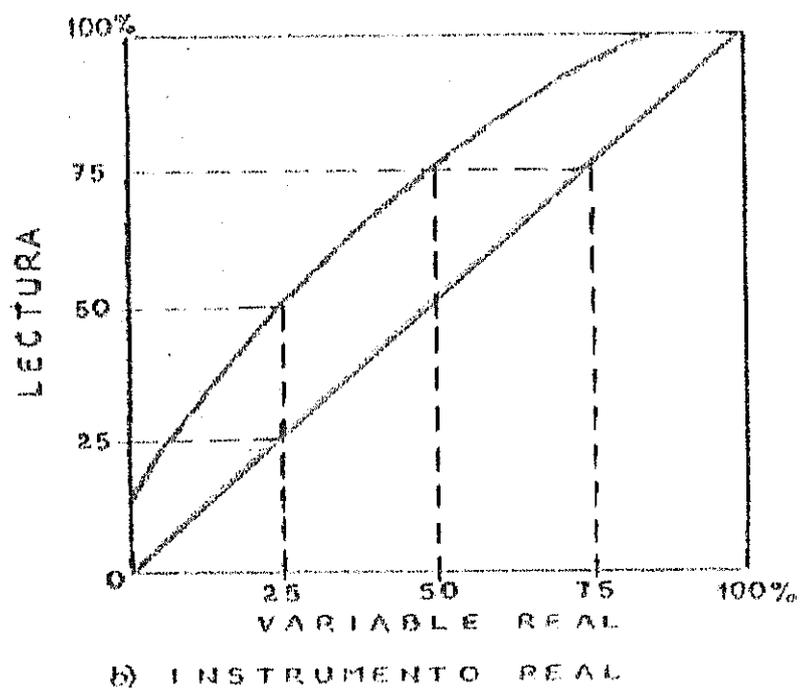
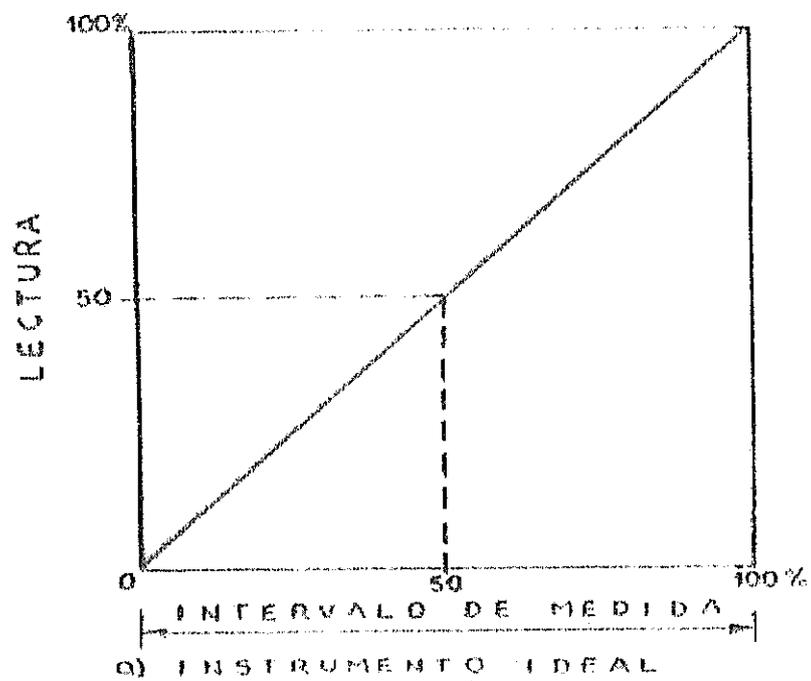


Fig. 5.2 RELACION MEDIDA REAL - LECTURA

descomponerse en tres, las que individualmente representan tres tipos de errores en forma aislada o combinada en los instrumentos:

### **Error de cero**

Todas las lecturas se encuentran desplazadas un mismo valor con respecto a la recta ideal representativa del instrumento. Este tipo de error se puede observar en el gráfico de la figura 5.3, donde el desplazamiento puede ser positivo o negativo. El punto de partida o de base de la recta representativa cambia sin que varíe la inclinación o la forma de la curva. (La curva representativa ideal y la curva real actual del instrumento tienen pendientes similares).

### **Error de multiplicación**

El aumento o disminución progresiva de las lecturas con relación a la recta representativa; de acuerdo a lo que se ve en la figura 5.4, la que nos muestra que el punto base o de partida no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

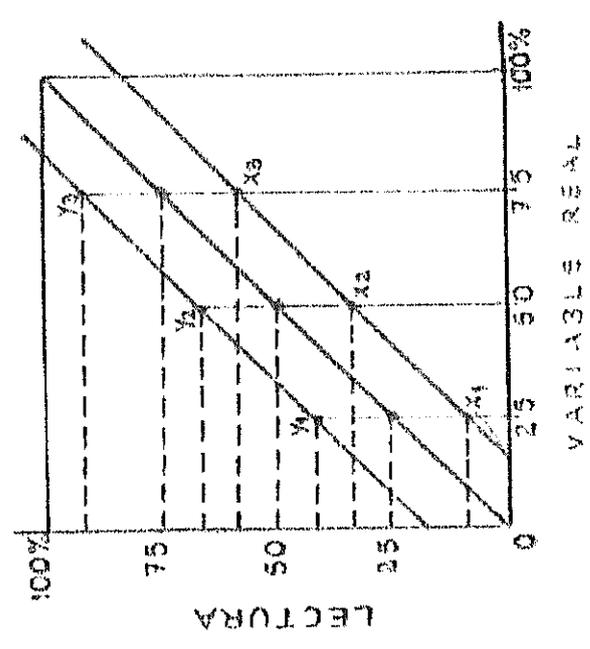
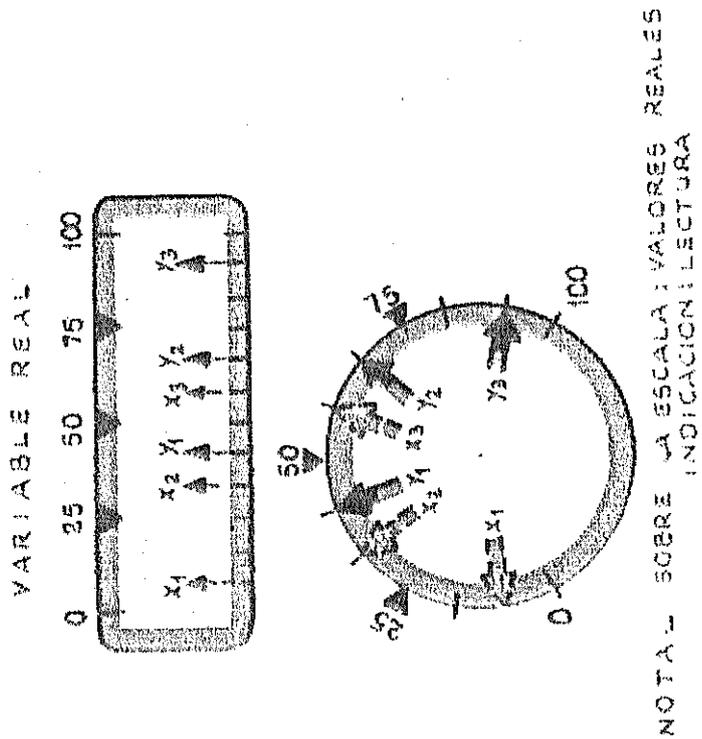


Fig. 5.3 ERROR DE CERO

NOTA: SOBRE LA ESCALA: VALORES REALES (INDICACION); LECTURA.

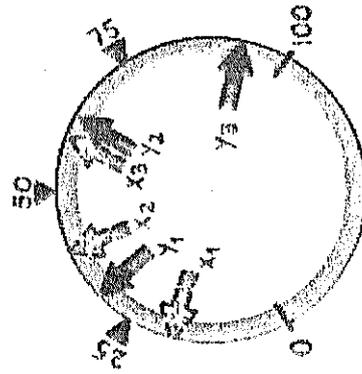
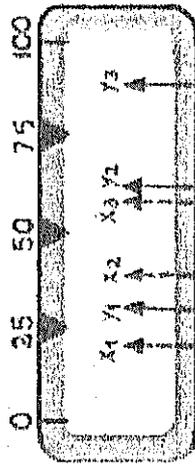
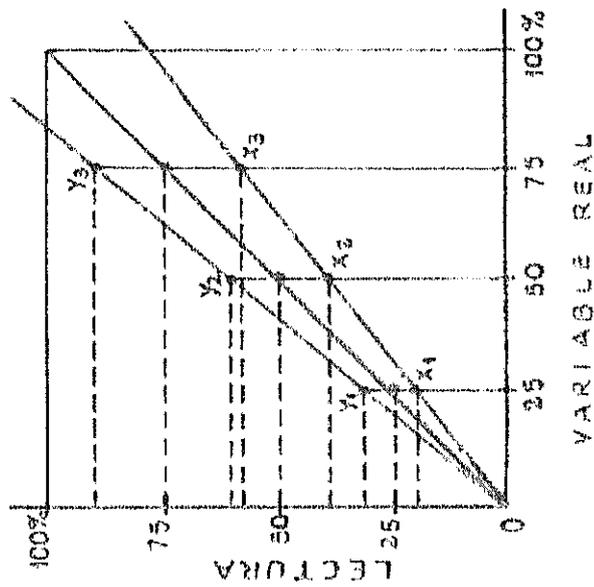


Fig. 5.4 ERROR DE MULTIPLICACION

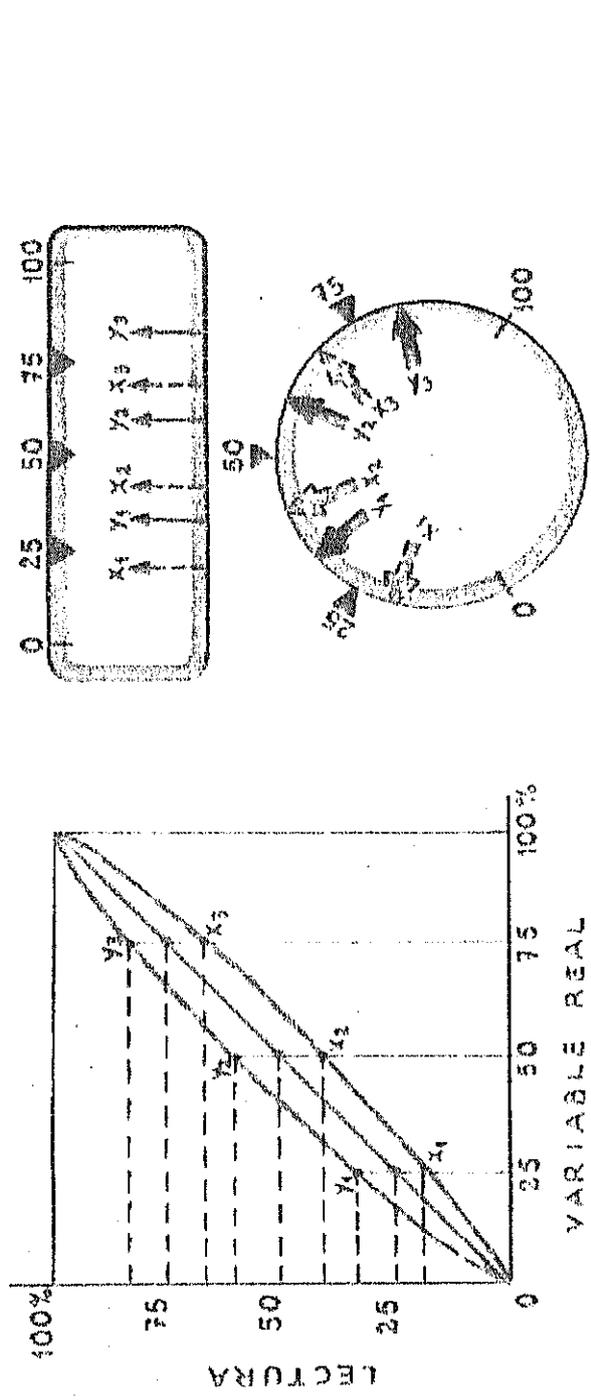


### Error de angularidad

La curva real coincide en los puntos 0 y 100% de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. La curva toma la forma de un arco de flecha. En la figura 5.5, puede verse un error de estas características. La máxima desviación se suele encontrar en la mitad de la escala.

Podemos hacer ajustes a los instrumentos para corregir los errores. Cabe indicar que algunos instrumentos no pueden tener error de angularidad (por su construcción), entre los cuales están los instrumentos electrónicos en general. Al combinar estos tres errores obtenemos una curva de relación **medida real - lectura**, tal como la representada en la gráfica de la figura 5.2. En muchas ocasiones, el error de cero se corrige con el llamado tornillo de cero, que modifica directamente la posición del índice, aguja (pointer) o de la pluma de registro, cambiando la curva **variable - lectura** paralelamente a sí misma, o bien extrayendo el índice y fijándolo al eje de lectura en otra posición.

El error de multiplicación se corrige actuando sobre el tornillo de multiplicación (o span en inglés), denominado también tornillo de cien,



NOTA: SOBRE LA ESCALA: VALORES REALES  
INDICACION: LECTURA

Fig. 5.5 ERROR DE ANGULARIDAD

que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la variable al índice o a la pluma, es decir, que aumenta o disminuye progresivamente las lecturas sobre la escala.

Para calibrar un instrumento es importante, primeramente, eliminar o reducir al mínimo el error de angularidad. Se debe principalmente, a la transmisión, por palancas de movimiento del elemento primario o de la variable medida, al índice de lectura o de registro (fig.5.6 ).

Se anulará el error de angularidad cuando las palancas queden exactamente a escuadra de la variable al 50% de su valor. Se observará en la figura 5.6 a., que en aquella posición, cualquier cambio angular en la posición del brazo de la variable medida se reproduce en forma lineal en el brazo de la pluma, y no existe error de angularidad. El "escuadrado previo de las palancas" es equivalente a decir, perpendiculares entre sí.

Gráficamente podemos explicar mejor esta situación en la figura 5.6 b., la transmisión de movimientos de un instrumento neumático fundamental, las clases de errores y su procedimiento general de calibración. Una aplicación práctica la tenemos en el manómetro de Tubo Bourdon como el de la figura.

Veamos entonces, lo que ocurre, cuando situamos la variable en 0% de la escala, acortamos intencionalmente la longitud  $c'$  la varilla  $c$  de unión de las palancas, ocurrirá que la posición del brazo de la variable será la VA, y la del índice será  $IM'$ , de modo que será necesario ajustar el cero para que el índice pase de  $IM'$  a la posición correspondiente al 0% de la escala. Con este ajuste, el índice ha quedado un ángulo  $\alpha$  desplazado, equivalente a  $M'I A'$  con respecto al brazo  $b$ . En la figura podemos observar que para los valores de la variable de 50 y de 100%, las posiciones del índice son  $N''$  y  $P''$ , y las de su brazo  $N$  y  $P$  respectivamente, las cuales hacen que el movimiento de la varilla de unión es mayor entre 0 y 50%, que entre 50 y 100%. Por este motivo, la pluma indicará un valor alto para el valor medio de la variable; siendo este valor el de  $N''$ , con la condición de que el ángulo  $N'I N'' = \alpha$ .

La angularidad anterior se ha obtenido acortando la varilla de conexión, de modo que para eliminarla hay que aumentar la longitud de ésta. Pero, con el ajuste de cero efectuado, este alargamiento da lugar a que la pluma señale un valor todavía más alto para el valor medio de la variable.

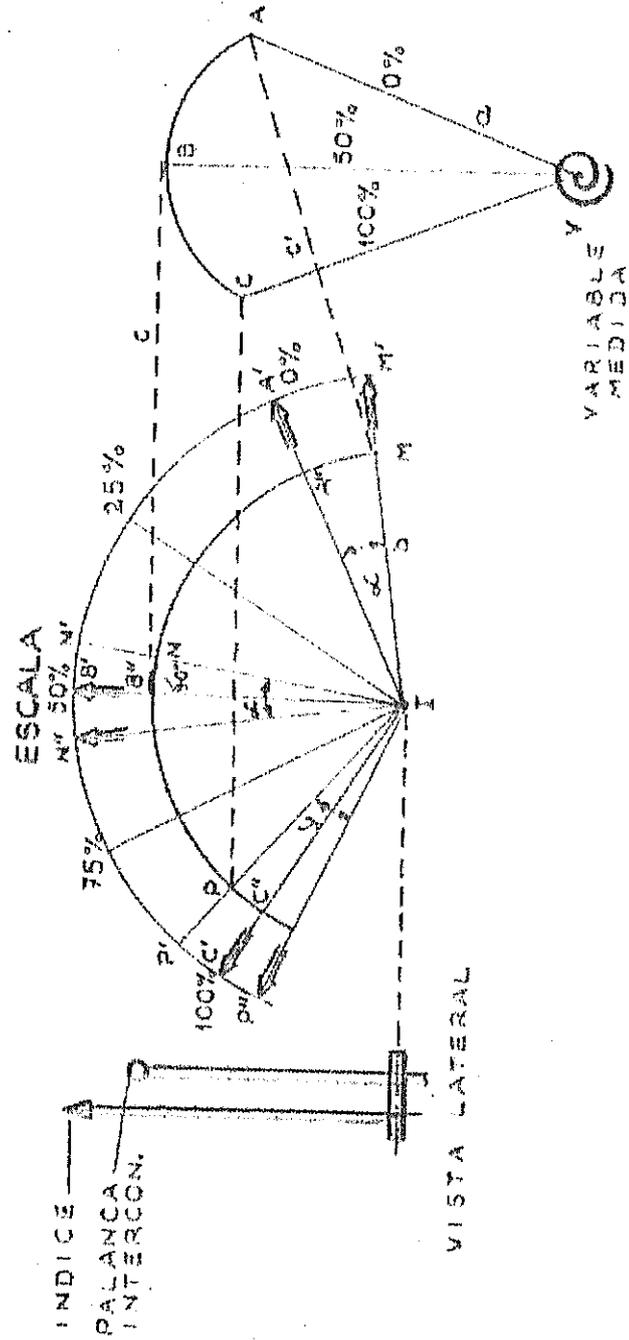
En consecuencia, para corregir el error de angularidad es necesario actuar en sentido contrario al aparentemente más lógico, es decir, en el mismo sentido del error.

Análogamente, el manómetro de tubo Bourdon de la figura 5.6, nos deja observar un funcionamiento parecido, solo que aquí la palanca de interconexión es fija y el mecanismo de la angularidad es el deslizador S, de tal forma que el error de esta especie es nulo cuando la palanca de interconexión C y la del deslizador b forman un ángulo recto para el 50% del valor de la variable.

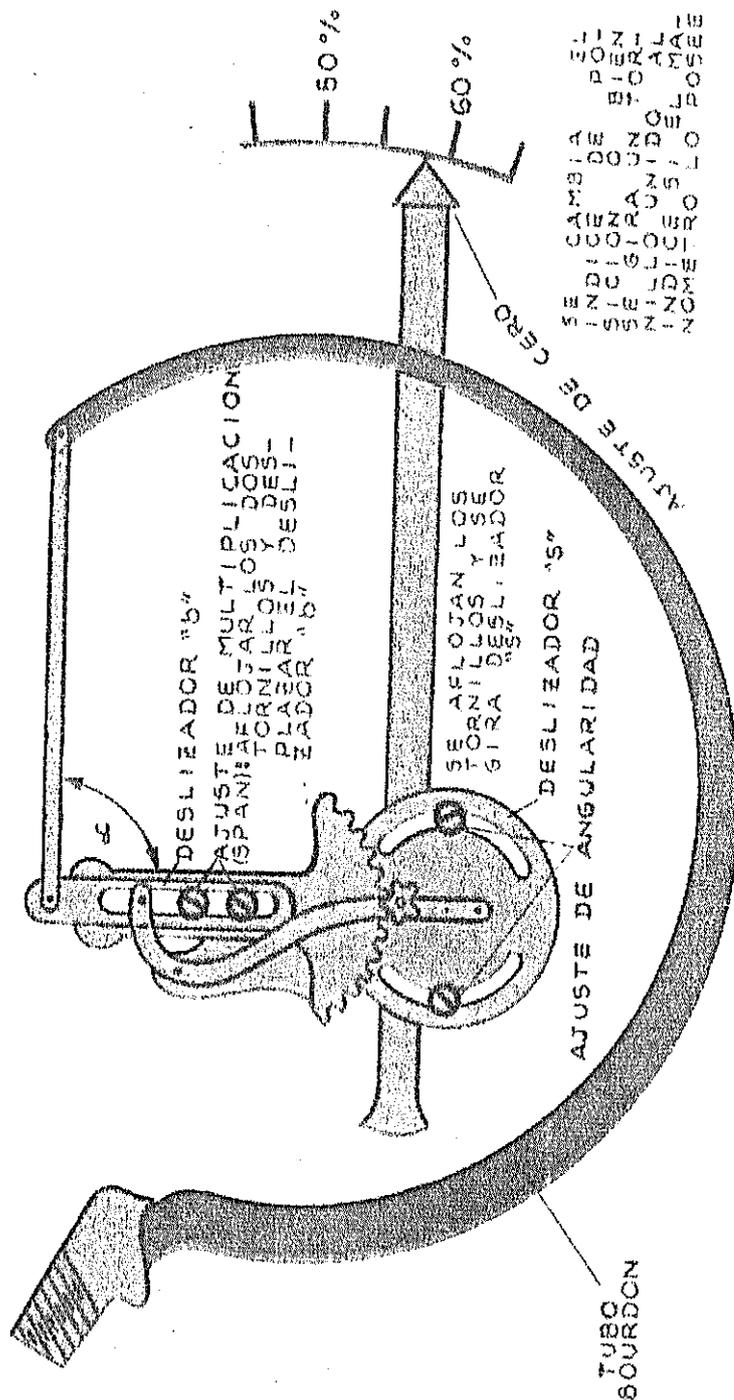
La posición de la punta del tubo de Bourdon puede compararse con el círculo que describen los puntos A, B y C del extremo de la palanca de la variable, ya que el movimiento del tubo Bourdon puede considerarse lineal dentro del campo de medida de la variable. Podríamos provocar un error de angularidad girando por ejemplo a izquierdas un ángulo  $\alpha$  el deslizador S, con lo cual se vería que la eliminación correspondiente del error ( girando a derechas el mismo ángulo ) da como resultado que el índice señale un valor todavía más alto para el valor medio de la variable.

Entonces, el error de angularidad puede ser eliminado procediendo al escuadrado previo de las palancas para el valor de 50 % de la variable, o también ajustando el tornillo de angularidad para aumentar el valor del error en su misma dirección. La experiencia nos dice que este aumento puede ser de unas cinco veces el error encontrado. Nótese que la acción del tornillo de angularidad consiste en realidad en acortar o alargar la longitud de la varilla de unión entre el brazo de la variable y el del índice o pluma. Podemos, así mismo, ajustar la angularidad deslizando la palanca de la variable sobre su eje o bien la palanca correspondiente al índice, de modo que el ángulo que forman con la de interconexión sea recto para el valor del 50% de la variable.

Ocasionalmente, en los instrumentos neumáticos no es posible obtener el ajuste deseado de la angularidad por variación de la longitud de la palanca de interconexión; cuando esto ocurre es necesario variar la altura de la tobera con relación al obturador: el aumento de su separación baja la presión de salida en la zona mitad del campo de la señal de salida. No obstante, esta variación de posición no debe efectuarse a menos que sea absolutamente necesario, ya que dicha separación ha sido sellada en fábrica.



a) TRANSMISION DE MOVIMIENTOS POR PALANCAS  
 Fig. 5.6 TRANSMISION DE MOVIMIENTOS Y LOCALIZACION DE AJUSTES



2) LOCALIZACION DE AJUSTES (MANOMETRO)

Fig. 5. 6 TRANSMISION DE MOVIMIENTOS Y LOCALIZACION DE AJUSTES

### 5.3 Procedimiento general de calibración

La figura 5.7, resume lo que a continuación describimos:

1. Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de cero del instrumento hasta que el índice señale el punto de base (el cero de la escala) (fig. 5.7 b.).
2. Colocar la variable en el valor máximo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de multiplicación (span) hasta que el índice señale el valor máximo de la variable (fig.5.7 c.).

En los pasos anteriores no es necesario ajustar con prolijidad los tornillos de cero y de multiplicación ya que aquello se realizará en los pasos finales que, como se observará, son una repetición de los dos primeros; el cuidado en el ajuste será posible en los pasos finales para obtener la precisión máxima posible en la calibración.

3. Repetir los pasos numerados con 1. , y 2. , sucesivamente hasta que las lecturas sean correctas en los valores mínimo y máximo (figs. 5.7d y 5.7e).



4. Situar la variable en el 50% del intervalo de medida y en este punto ajustar el tornillo de angularidad hasta mover el índice una distancia igual a cinco veces el valor del error en la dirección del mismo (la curva real se aplana). Podemos prescindir de este paso procediendo al escuadrado de las palancas para el 50% de la variable (fig.5.7 f). Comprobar la angularidad en los valores 25% y 75% de la escala.
5. Reajustar sucesivamente los tornillos de cero y de multiplicación hasta de conseguir la exactitud deseada o requerida (figs. 5.7g, 5.7h y 5.7i). Si fuera necesario efectuar una nueva corrección de angularidad.

Debemos reconocer que la palabra índice es equivalente a pointer (pluma o aguja) y señal de salida en instrumentos registradores y transmisores neumáticos por 3 a 15 psi, o electrónicos por 4 a 20 mA D.C.

La posición de los tornillos de ajuste de cero, de multiplicación y de angularidad, varía según el tipo de instrumento. Debe tomarse en cuenta, que los termómetros bimetalicos, usualmente tienen tornillo de cero; que los manómetros poseen tornillo de cero (o en su lugar

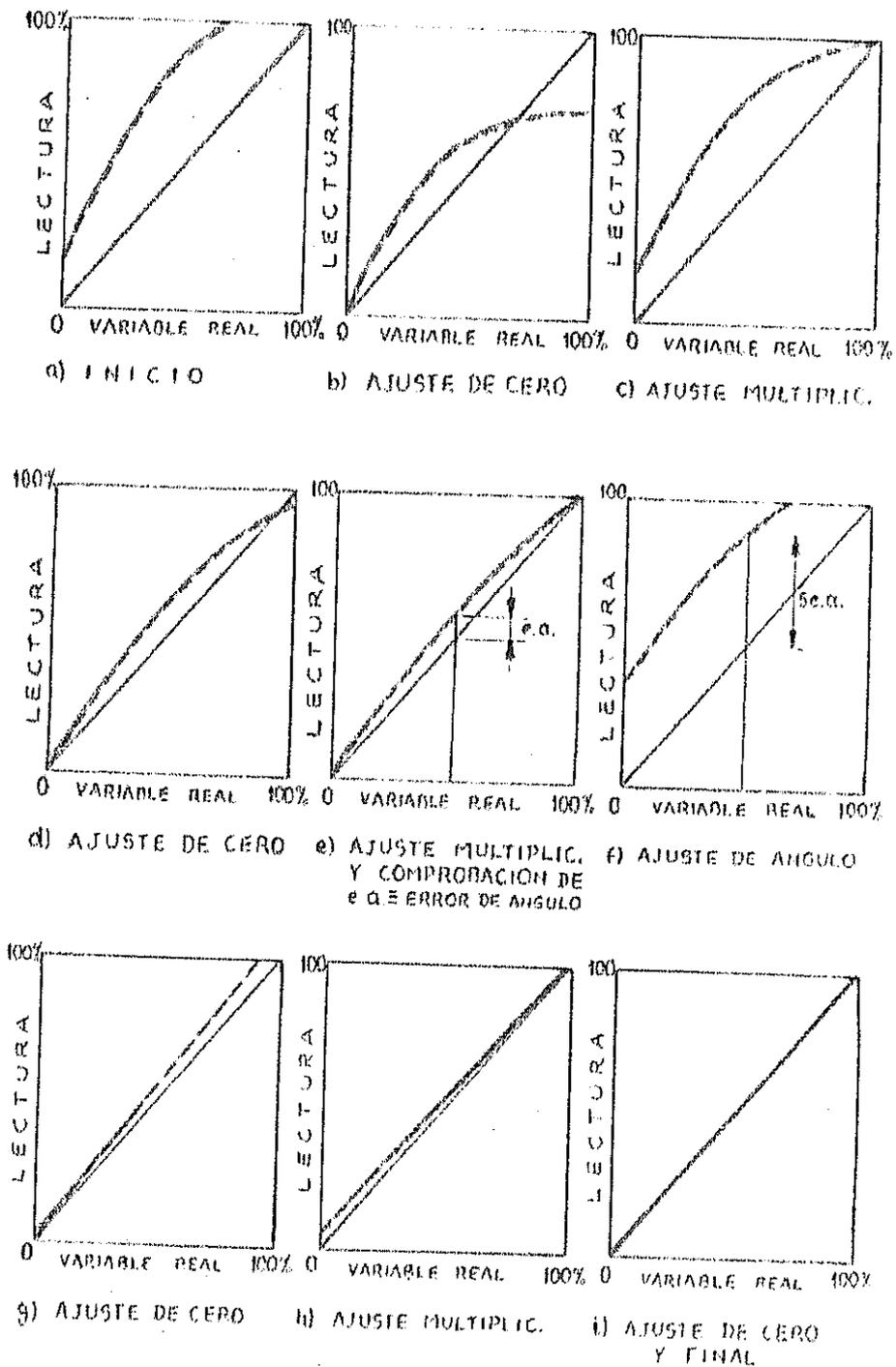
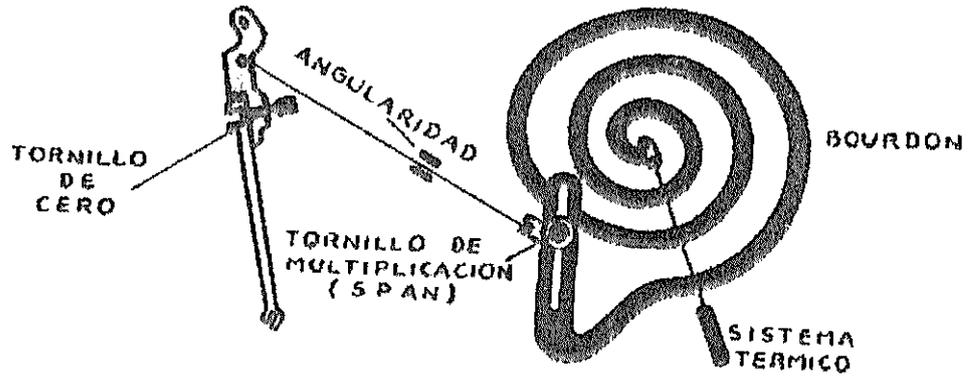
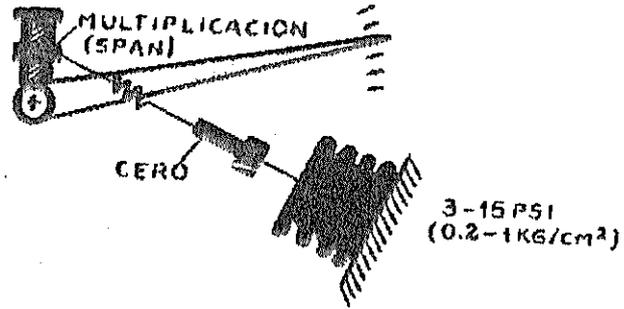


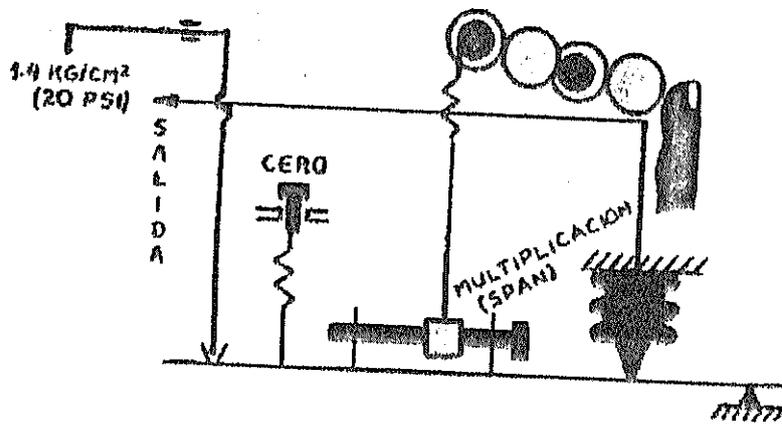
Fig. 5.7 METODO GENERAL DE CALIBRACION



a) REGISTRADOR CON TERMOMETRO DE BULBO



b) INDICADOR RECEPTOR NEUMATICO



c) GENERADOR NEUMATICO DE PUNTO DE CONSIGNA

Fig. 5. 8 SITUACION DE LOS AJUSTES EN INSTRUMENTOS

VARIABLE MEDIDA	SEÑAL NEUMÁTICA			SEÑAL ELECTRÓNICA							
	PSI	Kg/cm <sup>2</sup>	mA	D.C.			V. D.C.				
				4	10	0	1	0	0		
0	3	0.2	4	1	10	0	0	1	0	0	0
25	6	0.4	8	2	20	1.25	5	2	2.5	12.5	25
50	9	0.6	12	3	30	2.5	10	3	5	25	50
75	12	0.8	16	4	40	3.75	15	4	7.5	37.5	75
100	15	1.0	20	5	50	5	20	5	10	50	100

Tabla 5.1 Valores generales para calibración de los instrumentos

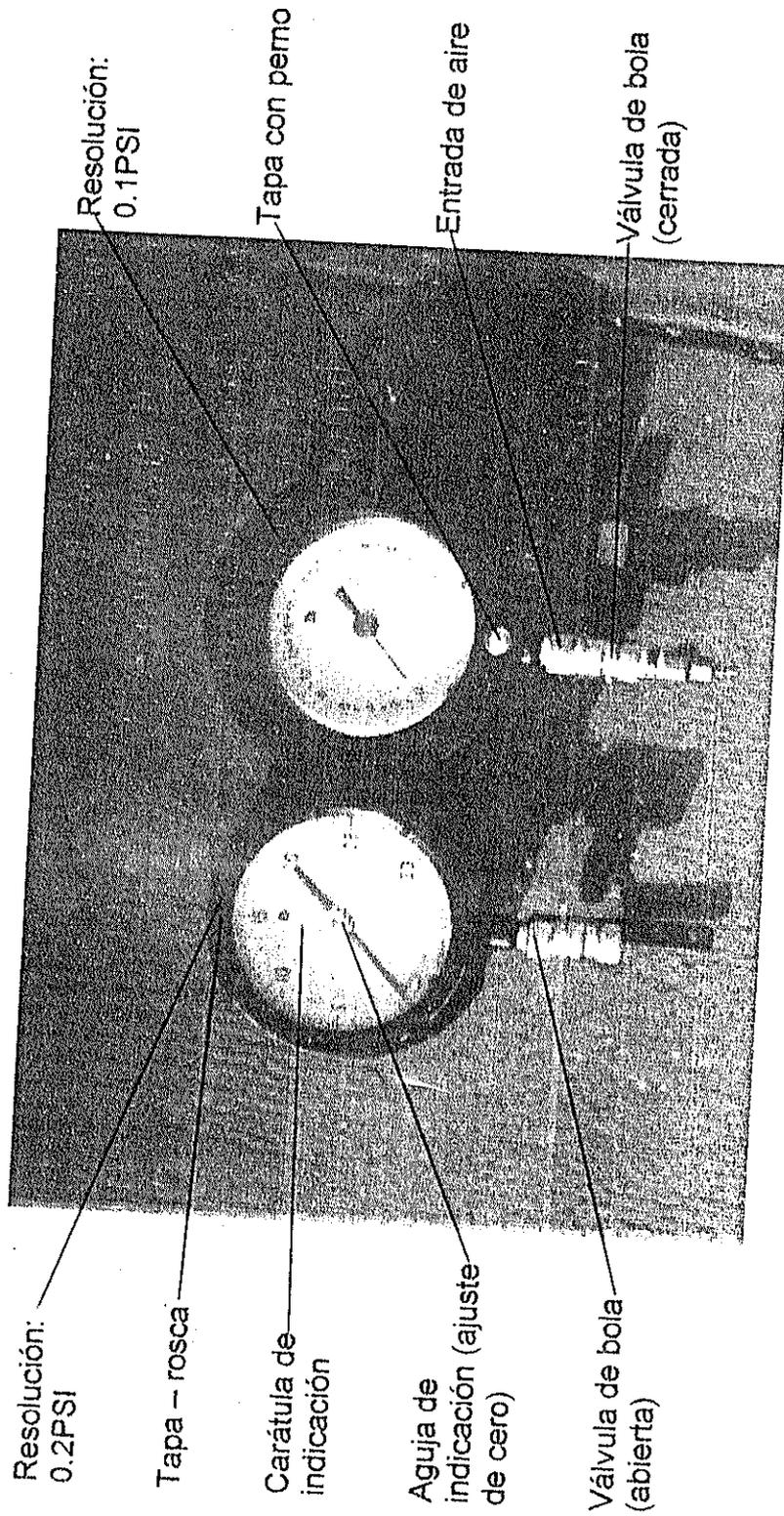


Fig. 5. 9a MANÓMETROS PATRON (VISTA FRONTAL)

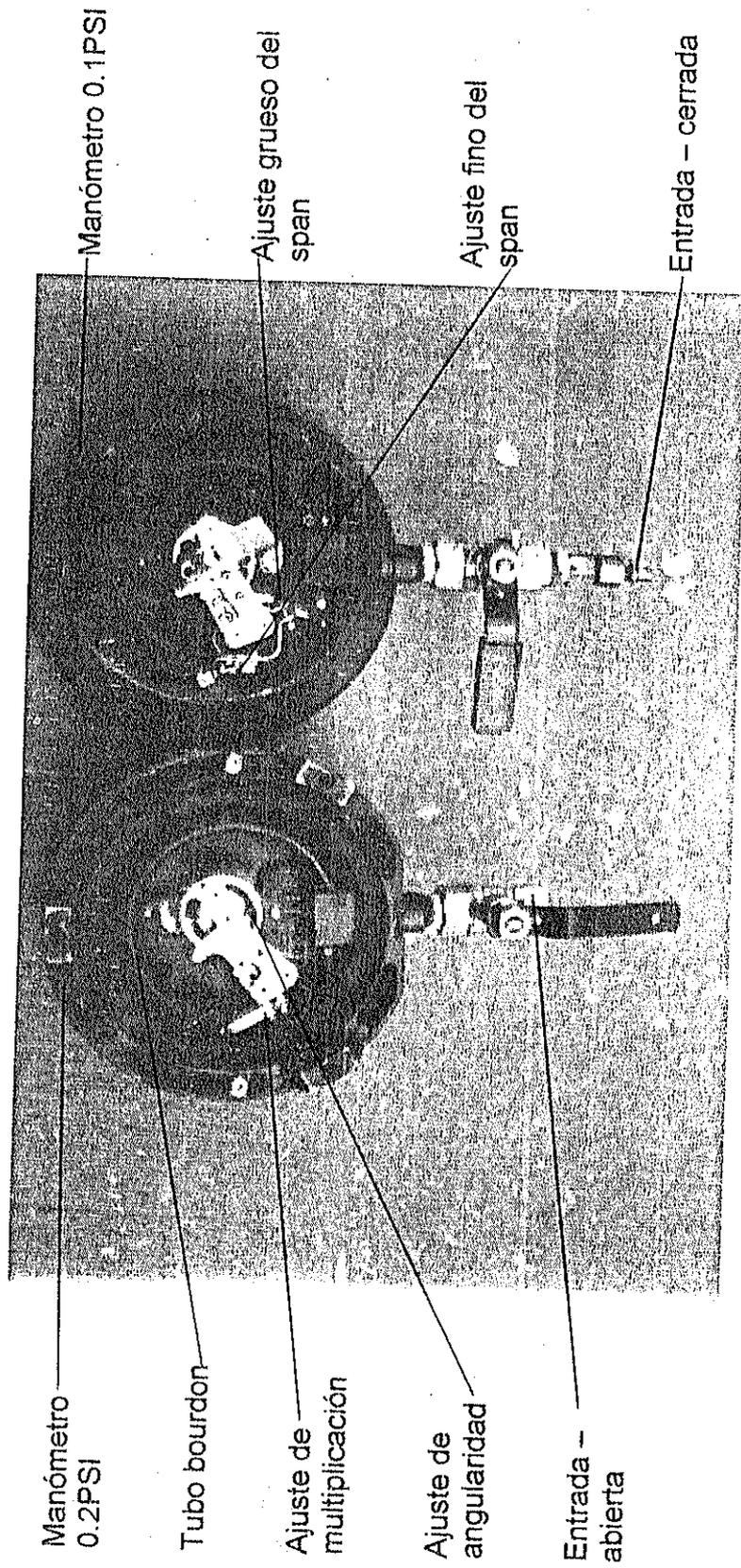


Fig. 5. 9b MANÓMETROS PATRON (VISTA POSTERIOR)

Bourdon. Es posible conseguir mayor precisión (hasta 0.1%) situando marcas móviles para cada incremento de la lectura.

La calibración periódica de los manómetros patrones es conseguida con el comprobador de manómetros de pesas, como el de la figura 5.10. El cual consiste en una bomba de fluido hidráulico como el aceite con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro que se está calibrando, y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego de pesas.

Accionando la bomba hasta levantar el pistón con las pesas y haciéndolas girar con la mano, es cuando comienza la calibración; el giro libre nos hace presentir que la presión es la adecuada ya que el conjunto **pistón - pesas** está flotando sin roces. Una pequeña válvula de alivio nos permite fijar exactamente la presión deseada cuando se cambian las pesas en la misma prueba para obtener diferentes presiones, o cuando inadvertidamente damos una presión excesiva.

Pistones de alta y baja presión con varios juegos de pesas permiten obtener márgenes de calibración muy variados. Ejemplos: 0-20, 2-100,

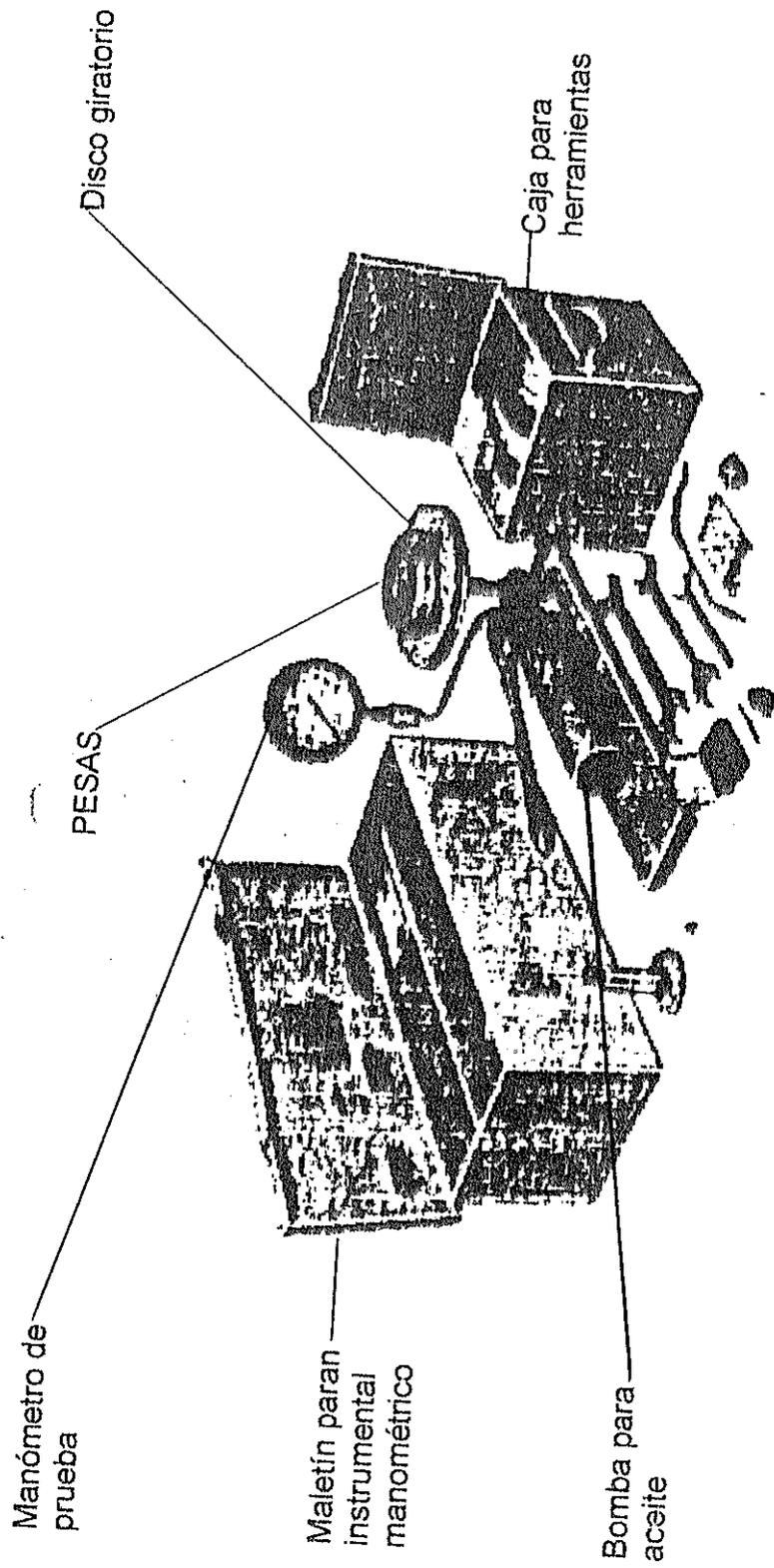


Fig. 5. 10 COMPROBADOR DE MANÓMETROS POR PESAS

30-150, 70-350, 140-700 Kgf/cm<sup>2</sup> ; siendo la precisión de medida de 0.1%.

El comprobador de manómetro portátil, fig.5.11, es de igual naturaleza que el anterior, la diferencia radica en que el patrón de comprobación es otro manómetro patrón en lugar de las pesas; la calibración, usando este equipo resulta más cómoda y de menor tiempo que con el equipo anterior.

Para presiones del orden de 1Kgf /cm<sup>2</sup> como máximo, se utilizan las columnas de mercurio portátiles. Se pueden disponer de las siguientes graduaciones: 0-100 mm de columna de mercurio (mm de Hg) 0 - 1.4Kgf /cm<sup>2</sup> o de 0 - 20 psi. Dichas columnas de mercurio disponen de conexiones en la parte inferior y en la superior, para la medida de presión o vacío respectivamente.

Para medir presiones más bajas utilizamos columnas de agua hasta 1.5 m de longitud, de igual manera, con conexiones en la parte inferior y en la superior para medir presión o vacío respectivamente.

Fabricantes de instrumentos disponen de maletas de calibración de instrumentos neumáticos, que permiten ahorros de tiempo.

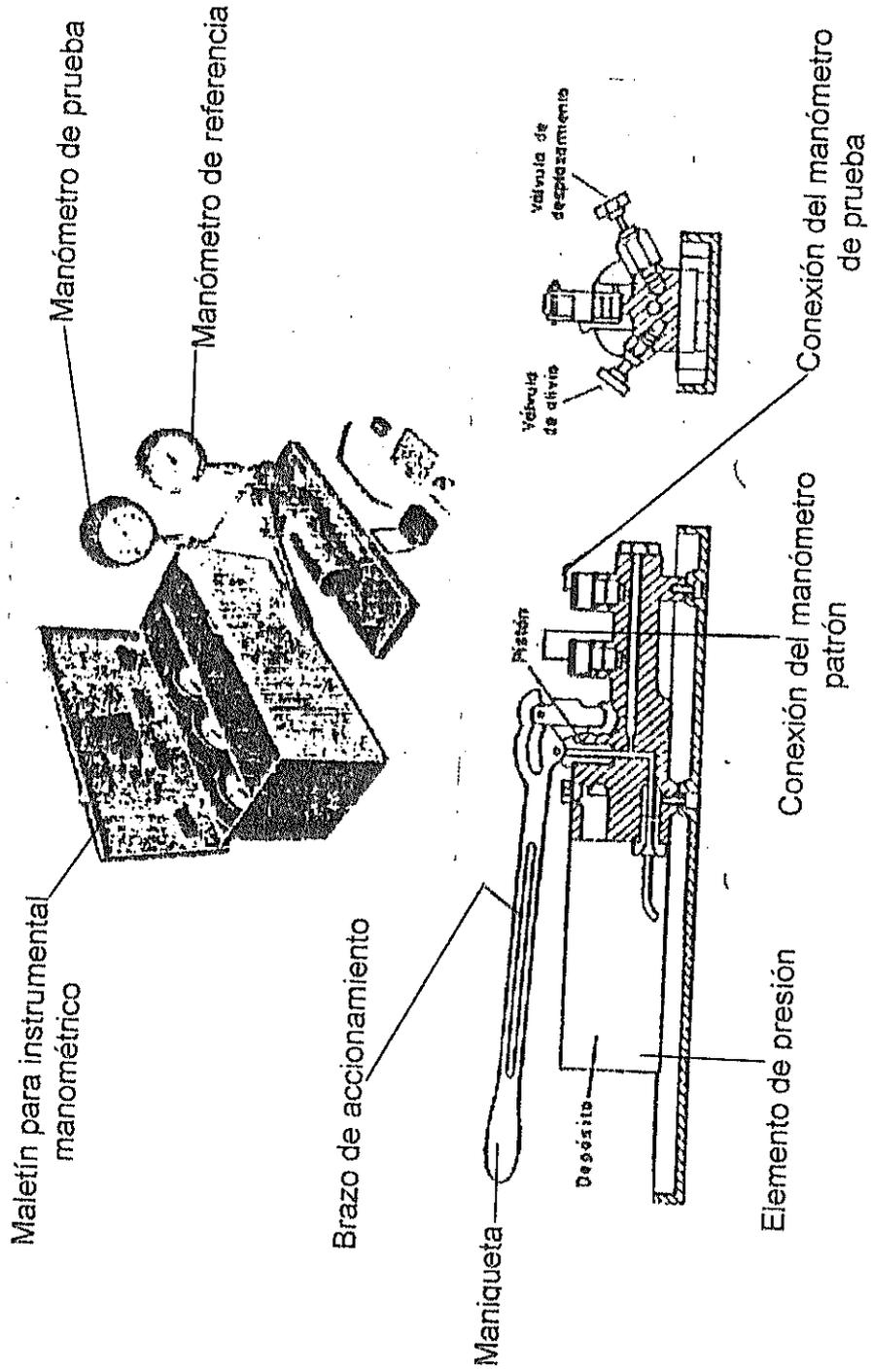


Fig. 5.11 COMPROBADOR DE MANÓMETROS PORTATIL

Las fuentes de alimentación de aire se las puede obtener de un compresor pequeño de aire sin aceite, accionado electrónicamente que proporcione una presión mínima de  $2 \text{ Kgf /cm}^2$  y acoplado un filtro manoreductor para conseguir la presión de alimentación de 20 psi ( $1.4 \text{ Kgf /cm}^2$ ). Algo que debemos tener muy en cuenta es que, las conexiones en los instrumentos en general siguen la norma **NPT** de rosca **cónica** tanto en la conexión macho como en la hembra. Siendo las conexiones más empleadas de  $\frac{1}{4}$ " NPT en las señales neumáticas y la de  $\frac{1}{2}$ " NPT para proceso.

Para determinar el tamaño del compresor necesario para alimentar los instrumentos de calibrar o para una instalación fija del mismo y los diámetros de las tuberías que alimentan los instrumentos neumáticos del proceso se tiene que considerar los caudales de consumo medio de aire de los aparatos neumáticos estándar utilizados en la industria.

Sumando todos los valores de consumo de aire resultará el consumo total de aire sin considerar la reducción por aumento del número de unidades. Es importante que, al seleccionar el compresor debe considerarse que lo normal es que funcione la mitad del tiempo sin estar en servicio continuo, es decir, que el compresor debe ser capaz

de suministrar el doble del caudal de consumo de los instrumentos como mínimo.

Al calibrar los manómetros es necesario extraer la aguja para ajustar el cero, o puede ser que el propio manómetro disponga de un engranaje con accionamiento exterior para posicionar la aguja. Esta operación se la debe realizar con sumo cuidado para evitar dañar la aguja y los mecanismos del movimiento; para el efecto, se emplean extractores.

La fig. 5.12, nos muestra los dispositivos de agujas y elementos extractores.

En la calibración de instrumentos electrónicos, se trata que el sistema de calibración sea capaz de generar y recibir señales de 4 - 20 mA D.C, y de simular las impedancias externas del circuito asociado con el instrumento. Como orientación, en la figura de la tabla 5.2, se obtienen las señales e impedancias que son características de los instrumentos electrónicos empleados en la industria.

Las maletas de calibración disponen de conectores, selectores para instrumentos de panel, selector de señal de salida, indicador de la señal de proceso etc.

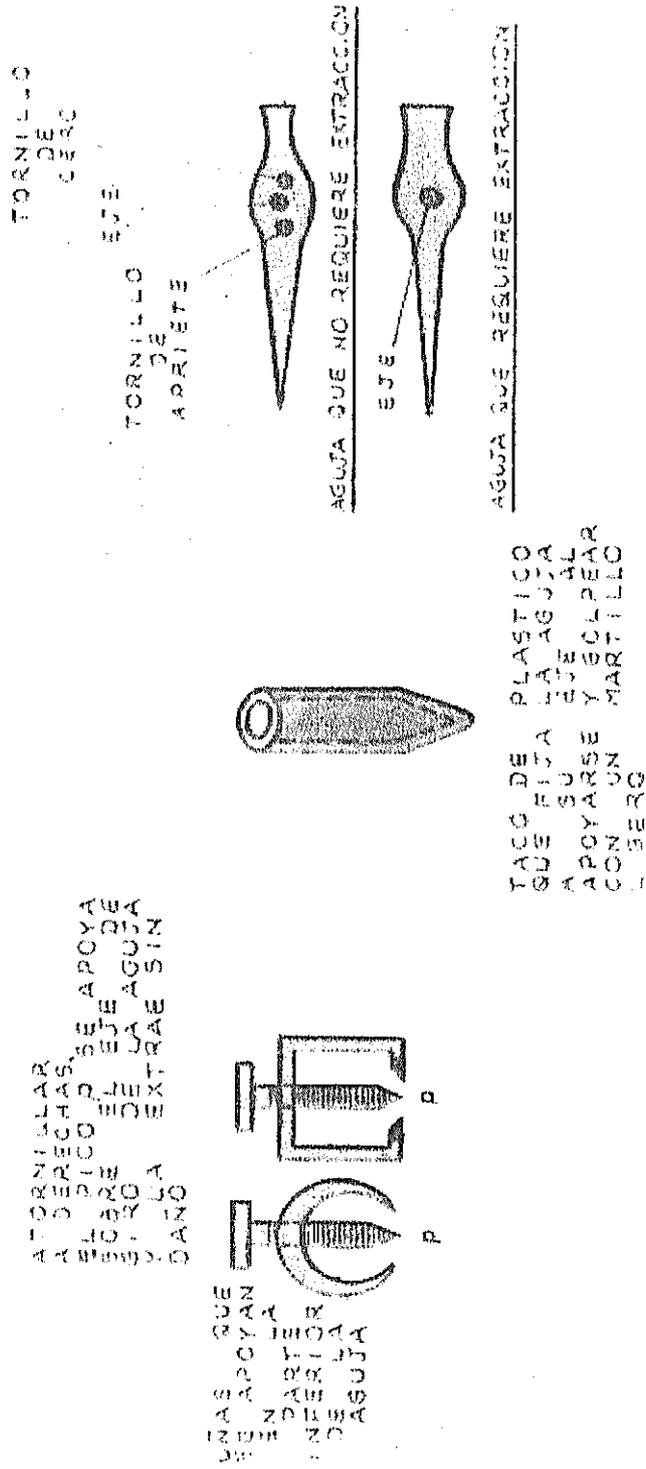


Fig. 5.12 EXTRACTOR DE AGUJAS DE MANOMETROS

SEÑAL	IMPEDANCIA INTERNA ( $\Omega$ )	IMPEDANCIA DE CARGA TOTAL ( $\Omega$ )	ALIMENTACION
4-20 mA c.c.	250	1200	24V c.c.
1-5 "	1000	4800	24V c.c.
10-50 "	100	1300	65V c.c.
0-5 "	1000	4800	24V c.c.
0-20 "	250	1200	24V c.c.
1-5V c.c.	250 que genera	4-20 mA c.c.	24V c.c.
0-10 mA c.c.	1 "	1-5 mA c.c.	24V c.c.
10-50 mA c.c.	10 "	1-5 mA c.c.	24V c.c.

Tabla 5.2 Impedancias características de los instrumentos

se puede extraer la aguja y ajustarla al eje en otra posición), de multiplicación y de angularidad; además, que los instrumentos electrónicos no suelen tener error de angularidad.

En la figura 5.8, pueden observarse varios tipos de instrumentos con sus ajustes correspondientes.

La figura de la **tabla 5.1**, nos muestra los valores generales para calibrar los instrumentos neumáticos y electrónicos.

#### **5.4 Calibración de instrumentos de presión**

En la calibración de instrumentos de presión se pueden utilizar dispositivos que contengan en general manómetros patrón.

Los manómetros patrón (fig. 5.9) sirven como testigos de la correcta calibración de los instrumentos de presión. Se encuentran con precisiones de hasta 0.2% de toda la escala, obtenida mediante un dial con una superficie espejular, con un índice (aguja) y unas graduaciones en la escala muy finas, con compensación de las variaciones de temperatura ambiente y con varias espiras en el tubo

La figura 5.13, nos muestra un circuito para maleta de comprobación neumática y un esquema para la calibración de instrumentos electrónicos.

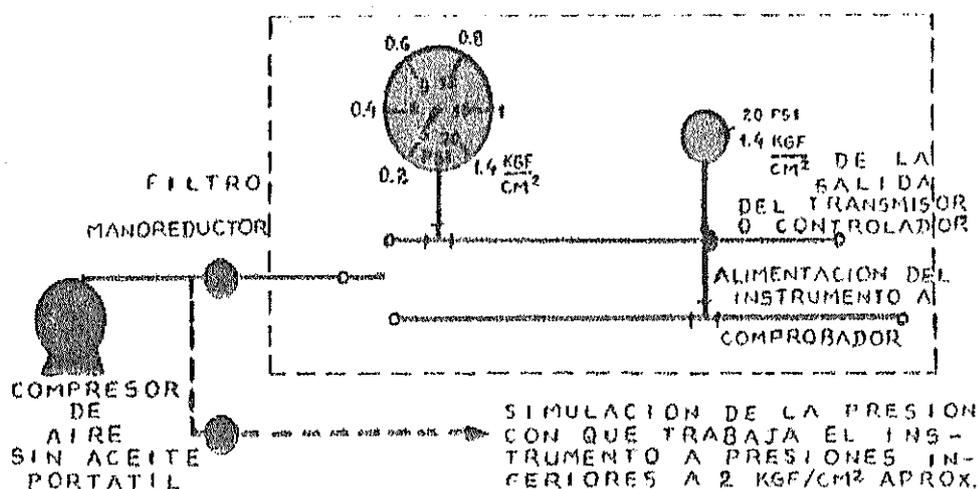
Por comodidad bastará simular la variable estudiada para iniciar la calibración del aparato, preferentemente en el taller de instrumentos y no en el propio proceso.

### **5.5 Calibración de los instrumentos del lazo de control de temperatura**

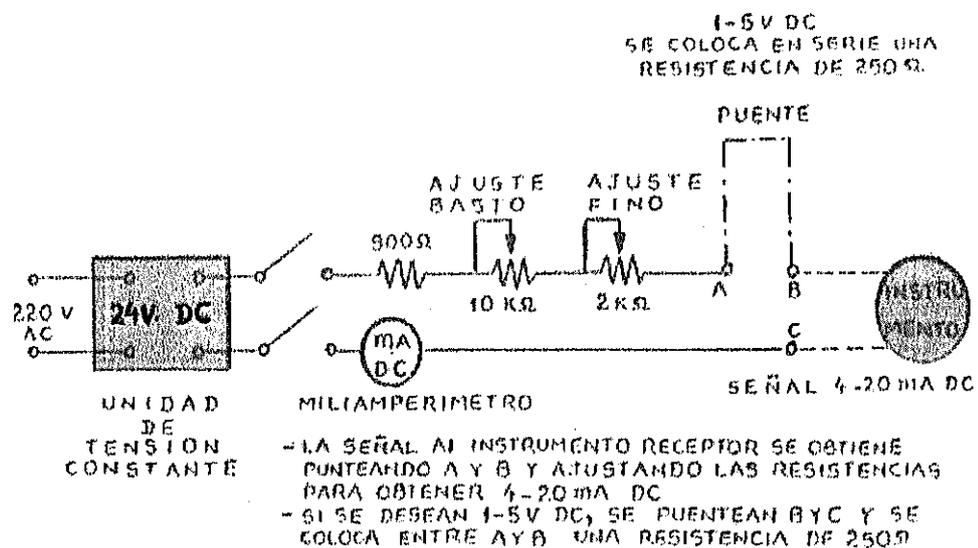
A continuación desarrollaremos el procedimiento de calibración de los siguientes instrumentos del lazo de control de temperatura:

- a) Transmisor neumático
- b) Controlador neumático
- c) Convertidores
- d) Válvula de control.

Este procedimiento es seguido por lo indicado por el fabricante. Con la experiencia se puede descubrir un procedimiento de calibración más sencillo y práctico.



a) MALETA DE COMPROBACION NEUMATICA



b) ESQUEMA PARA LA CALIBRACION DE INSTRUMENTOS ELECTRONICOS

Fig. 5. 13 COMPROBACION NEUMÁTICA Y ELECTRONICA

La figura 5.14, nos muestra los instrumentos a calibrar con algunos de los equipos de calibración utilizados. Se los cita en su orden de ubicación, a los transmisores indicadores neumáticos colocados sobre soportes universales en los extremos de la foto; de izquierda a derecha se encuentran el segundo y tercer instrumento llamados convertidores P/I, a continuación, el cuarto instrumento llamado convertidor I/P y en penúltima ubicación se encuentra el controlador registrador neumático; finalmente, se ubican en el centro desde arriba hacia abajo, el potenciómetro de corriente A.C., el regulador de presión de aire y alta precisión marca WALLACE y el multímetro digital.

### **5.5.1 Transmisor indicador neumático de temperatura TAYLOR**

#### **Pre-calibración y alineación**

Para desensamblaje o mantenimiento mayor. Referirse a la sección del elemento de medida para los detalles de procedimiento de Pre-calibración para un elemento específico de medida.

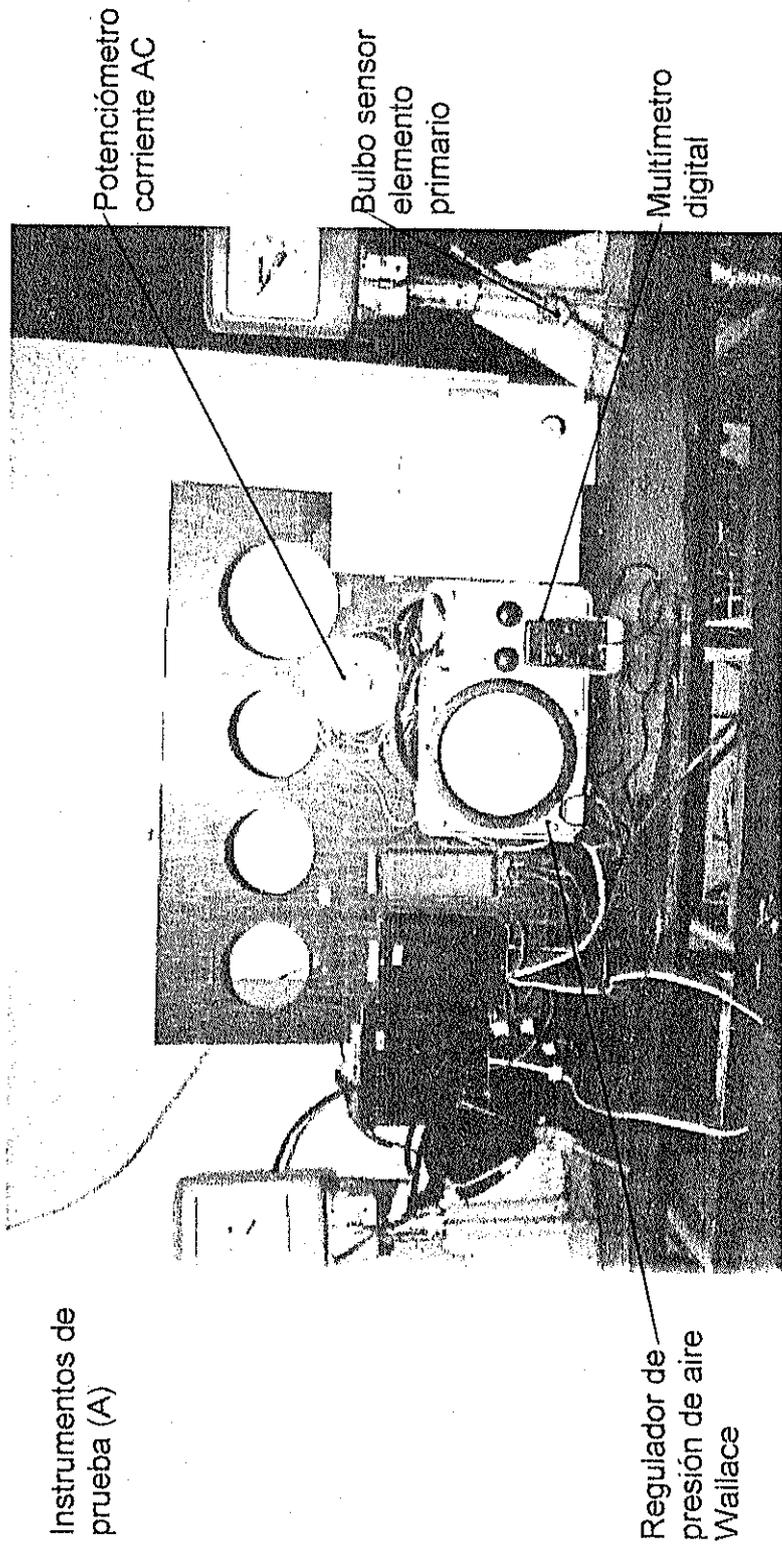


Fig. 5.14 INSTRUMENTOS PARA CALIBRAR

El procedimiento de Pre-calibración está descrito en esta sección. Esto es requerido solamente después del desmontaje de la unidad o para un mantenimiento mayor.

Nota: Para ajustes menores proceder a la calibración en la página 9 del instructivo proporcionado por el fabricante.

1. Desconectar la varilla de conexión, desde el pivote sobre el brazo copiador (take-off arm) del elemento de medida (measuring element), fig. 3 del instructivo.
2. Aflojar la tuerca de seguridad (locknut) de la boquilla y fijar la punta (tip) de la boquilla aproximadamente 3/8" desde el tope (top) de la tuerca de seguridad [Cuando la tuerca de seguridad está bien cerrada].
3. Aflojar el tornillo fijo sobre el eje (hub) del soporte de montaje del deflector (baffle mounting bracket) y colocar el deflector en ángulo recto a la boquilla. Apretar el tornillo fijo.

### Aguja indicadora (pointer)

1. Ajustar el tornillo de la aguja indicadora del Span (pointer span) hacia el centro de su recorrido
2. Rotar la aguja (pointer) en contra del movimiento de las manecillas del reloj sin forzamiento hasta su tope extremo. Este será aproximadamente  $1 \frac{1}{2}$  " debajo del 0% de la escala.

Si no es así, sujetar el disco de la aguja (pointer) firmemente y mover la aguja (pointer) hasta aproximadamente  $1 \frac{1}{2}$  " debajo del 0% de la escala.

3. Rotar la aguja en dirección del movimiento de las agujas del reloj sin forzamiento hasta su tope extremo. Este será aproximadamente  $1 \frac{1}{2}$  " más allá del 100% de la escala. Si no es así, la parte móvil ha sido averiada y debe ser reemplazada.
4. Ajustar el brazo de manivela (crank arm) como sigue:  
Fijar la aguja en 50% de la escala, y observar la salida. Esta será de  $9 \text{ psig} \pm 0.5$  (8.5 – 9.5). Si no es así, sujetar la aguja (pointer) en 50% de la escala y aflojar el tornillo fijo (set-

screw) sobre el eje (hub) del brazo de manivela (crank-arm) y rotar el brazo (arm) hasta que la salida sea de  $9 \text{ psig} \pm 0.5$ .  
Apretar el tornillo fijo (set screw).

5. Girar el tornillo del ajuste de cero (zero adjustment screw) hasta que el sector esté en el centro de su recorrido.

### **Elemento de medida (measuring element)**

1. Centrar el brazo coprador (take-off arm) en la ranura, fig. 3 del instructivo del fabricante.
2. Ajustar el tornillo del elemento de medida del span (screw of measuring element span) hacia el centro de su recorrido.
3. Ajustar el proceso en la entrada hacia el 50% del rango.
4. Conectar el pivote (pivot) sobre la varilla de conexión (link) hacia el segundo agujero desde el final derecho del brazo de manivela (crank arm).
5. Con la aguja (pointer) en  $50\% \pm 1$  de la escala, colocar la varilla de conexión (link) a través del pivote del brazo coprador

del elemento de medida (pivot of measuring element take-off arm) y chequear lo siguiente:

- a) La varilla de conexión (link) estará a  $90^\circ$  del brazo de manivela (crank arm). Si no es así, girar el ajuste de cero hasta que  $90^\circ$  es obtenido.
  - b) El pivote (pívor) sobre el brazo copiador (take-off arm) estará en el agujero centro de la varilla de conexión (link). Si no es así, rotar el yugo (yoke) del brazo copiador (take-off arm) en la ranura (slot) en la correcta posición del brazo.
6. Conectar el pivote hacia el agujero central en la varilla de conexión (link). Si el pivote no igualara con el agujero, repetir el paso 5b.

El transmisor estará ahora apropiadamente alineado.  
Proceder a la calibración.

### Calibración.- (Ajustes menores)

**Nota:** Después del desmontaje o mantenimiento mayor, primero alinear el instrumento como se describe bajo Pre-Calibración y alineamiento.

El procedimiento de calibración básico es descrito en esta sección.

Referirse a la sección elemento de medida (measuring element.) para los detalles del procedimiento de calibración y acoplamiento (hook-up) para un tipo específico de elemento de medida (measuring element).

Los elementos son calibrados, con aire sobre, en este orden:

Transmisor indicador 210 T-1	SECCION A. Salida a la aguja (pointer)
	SECCION B. Salida al elemento de medida (measuring element).
Transmisor ciego 211 T-0	SECCION B. Salida al elemento de medida.

### **Sección A. Salida a la aguja**

1. Desconectar la varilla de conexión (link) desde el pivote (pívo) sobre el brazo coprador del elemento de medida (measuring element take-off arm), siendo cuidadosos al marcar el agujero que será usado, fig. 8 del instructivo.
2. Mover la varilla de conexión (link) hacia arriba y hacia abajo, asegurarse que la aguja (pointer) cubre toda la escala. Si no es posible, referirse a Pre-Calibración y alineamiento, paso 3.

### **Ajuste de acero**

Sujetar o retener la aguja (pointer) en 0% de la escala. La salida será de  $3 \text{ psig} \pm 0,12$ . Si no es así, sujetar la aguja (pointer) firmemente y mover la rueda del eje (hub), fig. 7 del instructivo dado por el fabricante, hasta que  $3 \text{ psig} \pm 0,12$  es obtenido.

### **Ajuste del Span**

1. Sujetar la aguja indicadora (pointer) en 100% de la escala. La salida será  $15 \text{ psig} \pm 0,12$ . Si es bajo, rotar el tornillo de la aguja de ajuste del Span (pointer span adjustment screw). Un

giro o vuelta en dirección del movimiento de las agujas del reloj aumenta el span aproximadamente 0,24 psig.

2. Repetir el ajuste de cero.
3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que  $15 \text{ psig} \pm 0,12$  de salida es obtenido en 100% de la escala.

### **Ajuste lineal (linealidad)**

1. Sostener la aguja (pointer) en 50% de la escala. La salida será  $9 \text{ psig} \pm 0,12$ . Si no es así, aflojar la tuerca de seguridad de la boquilla (nozzle):
  - a) Si la salida leída es baja, girar la boquilla en dirección de las manecillas del reloj una vuelta. Apretar la tuerca de seguridad.
  - b) Si la salida leída es alta, girar la boquilla en contra del movimiento de las agujas del reloj una vuelta. Apretar la tuerca de seguridad.
2. Repetir el ajuste de cero y el ajuste del Span.

3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que  $9 \text{ psig} \pm 0,12$  de salida es obtenido en 50% de la escala.

**Nota:** Si el movimiento de la aguja golpea su parada, repetir el procedimiento bajo Aguja indicadora (pointer), pasos 1 al 4.

### **Sección B. Salida hacia el elemento de medida (measuring element)**

Conectar la varilla de conexión (link) hacia el pivote (pívor) sobre el brazo coprador del elemento de medida (measuring element take-off arm) usando el agujero que está marcado, figuras 3 y 9 del instructivo del fabricante.

### **Ajuste de cero**

1. Ajustar el proceso a la entrada en 0% del rango. La salida será de  $3 \text{ psig} \pm 0,06$ . Si es baja, rotar el tornillo de ajuste de cero hasta que  $3 \text{ psig} \pm 0,06$  es obtenido.

Una vuelta en dirección del movimiento de las agujas del reloj aumenta la salida de presión aproximadamente  $1,0 \text{ psig}$ .

### **Ajuste del Span**

1. Ajustar el proceso a la entrada en 100% de rango. La salida será de  $15 \text{ psig} \pm 0,06$ . Si es baja, rotar el tornillo de ajuste del elemento de medida del span (measuring element span adjustment screw). Una vuelta en dirección del movimiento de las agujas del reloj aumenta el Span aproximadamente 0.04 psig.
2. Repetir el ajuste de cero.
3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que  $15 \text{ psig} \pm 0,06$  de salida es obtenido para 100% de entrada.

### **Ajuste de la linealidad**

1. Ajustar el proceso a la entrada en 50% del rango. La salida será  $9 \text{ psig} \pm 0,06$ . Si es baja, acortar la varilla de conexión (link) por movimiento del pivote (pívor) sobre el brazo copiador (take-off arm) del elemento de medida (measuring element) hacia el agujero más próximo (nearest hole) hacia la izquierda del agujero en uso. Si es alta, alargar la varilla de conexión (link) por movimiento del pivote (pivot) sobre el brazo copiador

(take-off arm) del elemento de medida (measuring element) hacia el agujero más próximo a la derecha del agujero en uso.

2. Repetir el ajuste de cero y el ajuste del span.
3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que  $9 \text{ psig} \pm 0,06$  de salida es obtenido.

Finalmente observar las sugerencias de limpieza y mantenimiento que propone el instructivo.

#### **5.5.2 Controlador registrador neumático de temperatura Taylor**

Antes de proceder a cualquier ajuste y calibración, observar lo descrito en puesta en marcha del proceso y mantenimiento del instrumento en el instructivo.

#### **Fallas comunes**

(Observar las figuras 1 y 2 del instructivo o las figs. 5.15 y 5.16).

Los métodos para diagnosticar y corregir las fallas comunes del instrumento son descritos abajo:

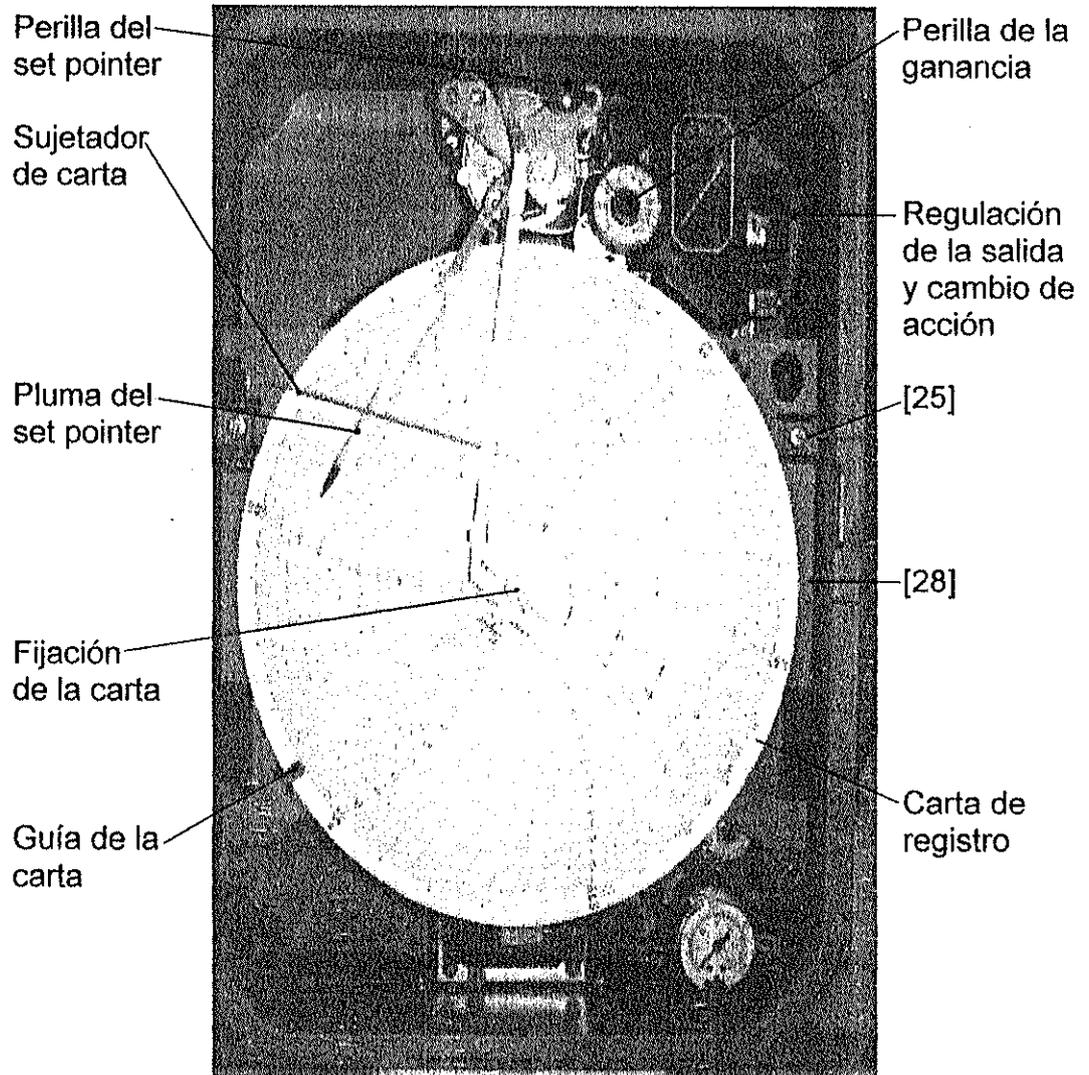


Fig. 5. 15 CONTROLADOR NEUMÁTICO EN FALLAS COMUNES

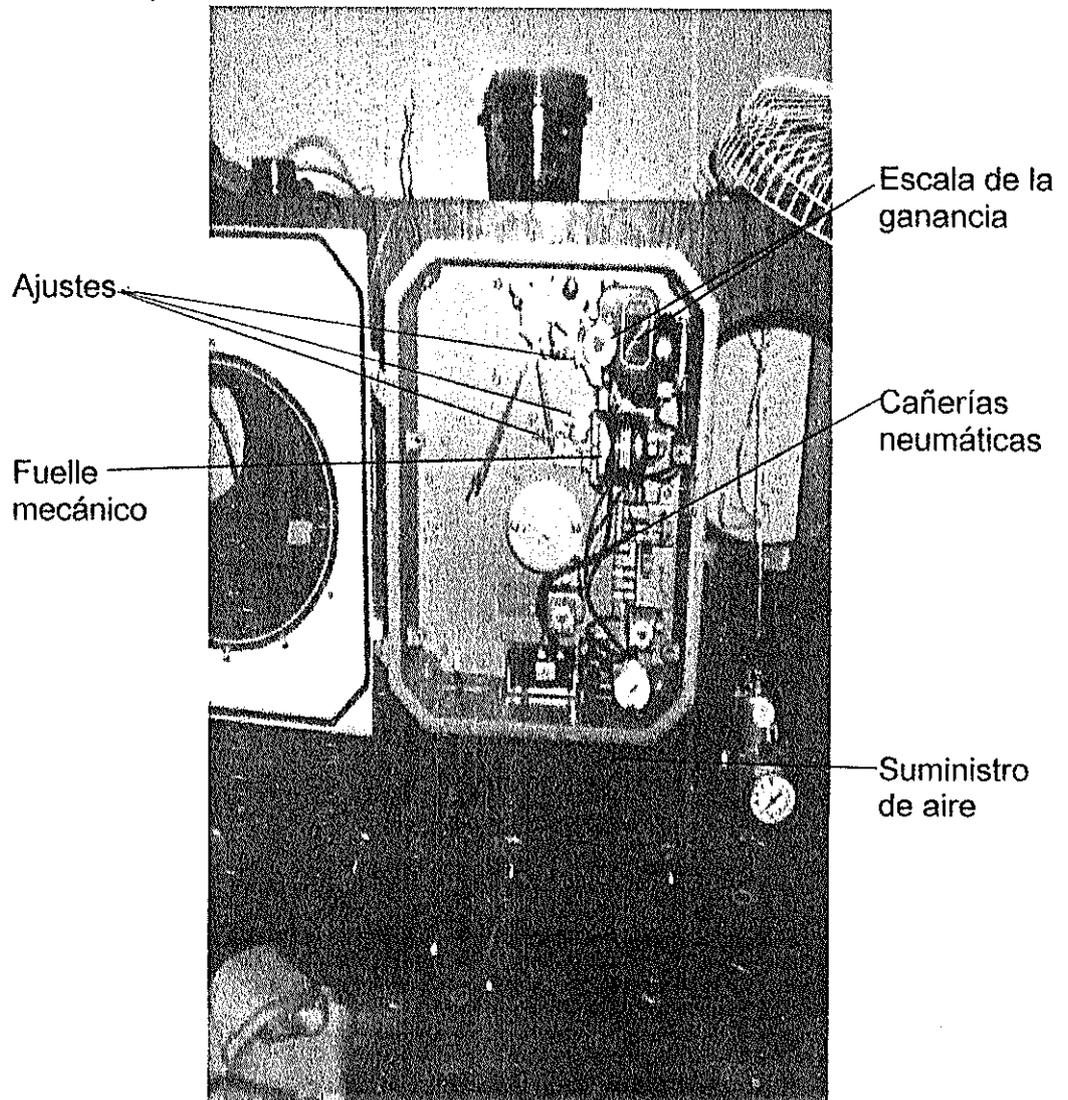


Fig. 5. 16 CONTROLADOR NEUMÁTICO EN FALLAS COMUNES (DESCUBIERTO)

Separar la pluma (pen) y la aguja del punto de consigna (el set – pointer) al menos 1" (Ver fig. 5.17), y anotar la presión de salida. Mover el set-pointer 1" más allá de la pluma sobre el lado opuesto, y anotar la presión de salida.

La presión de salida, en la posición uno, será 0 (cero). En la otra posición será en al menos 2 psi de la presión de suministro. Si una o ambas de estas condiciones no son satisfechas, efectuar las operaciones de reparación en el orden indicado, hasta que la falla sea corregida.

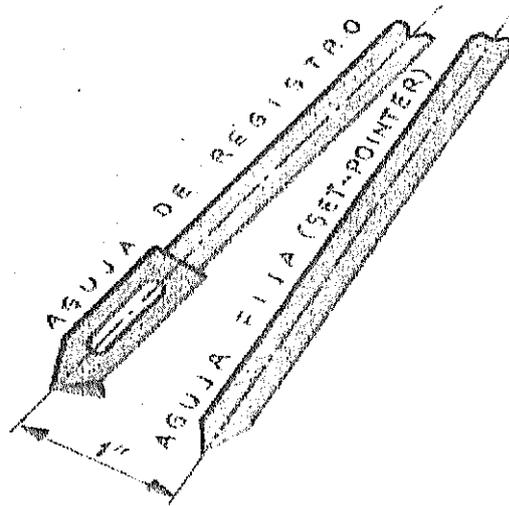
1.- Deficiencia de la presión de salida de aire para ir hacia cero con la pluma y el indicador de consigna (pointer) separados.

a) Orificio tapado en la válvula relay [24]

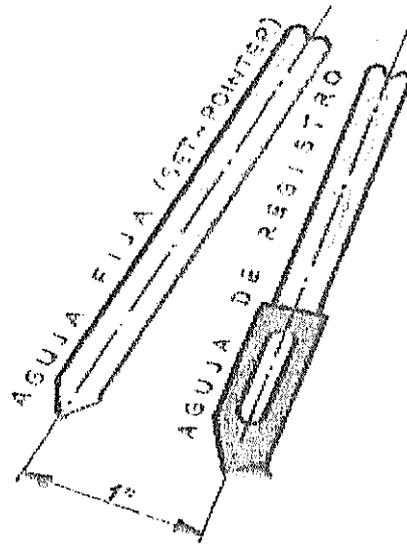
(1) Para limpiar, girar tornillo [26] en contra del movimiento de las manecillas del reloj y soltarlo o desprenderlo.

b) Suciedad en la válvula relay.

(1) Remover el plato de la carta [28] por extracción de los 4 tornillos [25].



a) POSICION 1 (PRESION DE SALIDA = 0 PSI)



b) POSICION 2 (PRESION DE SALIDA = 2.0 PSI)

Fig. 5. 17 POSICIONES DE LA AGUJA REGISTRADORA Y EL SET POINTER PARA DETECTAR FALLAS COMUNES

- (2) Aflojar las tuercas [21] y [22], pero no removerlas.
  - (3) Sacar afuera los tornillos [23].
  - (4) Remover tuerca [22] y limpiarla, como también la bola, el vástago y el interior de la válvula con un paño o tejido de algodón.
  - (5) También limpiar el orificio pero removiendo la tuerca [21].
- c) Suciedad sobre el deflector.
- (1) Limpiar el deflector circular, justo encima de la boquilla, con un paño.
- d) Fuga o fisuras en las conexiones de la cañería.
- (1) Apretar las conexiones del tubo en la boquilla [15], múltiple (manifold) [20], y punta de la boquilla [10].
- e) Fuga o fisura en la cámara capsular (capsular chamber) [29].
- (1) Probar con agua alrededor del perímetro de la cámara por burbujeos.
  - (2) Aparecerán burbujas, y reemplazar con una nueva válvula relay, parte N° 88535

2.- Deficiencia de la presión de salida de aire para ir al alcance de 2 psi de la presión de suministro, con la pluma y el indicador (pointer) separados.

a) Suciedad en la válvula relay.

(1) Remover el plato de la carta [28] por extracción de cuatro tornillos [25].

(2) Aflojar la tuerca [22], pero no removerla.

(3) Sacar los tornillos [23].

(4) Remover la tuerca [22] y limpiarla así como también la bola, el vástago y el interior de la válvula con un paño o lienzo de algodón.

b) Suciedad en la boquilla.

(1) Remover la boquilla y limpiarla en algún solvente removedor de grasa. Soplar fuera del contorno o línea de la boquilla por remoción de la tuerca del orificio [21] y poniendo un dedo sobre la entrada.

c) Fisura en la línea de aire desde el instrumento hacia la válvula del diafragma. Reparar las fisuras.

## **Reloj**

El reloj puede ser de resorte arrollado o eléctrico, en nuestro caso es eléctrico.

## **Reloj eléctrico**

Si el reloj para, verificar la corriente de suministro. Si la corriente está presente, un reemplazo de reloj es necesario. (Asegurarse de dar la revolución, el voltaje y el número de ciclos cuando ordenamos).

## **Para fijar la pluma (pen)**

Los controladores son calibrados y ajustados en la factoría o fábrica.

Antes de instalar un nuevo instrumento, el controlador de temperatura puede no concordar exactamente con aquél de un termómetro de prueba.

No hacer algún ajuste a no ser que se esté seguro que el termómetro de prueba lea correctamente y que los bulbos del termómetro de prueba y el controlador están sujetos a las mismas

condiciones y que es dado el tiempo suficiente para que ambos instrumentos alcancen el equilibrio "**esto es muy importante.**"

Si estamos seguros que el controlador está en error, girar el tornillo micrométrico del brazo de la pluma [12] hacia atrás o hacia adelante, dependiendo del ajuste requerido, hasta que la pluma [3] registre la temperatura correcta como se observa sobre el termómetro de prueba.

#### **Para calibrar**

Si es visto que después de fijar la pluma en una temperatura como la descrita arriba, lee incorrectamente en otros puntos sobre la carta, el sistema de tubo debe ser recalibrado. No hacer ajustes a menos que el bulbo pueda ser sometido a temperaturas aproximadamente el 20% de cada final del rango de la carta (80°C y 20°C para nuestro caso).

Todas las observaciones o notas se referirán a la calibración de temperatura, pero son aplicables para la presión. Para la calibración del nivel de la boya, ver la instrucción de la forma

92044. Seguir los pasos listados a continuación para el procedimiento general de calibración.

- 1) Asegurarse de usar un termómetro de prueba de exactitud conocida.
- 2) El bulbo del termómetro de prueba será aplicado fielmente al bulbo del controlador.
- 3) El líquido en que los bulbos son inmersos será completamente agitado.
- 4) Remover el plato de la carta [28] por aflojamiento de 4 tornillos [25].
- 5) Someter el bulbo en la temperatura media de la carta.
- 6) Ajustar la longitud de la varilla de conexión [16] (connecting link) y la posición del brazo de imitación (take - off arm) [17], así como el brazo de imitación y el brazo palanca de la pluma estén paralelos, (brazo palanca ensamblado en jaula para que el fin superior de la varilla de conexión sujete o corresponda). También, que un ángulo recto es formado entre la varilla (link)

[16] y el brazo de imitación (take-off arm) con la pluma en la temperatura media de la carta como muestra la fig. 5.18.

- a) Los agujeros en el final de la varilla de conexión están espaciados para dar cambios de incrementos de longitud igual a 1/16".
  - b) Asegurarse que el agujero final de la varilla de conexión (connecting link) está sobre el correcto pasador pivote sobre el brazo palanca de la pluma (pen arm lever). Los pasadores pivote A y H son para cartas de 10" y los pivotes B y G para cartas de 12" (Ver fig. 5.19).
- 7) Someter el bulbo en aproximadamente 80% de la temperatura total de la carta (80°C).
- 8) Fijar la pluma para leer correctamente en esta temperatura.
- a) Aflojar los tornillos [18]
  - b) Mover el brazo de imitación (take-off arm) [17] hasta que la pluma (pen) lea correctamente.

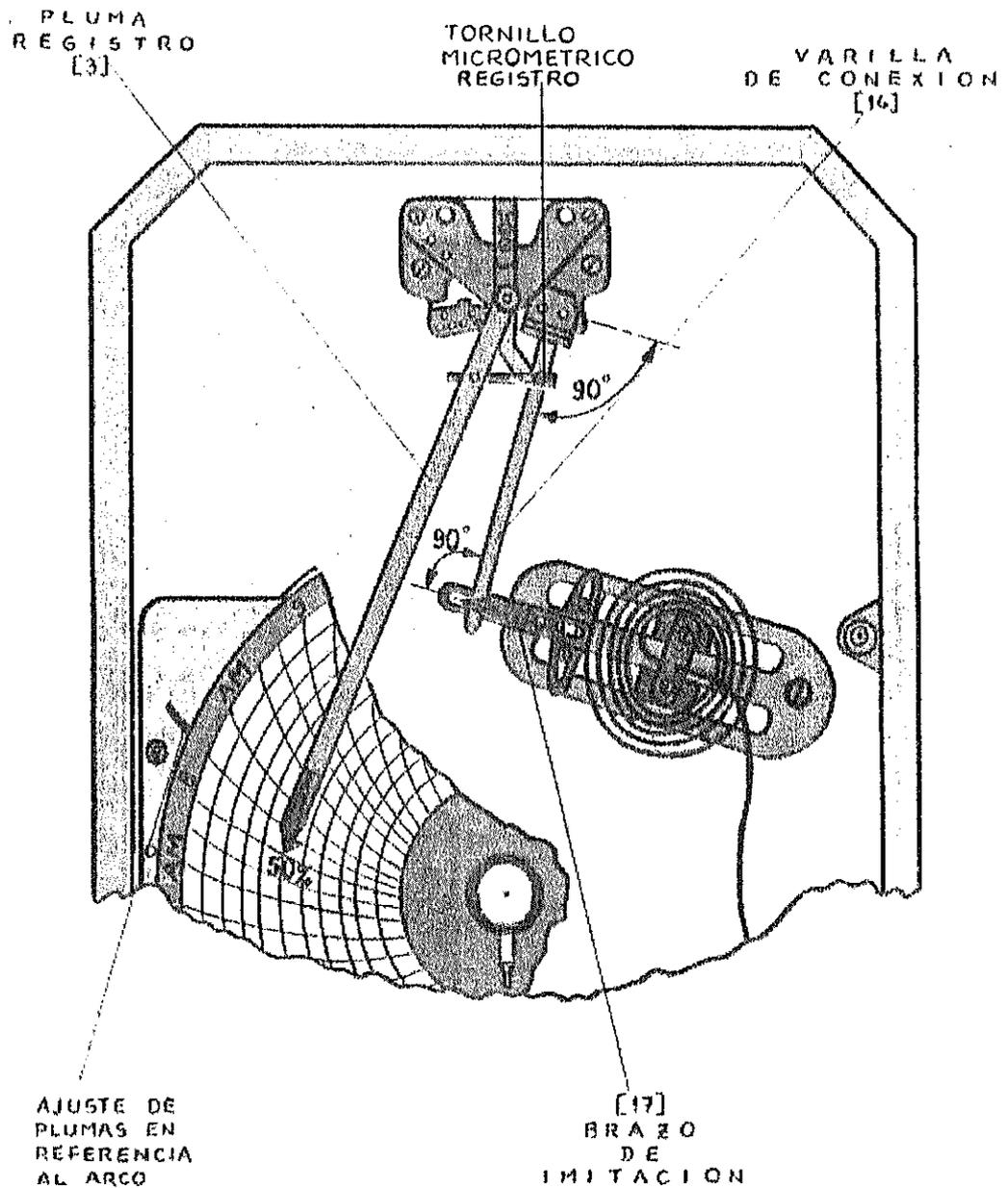


Fig. 5. 18 PERPENDICULARIDAD: VARILLA DE CONEXION Y BRAZO DE IMITACION CON LA PLUMA DE REGISTRO EN 50% DE LA ESCALA DEL CONTROLADOR NEUMATICO

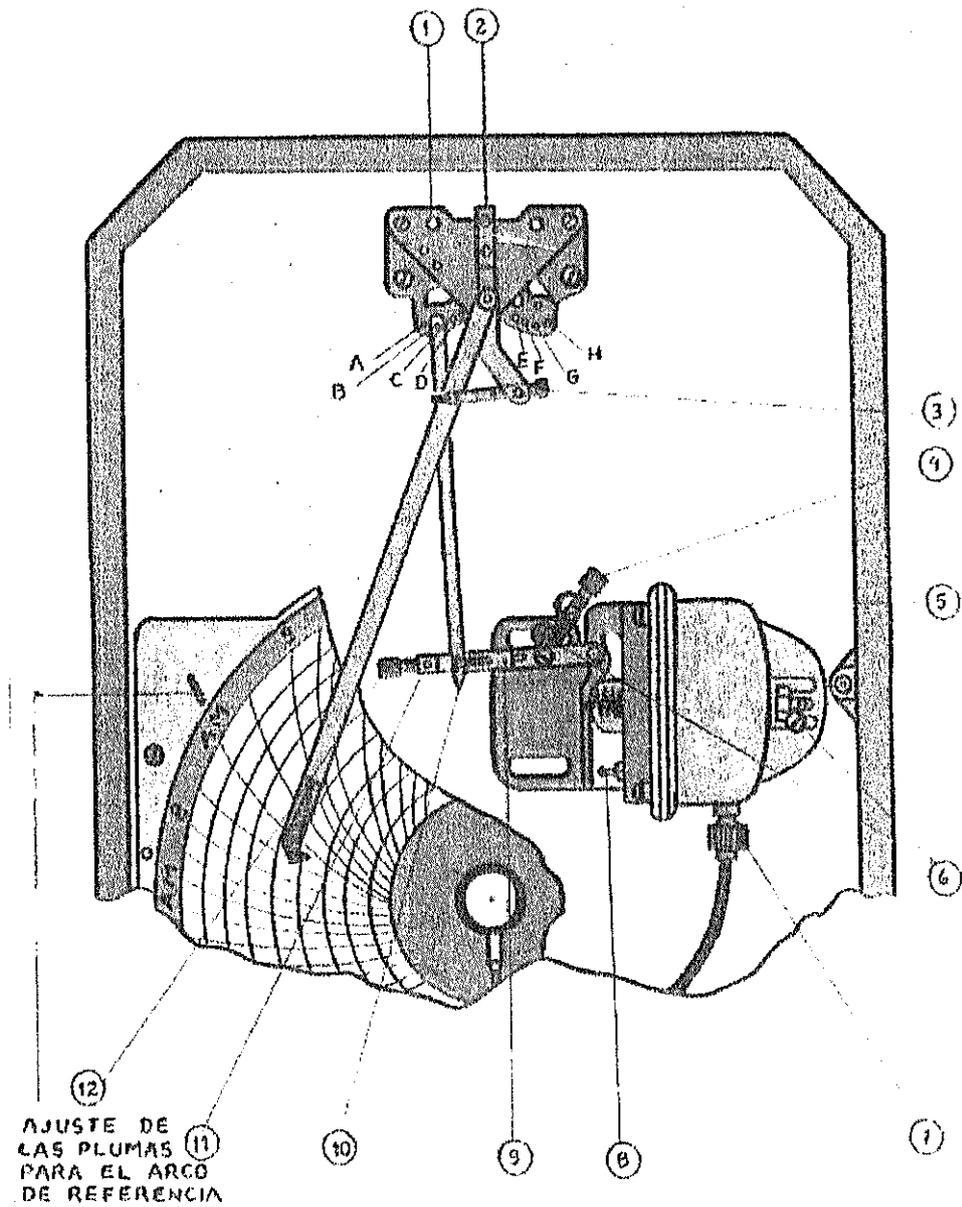


Fig. 5. 19 PIVOTES PARA LAS DIMENSIONES DE LAS CARTAS DE REGISTRO

- c) Ajustes menores de 1/16" pueden ser realizados con el tornillo micrométrico sobre el brazo de la pluma (pen arm).
- 9) Sujetar el bulbo en aproximadamente el 20% de la temperatura máxima de la carta (20°C).
  - 10) Notar u observar la lectura.
    - a) Si la pluma (pen) se mueve demasiado lejos, el sujetador o pinza deberá ser movido cerca del resorte.
    - b) Si la pluma (pen) no ha sido movida suficientemente lejos, el sujetador (clip) deberá ser movido lejos del resorte.
    - c) Esto es realizado por aflojamiento del tornillo que abraza el sujetador (clip) en el brazo de imitación (take-off arm).
  - 11) Someter el bulbo en 80% (80°C) de la temperatura de la carta nuevamente.
  - 12) Fijar la pluma en la temperatura de 80% como es delineado en el paso 8.
  - 13) Repetir los pasos 9, 10, 11, y 12 hasta que no haya error en el 20 y 80% leídos (20 y 80°C).

- 14) Si el sujetador pinza o abrazadera (clip) está prácticamente en el fin de el brazo de imitación (take-off arm) es necesario un realineamiento. Esto es hecho por desplazamiento del resorte sobre su sub - base.
- 15) Sujetar el bulbo en la mitad de la carta de temperatura.
- 16) Notar si la lectura del instrumento es alta o baja. Si la pluma lee bajo en la mitad de la carta, usar el ajuste rotatorio de la imitación (take-off), una rotación inicial hacia la parte superior del rango, o si la pluma lee alto en la mitad de la carta, dar a la imitación una rotación inicial hacia la parte inferior del rango.

La cantidad de ajuste es establecida por prueba y error. Si es necesario después de hacer este ajuste, modificar la longitud de las varillas o vínculos para obtener correctas lecturas de la escala.

Adicionalmente, revisar la información delineada bajo precauciones generales, cambio de acción del instrumento y centrado del deflector del controlador.

### Precauciones generales

- No permitir que corriente de agua o chorro de vapor, llegue a tomar contacto con el instrumento.
- No lavar o limpiar sobre tuberías, tanques o aparatos con vapor o agua caliente así como someter el bulbo a una temperatura mayor que el rango máximo de la carta a menos que el instrumento esté diseñado para tener cuidado de esto. Si es necesario, primero remover el bulbo.
- No someter el elemento de presión del controlador a una presión mayor que el máximo rango de la carta a menos que el instrumento esté diseñado para tener cuidado de esto.
- No permitir que la puerta del controlador quede abierta cualquier longitud de la que es necesario. Mantener el vidrio limpio. Si los vapores suben al vidrio, aplicar una pequeña cantidad de glicerina.
- Soplar afuera periódicamente los receptores del compresor de aire, para drenar la mezcla, aceite, suciedad, etc. del sistema.

- El suministro del medio de control siempre será más que el requerido para mantener el punto de control deseado del aparato.
- Recordar que el instrumento es una valiosa pieza de mecanismos y con una razonable cantidad de cuidados darán muchos años de servicio satisfactorio.

### **Cambio de acción del instrumento**

Para cambiar la acción del instrumento proceder como sigue:

1. Girar la perilla [8] de la aguja fija de manera que el indicador tabulador (tab) pase hasta abajo y que la aguja fija llegue al tope.
2. Elevar el pequeño resorte cerrando el tabulador (tab) [5].
3. Continuar girando la perilla [8] por  $\frac{1}{4}$  de vuelta en la misma dirección.
4. Aflojar el tabulador (tab) [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 (tab) mencionado.

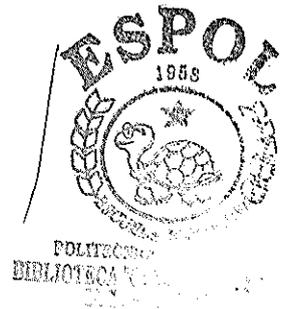
### **Centrado del deflector**

- 1.- Remover el plato de la carta [28].
- 2.- Deslizar el final inferior de la varilla de conexión [16] desde o lejos del elemento pivote de actuación.
  - a) Ser cuidadoso de marcar el agujero en la varilla que estaba sobre el pivote para el correcto reemplazo. El agujero correcto es indicado por un círculo escrito.
- 3.- Acuñar una pequeña pieza de papel doblado holgadamente entre el brazo de movimiento de la pluma (pen movement arm) [7] y la placa de movimiento (movement plate) [6].
- 4.- Poner la pluma (pen) en el centro de la carta.
- 5.- Poner el set - pointer (indicador fijo) detrás de la pluma.

- 6.- Si la presión de salida es 10 psi proceder hacia el párrafo 10.
- 7.- Aflojar la tuerca de seguridad del tornillo de ajuste [14].
- 8.- Mover el tornillo de ajuste de la boquilla [14], hasta que la presión de salida de aire sea 10 psi.
- 9.- Apretar la tuerca de seguridad.
- 10.- Invertir la acción del instrumento. Ver cambio de acción del instrumento.
- 11.- Posicionar el indicador fijo (set - pointer) de manera que la presión de salida sea 10 psi.
- 12.- Si el indicador fijo está detrás de la pluma, el deflector está correctamente centrado y el instrumento puede ser devuelto a la acción deseada.
- 13.- Si la pluma (pen) y el indicador fijo (set-pointer) están separados, mover el indicador fijo  $\frac{1}{2}$  de la distancia con respecto a la pluma con la perilla [8] y la distancia remanente con el tornillo micrométrico [13].

- 14.- Obtener 10 psi de presión de salida como es delineado en los párrafos 7, 8, y 9.
- 15.- Retornar el instrumento a su acción original.
- 16.- Ajustar con la perilla la aguja indicadora fija (set-pointer) hasta que la presión de salida sea 10 psi.
- 17.- Si la pluma (pen) y el indicador (pointer) están apartados en menos de 1/8", usar el tornillo micrométrico para retornar el indicador fijo o aguja indicadora fija (set-pointer) detrás de la pluma.
- 18.- Si la pluma y el indicador fijo están separados en más de 1/8", repetir los pasos 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, y 17 hasta que la pluma (pen) y el indicador estén juntos o al mismo tiempo en la acción correcta y la presión de salida sea 10 psi.

### 5.5.3 Convertidores Taylor



Los convertidores o transductores que posee el lazo de control de temperatura, como ya se mencionó, es de dos tipos:

- a) Convertidores I/P, y
- b) Convertidores P/I

Comenzaremos por describir el procedimiento de calibración de los convertidores I/P y posteriormente la calibración de los convertidores P/I.

### **Procedimiento de calibración de los convertidores I/P**

La acción del transductor, directa o indirecta (reversa), puede ser cambiada por intercambio de las conexiones de entrada como es indicado sobre el diagrama de conexión.

1. Conectar un suministro de aire de 22 psig completamente limpio y seco a la toma de suministro de aire del instrumento.
2. Conectar un manómetro o medidor de 0 a 20 psig, con una precisión de 0.02 psig, a la conexión de salida.
3. Conectar la salida del calibrador de precisión Taylor o fuente de corriente, resistor de 62.5 ohm ( $\Omega$ ) con precisión (0.1%) y voltímetro de precisión a los terminales de entrada como es indicado abajo. Observar la correcta polaridad que es

requerida para acción directa o inversa. Referirse al Diagrama de conexión.

Si el calibrador de precisión Taylor es usado, hacer los siguientes ajustes sobre el calibrador:

Posición del selector del rango de salida, interruptor S1 en 24 mA.

Posición del selector del galvanómetro, interruptor S3 en SALIDA.

Posición del selector mediador, interruptor S5 hacia los terminales de salida (a la izquierda).

Abrir la aguja (pointer) del galvanómetro.

Conectar el calibrador.

Estandarizar el galvanómetro.

Ajustar la salida bajo el ajuste fijo R33 para 0% del rango, e.g. 4 mA d-c.

CORRIENTE DE ENTRADA ( mA )	VOLTAJE A TRAVES DEL RESISTOR DE 62.5 $\Omega$ ( V )
4	0.250
8	0.500
12	0.750
16	1.000
20	1.250

Tabla 5.3 Flujo de corriente vs. Caída de voltaje a través del resistor

Ajustar la salida bajo el ajuste fijo R34 para 100% del rango, e.g. 20 mA d.c.

Si la fuente de corriente, resistor y voltímetro son usados, conectar la fuente de corriente a los terminales de entrada. Conectar el resistor de precisión en serie con una línea.

Conectar el voltímetro de precisión con el resistor de precisión. La relación de flujo de corriente y la caída de voltaje a través del resistor es presentada en la figura de la tabla 5.3.

4. Calibrar el transductor usando el procedimiento presentado en la figura de la tabla 5.4. Ajustar la salida a  $3 \pm 0.02$  psig o  $15 \pm 0.06$  psig como es requerido.

#### **Nota**

Transductor con rango de entrada abierto puede ser calibrado para cualquier Span de 8 mA d-c con el rango de 4 a 20 mA d-c.

PASO DE CALIBRACION	VALORES DE ENTRADA Y SALIDA					
	4 a 20 mA. D.C. ENTRADA		4 a 12 mA. D.C. apertura del RANGO DE ENTRADA		12 a 20 mA. D.C. apertura del RANGO DE ENTRADA	
	4 mA	4 mA	4 mA	4 mA	12 mA	12 mA
1.- Ajustar la entrada a:	4 mA	4 mA	4 mA	4 mA	12 mA	12 mA
2.- Girar el ajuste de cero hasta que la salida sea: (la rotación del cero en el sentido de las manecillas del reloj)	3 psig	15 psig	3 psig	15 psig	3 psig	15 psig
3.- Ajustar la entrada a:	20 mA	20 mA	12 mA	12 mA	20 mA	20 mA
4.- Girar el ajuste del Span hasta que la salida sea: (girar cada ajuste en igual cantidad)	15 psig	3 psig	15 psig	3 psig	15 psig	3 psig
5.- Repetir los pasos del 1 al 4 por requerimiento de exactitud						

TABLA 5.4 Procedimiento de calibración y valores de los transductores

### Procedimiento de calibración de los convertidores P/I

1. Poner el instrumento en la misma posición como cuando montamos en el campo.
2. Conectar el instrumento para la prueba de acoplamiento como se presenta en la figura 5.20. No aplicar la señal de entrada.
3. Conectar el voltímetro de precisión (0.1%) por medio de un resistor de 62.5 ohm ( $\Omega$ ), conectado entre los terminales 8 (+) y 7 (-).
4. Dar potencia al instrumento.
5. Ajustar la entrada a 3 psig.
6. Girar el ajuste de cero, figura 5.21, hasta que el voltímetro indique  $0.25 \text{ V} \pm 1 \text{ mV d-c}$ .
7. Ajustar la entrada a 15 psig.
8. El voltímetro indicará  $1.250 \text{ V} \pm 1 \text{ mV d-c}$ . Si no es así, ajustar el Span moviendo la lámina de montaje del fuelle cerca al pivote de la palanca de fuerzas. Moviendo la placa de montaje del fuelle cerca al pivote de la palanca de fuerza

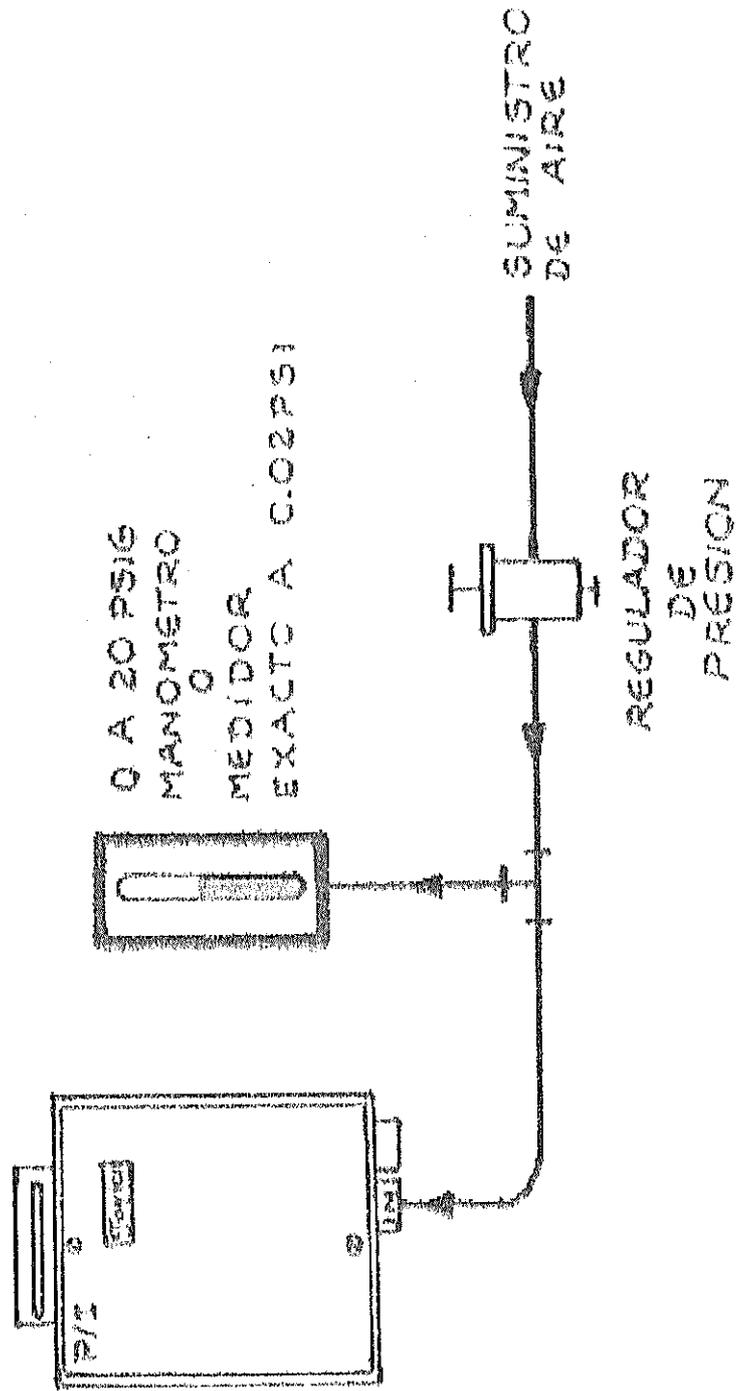


Fig. 5. 20 ACOPLAMIENTO DE PRUEBA NEUMÁTICO PARA UN CONVERTIDOR P/I

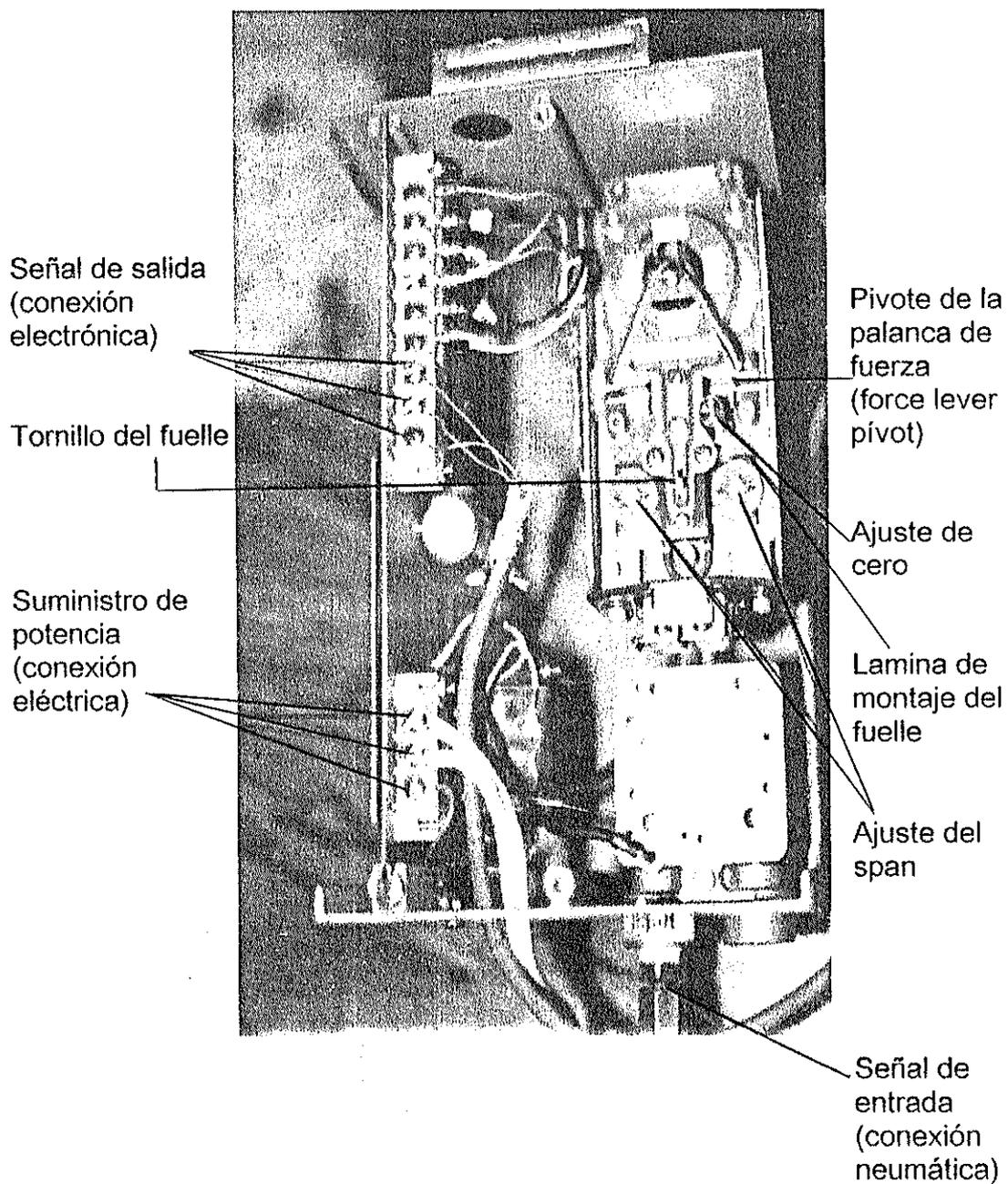


Fig. 5. 21a AJUSTES Y CONEXIONES ELECTRICAS,  
ELECTRÓNICAS Y NEUMÁTICAS PARA  
CALIBRACIÓN DEL CONVERTIDOR P/I

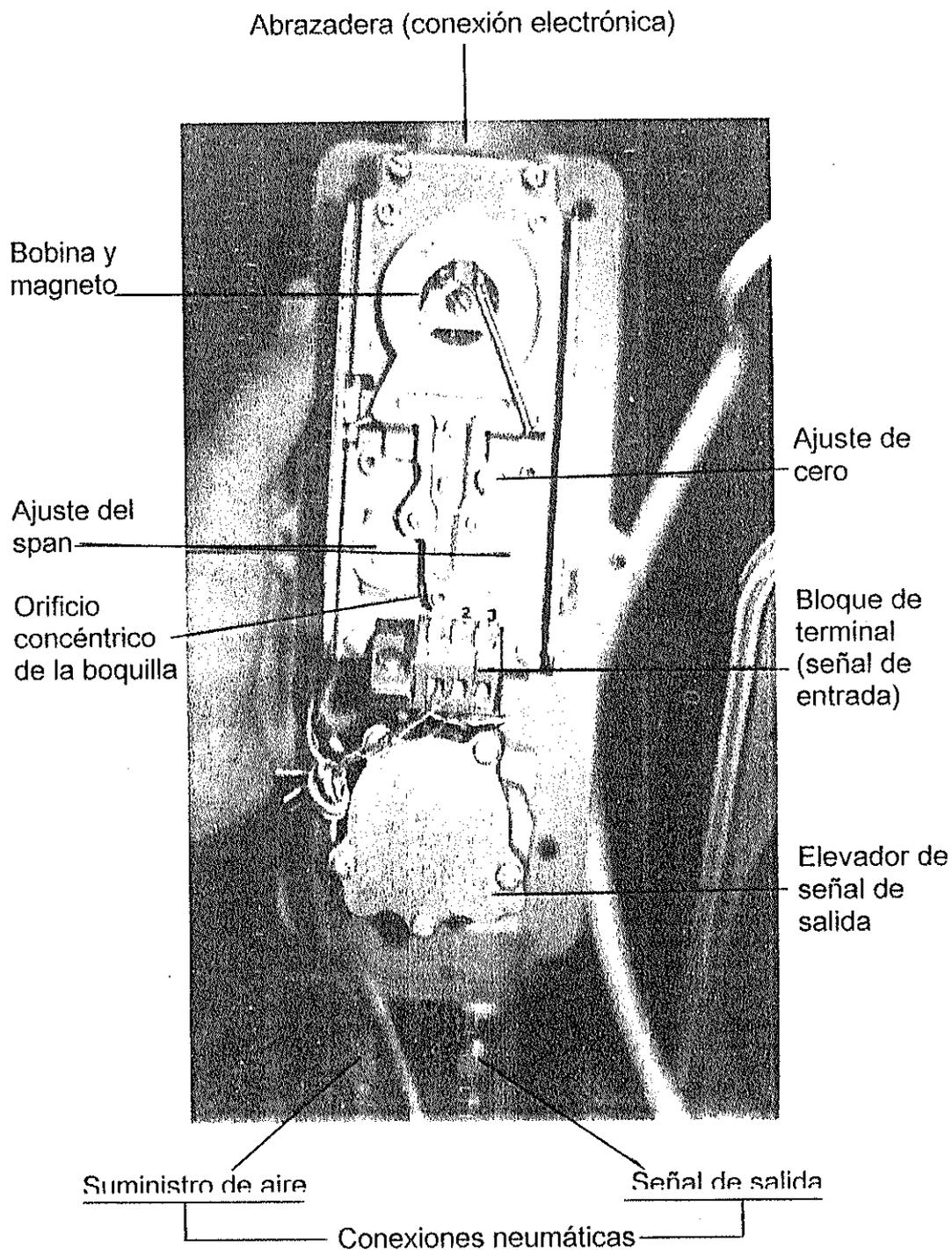


Fig. 5. 21b AJUSTES Y CONEXIONES ELECTRICAS, ELECTRONICAS Y NEUMATICAS PARA CALIBRACION DEL CONVERTIDOR I/P

disminuye el Span. Ajustar ambos ajustes del Span en igual cantidad. Después de hacer el ajuste del Span, centrar el fuelle en el manguito del fuelle, figura 5.22, por movimiento del tornillo del fuelle con los dedos. No usar una herramienta para mover el tornillo del fuelle.

9. Repetir el paso 5 hasta el 8 para requerimientos de exactitud.

#### **5.5.4 Válvula de control de flujo de accionamiento neumático**

##### **Taylor**

##### **Ajuste del rango del actuador**

Cuando usamos este procedimiento, estar seguros que la válvula está operando bajo la línea de condiciones normales de presión. Referirse a procedimiento de ajuste del rango del actuador, si la válvula no está en la línea de la tubería. Si es necesario, hacer un acoplamiento de prueba como presentamos en la figura 5.23.

1. Lentamente aumentar la entrada de presión hasta que el vástago justo comience a moverse. El movimiento del vástago

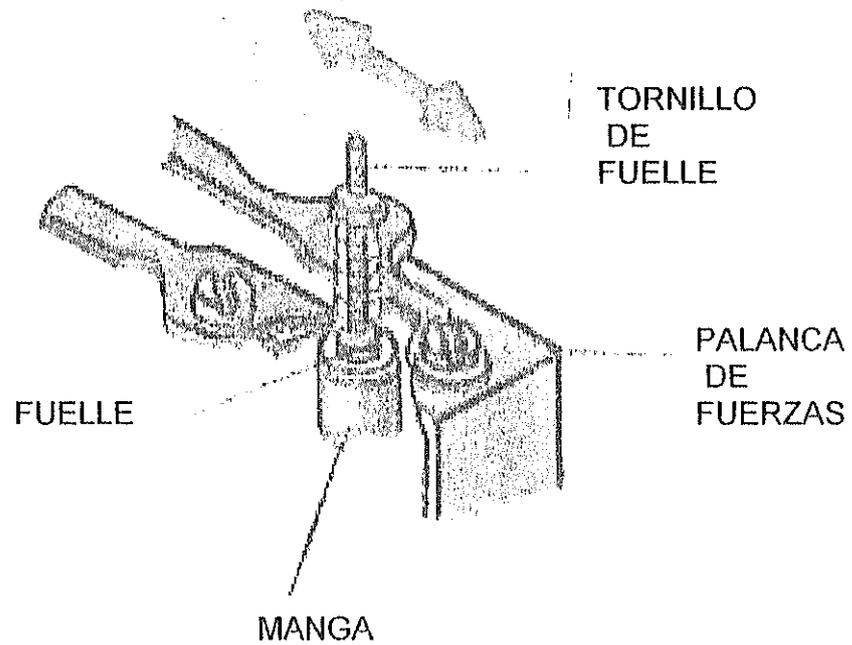


Fig. 5. 22    CENTRADO DE LA ENTRADA DEL FUELLE  
EN LA MANGA (MANGUITO)    DEL  
CONVERTIDOR P/I

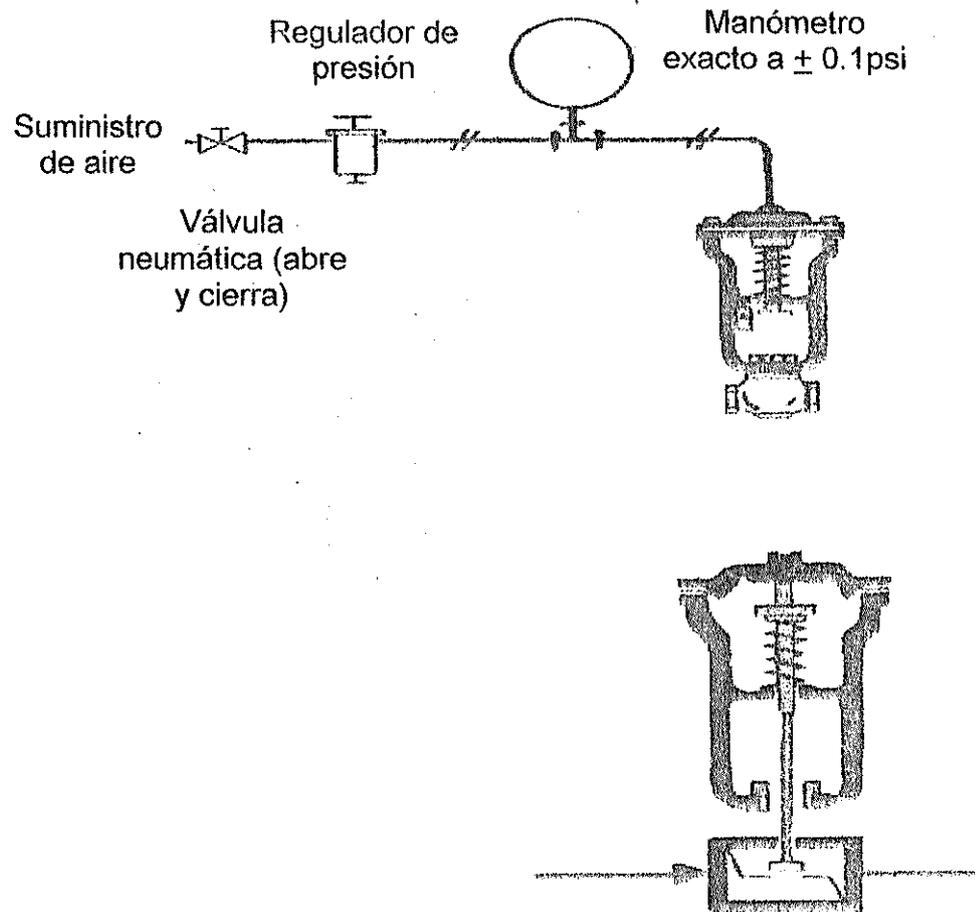


Fig. 5. 23 ACOPLAMIENTO DE PRUEBA Y ACTUADOR DE AIRE PARA CERRAR LA VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO

puede ser fácilmente detectado por tocación o sensación del vástago o empuje de la barra como presión es aplicada.

ADVERTENCIA. Si la válvula es usada para servicio de vapor o donde la línea de proceso es caliente, usar modos o medios visuales de detección del movimiento para evitar heridas o lesiones.

2. Anotar la presión de entrada en la cual se mueve el vástago.
3. Si la presión de entrada no es la misma como el valor más bajo especificado del rango, la tuerca de ajuste del resorte debe ser ajustada por inserción correcta en los agujeros, y giramiento de la tuerca.

Si la presión es alta, ajustar el giro de la tuerca, figura 5.24, en contra del movimiento de las manecillas del reloj como vemos desde el tope de la válvula.

Si la presión es baja, girar el ajuste de la tuerca en dirección del movimiento de las manecillas del reloj como vemos desde el tope de la válvula.

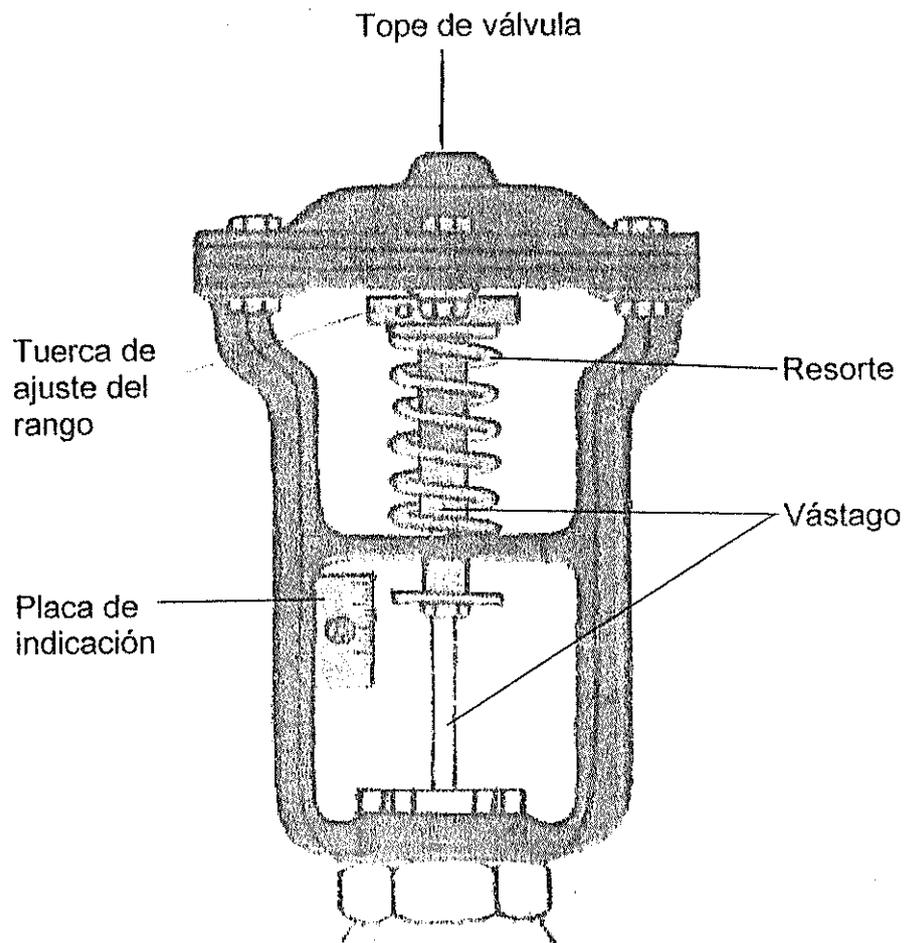


Fig. 5. 24 AJUSTE DEL RANGO DEL ACTUADOR DE LA VÁLVULA DE CONTROL



4. Liberar la presión de entrada y repetir los pasos 1, 2 y 3 hasta que el vástago de la válvula se mueva en el valor más bajo del rango.

### **Equipo de prueba y herramientas requeridas**

El equipo de prueba solamente es requerido para el mantenimiento de la válvula y actuador, es una fuente de suministro, un manómetro y un regulador.

Las herramientas requeridas son presentadas en la tabla 2 del instructivo presentado por el fabricante.

Observar lo delineado bajo ensamble y desensamble de la válvula si es que ella requiere de un mantenimiento previo. Observar las precauciones, advertencias y notas dadas en estas secciones.

### **Ajuste del recorrido del obturador de la válvula**

El propósito de este procedimiento es para ajustar la longitud encajada del vástago de la válvula en la barra de empuje de manera que el indicador de recorrido esté en las marcas del

recorrido sobre la placa indicadora cuando la válvula está totalmente cerrada.

### **Empuje para cerrar la válvula**

1. Aplicar la presión de aire hacia el actuador para cerrar totalmente la válvula y anotar la posición del indicador de recorrido.
2. Si el indicador no está en las marcas de recorrido sobre la placa, figura 5.25, medir la distancia entre el indicador y la marca.

**PRECAUCION.** No hacer cualquier ajuste cuando el obturador de la válvula esté sobre su asiento.

3. Dar salida o dejar escapar a toda la presión desde el actuador.
4. Aflojar la contratuerca de seguridad del vástago figura 5.26. Apretar cerca de las roscas del vástago de la válvula, y girar el vástago hasta mover el obturador de la válvula la distancia medida en el paso 2.
5. Apretar la contratuerca de seguridad del vástago de la válvula.

Empuje para cerrar la válvula

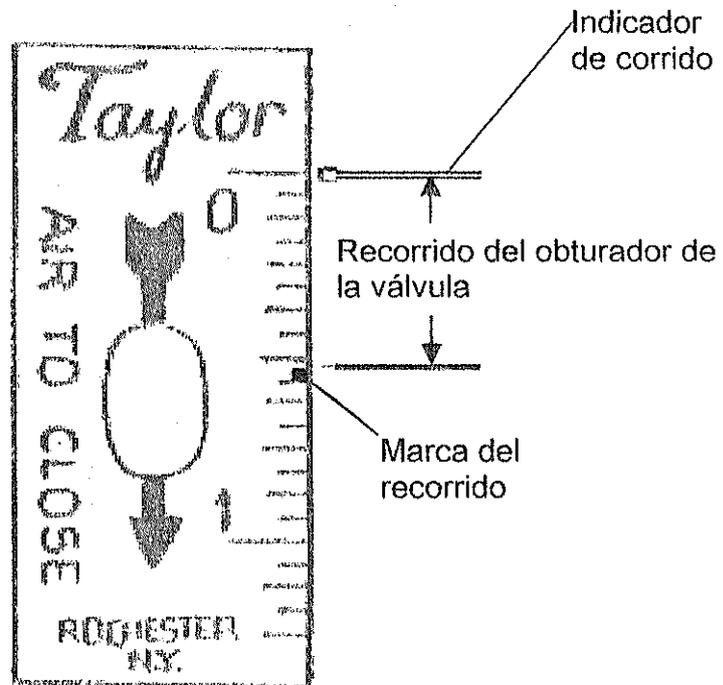


Fig. 5. 25 PLACA DE INDICACIÓN DE RECORRIDO PRESENTANDO EL RECORRIDO DEL OBTURADOR DE LA VÁLVULA DE CONTROL

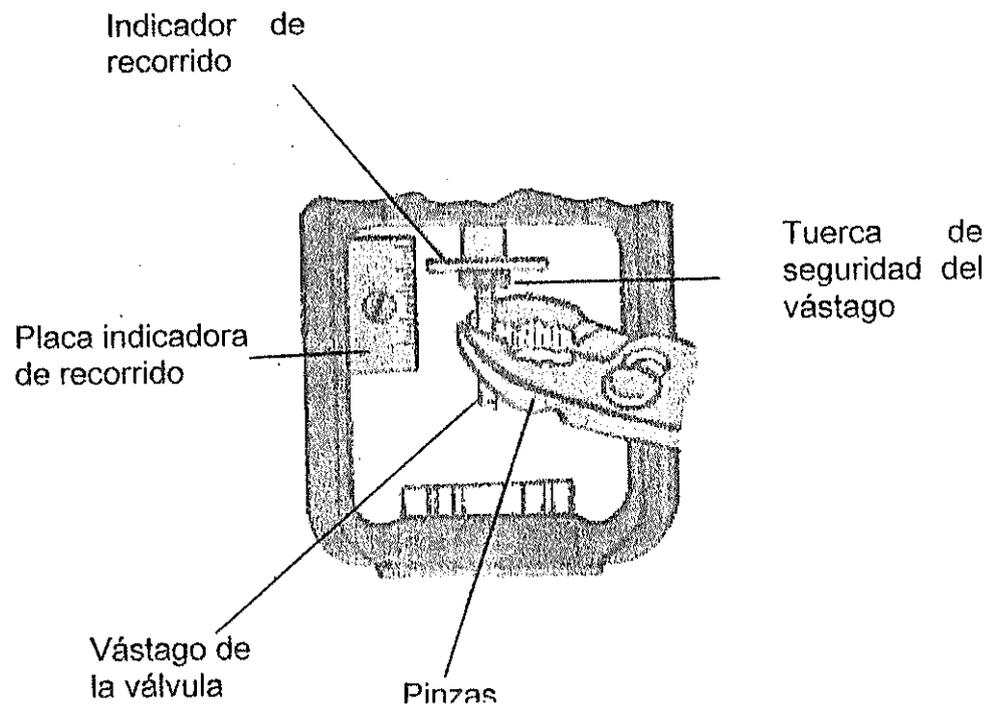


Fig. 5. 26 AJUSTE DEL RECORRIDO DEL OBTURADOR DE LA VÁLVULA DE CONTROL

6. Repetir los pasos 1 hasta 5 hasta que el indicador de recorrido esté en las marcas de recorrido cuando la válvula está totalmente cerrada.

### **Notar**

Si el rango de presión requerido para obtener completamente el recorrido del obturador de la válvula no concuerda con el rango originalmente especificado referirse a AJUSTE DEL RANGO DEL ACTUADOR.

### **Reemplazo del diafragma del actuador**

1. Aislar o separar la válvula de control en la línea de la tubería.
2. Cerrar la presión hacia el actuador desconectar la línea.
3. Girar en contra del movimiento de las manecillas del reloj la tuerca de ajuste del rango del resorte para aliviar toda la compresión para aliviar toda la compresión del resorte

**ADVERTENCIA.** Si toda la compresión del resorte no es aliviada, serios perjuicios pueden ocurrir cuando removemos la cubierta del diafragma.

4. Aflojamos y removemos todo el montaje de tornillos, tuercas y arandelas de la cubierta del diafragma figura 5.27.
5. Levantar hacia afuera la cubierta superior del diafragma desde el ensamblaje del actuador.
6. Remover el diafragma viejo y desecharlo.
7. Instalar la cubierta superior con el nuevo diafragma del actuador. Fijar con pernos, tuercas y arandelas removidos en el paso 4.

#### **Cambio del rango del resorte del actuador**

1. Aislar o evitar la válvula de control en la línea de la tubería.
2. Cerrar presión hacia el actuador y desconectar la línea de aire.
3. Girar la tuerca de ajuste del rango del resorte en contra del movimiento de las manecillas del reloj para aliviar toda la compresión del resorte.

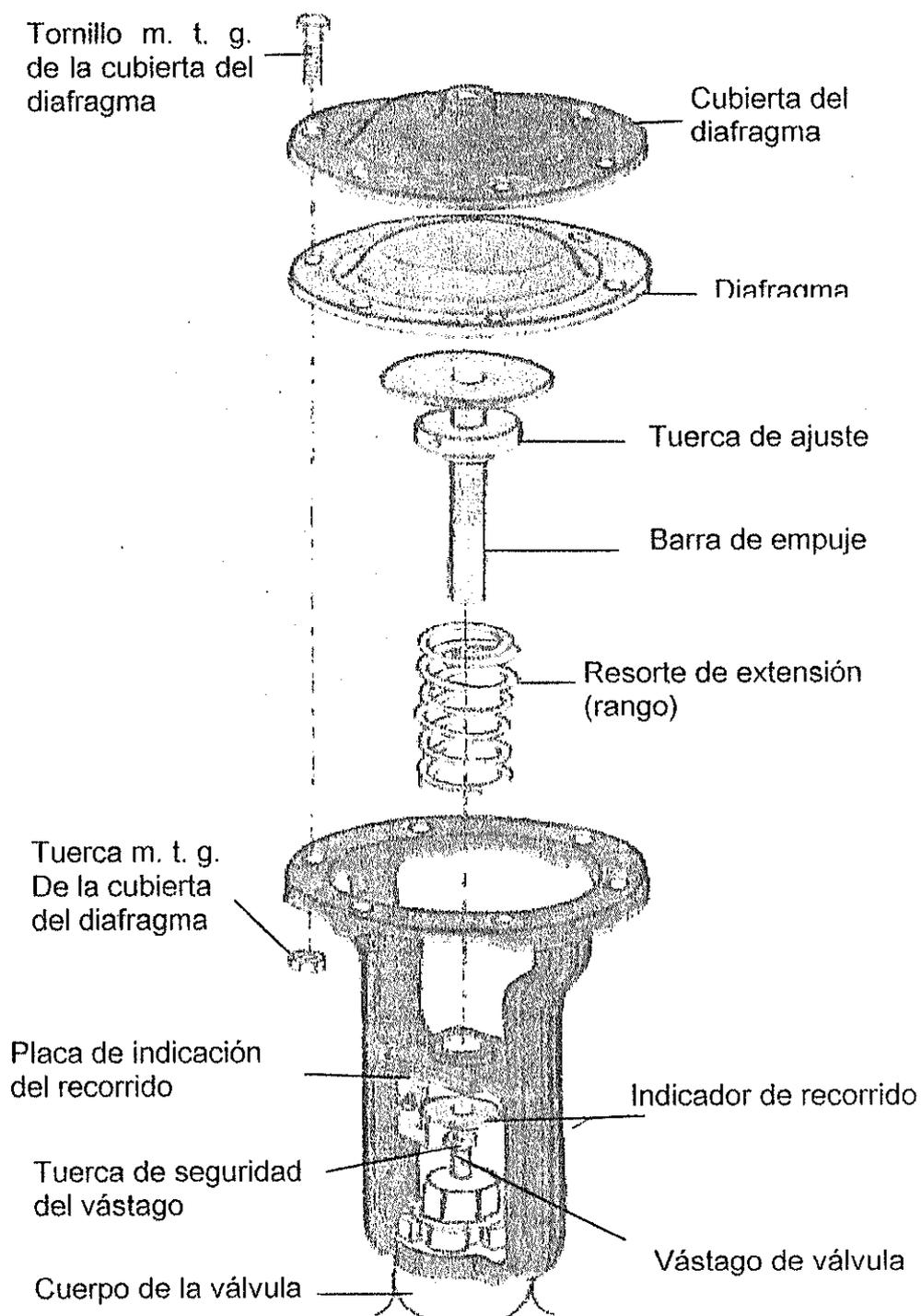


Fig. 5. 27 DESPIECE DE LA VÁLVULA DE AIRE PARA BAJAR EL ACTUADOR

## Advertencia

Si toda la compresión del resorte no es aliviada serios perjuicios pueden ocurrir cuando removemos la cubierta superior del diafragma.

4. Aflojar y remover todo el montaje de tornillos, tuercas y arandelas del diafragma, figura 5.27.
5. Elevar afuera la cubierta superior del diafragma y el diafragma desde el ensamble del actuador.
6. Aflojar la tuerca de seguridad del vástago de la válvula justo lo suficiente para destornillar la barra de empuje con la plancha o plato de empuje desde el vástago de la válvula.

**Precaución.** No rotar el obturador de la válvula sobre el anillo asiento. Puede ser necesario usar pinzas o alicates para sujetar el vástago de la válvula. Si es necesario apretar cerca de los filetes del vástago para evitar escorias del vástago.

7. Remover la barra de empuje y plato de empuje con el alcance del resorte desde el ensamble del actuador.
8. Instalar un nuevo rango o alcance del resorte con la barra de



empuje y la placa o plato de empuje en el ensamblaje del actuador.

9. Atornillar la barra de empuje sobre el vástago de la válvula hacia la punta o extremo de la tuerca de seguridad del vástago y apretar la tuerca de seguridad.
10. Instalar la cubierta del diafragma con el diafragma sobre el ensamble del actuador. Atar o sujetar con los pernos, tuercas y arandelas removidas en el paso 4.
11. Reconectar la tubería o cañería para la conexión de la presión en la cubierta superior del diafragma.
12. Reajustar el recorrido del actuador. Referirse a AJUSTE DEL RANGO DEL ACTUADOR.

### **Procedimiento de ajuste del rango establecido del actuador**

#### **Nota**

Hacer un acoplamiento de prueba como presentamos en la figura 5.23. Cuando usamos este procedimiento, la válvula estará fuera de la línea de la tubería o allí no habrá presión en la línea. Presión en la línea de la tubería causará incorrectos ajustes en el resorte.

**Actuador con empuje para cerrar la válvula (acción del aire para cerrar). Fig. 5.23**

- I. Para determinar la presión de entrada en que el vástago de la válvula empezará a moverse a partir de las figuras 26 a, 26 b, 26 c, o 26 d del instructivo.

Seleccionar la figura que comprende o cubre el actuador al tamaño de la válvula que ha sido ajustado.

Usar la figura 5.28 para establecer el número de terminación para contar o determinar el número de pernos en la cubierta del diafragma.

**Ejemplo:**

La válvula que ha sido ajustada tiene ocho pernos en la cubierta del diafragma, así el número de terminación del actuador es 002. Asumir que la válvula es de dimensión o tamaño de 1" y el resorte de la válvula ha sido seleccionado para usarlo sobre una presión diferencial máxima de 60 psig (414 Kpa). Usar la figura 26 b, nosotros podremos determinar

H	N° de Term.		
PULG.	mm	N° de pernos	N°
6	152.40	5	001
8-1/2	215.90	8	002
11-1/4	285.75	12	003
13-1/8	333.38	16	004

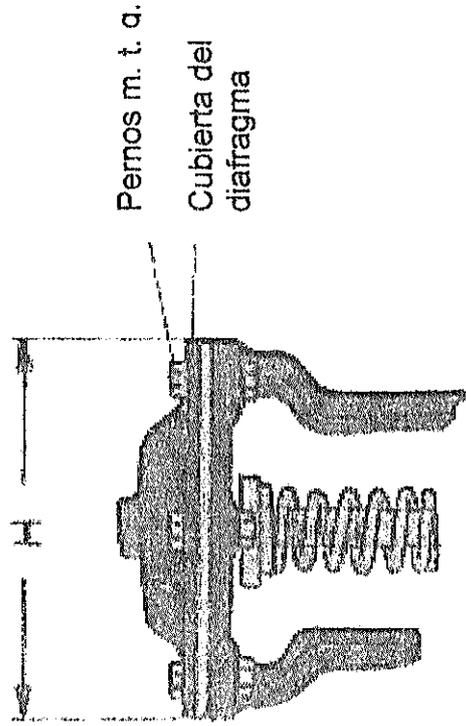


Fig. 5. 28 DETERMINACION DEL NUMERO DE TERMINACION DEL ACTUADOR

que el vástago de la válvula empezará su movimiento cuando el actuador alcance una entrada de 5 psig (34 KPa)  $\pm$  0.2 psig (1.4 Kpa), (3 psig de compresión inicial más 2 psig de compresión adicional del resorte).

2. Lentamente aumentar la presión de entrada y anotar la presión en que se mueve el vástago.
3. Si la presión de entrada no es la misma como el valor del rango más bajo especificado, la tuerca de ajuste del resorte debe ser ajustada.

Si la presión es alta, girar la tuerca de ajuste en contra del movimiento de las manecillas del reloj como vemos desde la cumbre de la válvula, figura 5.24.

Si la presión es baja girar la tuerca de ajuste en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj como vemos desde la cima de la válvula.

4. Liberar la presión de entrada y repetir los pasos 2 y 3 hasta que el vástago de la válvula se mueva en el valor más bajo del rango.

## CAPITULO 6

### PRACTICAS DE LABORATORIO

#### 6.1. Prueba para calibración de los manómetros

##### 1. Objetivos

- a) Familiarización y conocimiento de los mecanismos y tornillos de ajustes que constituyen los manómetros que disponemos.
- b) Conocer el funcionamiento de los manómetros a consideración nuestra para las pruebas de ajuste y calibración de los instrumentos del lazo de control de temperatura.
- c) Simular una descalibración, efectuar su respectiva corrección y determinar el error del instrumento.

## 2. Teoría

- a) Calibración de instrumentos de presión, banco de pruebas y maletas de comprobación.
- b) Procedimiento general de calibración ( manómetros )
- c) Procedimiento de calibración del manómetro de resolución 0.1 psi
- d) Tipos de errores.

## 3. Equipos y materiales

- a) Comprobador de manómetros de pesas, o un comprobador de manómetros portátil con un manómetro patrón de 0 - 30 psi en rango, y resolución 0.1 psi.
- b) 2 Manómetros marca Ashcroft ( Duragauge ) fabricado en U. S. A. con las siguientes características:

1) 0.1 psi. Subd.

accuracy

grade 3 A

0.25 %

tubo de bronce

brass socket brazed

rango: 0 – 30 psi

2) 0.2 psi. subd.

tubo de bronce

brass socket brazed

rango: 0 - 30 psi

### Manómetro (0.2 psi. subd.) [Ver figs. 5.9a y 5.9b]

Posee tornillo de ajuste de cero incorporado a la aguja de indicación; tornillo de ajuste del span, hacia el interior, por el lado izquierdo, formando un mecanismo de eslabonamiento corredizo traslacional y un ajuste de angularidad a través de dos tornillos que ajustan un disco corredizo concéntricamente al eje de indicación, el cual es girado en forma rotacional alrededor de dicho eje.

Por los datos detallados anteriormente, observamos que se trata de un manómetro que no requiere de mayor precisión y calibración.



**Manómetro (0.1 psi. subd.) [Ver figs 5.9a y 5.9b ]**

Observando el manómetro, percibimos que la aguja de indicación es muy sensible, que no hay ajuste de cero sobre o cerca de ella; posee una superficie especular para la mejor observación de la indicación, con un índice y unas graduaciones de la escala muy finas.

Con la vista hacia el interior de la caja del instrumento y con ayuda de la hoja del diagrama de flujo para la calibración del instrumento, reconoceremos los siguientes tornillos de ajuste:

- a) tornillo de ajuste de linealidad (fino y grueso)
- b) tornillo de ajuste grueso del span (coarse).
- c) tornillo de ajuste fino del span (micrometer),

Además conoceremos al compensador de temperatura, propio de los manómetros de alta precisión.

Indiscutiblemente que la disposición de los mecanismos entre los dos manómetros anteriores tiene variación pero el principio físico de funcionamiento es el mismo.

Se lo puede recomendar como patrón de ajuste y calibración de los instrumentos del lazo de control de temperatura, en especial los de tipo electrónico.

Manipularlo con mucho cuidado porque es sensible a descalibración.

Seguir las recomendaciones dadas por el fabricante que están delineadas sobre la cubierta lateral.

- d) Reducciones, conectores, sellos, válvulas y cañerías de cobre de  $\varnothing \frac{1}{4}$ " O.D., o equivalentes para instalaciones neumáticas.
- e) Extractor de agujas tipo "santiago" para desalojar la aguja de indicación de la carátula.
- f) Destornilladores plano y de estrella para montaje y desmontaje de los mecanismos según el requerimiento o para el respectivo ajuste o calibración.

- g) Juego de llaves de boca, llave de boca regulable ( "francesa" ) y juego de llaves allen (opcional ), para ensamblaje y ajuste de conexiones neumáticas.

#### 4. Procedimiento

**Utilizando el comprobador de manómetros portátil (pesos muertos):**

##### **Precaución**

Si utilizamos la calibración por pesos muertos asegurarse que se tengan las pesas adecuadas o un manómetro patrón consistente.

- a) Realizar la instalación como se muestra en la figura 6.1.1, para la prueba y calibración de cada uno de los manómetros (en el fondo hacia la izquierda de la figura).
- b) Para la prueba y calibración del manómetro de resolución 0.1 subd., seguir el procedimiento que se muestra en la figura 6.1.2.

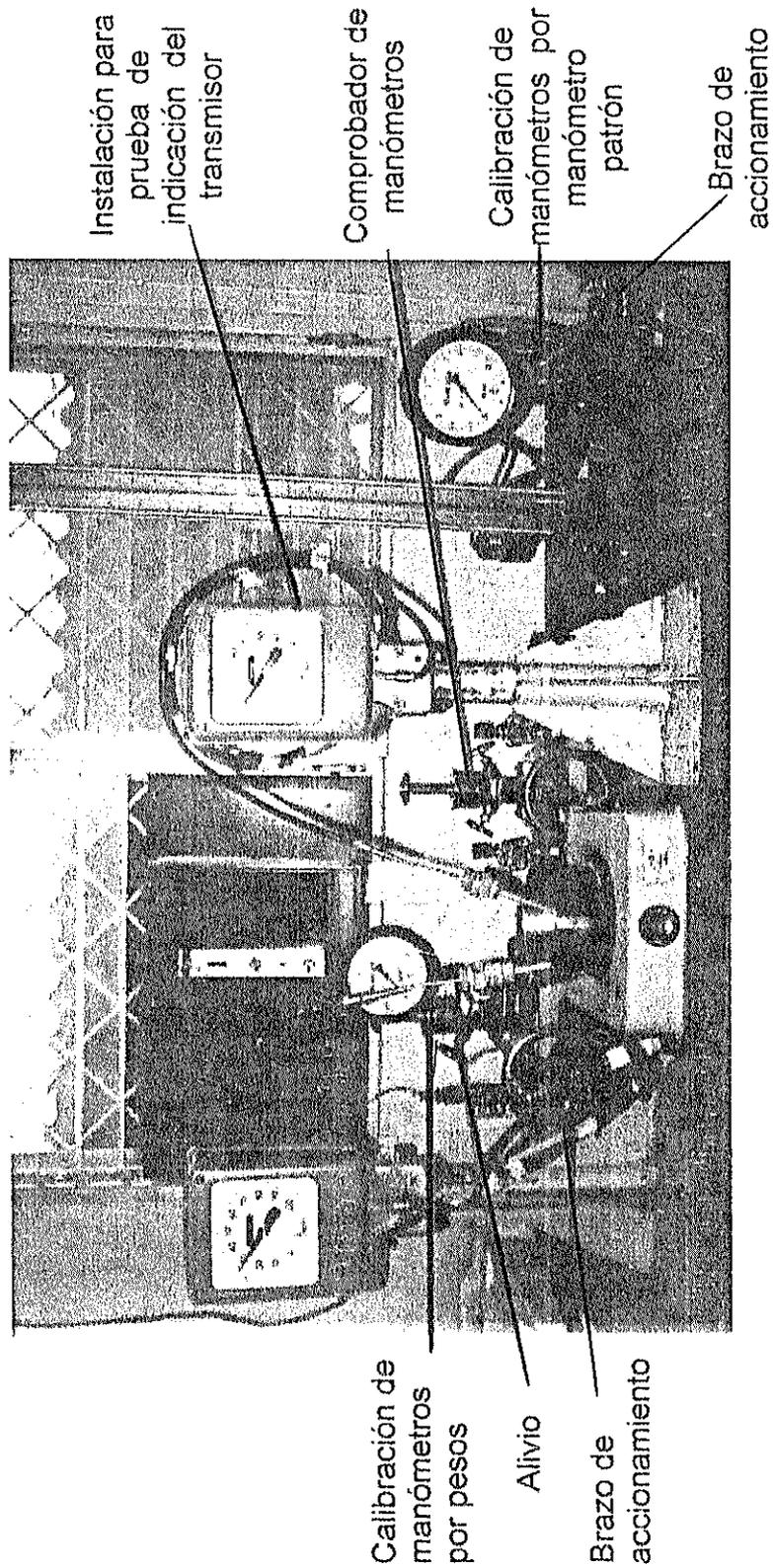


Fig. 6. 1. 1. INSTALACIÓN PARA PRUEBA Y CALIBRACIÓN DE MANÓMETROS (POR: PESOS Y MANÓMETRO PATRON)

Este medidor de prueba ashcroft tipo 1082 esta provisto con span micrométrico y ajustes de linealidad para simplificar la calibración. El diagrama de flujo bajo estas líneas recomienda el procedimiento de calibración.

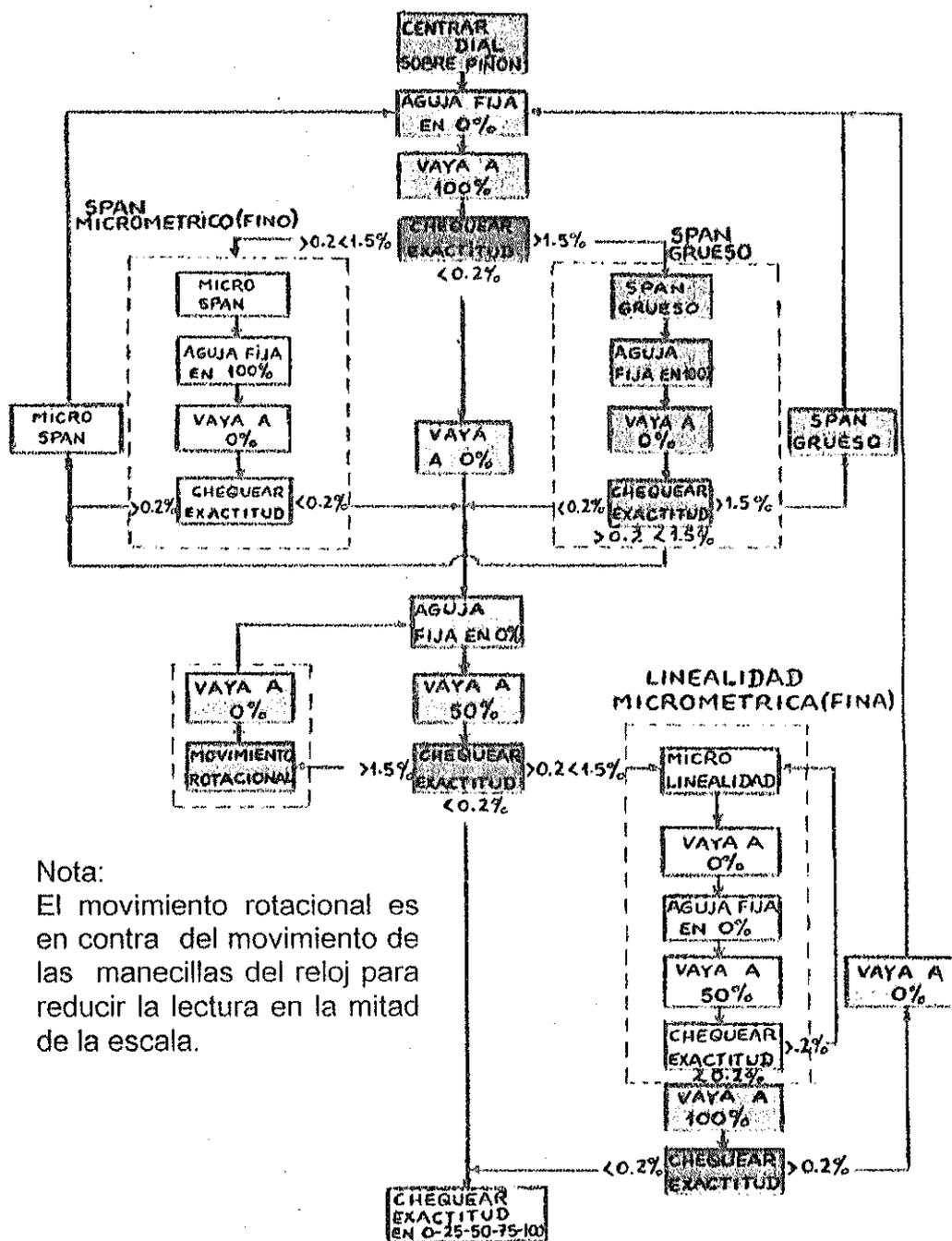
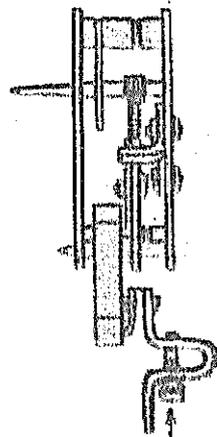


Fig. 6. 1. 2a PROCEDIMIENTO MICROMETRICO DE CALIBRACIÓN DE MANOMETROS

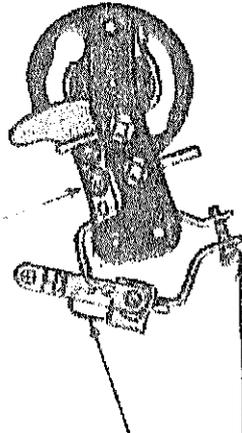


**AJUSTE MICROMETRICO DE LINEALIDAD**

- APRETAR TORNILLO PARA REDUCIR LECTURA EN MITAD DE LA ESCALA 1 VUELTA = APROX 1/2%

**AJUSTE GRUESO DEL SPAN**

- AFLOJAR LOS TORNILLOS
- MOVER DESLIZANDO HACIA EL INTERIOR PARA INCREMENTAR SPAN 0.000-0.005 APROX IGUAL 1%
- APRETAR 205 TORNILLOS



**COMPENSADOR DE TEMPERATURA**

**AJUSTE MICROMETRICO DEL SPAN**

- APRETAR TORNILLO PARA INCREMENTAR SPAN 1 VUELTA = APROX 1/2%

Fig. 6. 1. 2b AJUSTES DEL MANÓMETRO ASHCROFT TIPO 1082

- c) Accionar la manigueta del brazo de accionamiento para bombear el elemento de presión hacia el interior de los tubos Bourdon del manómetro de prueba, y del manómetro patrón. Asegurarse que la válvula de alivio esté cerrada y regular la presión con la válvula de desplazamiento.
- d) Calibrar el manómetro de prueba en las posiciones 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 y 30 psi. Para cada posición aflojar la válvula de alivio, asegurando así la precisión de cada lectura. Proceder en forma ascendente y descendente.
- e) Tabular los datos y graficarlos. Determinar el error de angularidad para valores en la descalibración.
- f) Para la prueba y calibración del manómetro de resolución 0.2 subd. Seguir las instrucciones que se muestran en el procedimiento general de calibración para los manómetros.
- g) A continuación, seguir lo delineado en el literal c) y d).
- h) Tabular y graficar los datos. Determinar el error que se obtiene en los primeros valores de descalibración, y qué tipo de ajuste se debe realizar a continuación.

**NOTA:** Inicialmente se realiza el movimiento en cualquiera de los tornillos de ajuste para generar una descalibración en los manómetros.

Utilizando el regulador patrón de precisión de aire Wallace. Ver fig. 6.1.3, de instalación de regulación para comprobación y calibración manométrica.

### **Precaución**

Para este instrumento no exceder la presión de suministro en más de 35 psi.

Debe observarse que las instalaciones sean libres de fugas, para evitar errores en la medición de presiones e indicación de presiones transmitidas.

La fig. 6.1.4, muestra una sencilla instalación para la calibración de los manómetros utilizando el regulador patrón de precisión.

Antes de abrir el suministro de aire hacia el regulador de precisión, asegurarse que las perillas de regulación que se

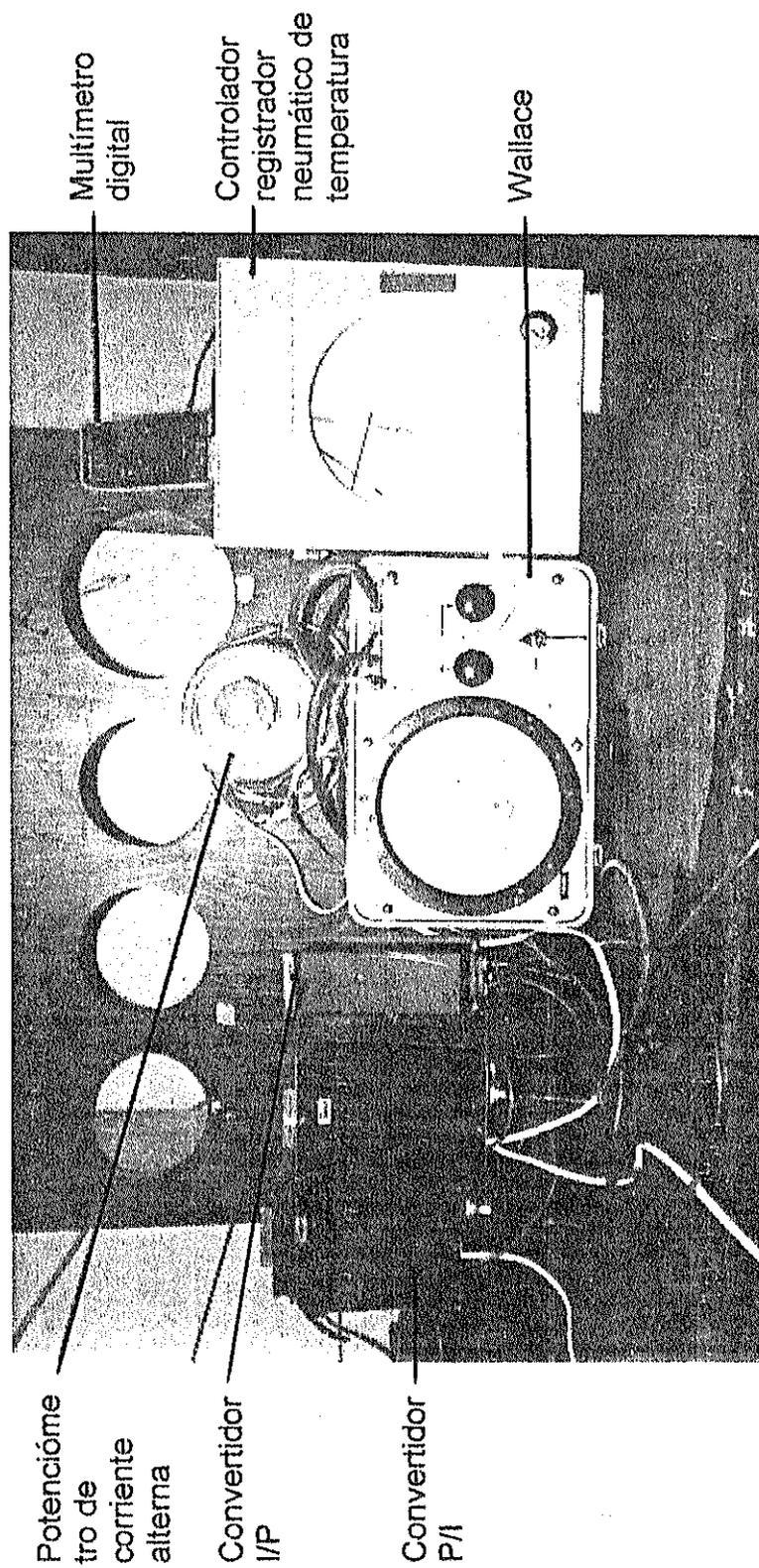


Fig. 6. 1. 3 REGULADOR DE AIRE WALLACE PARA ALTA PRECISION, (ACOMPAÑADO DE VARIOS INSTRUMENTOS DE CONTROL)

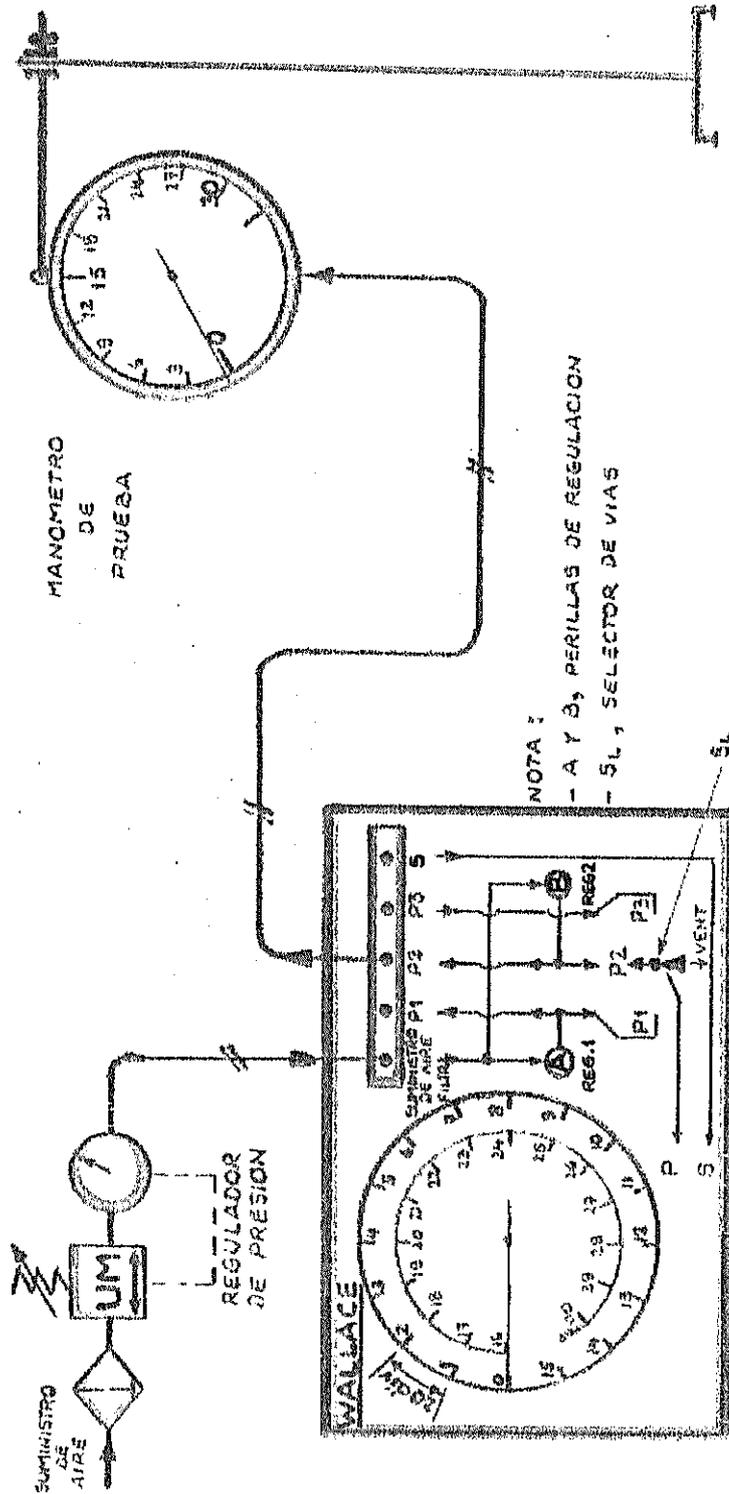


Fig. 6. 1.4 INSTALACION DE REGULACION PARA COMPROBACION Y CALIBRACION MANOMETRICA

REGULADOR PATRON

encuentran en él, estén lo suficientemente giradas en contra del movimiento de las manecillas del reloj, para que la presión de aire desde aquel y hacia el manómetro en ajuste, comience desde la presión mínima posible (0 psi).

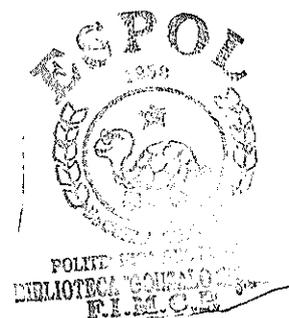
- a) Seleccionar bien la salida de aire desde el regulador de precisión.
- b) Aumentar progresivamente la presión desde el regulador patrón con la perilla correspondiente en el sentido del movimiento de las agujas del reloj, y verificar la salida en el manómetro de prueba.
- c) Obtener los valores de la salida para 0-25-50-75 y 100 % de la escala, tanto en sentido ascendente como descendente (aumentando y disminuyendo progresivamente la regulación).
- d) Graficar los resultados.
- e) Una vez determinado el error existente, proceder a la calibración respectiva siguiendo los métodos descritos.

**Sugerencia:** Cada vez que se ejecute el paso correspondiente, al literal c), descargar el aire remanente desde el regulador patrón

(seleccionar VENT), para evitar posibles errores en la toma de nuevas lecturas y dar al manómetro de prueba, pequeños golpes debido a fallas o errores propios del instrumento producto del uso.

## 5. Preguntas

- a) ¿Qué función desempeña el manómetro en un sistema de control ?
- b) ¿Qué tipos de errores determinó en el manómetro de menor precisión?. Grafíquelos.
- c) Determinar la repetibilidad máxima y la histéresis inicial del manómetro de mayor precisión.
- d) ¿A qué es igual numéricamente, la pendiente de la curva en la gráfica salida vs. entrada en el manómetro de menor precisión (una vez calibrado ). ¿Con qué nombre podemos definir a esta pendiente?.
- e) ¿A qué llamamos ajustes: grueso o basto y fino?.



## 6. Análisis de Resultados

- Se comprueba la relación proporcionalmente directa entre la señal de salida o indicación de los manómetros en la escala psi y la señal de entrada de aire hacia su interior en psi. El valor de esta relación llamada sensibilidad o ganancia, obtenido a partir de la pendiente del gráfico **salida frente a la entrada** del instrumento es de 1 psi/psi, cuando este se encuentra calibrado.
- Se comprueba que, el proceso iterativo de calibración reduce paulatinamente el error hasta eliminarlo.
- Se comprueba que, los manómetros de mayor precisión y exactitud poseen ajustes más finos y su calibración exige de ciertos pasos iterativos que eliminan los diferentes tipos de errores. Para los manómetros de menor precisión y exactitud solo se requieren de ajustes más gruesos o bastos siguiendo los pasos generales de calibración.
- Se comprueba que, los manómetros con superficie especular son más confiables para calibración y pruebas en instrumentos.

- Se debe tener al alcance un producto limpiador de mecanismos sensibles (en spray) y utilizarlo antes de comenzar la prueba, como los que se utilizan para limpieza de equipos electrónicos.
- No usar aceite para limpiar dichos mecanismos internos del manómetro, porque causaría errores en la lectura.
- Maniobrar con cuidado el destornillador sobre los diferentes ajustes, porque podrían causar perjuicios en los mecanismos.
- La observación debe ser perfectamente perpendicular al plano de la carátula para evitar los errores de paralelaje.
- Usar el procedimiento iterativo con paciencia hasta eliminar el error.

### **Manómetro (0.2 psi. subd.)**

Se recomienda para medición de presión de suministro de aire; medición de entrada y salida, de presiones de los instrumentos o patrón de calibración de manómetros de reguladores de presión. No es posible recomendarlo para calibración de instrumentos de

alta precisión. Para calibrarlo, utilizar el procedimiento general de calibración.

### **Manómetro (0.1 psi. subd.)**

Se recomienda como patrón de ajuste y calibración de los instrumentos del lazo de control de temperatura, en especial los de tipo electrónico.

Manipular con mucho cuidado porque es sensible a descalibración.

Seguir las recomendaciones dadas por el fabricante que están delineadas sobre la cubierta lateral.



MANOMETROS DE PRUEBA		MANOMETRO PATRON
RESOLUCION [PSI]		RESOLUCION [PSI]
( 0.1 )	( 0.2 )	( 0.1 )
0	0	0
3	3	3
6	6	6
9	9	9
12	12	12
15	15	15
18	18	18
21	21	21
24	24	24
27	27	27
30	30	30

**Tabla 6.1.1 Referencia de calibración de los manómetros para la salida  
en la indicación**

X INPUT (PSI)	Y		LINEA TEORICA OUTPUT (PSI)
	MANOMETRO DE PRUEBA OUTPUT	MANOMETRO DE CALIBRACION (REF.) OUTPUT	
0	0.1 (PSI)	0.2 (PSI)	0
3	0	0	3
6	3	3	6
9	6	6	9
12	9	9	12
15	12	12	15
18	15	15	18
21	18	18	21
24	21	21	24
27	24	24	27
30	27	27	30

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS MANOMETROS**

**REFERENCIA PARA CALIBRACION DE LOS MANOMETROS.**

Gráfico: Señal de Salida indicada (psi) vs. Señal de Entrada (psi)

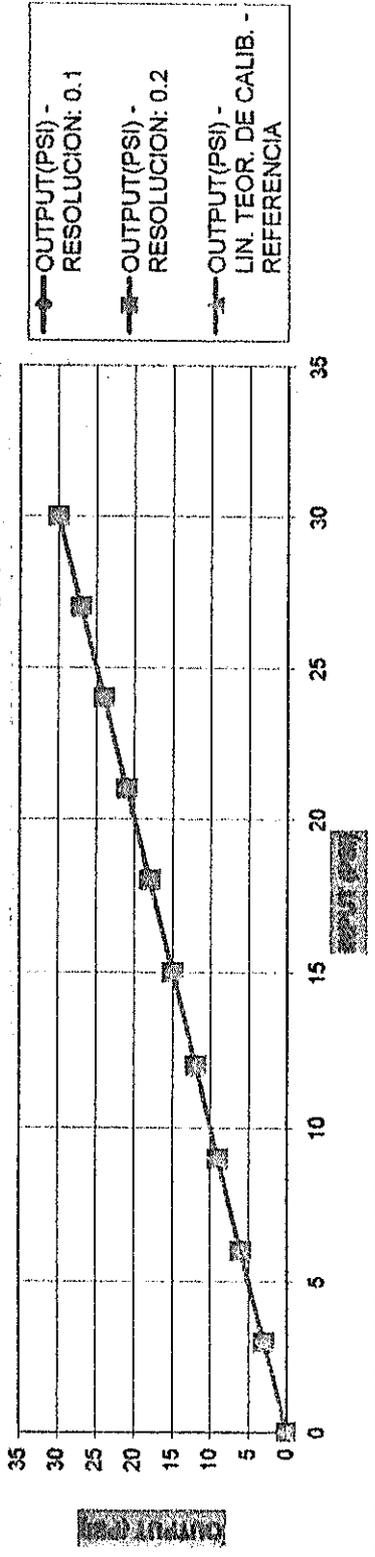


Gráfico 6.1.1 Calibración manométrica (Referencia)

MANOMETRO DE PRUEBA		MANOMETRO PATRON
SALIDA [PSI]		ENTRADA
ASCENSO	DESCENSO	[PSI]
0.00	0.00	0
3.30	2.70	3
6.60	5.30	6
9.80	8.15	9
13.05	10.90	12
16.50	13.30	15
19.00	17.00	18
21.50	20.60	21
24.00	24.00	24
26.50	27.50	27
28.95	31.00	30

**Tabla 6.1.2a Resultados de la indicación en el manómetro de prueba de resolución 0.1 psi (descalibración de manómetro)**

X INPUT (PSI)	Y ASCENSO DESCENSO		LINEA TEORICA DE CALIBRACION -OUTPUT (PSI)
	ASCENSO (PSI)	DESCENSO (PSI)	
0	0	0	0
3	3.3	2.7	3
6	6.6	5.3	6
9	9.8	8.15	9
12	13.05	10.9	12
15	16.5	13.3	15
18	19	17	18
21	21.5	20.6	21
24	24	24	24
27	26.5	27.5	27
30	28.95	31	30

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS MANOMETROS**

VALORES INICIALES OBTENIDOS EN EL MANOMETRO 0.1 PSI

Gráfico: Señal de Salida indicada (psi) vs. Señal de Entrada (psi)

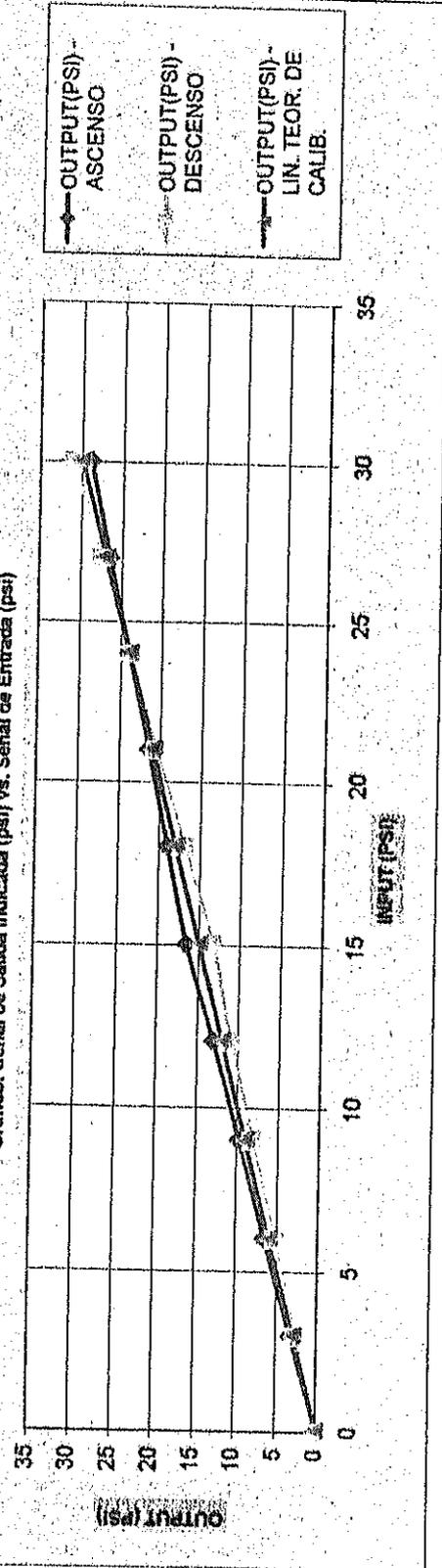


Gráfico 6.1.2a Calibración manométrica (descalibración)

MANOMETRO DE PRUEBA		MANOMETRO PATRÓN
SALIDA [PSI]		ENTRADA
ASCENSO	DESCENSO	[PSI]
0.80	0.75	0
3.80	3.75	3
6.85	6.75	6
9.80	9.75	9
12.85	12.75	12
15.80	15.80	15
18.85	18.75	18
21.80	21.75	21
24.80	24.75	24
27.80	27.75	27
30.80	30.75	30

Tabla 6.1.2b Resultados de la indicación en el manómetro de prueba de resolución 0.1 psi (calibración intermedia de manómetro)

X INPUT (PSI)	Y		LINEA TEORICA DE CALIBRACION OUTPUT (PSI)
	ASCENSO	DESCENSO	
	OUT PUT	OUT PUT	
	(PSI)	(PSI)	
0	0,8	0,75	0
3	3,8	3,75	3
6	6,85	6,75	6
9	9,8	9,75	9
12	12,85	12,75	12
15	15,8	15,8	15
18	18,85	18,75	18
21	21,8	21,75	21
24	24,8	24,75	24
27	27,8	27,75	27
30	30,8	30,75	30

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS MANOMETROS**

**CALIBRACION INTERMEDIA EN EL MANOMETRO 0.1 PSI**

Gráfico: Señal de Salida entrada (psi) vs. Señal de Entrada (psi)

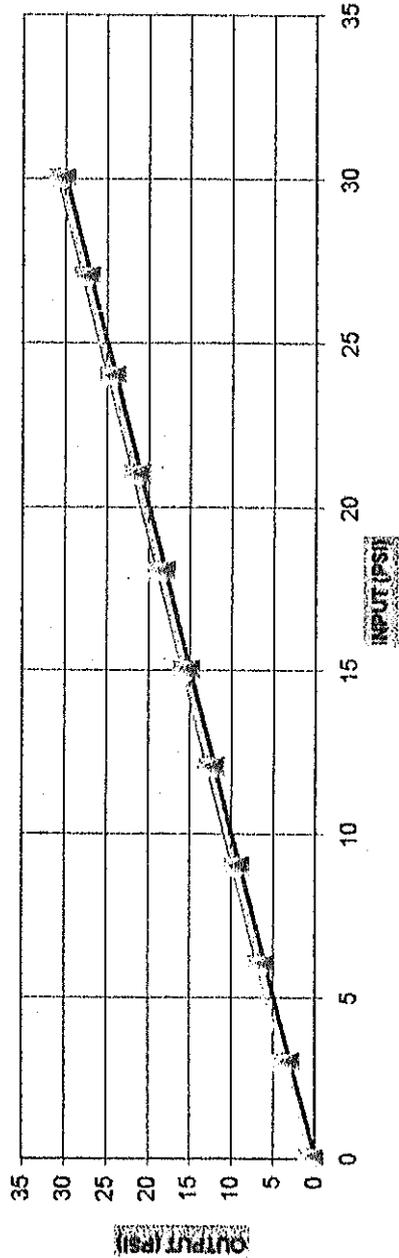


Gráfico 6.1.2b Calibración manométrica (calibración intermedia)

MANOMETRO DE PRUEBA		MANOMETRO PATRÓN
SALIDA [PSI]		ENTRADA
ASCENSO	DESCENSO	[PSI]
0.00	0.00	0
3.20	2.80	3
6.40	5.60	6
9.00	9.00	9
11.80	12.20	12
14.60	15.40	15
17.40	18.60	18
20.20	21.80	21
23.00	25.00	24
25.80	28.20	27
28.60	31.40	30

**Tabla 6.1.3 Resultados de la indicación en el manómetro de prueba de resolución 0.2 psi (descalibración de manómetro)**

X INPUT (PSI)	Y		LINEA TEORICA DE CALIBRACION OUTPUT (PSI)
	ASCENSO OUT PUT (PSI)	DESCENSO OUT PUT (PSI)	
0	0	0	0
3	3.2	2.8	3
6	6.4	5.6	6
9	9	9	9
12	11.8	12.2	12
15	14.6	15.4	15
18	17.4	18.6	18
21	20.2	21.8	21
24	23	25	24
27	25.8	28.2	27
30	28.6	31.4	30

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS MANOMETROS**

VALORES INICIALES OBTENIDOS EN EL MANOMETRO 0.3 PSI

Gráfico: Señal de Salida indicada (psi) vs. Señal de Entrada (psi)

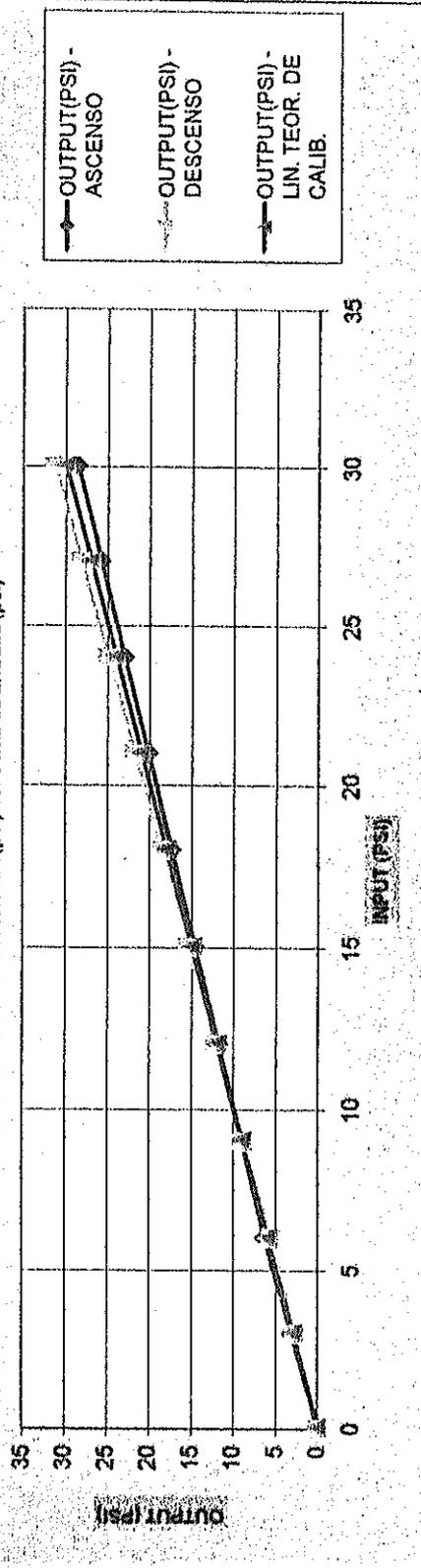


Gráfico 6.1.3 Calibración manométrica (descalibración)

## 6.2. Prueba para calibración de los transmisores

### 1. Objetivos

- a) Conocer el funcionamiento de los Transmisores.
- b) Determinar el error del instrumento y efectuar su corrección respectiva. Previa a una generación de descalibración.

### 2. Teoría

- a) Descripción de operación.
- b) Procedimiento de calibración (ajustes menores).
- c) Para ajustes mayores y mantenimiento (Observar sugerencias del instructivo).

### 3. Equipos

- a) Transmisores indicadores de temperatura neumáticos, (Rango: 0 - 100 °C), y resolución: 1 °C, de acción proporcional directa.
- b) Transmisor patrón de bulbo para la indicación de temperatura con rango de 0 - 100 °C y resolución 1 °C.

- c) 2 Manómetros con rango de 3 - 15 psi, para medir salida de presión de aire del transmisor ó un equivalente a un rango de 0 - 100% de la escala de indicación del transmisor.
- d) Regulador ( es ) de presión de aire, para suministro de aire hacia el ( los ) transmisor (es) [ 20 psi de suministro].
- e) 2 Soportes universal, lo suficientemente rígidos para sujetar los transmisores sin peligro de caerse o moverse.
- f) Cañerías y conectores de cobre de diámetro  $\frac{1}{4}$  " O.D, para aire o equivalente.
- g) 1 Cocineta (en lo posible regulable), para calentar agua dentro de un recipiente.
- h) 1 Recipiente adicional para sujetar el agua fría (o agua con hielo) que permitirá enfriar los bulbos de los transmisores y el agua caliente (producto de las pruebas) muy rápidamente.
- i) Hielo o agua fría dentro de una nevera disponibles para enfriar de acuerdo al requerimiento.

Observar instalación en las figuras 6.2.1, 6.1.1 y 6.2.2.



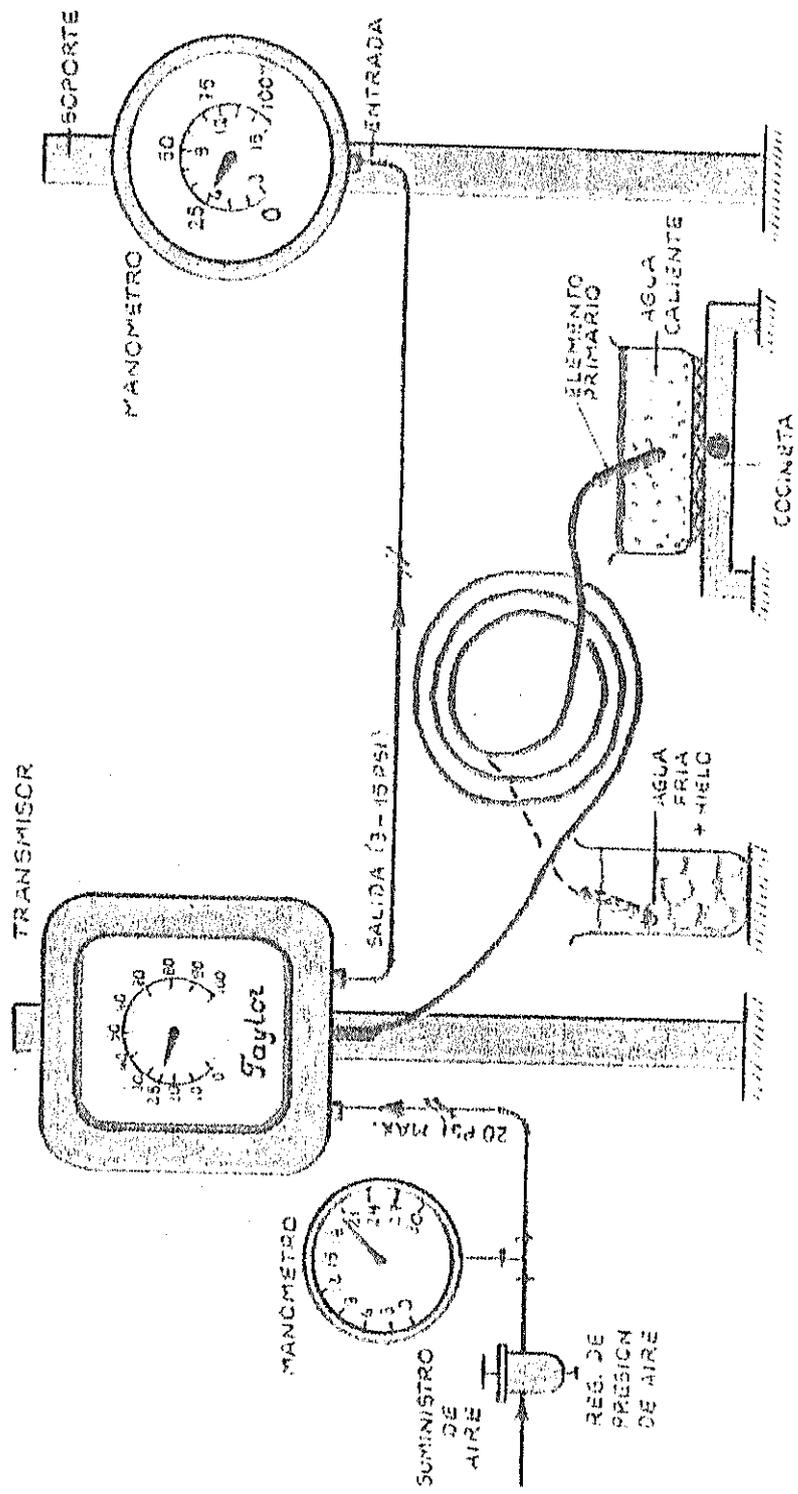
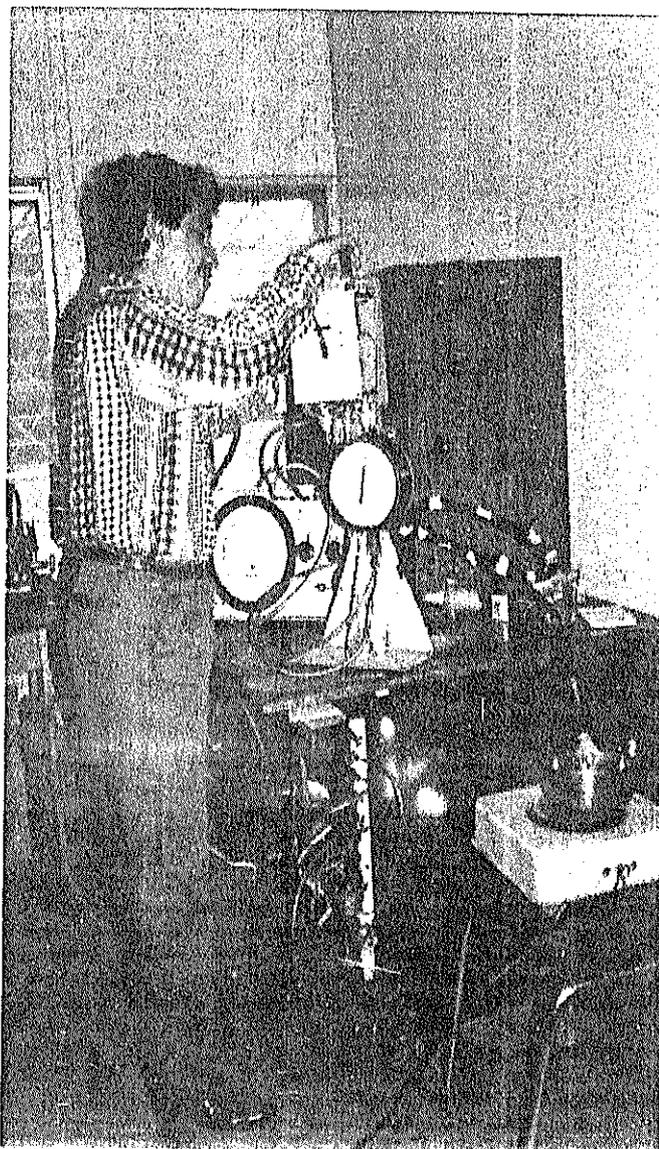


Fig. 6. 2. 1 INSTALACION PARA AJUSTE Y CALIBRACION DE TRANSMISORES



Ajuste de  
la salida.  
(rango)

Fig. 6. 2. 2 AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES

- Advertencia :**
- Colocar la cocineta en un sitio que no cause daño y permita accesibilidad.
  - Colocar bien el recipiente con agua caliente sobre la cocineta.
  - En lo posible utilizar guantes cuando maniobremos superficies calientes.
  - Maniobrar con cuidado el (los) bulbo (s) de el (los) transmisor (es), no doblar los cables de los bulbos según sugerencia del fabricante.
  - El ajuste de conectores y cañerías no debe realizarse forzosamente.

- Precaución :**
- Los recipientes que contengan agua deben ser lo suficientemente grandes para cubrir la superficie sensora de los bulbos.
  - No permitir que el bulbo asiente su punta en el fondo del recipiente durante la prueba (cuando la cocineta esté encendida).
  - Verificar fugas en conexiones de cañerías y conectores.

- Verificar que la presión de suministro de aire sea 20 psi.
- No maniobrar forzando los mecanismos en el interior del transmisor.

**Nota :**

- Asegurarse que el transmisor patrón del bulbo y el manómetro medidor de la salida de presión de aire desde el (los) transmisor(es) esté(n) aceptablemente calibrado( s ).
- Durante la calibración, si se comparan la indicación y la salida de un transmisor con otros, ellos deben encontrarse en lo posible en la misma altura.
- Colocar plano de indicación del transmisor perpendicular a la dirección visual.
- Juegos de llaves de boca en especial 13 y 14 mm., para sujeción.
- Juegos de destornilladores para equipo electrónico ( calibración ).
- Extractor de aguja tipo "santiago" (para sacar la aguja desde la carátula de



indicación).

- Juego de destornilladores plano y de estrella (mantenimiento).
- Juego de llaves "Allen" o hexagonales (mantenimiento).
- Material de limpieza que incluye el spray de limpieza para equipos electrónicos.

#### 4. Procedimiento

Previo mantenimiento de los mecanismos del transmisor se procedió a colocarlos según sugerencia del instructivo.

1. Hacer las conexiones de suministro de aire regulado a 20 psi.
2. Hacer las conexiones de salida de aire hacia el (los) manómetro(s) desde el ( los ) transmisor(es).
3. Sujetar :
  - Cuerpo de los transmisores.
  - Cables y bulbos de los transmisores, como se recomendó.
4. Observar y comparar la indicación de el (los) transmisor (es) con la indicación de el transmisor patrón de bulbo.

5. Colocamos la aguja indicadora firmemente balanceando el rango de indicación con la rueda de indicación HUB, o en lo posible se debe colocar la aguja en la temperatura ambiente y mover la indicación de tal manera que se obtenga todo el rango, empujándola desde el elemento de medida para el ajuste del SPAN. (Measuring element span adjustment).
6. Luego se procede a calibrar el ajuste de cero (zero adjustment) y luego el ajuste del rango (measuring element span adjustment) alternadamente con sus respectivos tornillos hasta obtener la mayor aproximación según las condiciones de temperatura para cada caso de acuerdo a los resultados obtenidos en el termómetro y en los manómetros patrón.

**Nota :** Los dos ajustes mueven indicación junto con la salida.

7. Con el tornillo de ajuste de indicación de la salida (pointer span adjustment ), si es necesario, ajustamos la indicación de la salida sin necesidad de mover la indicación de la temperatura en el transmisor para el valor máximo de la escala.

8. Nuevamente repetimos el paso 6 y 7 hasta obtener la mejor aproximación.
9. Generar una descalibración para repetir los pasos del procedimiento.

**Nota:** Pequeños golpes en el transmisor, en los puntos donde se observa desviación de la indicación con respecto a la salida, ajustan a los resultados esperados.

## 5. Preguntas

- 1.- Explicar la función del transmisor en un sistema de control.
- 2.- Resumir con sus palabras la descripción de la operación de un transmisor indicador de temperatura Taylor.
- 3.- Mencione los tornillos de ajuste que encontró en el transmisor
- 4.- Mencione el tornillo de ajuste que mueve la indicación de la salida sin mover la indicación en la carátula del transmisor.

- 5.- ¿Qué tipos de errores determinó en el transmisor al generar la descalibración?. Tabular y graficar según formato de resultados.
- 6.- Analizar brevemente los resultados según los gráficos obtenidos.

**RESULTADOS INICIALES OBTENIDOS:**

INDICACION		SALIDA DE PRESION
TERMOMETRO PATRON	TRANSMISOR A CALIBRAR	RANGO DE 0-100% DE INDICACION
(°C)	(°C)	(PSI)
25	23	7
50	45	10.4
75	68	12.3
100	92	11.5

**RESULTADOS INTERMEDIOS OBTENIDOS**

INDICACION		SALIDA DE PRESION
TERMOMETRO PATRON	TRANSMISOR A CALIBRAR	RANGO DE 0-100% DE INDICACION
(°C)	(°C)	(PSI)
25	25.5	6
50	50	9
75	74	11.5
100	95	13.8

**Tabla 6.2.1 Resultados de la calibración del transmisor**

X		Y	
INP UT	INDICACION	OUTPUT RANGO	LINEA TEORICA DE CALIBRACION
TERMOMETRO PATRON A CALIBRAR		0-100% INDICACION	
(°C)	(°C)	(PSI)	(PSI)
23	23	7	5,76
45	45	10,4	8,4
68	68	12,3	11,16
92	92	11,5	14,04

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS TRANSMISORES INDICADORES NEUMATICOS DE TEMPERATURA (TIT)**

VALORES INICIALES OBTENIDOS

**CALIBRACION DE LA SALIDA DE LOS TRANSMISORES**

Gráfico: Señal de Salida (PSI) vs. Señal de Entrada (°C)

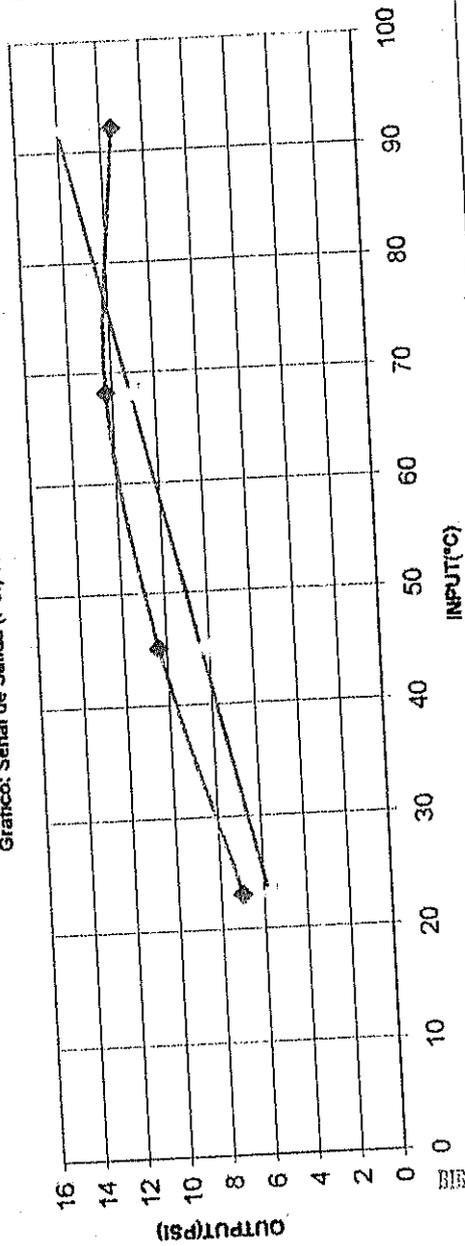
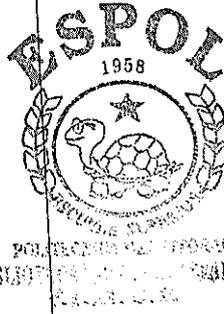


Gráfico 6.2.1a Generación de descalibración del transmisor



X		Y	
INP UT	INDICACION	RANGO 0-100% INDICACION	OUTPUT LINEA TEORICA DE CALIBRACION
TERMOMETRO PATRON A CALIBRAR	INDICACION	INDICACION	OUTPUT
(°C)	(°C)	(PSI)	(PSI)
25	25,5	6	6
50	50	9	9
75	74	11,5	12
100	96	13,8	15

PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS TRANSMISORES INDICADORES NEUMATICOS DE TEMPERATURA (TIT)

**VALORES INTERMEDIOS OBTENIDOS**

**CALIBRACION DE LA SALIDA DE LOS TRANSMISORES**

Gráfico: Señal de Salida (PSI) vs. Señal de Entrada (°C)

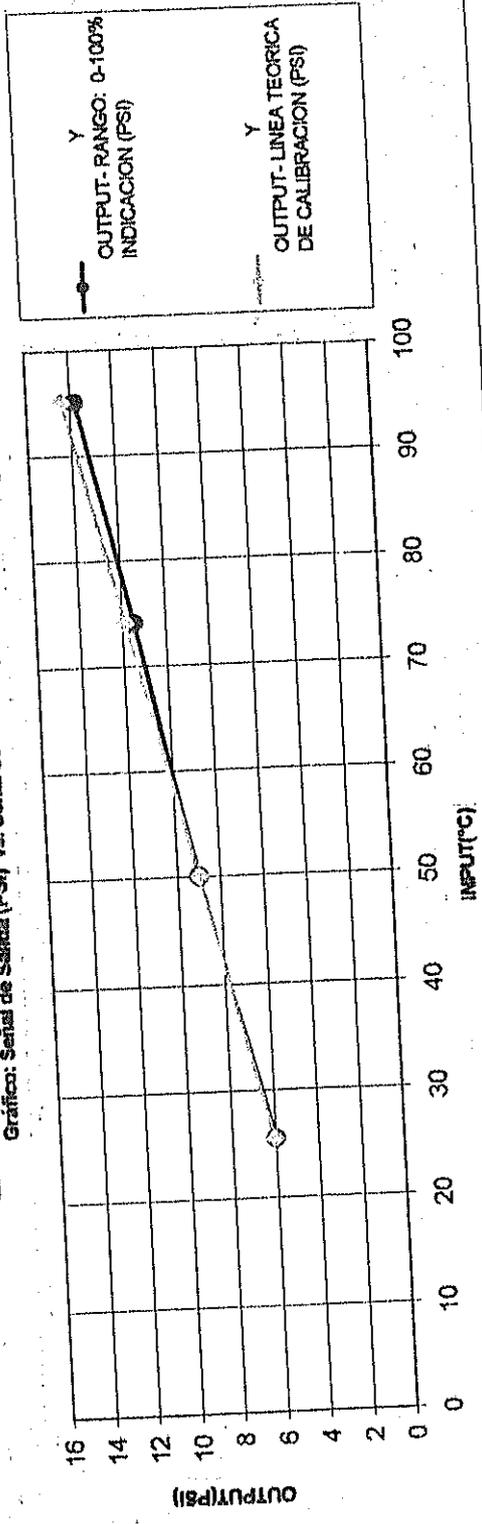


Gráfico 6.2.1b Calibración intermedia del transmisor

**RESULTADOS FINALES OBTENIDOS**

INDICACION		SALIDA DE PRESION
TERMOMETRO PATRON	TRANSMISOR A CALIBRAR	RANGO DE 0-100% DE INDICACION
(°C)	(°C)	(PSI)
25	25	6
50	50	9
75	75	12.1
100	100	15.3

INDICACION		SALIDA DE PRESION
TERMOMETRO PATRON	TRANSMISOR A CALIBRAR	RANGO DE 0-100% DE INDICACION
(°C)	(°C)	(PSI)
25	25	6.00
50	50	8.98 ( 9.00 )
75	75	12.01 ( 12.00 )
100	100	15.00

**Tabla 6.2.1 Resultados de la calibración del transmisor**

**6. Análisis de Resultados.**

- El resultado final del proceso de calibración desarrollado en el transmisor neumático de temperatura es la relación proporcionalmente directa obtenida a partir del gráfico final entre los valores de la salida observada en las indicaciones del transmisor o manómetro patrón, en % de temperatura o

X		Y	
INP UT		OUTPUT	
INDICACION		RANGO	
TERMOMETRO (TRANSIMISOR A CALIBRAR)		0-100%	
(°C)	(°C)	(PSI)	(PSI)
25	25	6	6
50	50	9	9
75	75	12.1	12
100	100	15.3	15

PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS TRANSMISORES INDICADORES NEUMATICOS DE TEMPERATURA (TIT)

VALORES FINALES PREVIA A ÚLTIMA CALIBRACION CALIBRACION DE LA SALIDA DE LOS TRANSMISORES

Gráfico: Señal de Salida (PSI) vs. Señal de Entrada (°C)

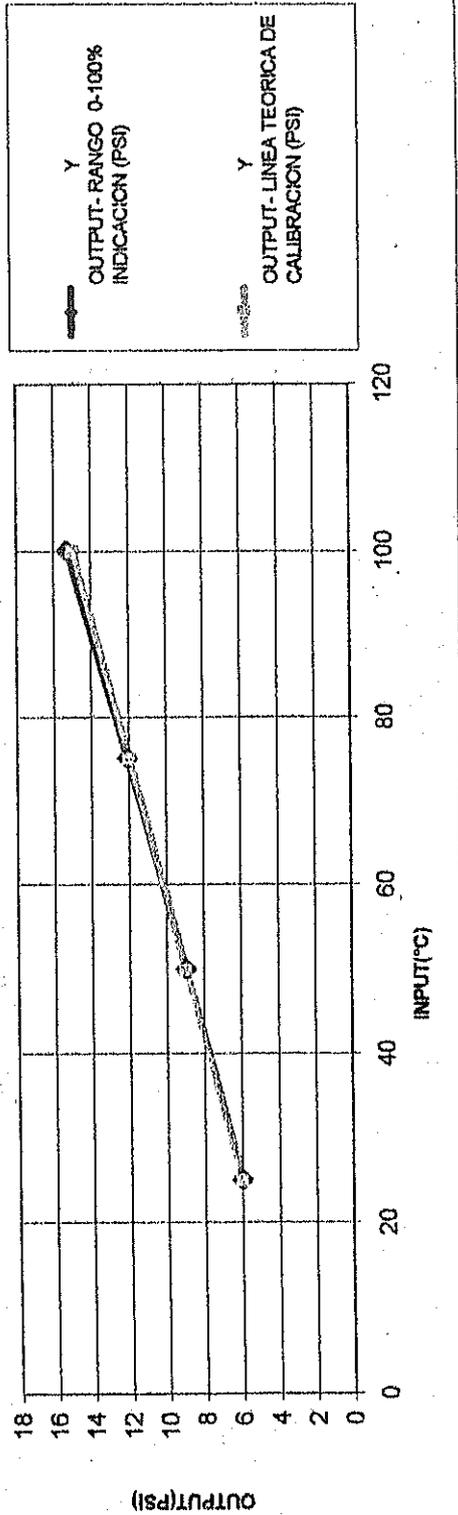


Gráfico 6.2.1c Calibración final del transmisor

X		Y	
INP UT		OUTPUT	
INDICACION		RANGO	
TERMOMETRO (TRANSMISOR A CALIBRAR)		0-100%	
PATRON (°C)	INDICACION (PSI)	INDICACION (PSI)	LINEA TEORICA DE CALIBRACION
25	6	6	6
50	8.98	8.98	9
75	12.01	12.01	12
100	15	15	15

PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS TRANSMISORES INDICADORES NEUMATICOS DE TEMPERATURA (TIT)

VALORES FINALES OBTENIDOS  
CALIBRACION DE LA SALIDA DE LOS TRANSMISORES

Gráfico: Señal de Salida (PSI) vs. Señal de Entrada (°C)

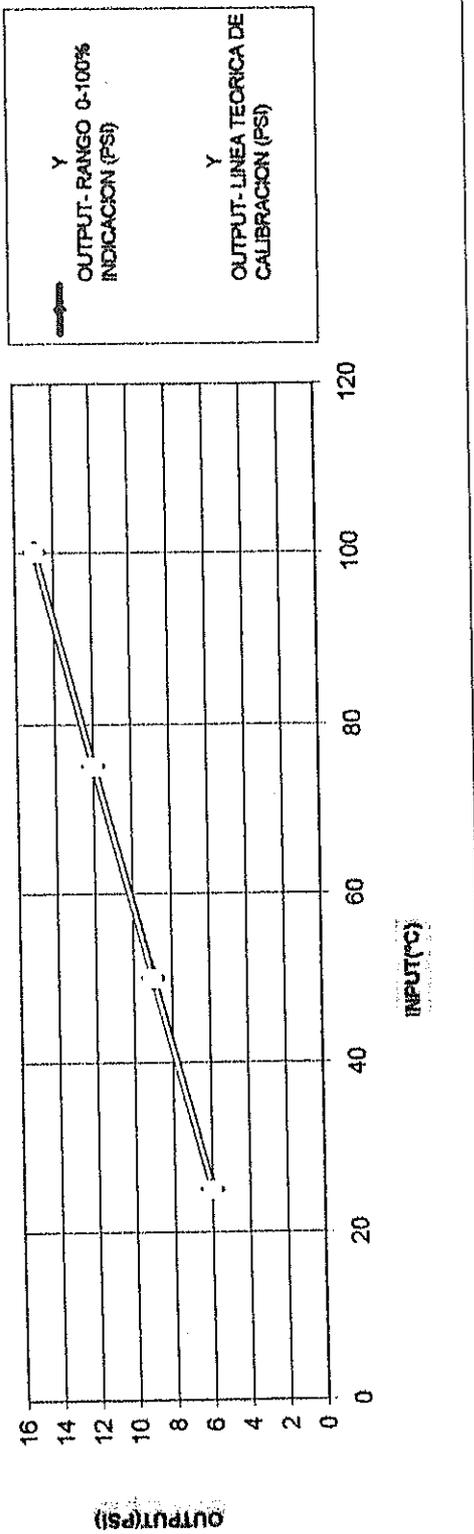


Gráfico 6.2.1d Resultado final de la calibración del transmisor

psi, y la entrada observada en la indicación del transmisor de prueba en °C.

- El valor de esta relación, ya conocida como ganancia o sensibilidad del transmisor, es de 0.12 psi/°C, fácilmente obtenido a partir del mencionado gráfico, dado por el valor de la pendiente.
- Se comprobó que los instrumentos analógicos como este transmisor, presentan los errores conocidos como: de cero, angularidad, del rango y el efecto de la zona muerta (dead-zone) en mitad de la escala.
- Antes de realizar las pruebas de calibración dar mantenimiento a los mecanismos del transmisor con el spray de limpieza para equipos electrónicos, sobre todo hacia el interior del servo-relay desde la boquilla.
- No forzar la rueda HUB, que fija el rango de indicación del transmisor.
- Maniobrar con cuidado los tornillos de ajuste, ya que excesivo forzamiento puede desprenderlos o gastarlos.

- Usar el procedimiento de calibración con paciencia, hasta eliminar el error.
  
- Dar suaves golpes, sin exceso, en la carcasa de los transmisores para obtener lecturas lo más correctamente posibles, ya que se trata de instrumentos mecánicos susceptibles a fallas en los mecanismos.
  
- Evitar el error de paralelaje.



### 6.3. Prueba para calibración del controlador neumático

#### 1. Objetivos

- a) Observar y conocer el funcionamiento del controlador registrador neumático de temperatura de la marca Taylor.
- b) Determinar el error del instrumento y efectuar su respectiva corrección al realizar preliminarmente una descalibración.

#### 2. Teoría

- a) Descripción de operación.
- b) Procedimiento general de calibración.
  - Comprobación básica del mecanismo diferencial.
  - Control proporcional.
  - Control integral.
  - Control derivativo.
- c) Ajustes mayores y mantenimiento (seguir especificaciones del fabricante).

### 3. Materiales y equipos

- a) 1 Controlador registrador neumático de temperatura de alta respuesta y sensibilidad, de acción proporcional, integral y derivativa con pre-actuador estabilizador: 33S22.

Posee las siguientes características:

Acción	: Directa / Inversa
Rango de registro	: 0 – 100% ( 0 - 100 °C )
Resolución de registro	: 1 °C
Reloj	: 30 min/rev.
Rango de indicación de la presión de salida	: 0 - 30 psi
Dial para fijación de la sensibilidad	: -Directa: 1-HIGH -Inversa: 0-250
Rango de la acción integral (rep/min)	: 0.05 – 200
Rango de la acción derivativa ( min)	: 0.01 – 20

- b) 2 Manómetros patrón para medir entrada y salida de presión de aire respecto del controlador, con las siguientes características:

Marca. : Ashcroft (Duragauge) Made in  
USA

1) Acción : Directa      2) Acción : Directa

Resolución: 0.1 psi subd.      Resolución : 0.2 psi subd.

Rango : 0 – 30 psi.      Rango : 0 – 30 psi.

- c) 2 Reguladores de presión de aire con manómetro incorporado.

Marca. : Taylor

Resolución : 1 psi.

Rango de salida : 0 – 30 psi.

Presión de entrada máxima de aire : 21 Kg /cm<sup>2</sup>.

- d) Cañerías y conectores de cobre de diámetro ¼" O.D., o equivalentes para instalaciones neumáticas.

- e) Soporte universal para sujetar el controlador correctamente.

**Precaución:** - Observar precauciones generales descritas en el instructivo.  
- Asegurarse que los manómetros patrón se

encuentren perfectamente calibrados.

- Verificar fugas en las conexiones de cañerías y conectores aplicando solución de agua y detergente con una brocha.
- No apretar exageradamente conexiones anteriormente citadas.
- No realizar cualquier ajuste en los mecanismos sin asesoramiento o guía del instructivo dado por el fabricante.

**Nota:** - Colocar el controlador (plano de registro), perpendicular a la dirección de la vista para evitar error de paralelaje.

- f) Juego de destornilladores para equipos electrónicos utilizados en la calibración.
- g) Juego de llaves de boca, en especial de  $\frac{1}{2}$ " (13 mm) y  $\frac{9}{16}$ " (14 mm) para sujeción del instrumento.
- h) Juego de destornilladores plano y de estrella para mantenimiento y calibración.
- i) Alicata para montaje y mantenimiento.

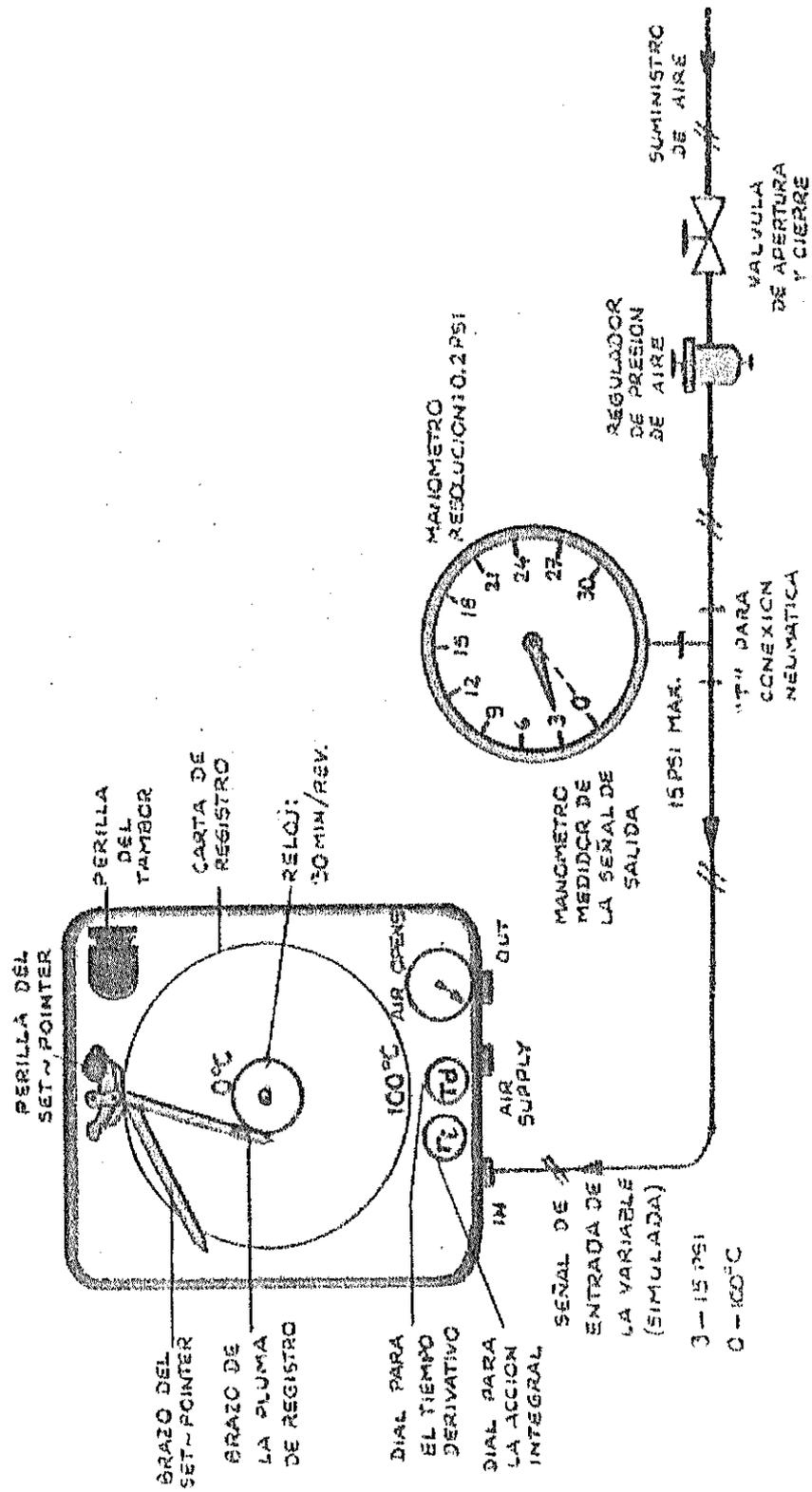


Fig. 6. 3. 1 INSTALACION PARA PRUEBA Y CALIBRACION DE REGISTRO DEL CONTROLADOR

- j) Material de limpieza:
- Retazos de lienzo
  - Spray de limpieza para equipos electrónicos.

#### 4. Procedimiento

Antes de realizar la prueba de calibración se procede al mantenimiento de los mecanismos y mangueras en el interior del instrumento con el spray de limpieza para equipos electrónicos.

##### Prueba de registro:

- a) Hacer la instalación de la prueba de registro como se muestra en la fig. 6.3.1 siguiendo el orden señalado.
- b) Aumentar la presión de aire hacia el controlador girando la perilla superior del vástago del regulador en el sentido del movimiento de las agujas del reloj, cuando el requerimiento es simular la señal de entrada de la variable que se encuentra en aumento, la aguja del registro sobre la escala graduada en °C se moverá en sentido ascendente hacia su valor máximo.

- c) Disminuir la presión de aire hacia el controlador girando la perilla antes mencionada en el sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj, cuando el requerimiento es obtener una simulación del descenso de la variable de entrada sobre la carta de registro de temperatura. La pluma de registro se moverá en sentido descendente hacia su valor mínimo.

**Precaución:** - Maniobrar con cuidado las agujas del registro y punto de consigna sobre la carta, no forzar su movimiento ni doblarlas exageradamente. Arreglarlas de tal manera que tengan fácil movimiento.

- En lo posible colocar la pluma de registro en la aguja correspondiente.

- d) Generar la descalibración, moviendo el tornillo micrométrico [13] hacia atrás o hacia adelante (Numeración obtenida según el instructivo).
- e) Obtener la desviación al tabular y graficar los datos. Determinar el error.

**Prueba del control proporcional:**

f) Observar como se comporta la separación tobera-obturador al mover la perilla del " tambor " situada en la parte superior derecha del instrumento, al igual que cuando movemos la perilla de la sensibilidad (en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj hasta el tope y en contra del mismo movimiento). Observar también la salida.

g) Antes de realizar prueba alguna, se debe hacer la comprobación básica del mecanismo diferencial. La instalación es presentada en la fig. 6.3.2. Se observa que se entrega 20 psi de suministro de aire con un regulador y es indicado en uno de los manómetros patrón o en el manómetro incorporado en el mismo.

La salida de presión de aire (output) se indica en el otro manómetro patrón. Buscar con la perilla del tambor situada en la parte superior derecha del instrumento, las condiciones para probar el funcionamiento del mecanismo diferencial.

h) Para la prueba del control proporcional, se realiza la instalación de acuerdo al esquema presentado en la fig.

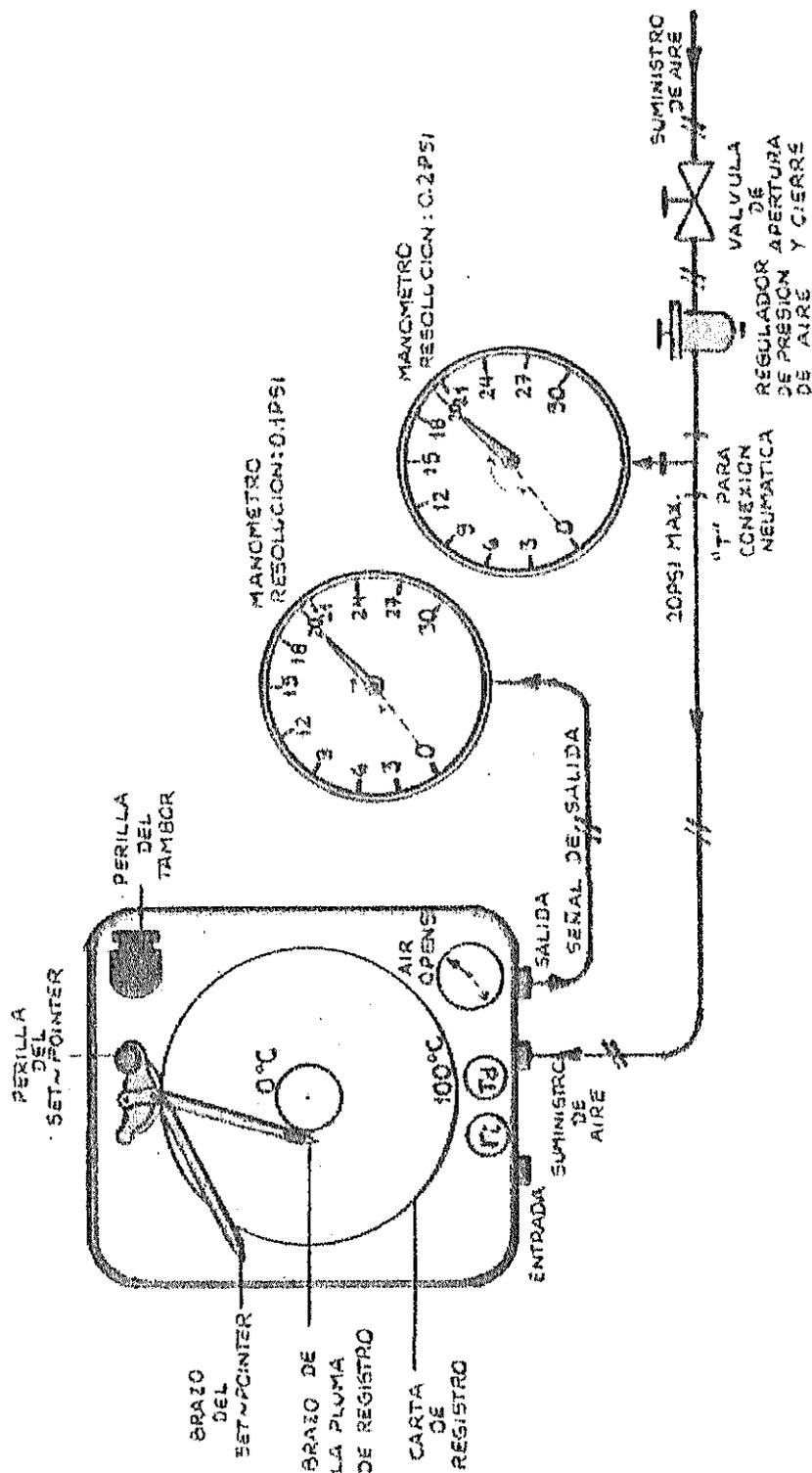


Fig. 6. 3. 2 INSTALACION PARA LA COMPROBACION BASICA DEL MECANISMO DIFERENCIAL DEL CONTROLADOR

6.3.3, que es una combinación de los esquemas de las figuras 6.3.1 y 6.3.2

- i) Balancear la señal de salida en 9 psi, anulando la acción derivativa ( $T_d = 0$ ) y aumentando la acción integral a un valor grande por ejemplo: 10 rep/min o más, para anular cualquier error existente debido a una acumulación de la acción integral. Esto se efectúa fijando la señal de entrada en 50% de la escala y con la perilla que mueve el brazo de la aguja del punto de consigna oscilándola en 50% de la escala (sobre y por debajo), de tal manera que se obtenga un valor fijo en la salida de 9 psi con el registro de la variable y con el punto de consigna en coincidencia.

Anulamos la acción integral ( $r_i = 0$ ).

- j) Buscar, a que sensibilidad corresponde ganancia ( $G$ ) = 1 principalmente y luego los demás valores de ganancia con la correspondiente perilla graduada.
- k) Si existe OFF-SET, corregirlo con la perilla del tambor situada en la parte superior derecha del instrumento a la vez

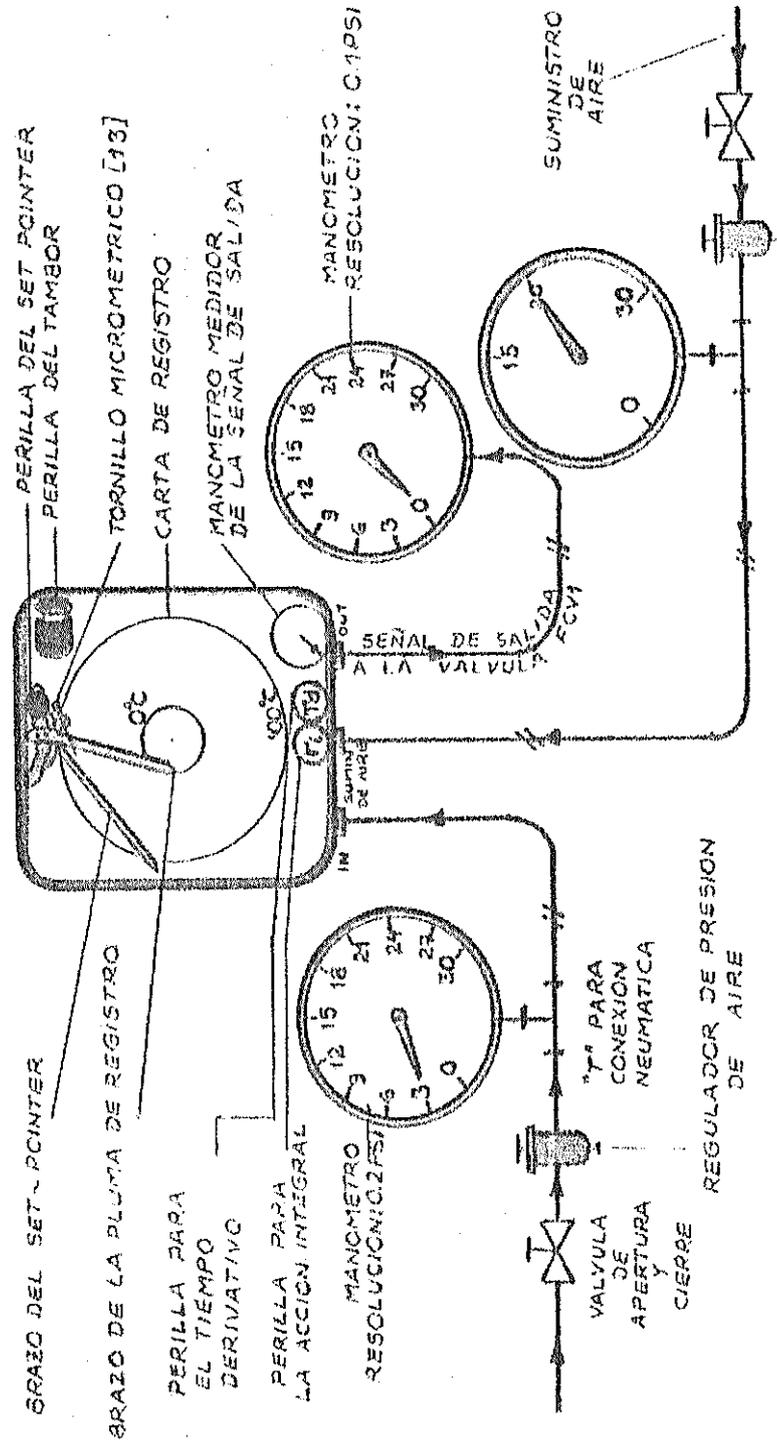


Fig. 6. 3. 3 INSTALACION PARA PRUEBA Y CALIBRACION DEL CONTROLADOR NEUMATICO

que verificamos la acción proporcional, cuando el controlador tiene ganancia  $(G)=1$ .

**Prueba del control integral:**

- 1) A continuación, realizar la comprobación de la acción integral, situando la banda proporcional en el 100%, correspondiente a la ganancia  $(G) =1$ , la variable y el punto de consigna en el 50% de la escala de registro, el índice de la acción integral en 1rep/min (ó 1 min/rep) y la presión de salida a la válvula de control en 9 psi. En estas condiciones introducir una entrada en escalón disminuyendo, por ejemplo el punto de consigna un 25% de la escala.

La señal neumática, indicada por el manómetro, a la válvula ubicado en la parte inferior derecha del instrumento, aumentará inmediatamente a 12 psi por la acción proporcional y se irá moviendo lentamente hasta que, al cabo de un minuto, debe haber repetido los 3 psi en que aumentó la acción proporcional alcanzando los 15 psi y posteriormente 20 psi. Se puede obtener otros resultados iguales si se repite el

mismo paso pero fijando el punto de consigna y registro en un 25% de la escala y efectuar una entrada en escalón descendente a 0% de la escala. Esta marcha corresponde a un controlador de acción directa.

**Nota:** Observar otros resultados de acuerdo a lo descrito en el libro de instrumentación de A. Creus respecto a comprobación de la acción integral.

Si la acción fuera de 0.1 repeticiones/minuto (o de 10 minutos/repetición) el índice alcanzaría 15 psi en 10 minutos, mientras que si fuera de 10 repeticiones/ minuto (0.1 minutos/repetición) lo haría en 0.1 minutos o sea, 6 segundos.

- m) Si los tiempos obtenidos difieren de los señalados en el dial de la acción integral, es necesario fijar el dial en la posición correcta.

Lo anterior no tiene importancia si el instrumento se ajusta al proceso por el método de tanteo, siendo de importancia para cualquier otro método, debido a que los valores calculados deben situarse en el instrumento.

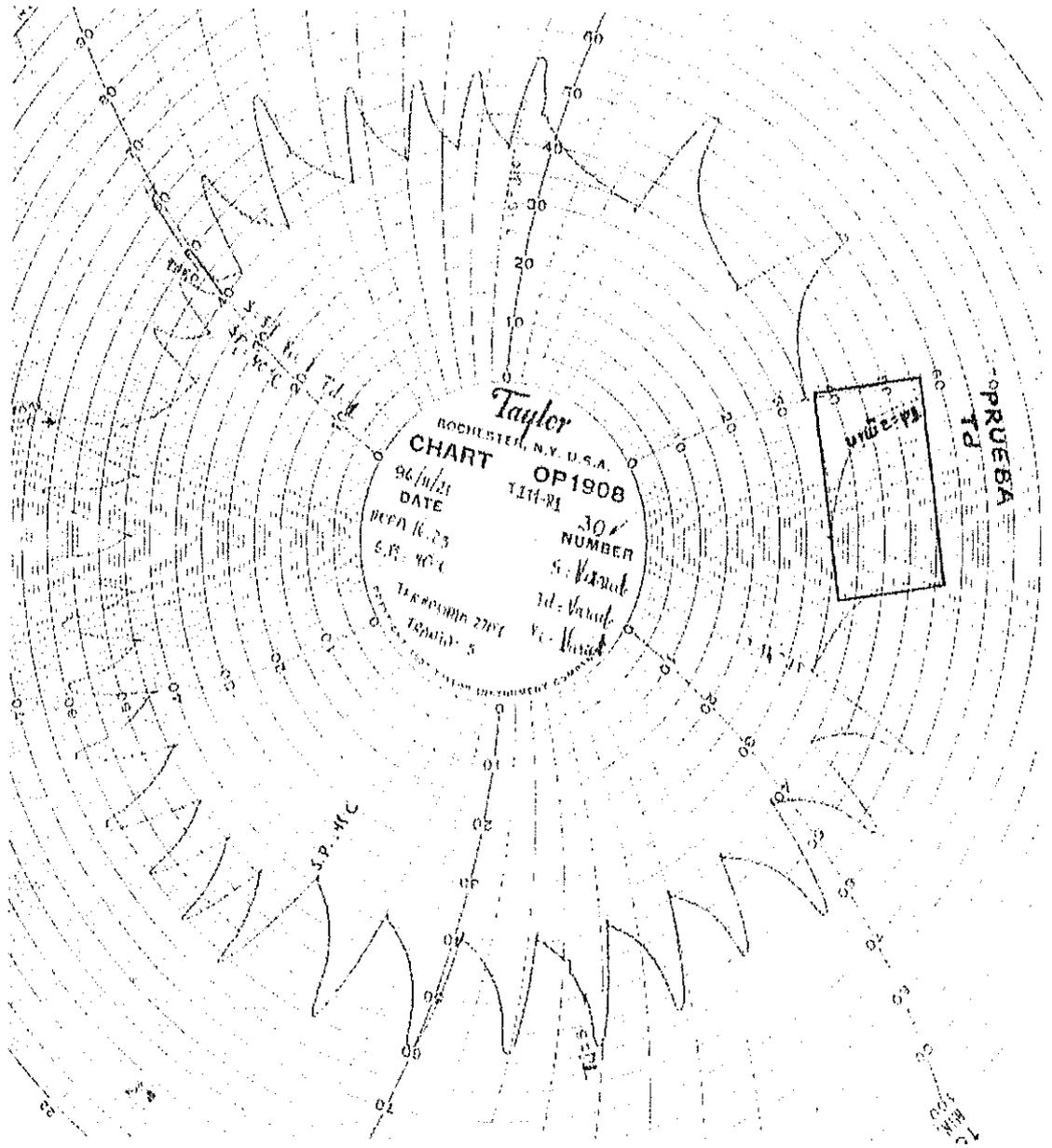
**Prueba de control derivativo:**

- n) Finalmente, verificamos la acción derivada observando la respuesta del instrumento ante una entrada en escalón. Para esto situamos la acción proporcional en  $G = 1$ , la acción derivada en 1 minuto de anticipo, la acción integral anulada ( $r_i = 0$ ) o en su mínimo de repeticiones/minuto (o en el máximo de minutos/repetición), el punto de consigna y la variable alineadas en un valor bajo de la escala igual o inferior al 50%.

A continuación se aumenta súbitamente el punto de consigna en un 5 a 10% de la escala. La variable aumentará en forma de pico debido a la acción derivada y luego bajará gradualmente aproximándose al nuevo punto de consigna y alcanzándolo dentro de una separación entre el 5 y el 10% en el tiempo de un minuto.

Se puede repetir el procedimiento para otros valores de la acción derivada con la misma separación del punto de consigna.





Graf. 6.3.3 PRUEBA DEL TIEMPO DERIVATIVO EN EL CONTROLADOR

**Nota:** El método debe aplicarse con cuidado, ya que, aunque se cumple en la mayoría de los casos, hay otros, en que los tiempos obtenidos llegan a ser la mitad de los valores reales de la acción derivativa.

Si los tiempos obtenidos se desvían apreciablemente de los señalados en el dial de la acción derivada, es preciso fijar el índice en otra posición para que se cumplan dichos tiempos.

En el método de tanteo, sobre el ajuste del instrumento, se pueden hacer las mismas consideraciones que para la acción integral.

- o) Si se dispone de un controlador P.I, podríamos hacer la prueba más exacta, generando una entrada en rampa.

## 5. Preguntas

- a) Explicar la función del controlador en un sistema de control.
- b) Resumir con sus palabras la descripción de la operación del controlador registrador de temperatura Taylor con alta respuesta de la fijación.

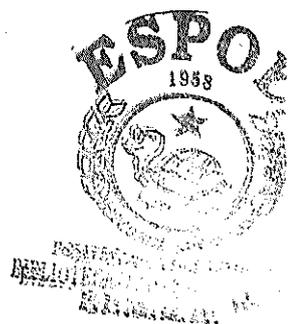
- c) Determine la Histéresis que se obtiene de los datos obtenidos luego de la calibración del registro.
- d) ¿Qué sucede con la señal de salida en control proporcional, cuando fijamos la variable de entrada y set-point en 50% de la escala y movemos la perilla del tambor en dirección del movimiento de las manecillas del reloj hasta el tope ( y viceversa )?
- e) ¿Qué sucede con la señal de salida en control proporcional, cuando fijamos la variable de entrada y set - point en 50% de la escala y movemos la perilla de la sensibilidad en dirección del movimiento de las manecillas del reloj hasta el tope (y viceversa)?.
- f) Verificar la acción integral (realizar 5 observaciones y tabularlas). Analizar resultados.
- g) Verificar el tiempo de la acción derivativa (realizar 5 observaciones). Analizar resultados.
- h) Obtener la desviación al tabular y graficar los datos. Determine el error.
- i) ¿Que acción proporcional debe tener nuestro controlador?.

## 6. Análisis de Resultados

- El tornillo micrométrico calibra solamente el error de cero del registro, recordando que el error de cero se mantiene constante sobre toda la escala. El error de cero simulado fue de aproximadamente  $\pm 5$  °C sobre o debajo de 0 °C.
- Al realizar la prueba de tiempo integral y derivado, se comprobó que los minutos de acción integral y derivada, eran aproximadamente igual a los valores que señalaban los diales correspondientes, por lo que no hubo necesidad de un reajuste.
- Para la prueba de ajuste integral en 10 repeticiones /minuto, se llegó a la corrección y estabilidad en aproximadamente 7 segundos.
- Para la prueba de acción derivativa, fijando el dial en 1 minuto, se efectuó la corrección en aproximadamente 57 seg.
- Mientras tanto, se obtenía siempre una desviación permanente en la estabilidad de 1 a 2 °C cuando se efectuaban la pruebas con el registro de temperatura. Aunque se puede omitir este último, simplemente observando la presión de salida.



- Fijar la acción directa del controlador, para todos los procesos de temperatura que se simulen aquí.
- Antes de realizar prueba alguna, efectuar la limpieza interna de los mecanismos del instrumento, sobre todo hacia el interior de las cañerías desde la boquilla y con el spray. Evitar desconexiones de cañerías.
- Evitar el error de paralelaje sobre la carta de registro y sobre la carátula de indicación de los manómetros.
- No realizar cualquier ajuste o calibración sin estar seguro de lo que se hace ( seguir indicaciones del fabricante).
- Manipular con cuidado todos los mecanismos.



**RESULTADOS EN ERROR DE REGISTRO**

1° ENTRADA	SALIDA	2° ENTRADA	SALIDA
INDICACION DEL MANOMETRO	REGISTRO DEL CONTROLADOR	INDICACION DEL MANOMETRO	REGISTRO DEL CONTROLADOR
(PSI)	(°C)	(PSI)	(°C)
3	5.5	3	-
6	30.6	6	20.0
9	55.5	9	45.1
12	80.6	12	70.0
15	-	15	95.1

**RESULTADOS DESPUES DE LA CALIBRACION**

ENTRADA	SALIDA	
INDICACION DEL MANOMETRO	REGISTRO DEL CONTROLADOR (°C)	
(PSI)	ASCENDENTE	DESCENDENTE
3	0.0	0.0
6	25.1	24.9
9	50.0	50.0
12	75.2	75.1
15	100	99.9

Tabla 6.3.1 Resultados de la prueba para calibración del registro del control



POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "TORIBIO DE VIALLOS"  
E.A.M. C.A.

X	Y
INPUT	OUTPUT
INDICACION DEL MANOMETRO (PSI)	REGISTRO DEL CONTROLADOR ERROR HACIA ARRIBA (°C)
3	5.5
6	30.6
9	55.5
12	80.6
15	95.1
	LINEA TEORICA ERROR HACIA ABAJO DE CALIBRACION (°C)
	0
	25
	50
	75
	100

PRUEBA PARA CALIBRACION DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMATICO

DE TEMPERATURA (TRC)

RESULTADOS DEBIDO A LA GENERACION DE LA DESCALIBRACION  
PRUEBA PARA CALIBRACION DEL REGISTRO

Gráfico: Señal de Salida (°C) vs. Señal de Entrada (PSI)

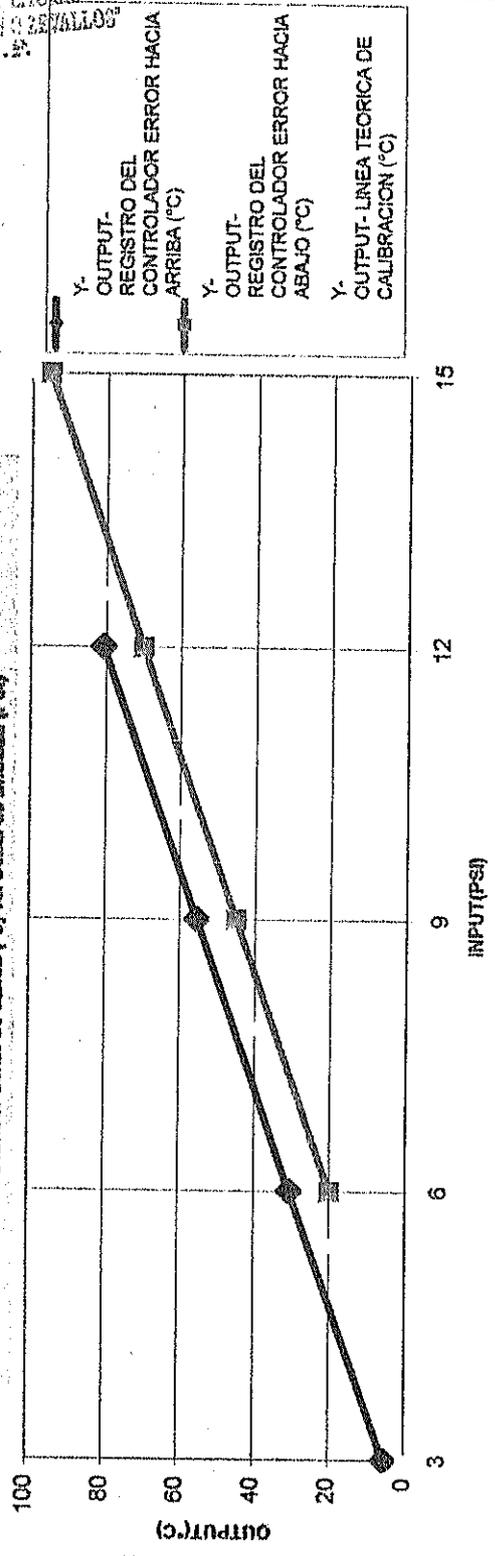


Gráfico 6.3.1a Generación de descalibración del registro en el controlador

X		Y	
INPUT		OUTPUT	
INDICACION DEL MANOMETRO (PSI)		REGISTRO DEL CONTROLADOR -ASCENDENTE (°C)	LINEA TEORICA DE CALIBRACION (°C)
3	0.0	0.0	0
6	25.1	24.9	25
9	50.0	50.0	50
12	75.2	75.1	75
15	100.0	99.9	100

PRUEBA PARA CALIBRACION DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMATICO DE TEMPERATURA (TRC)  
 DATOS ULTIMOS OBTENIDOS DESPUES DE LA CALIBRACION  
 PRUEBA PARA CALIBRACION DEL REGISTRO  
 Grafico: Salida en Seales (°C) vs. Salida en Entrada (PSI)

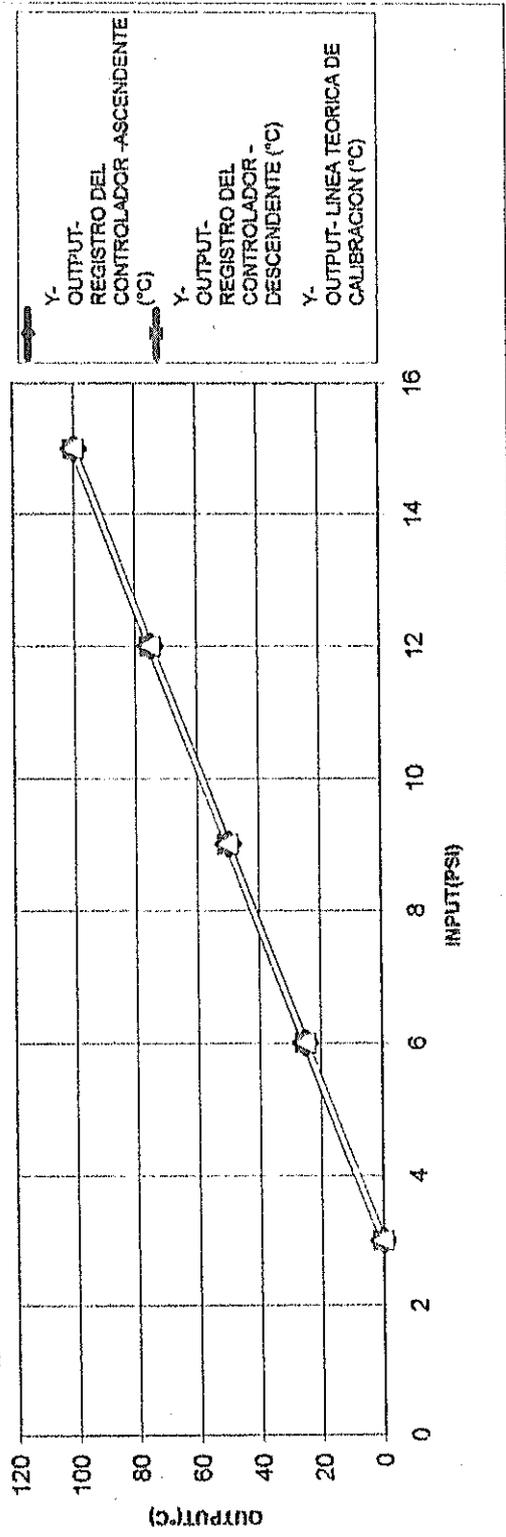


Gráfico 6.3.1b Resultado final de la calibración del registro en el controlador

GENERACION DE DESCALIBRACION DEL CONTROL PROPORCIONAL

ENTRADA		SALIDA	
FIJACION DE LA VARIABLE DE PROCESO (SIMULACION)	VARIACION DEL SET-POINT	SEÑAL A LA VALVULA (INDICACION EN UN MANOMETRO)	
(PSI)	(°C)	(PSI)	
		ERROR 1	ACCION INVERSA
9	0	15.5	3.2
9	25	14.0	6.3
9 (50%)	50	12.4	9.2
9	75	10.3	12.2
9	100	8.0	15.3

Tabla 6.3.2a Resultados de la prueba para calibración del control proporcionalmente directo

X INPUT		Y- OUTPUT	
FIJACION DE VARIABLE	VARIACION DEL SET-POINT (°C, %)	RESPUESTA DEL CONTROLADOR - DESCALIBRACION 1 (PSI)	LINEA TEORICA DE CALIBRACION (PSI)
9	0	15.5	15
9	25	14.0	12
9 (50 °C)	50	12.4	9
9	75	10.3	6
9	100	8.0	3

PRUEBA PARA CALIBRACION DEL CONTROLADOR REGULADOR NEUMATICO DE TEMPERATURA (TRC)  
 GENERACION DE DESCALIBRACION EN CONTROL PROPORCIONAL  
 Calibrar: Señal de Salida (PSI) vs. Señal de Entrada (°C, %)

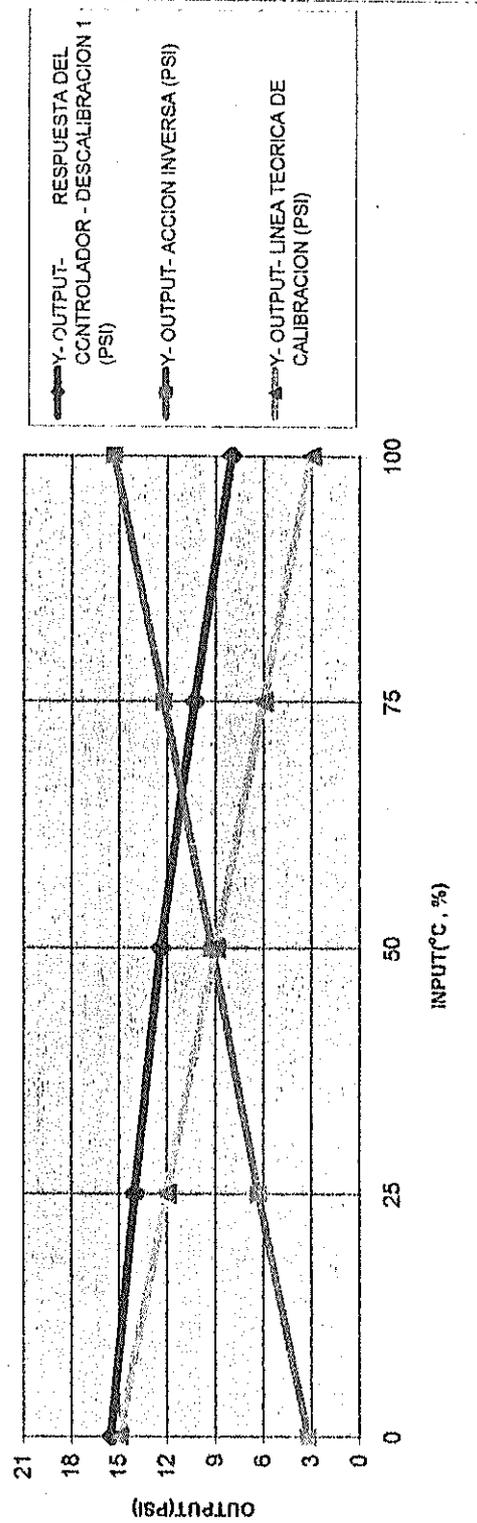


Gráfico 6.3.2a Generación de descalibración en el control proporcional

DATOS DESPUES DE LA CALIBRACION

CONTROL PROPORCIONAL EN ACCION DIRECTA (G = 1)

ENTRADA		SALIDA
FIJACION DE LA VARIABLE DE PROCESO (SIMULACION)	VARIACION DEL SET-POINT	SEÑAL A LA VALVULA (INDICACION EN UN MANOMETRO)
(PSI)	(°C)	(PSI)
9	0	15.2
9	25	12.1
9 (50%)	50	9.0
9	75	6.1
9	100	3.1

Tabla 6.3.2b Resultados de la prueba para calibración del control proporcionalmente directo

X		Y	
INPUT (REGIS TRO)		OUT PUT	
VARIABLE DE PROCESO	VARIACION DEL	SEÑAL A LA VALVULA	
SIMULACION (FUJA)	SET-POINT	INDICACION EN	
PRODUCCION EN UN MANOMETRO	1°C,(%)	MANOMETRO	DE CALIBRACION
(PSI),(%)		(PSI)	(PSI)
9	0	20	15
9	0	15.2	15
9	25	12.1	12
9 (50)	50	9.0	9
9	75	6.1	6
9	100	3.1	3

PRUEBA PARA CALIBRACION DEL CONTROLADOR REGISTRADOR NEUMATICO DE TEMPERATURA (TRC)

VALORES OBTENIDOS DESPUES DE LA CALIBRACION CALIBRACION DEL CONTROL PROPORCIONAL EN ACCION DIRECTA (G=1)

Gráfico: Señal de Salida (PSI) vs. Señal de entrada (°C, %)

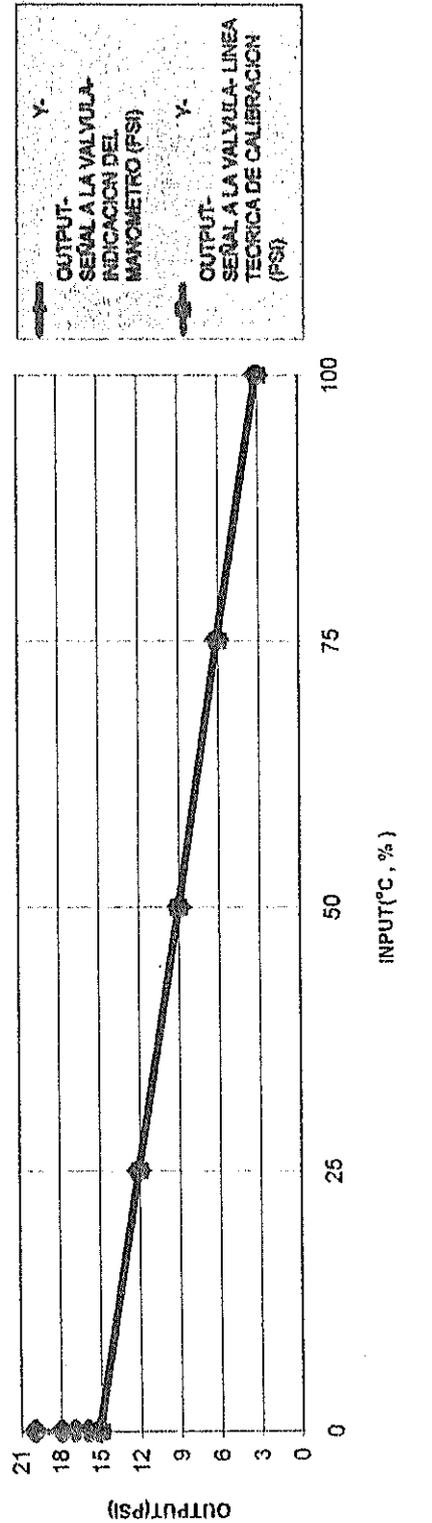


Gráfico 6.3.2b Resultado final de la calibración del control proporcional directo con ganancia G = 1

## 6.4. Prueba para calibración de la válvula de control.

### 1. Objetivos

- a) Conocer el funcionamiento de la válvula de control.
- b) Simular una descalibración, efectuar su respectiva corrección y determinar el error del instrumento.

### 2. Teoría

- a) Introducción.- Descripción general.- Válvula de alto Flujo.- Acción uniforme del actuador de la válvula.- Números de serie y catálogo.- Características técnicas.
- b) - Instalación.- Montaje.- Conexiones neumáticas.
  - Operación.- Inspección del recorrido de la válvula.- Ajuste del Rango del actuador.
  - Mantenimiento.- Equipos de pruebas y herramientas requeridas.- Desensamble de la válvula.- Ensamble de la válvula.- Ajuste del recorrido del Obturador de la válvula.- Empuje para cerrar la válvula.- Empuje para abrir la válvula.- Reemplazo del diafragma del actuador.- Cambio

del rango del resorte del actuador.- Procedimiento de ajuste del rango establecido del actuador.- Actuador con empuje para cerrar la válvula.- Actuador con empuje para abrir la válvula.

- c) Observar: Notas, ilustraciones, descripción de partes, gráficos, noticias, advertencias, y precauciones dados por el fabricante.



### 3. Equipos y materiales

- a) 1 Válvula de Control de flujo de líquido FCV1, de aire para cerrar la válvula o empuje para cerrar ATC, con las siguientes características:

Tamaño	: 1/2"
Rango de entrada de aire	: 3 – 15 psi
Material del cuerpo	: Br
Presión del cuerpo	: 250 psi
Serie	: 2000 VA 32220 – 92954

- b) 1 Manómetro marca ASHCROFT (Duragauge), hecho en U.S.A. con las siguientes características:



- f) 1 Llave ajustable de boca ( francesa ) mediana, para ajustar el Rango del actuador o cierre total de la válvula sobre los 15 psi de entrada de aire y apertura de la válvula sobre los 3 psi de entrada de aire y para aflojar la contratuerca de seguridad que permite mover el vástago sobre las indicaciones del rango establecidas.
- g) 1 Alicata para mover el vástago sobre las líneas demarcadas en la placa del rango de la válvula establecido en fábrica.
- h) Un destornillador plano para mover la placa de indicación de acuerdo al ajuste de salida del rango ( si es necesario ).
- i) Un cronómetro digital para obtención del tiempo para el cálculo de flujo de agua en el cierre proporcional del vástago de la válvula.
- j) Fracción del lazo para observar el comportamiento del Flujo de salida de agua de la válvula vs. Cierre de la válvula o entrada de aire en el rango de 3 - 15 psi de presión de aire sobre el actuador.

#### 4. Procedimiento

a) Efectuar el acoplamiento de prueba que se muestra en la fig. 6.4.1, se lo puede realizar con la válvula instalada en el lazo de control.

b) Anotar el número de hilos que sobresalen desde la contratuerca de seguridad en el vástago de la válvula.

**Nota:** Tener la precaución de hacer una señal con tinta de difícil remoción en el nivel del vástago sobre la tuerca de ajuste del Rango del actuador (Cuando la válvula esté calibrada).

c) O girar la tuerca de ajuste del Rango del actuador en dirección del movimiento de las manecillas del reloj o en contra de este movimiento para generar una descalibración.

c) O girar el vástago en dirección del movimiento de las agujas del reloj, o en contra de este movimiento aflojando previamente la contratuerca de seguridad para generar una descalibración.

d) O hacer las dos acciones c), y c'), para generar una descalibración.

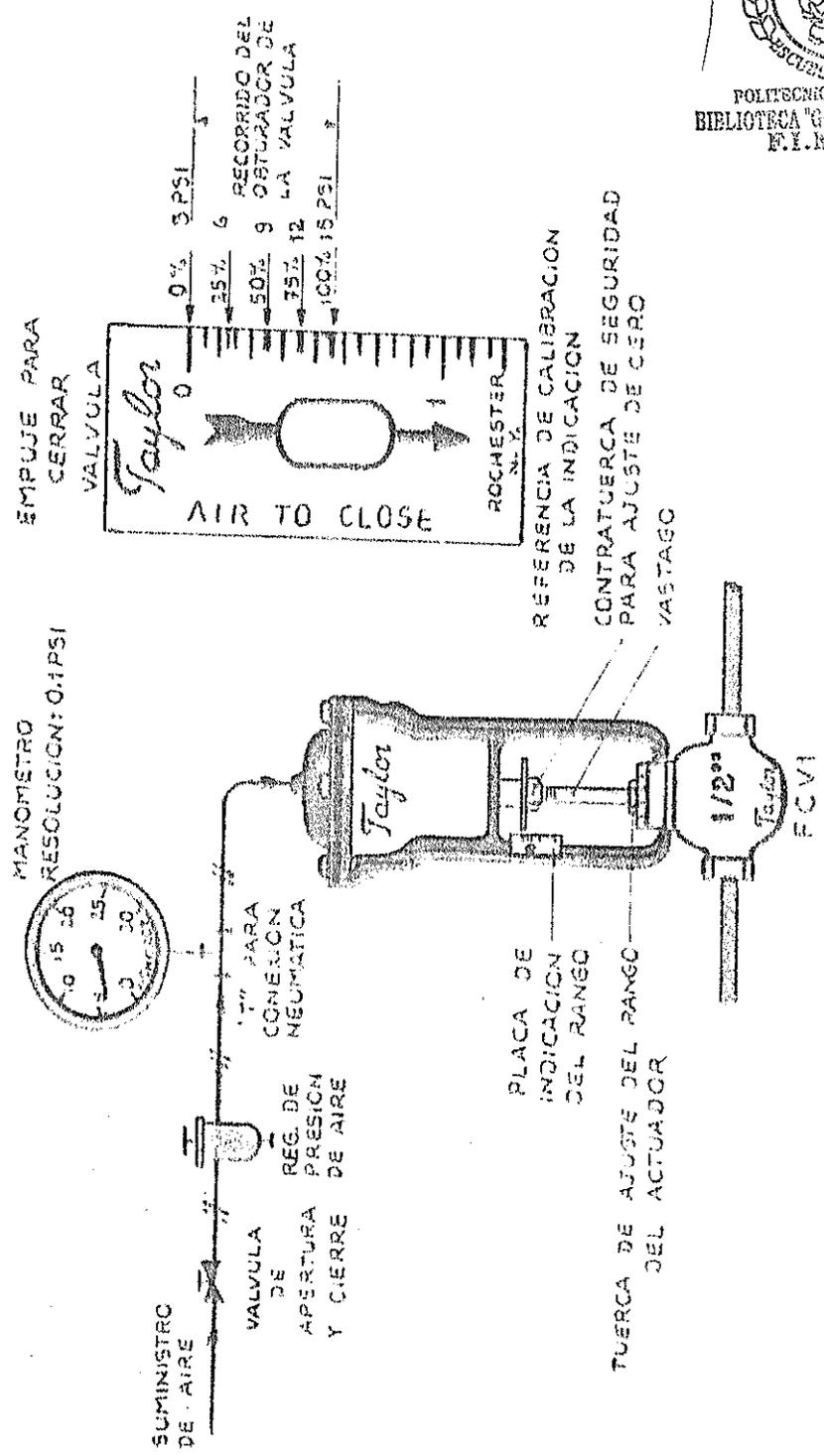


Fig. 6. 4. 1 ACOPLAMIENTO DE PRUEBA DE LA VÁLVULA DE CONTROL FCV1

- e) Dividir en cuatro partes iguales la placa de indicación y marcarlas para el % de recorrido del obturador de la válvula de control, según la fabricación.
- f) Abrir la válvula de suministro de aire, asegurándonos que la presión no sea superior de 21 Kg/cm<sup>2</sup> (299 psi) en la entrada al regulador y que la perilla de regulación esté lo suficientemente girada en contra del movimiento de las manecillas del reloj, para que la aplicación de presión de aire a la válvula de control esté en su valor más bajo posible.
- g) Empezar a aplicar presión de aire hacia la válvula de control desde el regulador en los valores de 3, 6, 9, 12, y 15 psi correspondientes a las marcas realizadas en la placa de indicación del recorrido del obturador de la válvula de control, cuando su indicación está calibrada (Ver fig. 6.4.1).
- h) Observar las desviaciones porcentuales y tabularlos.
- i) Graficar:
  - Salida porcentual del recorrido del obturador de la válvula vs., entrada de presión de aire correspondiente de acuerdo a la referencia de calibración de la indicación. (fig 6.4.1).

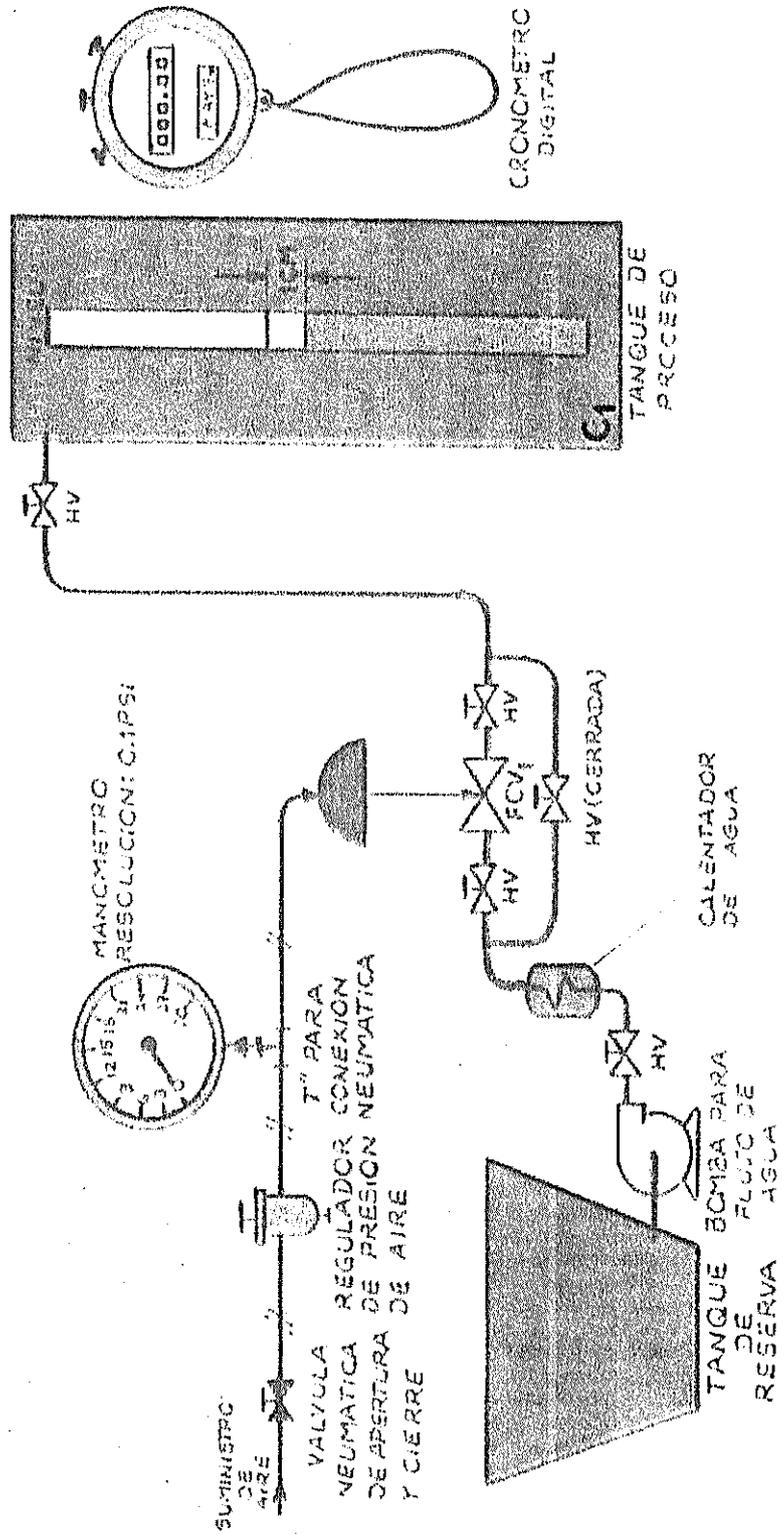


Fig. 6. 4. 2 DISPOSITIVO DE PRUEBA DEL FLUJO DEL LIQUIDO A TRAVES DE LA VÁLVULA CON EL % DE CIERRE DE SU OBTURADOR

- Salida porcentual del recorrido del obturador de la válvula vs., entrada de presión de aire correspondiente de acuerdo a la referencia de calibración de la indicación después de haber generado la descalibración.
- j) Retornar la válvula de control a su estado original calibrada de acuerdo a las instrucciones dadas en los procedimientos de calibración.
- k) Disponer el sistema a controlar de tal manera que podamos tomar lecturas de tiempo por cada cm. de nivel de agua en el tanque de proceso para cada % de cierre de la válvula.
- Un dispositivo de prueba como el de la figura 6.4.2, puede ser de utilidad.
  - Utilizar, el nivel que se observa en el panel instalado en el tanque de proceso y el cronómetro.
- l) Tabular datos y obtener la curva **% de Caudal vs. % de Cierre del obturador de la válvula.**
- m) Generar una descalibración y obtener datos para graficar la curva del literal l). Analizar resultados.

- n) Retornar la válvula de control a su estado original calibrada de acuerdo a las instrucciones dadas en los procedimientos de calibración.

## 5. Preguntas

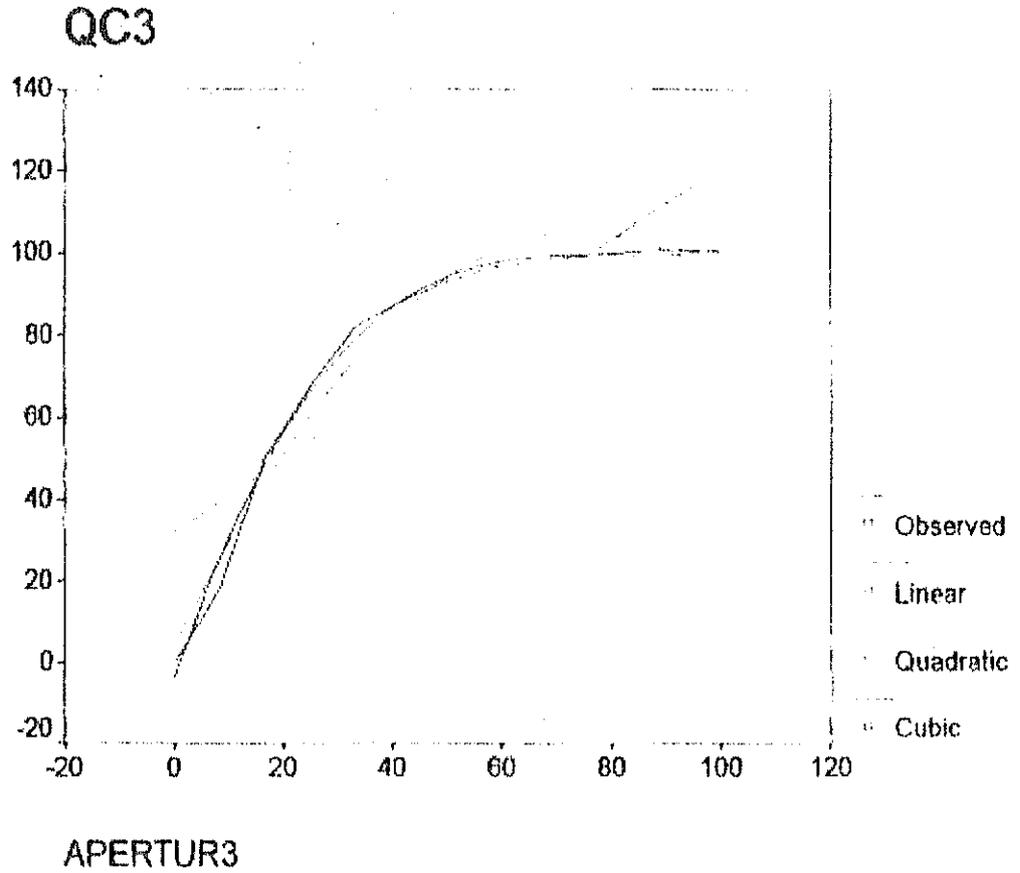
- a) Explicar la función de la válvula de control en un sistema de control.
- b) Resumir con sus palabras la descripción de la operación de la válvula de control (presión de aire para cerrar).
- c) Determine la ganancia del vástago de la válvula (calibrada).
- d) Determine la ganancia de la válvula de control (calibrada).
- e) ¿ Qué sucede con la salida del flujo de agua a través de la válvula cuando movemos la tuerca de ajuste del rango del actuador en dirección y en contra del movimiento de las manecillas del reloj cuando la entrada en presión de aire sobre el diafragma del actuador es de 15 psi ?
- f) ¿ Qué tipo de válvula es la que posee nuestro sistema de control, es decir qué característica de flujo y por qué ?

- g) Cuál es el  $C_v$  aproximado de la válvula para la temperatura ambiente en el rango de 3 a 15 psig de presión de entrada de aire sobre el actuador, para las condiciones de plena carga de la bomba.

## 6. Análisis de Resultados



- Se observa el comportamiento linealmente proporcional del recorrido del obturador con la entrada de presión de aire, que se manifiesta aún en descalibración del cero.
- En el gráfico: **% de recorrido del obturador frente a la entrada de presión de aire en psi**, la sensibilidad del vástago en calibración es igual a 8,33 %/psi.
- Las curvas obtenidas a partir del gráfico: **% de caudal frente a % de cierre del obturador de la válvula**, no tienen variación lineal, por lo tanto su ganancia no es un solo valor y esta depende del punto de trabajo.
- La válvula que representa el elemento final del circuito de control de temperatura, tiene una variación aproximadamente polinomial cúbica, del % de caudal con respecto al % de cierre



Graf. 6.4.3 APROXIMACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL QC, A TRAVES DE LA VÁLVULA DE CONTROL, CON LA APERTURA DEL VASTAGO DE LA MISMA

del obturador, obtenida a partir del ajuste de curvas comparada con la curva real obtenida. La aproximación cúbica obtenida a través de un programa de computadora nos presenta la siguiente ecuación respecto de la curva observada:

$$Q_c (\%) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3, \text{ de donde,}$$

$Q_c (\%)$ , es el valor del caudal de salida desde la válvula, en porcentaje, con referencia al caudal máximo.

$X$ , es el valor de la apertura de la válvula, en porcentaje, con referencia a la apertura máxima equivalente a 3 psi de entrada de presión.

$$a_0 = -3,4985$$

$$a_1 = 3,8824$$

$$a_2 = -0,0487$$

$$a_3 = 0,0002$$

De acuerdo a la curva ajustada y a la curva real obtenida, nuestra válvula de control es de las del tipo de apertura rápida, por esta razón la ganancia de la válvula variará con respecto al % de apertura o cierre del obturador, es decir a su punto de trabajo. El cálculo de la ganancia será la derivada

de la función polinomial anterior con respecto a  $X$ , evaluada en el punto de trabajo.

- Observar las recomendaciones sobre el uso de peligro, advertencia y nota para la válvula de control de flujo.
- Evitar el uso continuo del switch de la válvula solenoide para generar una falla en la señal de presión de aire que sale desde el controlador hacia la válvula de control a fin de evitar el desgaste considerable del asiento de la misma.
- Asegurarse que las conexiones neumáticas estén bien realizadas. Evitar las fugas de aire y los errores de transmisión de señal.



GRAFICO : CARRERA ( X ) VS. PRESION ( P )

PRESION ( P ) [ PSI ]	CARRERA ( X ) [ % ] CIERRE	
	CALIBRADA	ERROR
3	0	10
6	25	35
9	50	60
12	75	85
15	100	110
20	100	110

Tabla 6.4.1 Resultados de la prueba para calibración de la indicación del recorrido del vástago de la válvula de control

X	Y.
INPUT	OUTPUT.
PRESION (P)	CARRERA (X)
[PSI]	[%] CIERRE
	-CALIBRADA
	-ERROR
3	0
6	25
9	50
12	75
15	100
20	100

PRUEBA PARA CALIBRACION DE LA VALVULA NEUMATICA (FCV1)  
 REGULA FLUJO PARA CONTROL DE TEMPERATURA  
 CALIBRACION DE LA INDICACION DEL RECORRIDO DEL VASTAGO

Gráfico: Señal de Salida (%) vs. Señal de Entrada (psi)

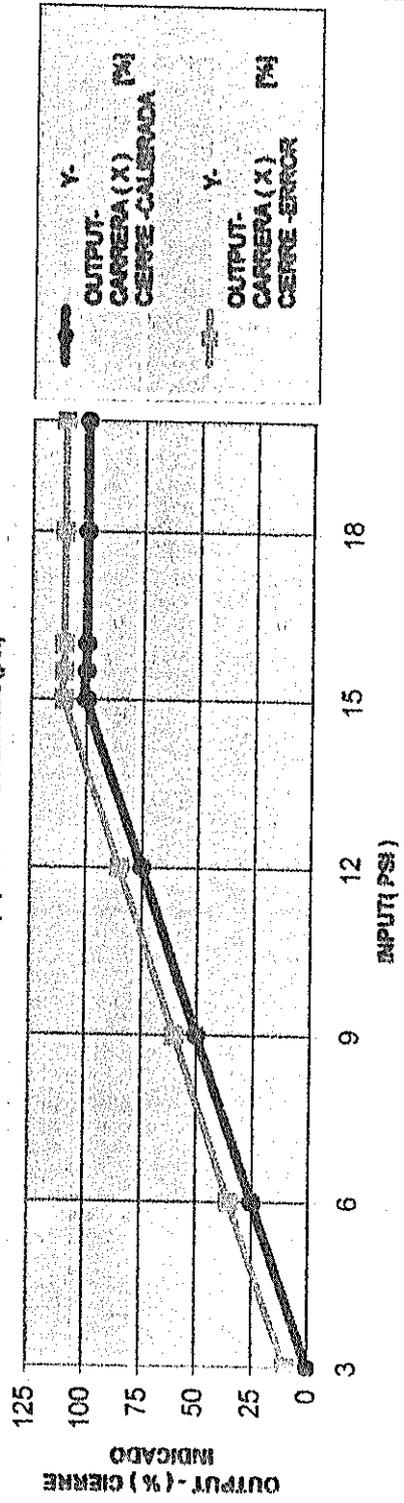


Gráfico 6.4.1 Calibración de la indicación del recorrido del vástago de la válvula de control FCV1

**GRAFICO: CAUDAL DE AGUA ( Qc ) VS. CARRERA ( X )**

CAUDAL DE AGUA Qc				CARRERA O POSICION DEL VASTAGO X	
CALIBRADA		ERROR1	ERROR2	X	
[ cm <sup>3</sup> /seg ]	[ % ]	[ % ]	[ % ]	[ psi ]	[ % ] APERTURA
377.833	100.00	100.00	100.00	3	100.00
381.582	100.99	100.88	99.71	4	91.67
378.664	100.22	100.20	99.71	5	83.33
375.416	99.36	99.30	99.91	6	75.00
370.475	98.05	97.80	99.14	7	66.67
364.594	96.50	97.00	99.03	8	58.33
351.704	93.08	95.00	97.84	9	50.00
333.377	88.23	92.90	96.27	10	41.67
311.429	82.43	88.19	93.90	11	33.33
255.829	67.71	77.30	89.12	12	25.00
189.468	50.15	62.41	81.98	13	16.67
69.114	18.29	33.08	66.24	14	8.33
0.000	0.00	12.60	47.63	15	0.00

**Tabla 6.4.2 Resultados de la prueba para calibración del flujo de salida con la posición del vástago de la válvula de control**

X		Y			
INPUT		OUTPUT			
CARRERA O POSICION DEL VASTAGO		CAUDAL DE AGUA			
X		Qc			
X		CALIBRADA		ERROR1	ERROR2
[psi]	[%]apertura	[cm <sup>3</sup> /seg]	[%]	[%]	[%]
3	100.00	377.833	100.00	100.00	100.00
4	91.67	381.582	100.99	100.68	99.71
5	83.33	378.664	100.22	100.20	99.71
6	75.00	375.416	99.36	99.30	99.91
7	66.67	370.475	98.05	97.80	99.14
8	58.33	364.594	96.50	97.00	99.03
9	50.00	351.704	93.08	95.00	97.84
10	41.67	333.377	88.23	92.90	98.27
11	33.33	311.429	82.43	88.18	93.80
12	25.00	255.829	67.71	77.30	89.12
13	16.67	189.468	50.15	62.41	81.98
14	8.33	69.114	18.29	33.08	68.24
15	0.00	0.000	0.00	12.80	47.83



**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LA VALVULA NEUMATICA (FCV1)**  
**REGULA FLUJO-CONTROL DE TEMPERATURA**  
**CALIBRACION DEL FLUJO DE SALIDA CON LA POSICION DEL VASTAGO**  
 Gráfico: Señal de Salida cronometrada (%) vs. Señal de Entrada indicada(%psi)

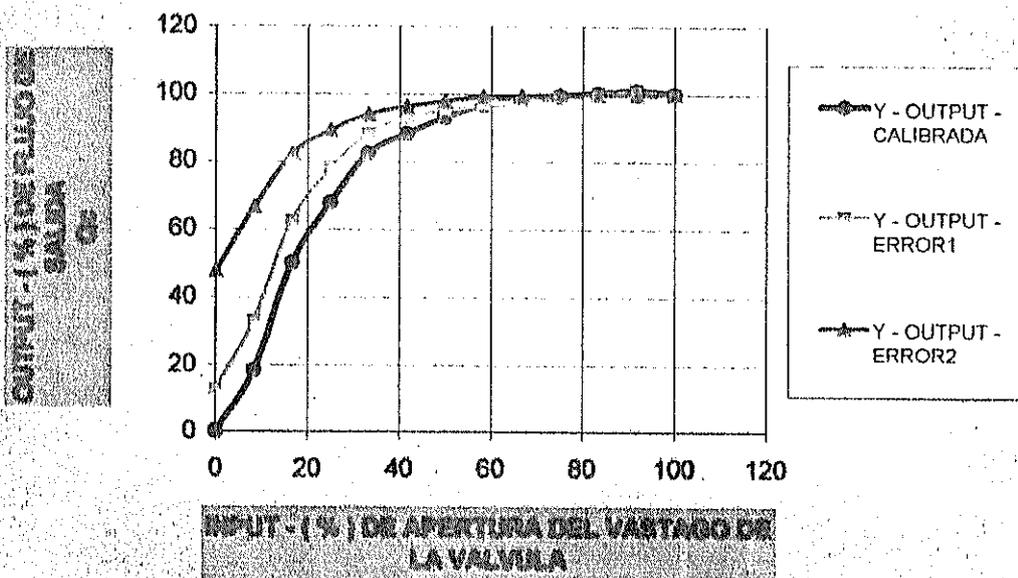


Gráfico 6.4.2 Calibración del flujo de salida con la posición del vástago de la válvula de control FCV1

## 6.5 Prueba para calibración de los convertidores

### 1. Objetivos

- a) Observar y conocer el funcionamiento de los transductores:
  - Convertidor de señal de entrada de corriente directa a salida de presión de aire de la marca Taylor.
  - Convertidores de señal de entrada de presión de aire a salida de corriente directa de la marca Taylor.
- b) Provocar una descalibración, efectuar su respectiva corrección y determinar el error del instrumento.

### 2. Teoría

- a) Descripción de operación.
- b) Procedimiento de calibración:
  - Seguir los pasos de la página 10 del instructivo correspondiente para la calibración de un convertidor de corriente directa ( d.c. ) a presión de aire.

- Seguir los pasos de la página 10 y 11 del instructivo correspondiente para la calibración de un convertidor de presión de aire a corriente directa (d. c).
- c) Para los ajustes mayores y mantenimiento (seguir las especificaciones del instructivo correspondiente).

### 3. Equipos

- a) 1 Convertidor de señal de entrada de corriente a señal de salida de presión de aire, I/P1, con las siguientes características:

Marca : Taylor.

Acción : proporcionalmente directa.

Rango : 4 - 20 m A  $\longrightarrow$  3 - 15 psi

Suministro neumático de potencia : 20 psi

- b) 2 convertidores de señal de entrada de presión de aire a señal de salida de corriente directa, P/I1 y P/I2, con las siguientes características:

Marca : Taylor

Acción : proporcionalmente directa

Rango : 3 - 15 psi  $\longrightarrow$  4 -20 m A

Suministro de potencia eléctrica : 117 V y 50 Hz

- c) 1 Regulador de presión para el suministro de aire hacia el convertidor de corriente directa a presión de aire, Reg. 1 ó Reg. 2, con las siguientes características:

Marca : Taylor

Entrada máxima : 21 Kg/ cm<sup>2</sup> (299 psi)

Rango máximo de Salida : 0 - 30 psi

- d) 1 Manómetro para constatar la presión de suministro de aire (suministro de potencia neumática). La selección de este último no es muy rigurosa respecto a su resolución y precisión pero si se requiere que esté dentro del rango de 0 - 30 psi.

- e) 1 Manómetro para obtener la indicación a la salida del convertidor de corriente directa a presión de aire. Sugerencia: De entre los 2 manómetros disponibles, seleccionamos el de mayor resolución.

Marca : Ashcroft (Duragauge) hecho en U.S.A.

Acción : Directa

Resolución : 0.1 psi subd.

Rango : 0 - 30 psi.

- f) 1 Regulador de presión de aire para simular la señal de entrada de aire a los convertidores de señal de entrada de presión de aire a señal de salida de corriente directa.

Marca : Taylor  
Entrada máxima : 21 Kg/cm<sup>2</sup>  
Rango máximo de salida : 0-30 psi

- g) 1 Manómetro para obtener la indicación de la regulación de la señal de entrada de aire hacia los convertidores [de señal de entrada de presión de aire a señal de salida de corriente directa (d.c.)]. Sugerencia: De entre los 2 manómetros disponibles, seleccionamos el de menor resolución.

Marca : Ashcroft ( Duragauge ) hecho en U.S.A.  
Acción : directa.  
Resolución : 0.2 psi subd.  
Rango : 0 - 30 psi

- h) 1 Potenciómetro para regular el suministro de corriente alterna, según lo especificado por el fabricante, de 117 V. y 50 Hz., hacia los convertidores de presión de aire a corriente directa.

- i) 1 Multímetro digital para obtener la señal de salida de corriente directa desde los convertidores de presión de aire a corriente directa.

Nota: Se utilizará un multímetro de resolución, hasta 0.01 mA.

Sugerencia : Se verificará el suministro de corriente alterna que entrega el potenciómetro con el multímetro digital, seleccionando la respectiva y correcta escala del voltaje.

- j) Cable para conexión electrónica de 4 - 20 mA d.c.
- k) Cable para conexión eléctrica de suministros de potencia 117V, 50 Hz ( a.c).

En lo posible utilizar terminales conocidos como " lagartos ", en buen estado, como elementos sensores del multímetro para obtener la mejor medición de corrientes y voltajes.

- l) Cañerías de cobre de diámetro  $\frac{1}{4}$  " O.D., ó mangueras equivalentes con sus respectivos accesorios: conectores " T ", válvulas, reducciones, tuercas, sellos, para las respectivas conexiones neumáticas.

- m) 1 Juego de destornilladores plano y de estrella para mantenimiento y calibración.
- n) 1 Juego de destornilladores planos pequeños para equipo electrónico, para calibración y mantenimiento.
- o) 1 Juego de llaves de boca, en especial de 13 y 14 mm., para sujeción de los instrumentos e instalación de las cañerías de aire.
- p) Material de limpieza que incluye el spray de limpieza para equipos electrónicos.
- q) Materiales y herramientas para instalación eléctrica y electrónica.

#### 4. Procedimiento

Antes de realizar las pruebas de calibración, se puede desmontar las piezas del instrumento y realizar una limpieza prolija a cada una de ellas y colocarlas con cuidado tal como se encontraban al empezar el desmontaje. O simplemente limpiar los mecanismos y conexiones con el spray de equipo electrónico.

La instalación para prueba de ajuste y calibración se la puede realizar como muestran las figs. 6.5.1a o 6.5.1b. Se observa que podemos reemplazar los manómetros y los reguladores de presión de aire por un regulador de mayor: resolución (1/20 psi), precisión y exactitud.

- a) Revisar la señal de salida del convertidor corriente directa a presión de aire que se obtiene en el manómetro de resolución 0.1 psi al simularse una señal de entrada, en cualquiera de los dos convertidores de presión de aire a corriente directa.

Sugerencia: Podemos seleccionar la **opción1** primero, abriendo la válvula neumática correspondiente y cerrando la válvula neumática correspondiente a la **opción 2**.

El **regulador 1**, nos permitirá simular valores de señal de entrada de 3, 6, 9, 12 y 15 psi que serán leídos en el manómetro de resolución 0.2 psi; el convertidor seleccionado entregará su señal de salida en mA. al convertidor de corriente directa a presión de aire, y este a su vez entregará una señal de salida correspondiente hacia el manómetro de resolución 0.1 psi. Las lecturas obtenidas en este último,

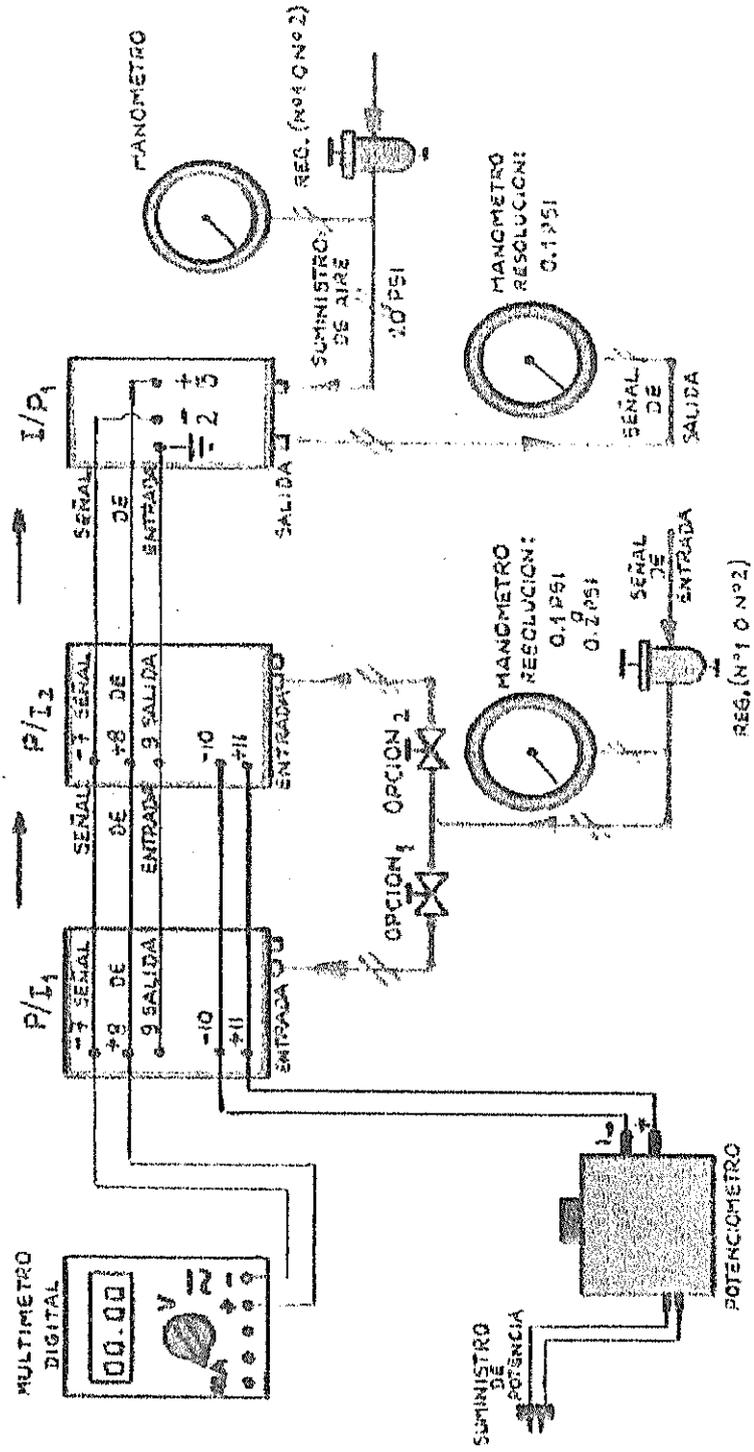


Fig. 6. 5. 1a INSTALACIÓN PARA PRUEBA Y CALIBRACIÓN EN LOS CONVERTIDORES



ESPOL  
1958  
ESCUELA SUPERIOR  
POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZAVALLA"  
M.A.C.P.

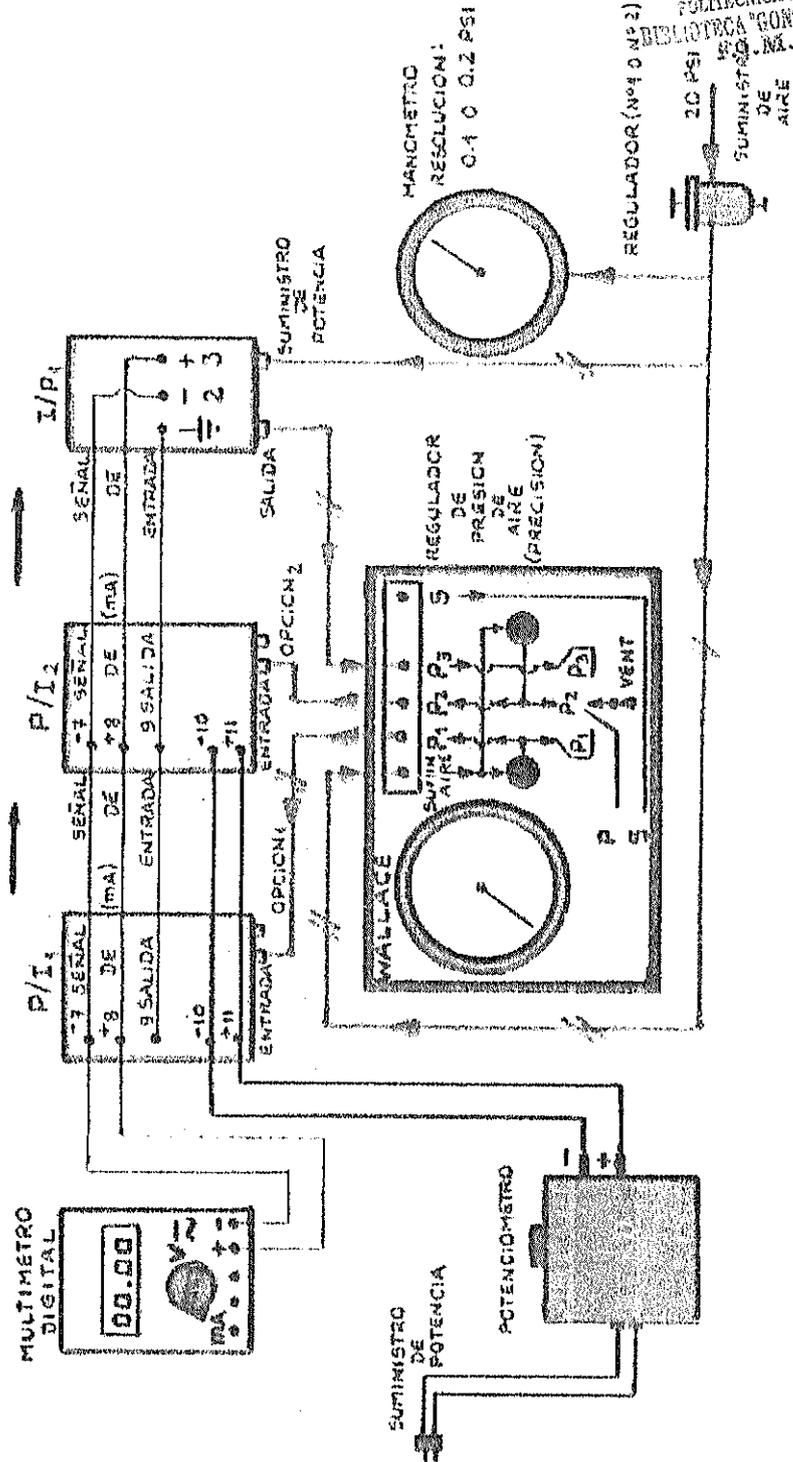


Fig. 6. 5. 1b INSTALACIÓN PARA PRUEBA Y CALIBRACIÓN EN LOS CONVERTIDORES



Fig. 6. 5. 1c AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE LOS CONVERTIDORES UTILIZANDO EL REGULADOR WALLACE

serán las linealmente proporcionales y correspondientes a los valores de entrada de: 3, 6, 9, 12 y 15 psi respectivamente.

- b) Paralelamente, se puede revisar y comparar los valores de la señal de salida en los convertidores de presión de aire a corriente con el multímetro digital. Los valores obtenidos en el multímetro a partir de la simulación deberán ser: 4, 8, 12, 16 y 20 mA.

La escala escogida es en mA de corriente directa, de 0 - 100 con una resolución de 0.01 mA. Podemos colocar los cables sensores del multímetro digital en los puntos donde se mide la señal de salida de cualquiera de los convertidores de presión de aire a corriente directa, (uno a la vez, de acuerdo a la opción) o en los puntos donde llega la señal de entrada en el convertidor de corriente directa a presión de aire, tal como lo muestra la fig. 6.5.2.

- c) Una vez tabulados los valores de entrada y salida, graficarlos. Reconocer el tipo de error.



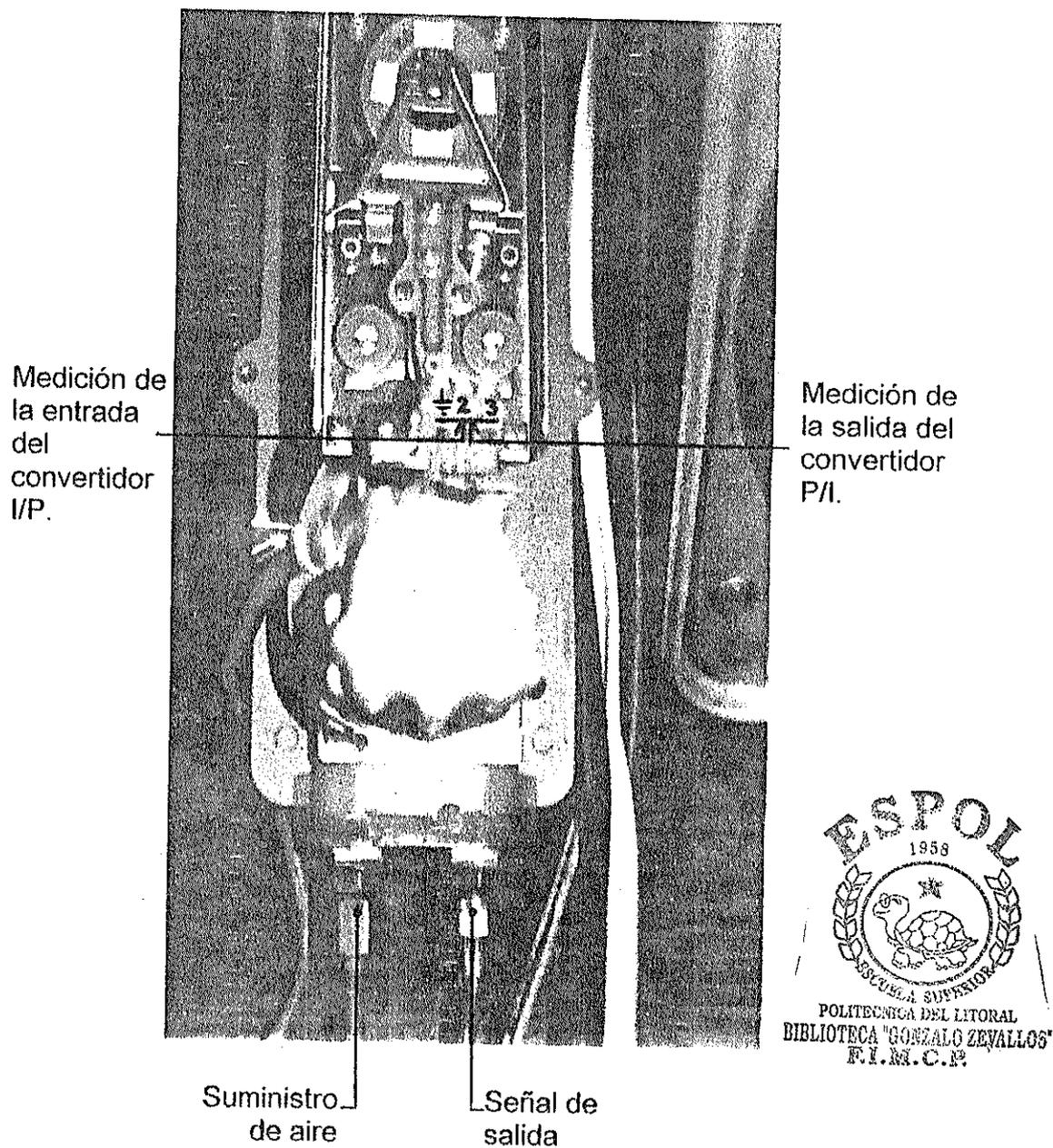


Fig. 6. 5. 2a TOMA DE LA SEÑAL DE SALIDA DEL CONVERTIDOR P/I EN LA ENTRADA DE SEÑAL DEL CONVERTIDOR I/P

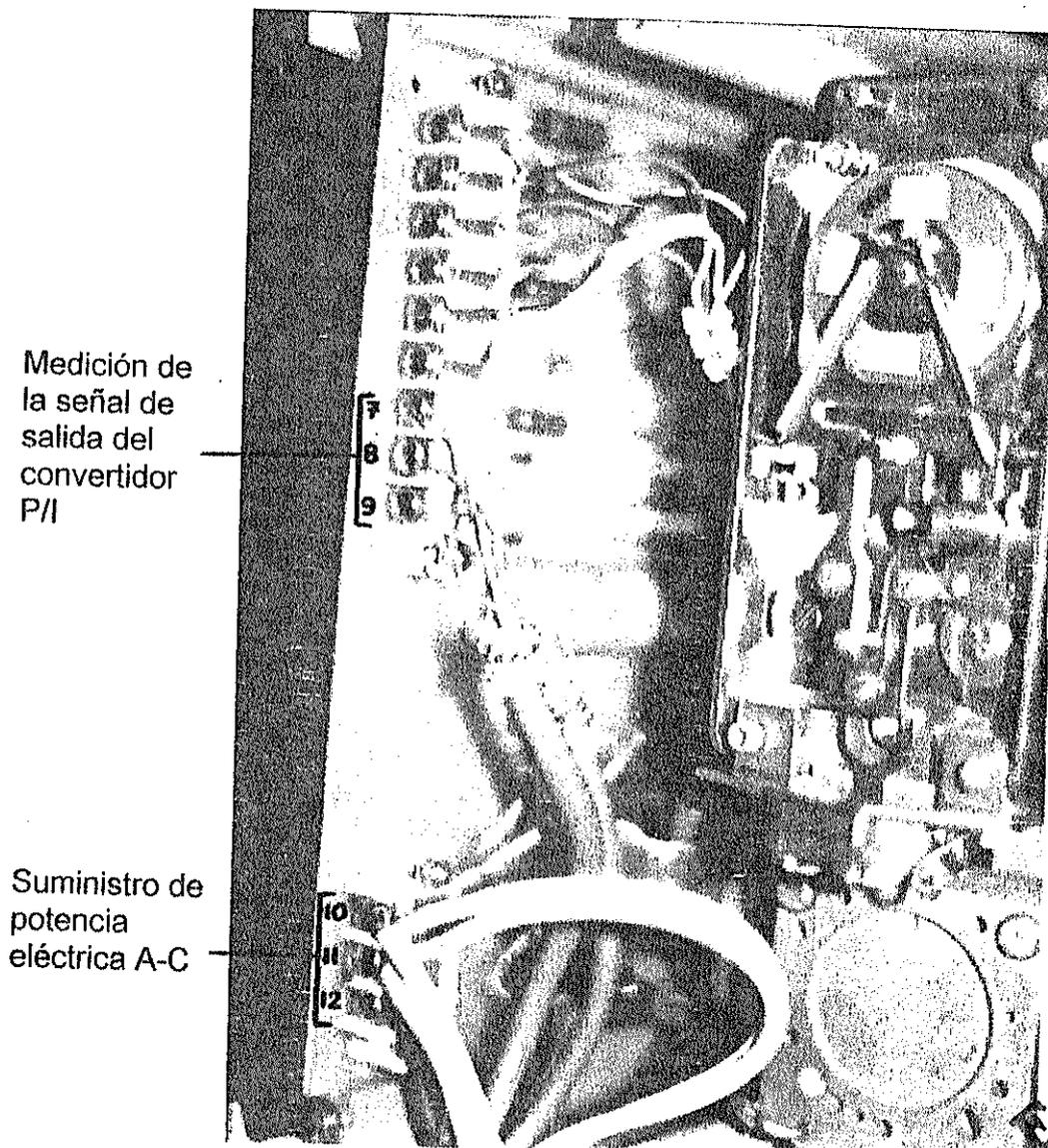


Fig. 6. 5. 2b TOMA DE LA SEÑAL DE SALIDA DEL CONVERTIDOR P/I EN LA SALIDA DE SEÑAL DEL CONVERTIDOR P/I.

- d) Detectado el error en el instrumento proceder a la calibración en el orden mostrado en la fig. 6.5.1, de izquierda a derecha. Seguir el procedimiento correspondiente especificado para cada instrumento.

Si el convertidor corriente a presión está descalibrado, la señal de salida indicada en el manómetro de resolución 0,1 psi será equivocada, por esta razón se debe comparar la señal de entrada del instrumento en error con el multímetro y verificar la relación directamente proporcional. Se debe seguir ese orden de calibración ya que necesitamos la señal de entrada correcta de corriente directa desde los convertidores de presión a corriente hacia el convertidor de corriente a presión para estar seguros de una corrección verdadera en este último, además que los mismos convertidores de presión a corriente son una fuente de corriente directa en mA.

- e) Tabular valores obtenidos después de la calibración.
- f) Graficar los valores.

- g) Si los instrumentos se presentan calibrados, generar una descalibración en cualquiera de los ajustes de cero o span, o en cero y span y repetir los pasos desde el literal a).
- h) Determinar la Hystéresis de cualquiera de los convertidores.

### TABLA DE DATOS

Como primera aproximación consideramos al convertidor I/P1 calibrado y por esta razón confiamos las salidas de los convertidores P/I1 y P/I2 al convertidor I/P1 observadas en un medidor de presiones de aire.

- Nota:**
- 1) Para aplicar la tabla 6.5.1, a continuación, debemos estar seguros que el convertidor I/P1 está calibrado.
  - 2) Probando solamente con presión de suministro en el convertidor I/P1 y desconectando la entrada de corriente directa, se obtuvo 0.6 psi en la indicación del manómetro de resolución 0.1 psi.

**Precaución :** Revisar periódicamente la salida del potenciómetro, ~ 117 V con el multímetro digital en la escala de voltios y corriente alterna.

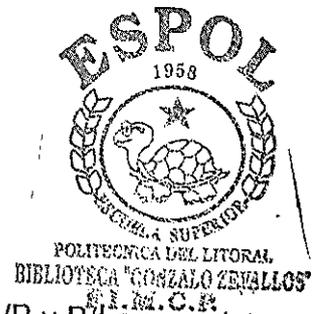
De los resultados obtenidos P/I1 y P/I2 los consideramos descalibrados. Ajustando el cero se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 6.5.1.

Como la posibilidad de que el convertidor I/P1 esté calibrado es remota, la medición de la salida de los convertidores P/I1 y P/I2 se debe hacer con el multímetro digital.

Al calibrar el convertidor I/P1, se regula la presión de aire a la entrada de los convertidores P/I1 o P/I2 de 3 a 15 psi, se obtiene corriente de unos de ellos y se lleva a la entrada del I/P1, se lleva la presión de aire hacia el regulador de precisión donde será leída la salida o simplemente en el manómetro de 0.1 psi de resolución.

## 5. Preguntas

- a) Explicar la función de un convertidor I/P y P/I en un sistema de control.
- b) Con la ayuda de un esquema explicar la descripción de operación de cualquiera de los dos tipos de convertidores en cuestión.



- c) Mediante un dibujo de la instalación, explique cómo calibraría un sistema de tres convertidores P/I y un convertidor I/P (todos descalibrados), sino se dispone de una fuente de corriente directa.
- d) De acuerdo a los datos tabulados durante la calibración, ¿qué sucede con el Span cuando se mueve la plaquita hacia el pivote de la palanca de fuerza y cuando se lleva la plaquita hacia el claro en los dos tipos de convertidores?
- e) Con un gráfico explique el movimiento de los tornillos del Span para cerrar o reducir el mismo.

## 6. Análisis de Resultados

- Se comprueba nuevamente, la aparición de los distintos errores durante el proceso iterativo de calibración, lo cual es observado en los gráficos.
- Finalmente, se comprobó la relación proporcionalmente directa de los transductores, entre la señal de salida y la señal de entrada en cualquiera de las dos naturalezas: electrónica y neumática o neumática y electrónica.

- Se obtuvo un valor de 0.75 psi/mA para la sensibilidad resultante en un convertidor I/P.
- Se obtuvo un valor de 1.333 mA/psi para la sensibilidad resultante en un convertidor P/I.
- Cuando se está efectuando la calibración o antes no está demás echar spray limpiador de contactos sobre los mecanismos y conexiones electrónicas.
- Utilizar un multímetro digital de preferencia con resolución de hasta una centésima de la unidad que se está midiendo.
- Revisar periódicamente la diferencia de potencial en la salida del potenciómetro (Asegurarse que este sea  $\sim 117$  V de acuerdo a la especificación del fabricante para el suministro de potencia de los instrumentos en referencia).
- Seguir las especificaciones para el procedimiento de calibración.
- Realizar correctamente las instalaciones eléctricas y electrónicas según lo que sugiere el instructivo o las figuras correspondientes a esta prueba.
- Fijar bien los instrumentos para una correcta calibración.

- No olvidar que las pruebas de calibración o eliminación de errores, requieren de mucha paciencia.

INPUT (ENTRADA)	OUTPUT ( SALIDA )		
OPCION 1	P/I1		
PRESION ( P ) ( PSI )	ERROR  ( mA )	ERROR INTERMEDIO  ( mA )	RESULTADO FINAL  ( mA )
3	4.03	6.05	4.00
6	10.04	12.04	8.01
9	13.04	17.05	12.01
12	15.03	19.04	16.02
15	16.02	20.01	20.01

Tabla 6.5.1 Resultados de la prueba para calibración del convertidor P/I1

INPUT (ENTRADA)	OUTPUT ( SALIDA )		
OPCION 2	P/I2		
PRESION ( P ) ( PSI )	ERROR  ( mA )	ERROR INTERMEDIO  ( mA )	RESULTADO FINAL  ( mA )
3	4.08	5.10	4.00
6	10.10	8.75	8.01
9	13.09	12.34	12.00
12	15.10	16.08	16.01
15	16.09	19.77	20.00

Tabla 6.5.2 Resultados de la prueba para calibración del convertidor P/I2

X		Y- (OUTPUT) P/I 1	
OPCION 1		ERROR INTERMEDIO	RESULTADO FINAL-
INPUT (PSI)		(mA)	(mA)
3	4,03	6,05	4,00
6	10,04	12,04	8,01
9	13,04	17,05	12,01
12	15,03	19,04	16,02
15	16,02	20,01	20,01

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS CONVERTIDORES**

VALORES INICIALES, INTERMEDIOS Y FINALES OBTENIDOS  
**CALIBRACION DEL CONVERTIDOR P/I1 (OPCION 1)**

Gráfico: Señal de salida (mA) vs. Señal de entrada (PSi)

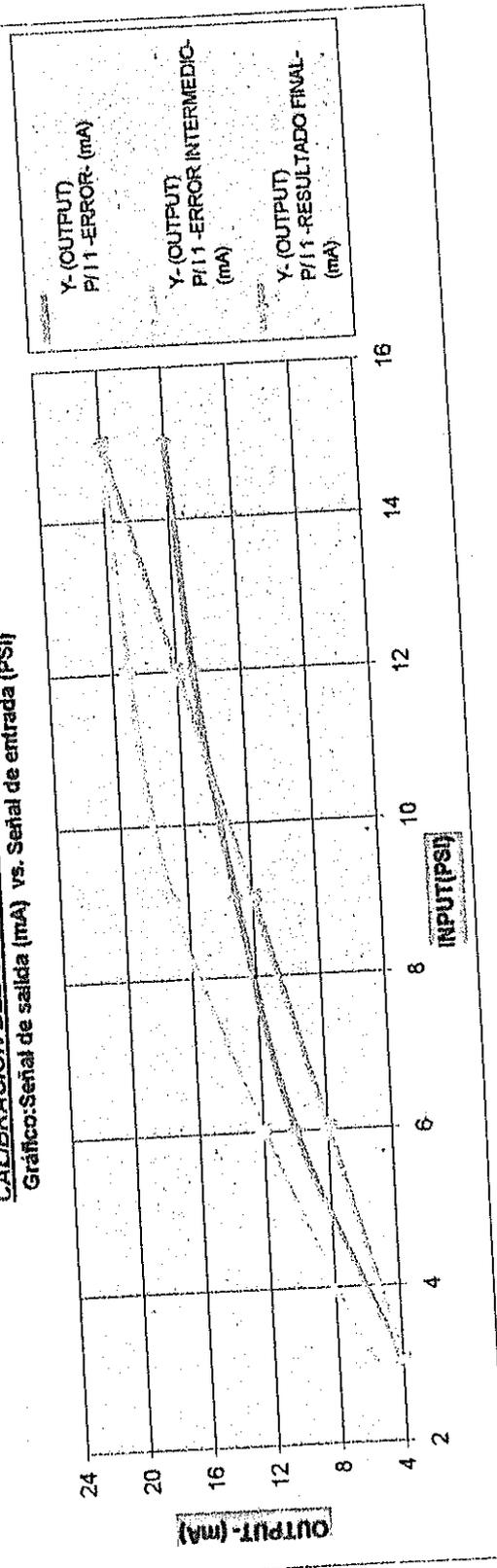


Gráfico 6.5.1 Calibración del convertidor P/I1

X		Y- (OUTPUT) P/I 2	
OPCION 2 INPUT	(PSI)	ERROR (mA)	RESULTADO FINAL- (mA)
3	4,98	5,10	4,00
6	10,10	8,75	8,01
9	13,69	12,34	12,00
12	15,10	16,08	16,01
15	16,09	19,77	20,00

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS CONVERTIDORES  
VALORES INICIALES, INTERMEDIOS Y FINALES OBTENIDOS  
CALIBRACION DEL CONVERTIDOR P/I2 (OPCION2)**

Gráfico: Señal de salida (mA) vs. Señal de entrada (PSI)

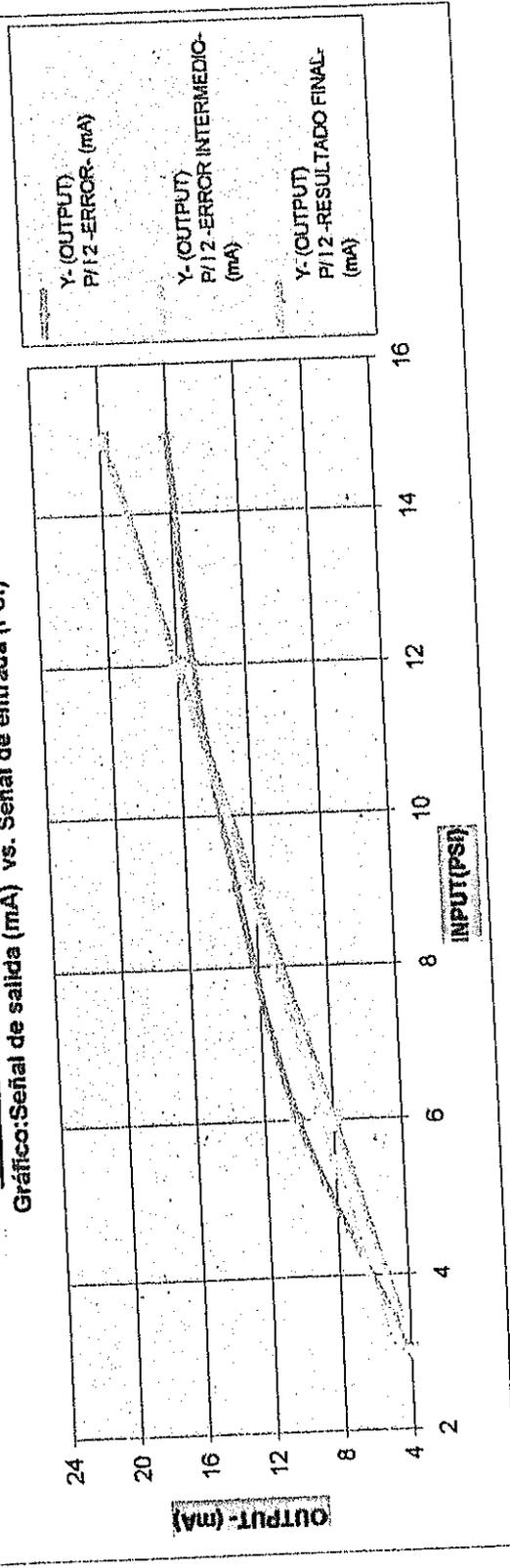


Gráfico 6.5.2 Calibración del convertidor P/I2

INPUT (ENTRADA)	OUTPUT (SALIDA)		
OPCION 1	I/P1		
CORRIENTE D.C. (I)	ERROR	ERROR INTERMEDIO	RESULTADO FINAL
(mA)	(PSI)	(PSI)	(PSI)
4.01	4.2	3.0	3.0
8.02	9.4	6.4	6.0
12.00	13.3	9.8	9.1
16.01	15.4	12.0	12.0
20.00	16.5	14.6	15.1



Tabla 6.5.3 Resultados de la prueba para calibración del convertidor I/P1

INPUT (ENTRADA) X (PSI)	OUTPUT (SALIDA) Y				
	OPCION1		OPCION2		I/P1
	ASCENSO	DESCENSO	ASCENSO	DESCENSO	
	(mA)				(mA)
3	4.00	3.99	4.00	4.00	4.00
6	8.01	8.00	8.01	7.99	8.01
9	12.01	11.99	12.00	11.99	12.10
12	16.02	16.00	16.01	16.00	16.00
15	20.01	20.00	20.00	19.99	20.10

Tabla 6.5.4 Resultados finales de la prueba para calibración de los convertidores

X		Y - (OUTPUT) I/P 1	
OPCION 1			
INPUT (mA)	ERROR/ERROR INTERMEDIO/ RESULTADO FINAL (PSI)	ERROR/ERROR INTERMEDIO/ RESULTADO FINAL (PSI)	ERROR/ERROR INTERMEDIO/ RESULTADO FINAL (PSI)
4,01	4,2	3,0	3,0
8,02	9,4	6,4	6,0
12,00	13,3	9,8	9,1
16,01	15,4	12,0	12,0
20,00	16,5	14,6	15,1
extrapolación			

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS CONVERTIDORES**  
**VALORES INICIALES, INTERMEDIOS Y FINALES OBTENIDOS**  
**CALIBRACION DEL CONVERTIDOR I/P1**

Gráfico: Señal de salida (PSI) vs. Señal de entrada (mA)

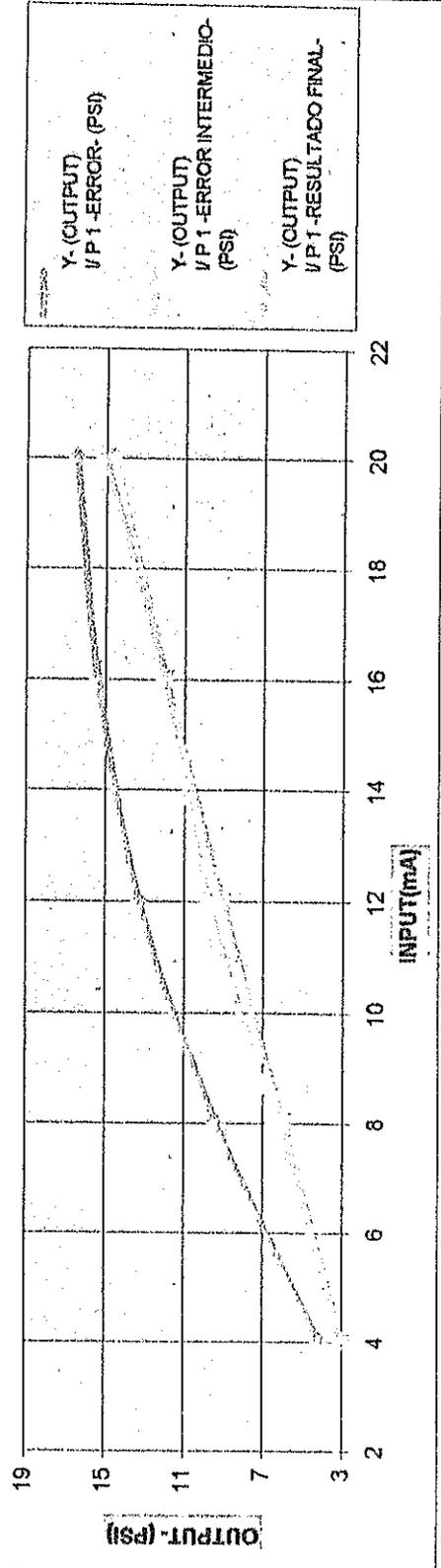


Gráfico 6.5.3 Calibración del convertidor I/P

X INPUT (PSI)	OPCION 1 ( P/I1 )		OPCION 2 ( P/I2 )		CONVERTIDOR I/P1 (PSI a mA)
	OUTPUT (mA)		-DESCENSO -ASCENSO -DESCENSO		
3	4.00	3.99	4.00	3.99	4.00
6	8.01	8.00	8.01	7.99	8.01
9	12.01	11.99	12.00	11.99	12.10
12	16.02	16.00	16.01	16.00	16.00
15	20.01	20.00	20.00	19.99	20.10

**PRUEBA PARA CALIBRACION DE LOS CONVERTIDORES**

**RESULTADOS FINALES**

Gráfico: Señal de Salida(mA,psi) vs. Señal de Entrada (psi)

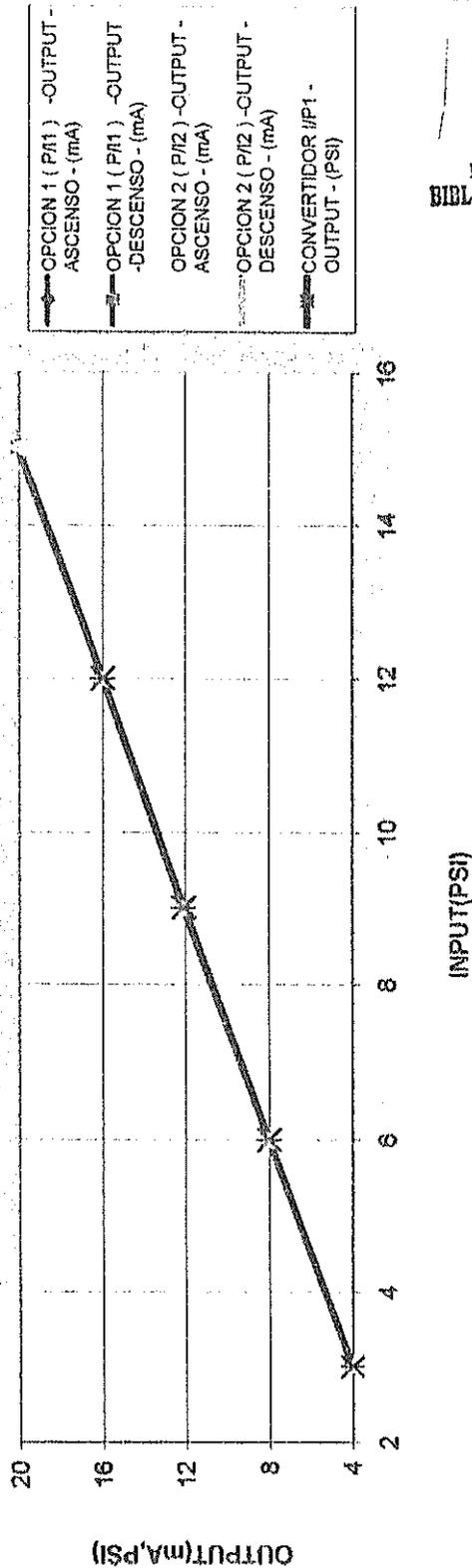


Gráfico 6.5.4 Calibración de los convertidores (Resultados finales)

## 6.6. Efecto del retardo en la respuesta del sistema de control

### 1. Objetivos

- a) Abrir el circuito de control desconectando el controlador neumático y considerar arreglando los siguientes circuitos de los procesos que se muestran en las figuras 6.6.1 y 6.6.2
- b) Sintonizar el controlador ON - OFF (termostato), para los disturbios  $T_c(t)$  en la respuesta  $T_{1/2}(t)$ , observando la respuesta de los procesos para las condiciones de retardo existentes.
- c) Comparar los resultados teóricos y experimentales, basados en los fundamentos teóricos.

### 2. Fundamentos teóricos

#### Descripción de operación

Arreglar el sistema de acuerdo a los procesos que se muestran en las figuras 6.6.1 y 6.6.2

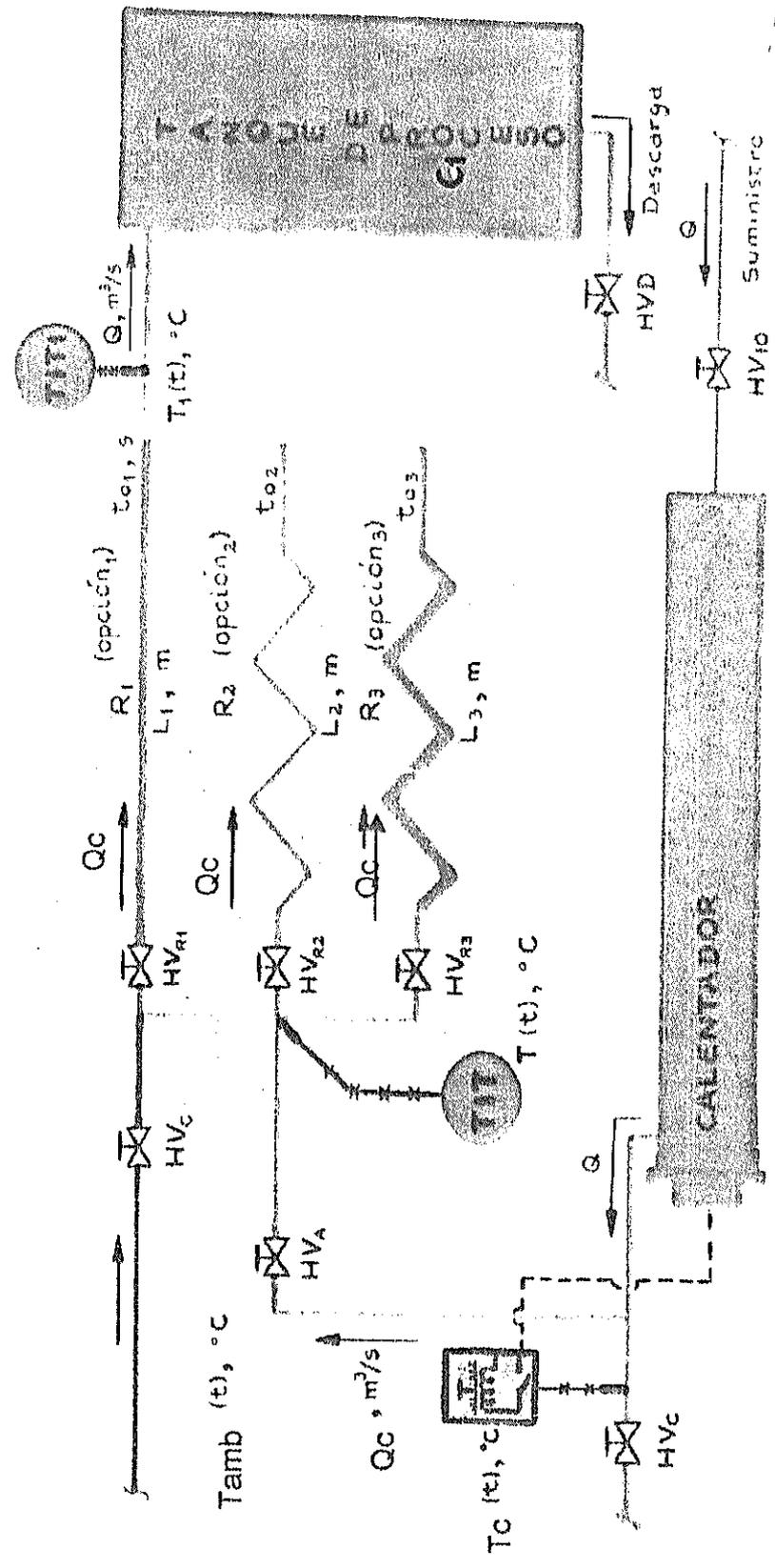


Fig. 6. 6. 1 CONDICIONES DE RETARDO A (R1, R2, R3)

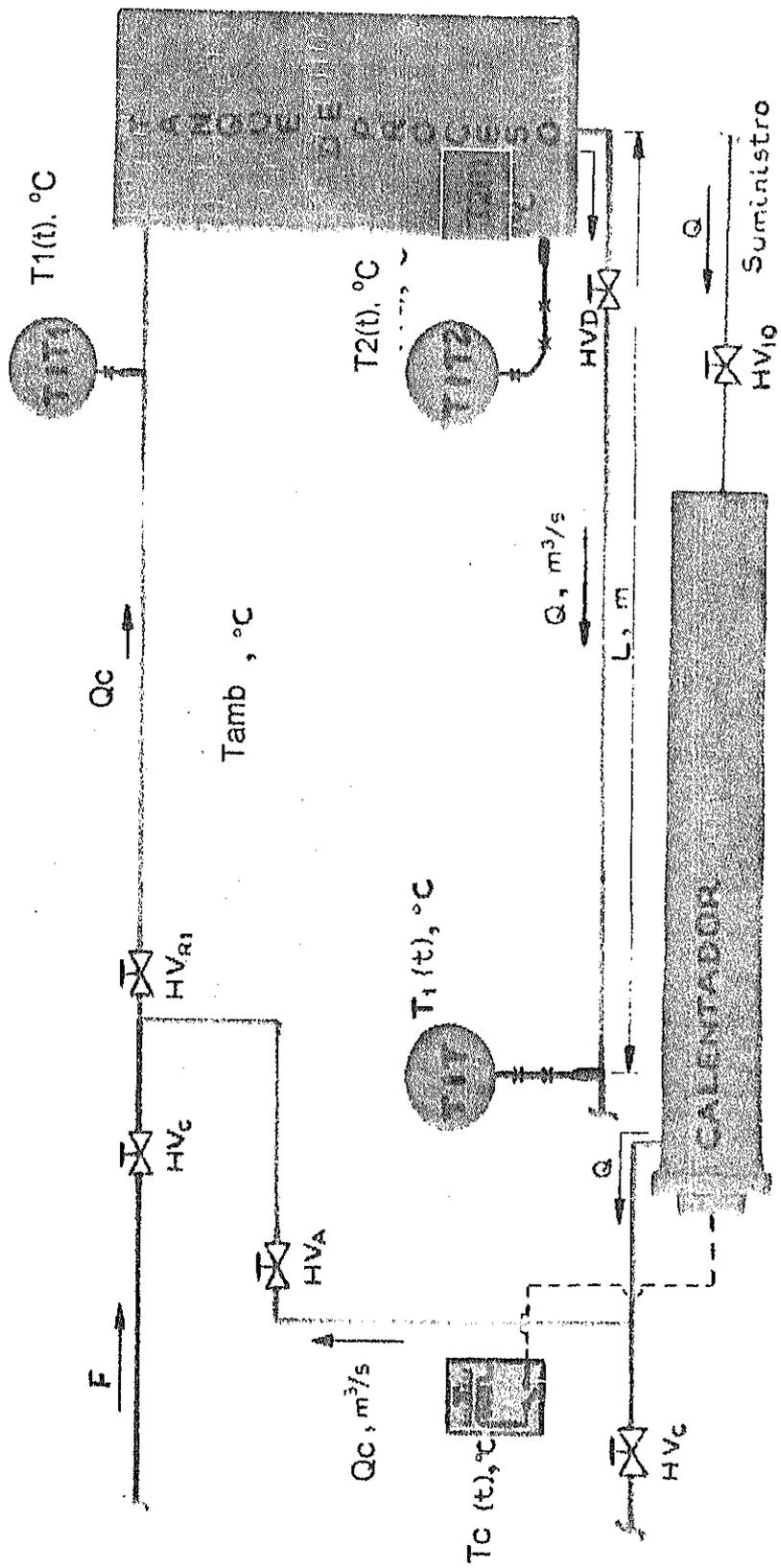


Fig. 6. 6. 2 CONDICIONES DE RETARDO B

### Tiempo muerto

Considerar los procesos de las figuras ya citadas, en los cuales estudiaremos como responde  $T_{1/2}(t)$  a los cambios en la temperatura de entrada y ambiente.

$$T_{1/2}(t) = \begin{cases} T_1(t) \text{ medido en TIT1, con sus respectivos } K_1 \text{ y } \tau_1 \\ T_2(t) \text{ medido en TIT2, con su respectivo } K_2 \text{ y } \tau_2 \end{cases}$$

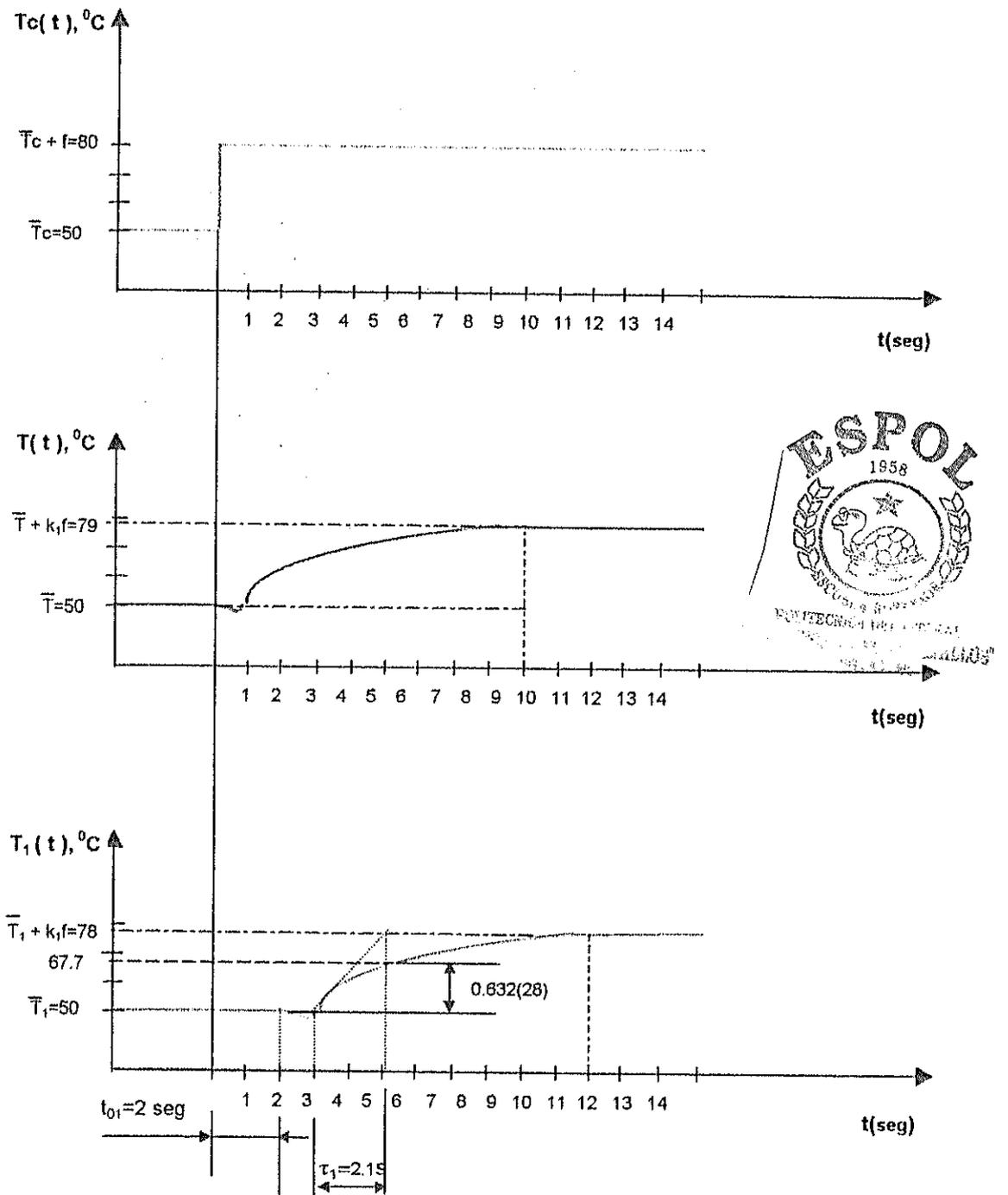
Para el efecto, haremos las siguientes suposiciones al respecto del circuito de las figuras:

- Figura 6.6.1, respuesta de  $T_1(t)$ , observada e indicada en TIT1, para estudiar el tiempo de retardo y constante de tiempo de los serpentines ante una entrada escalón  $T_c(t)$ .
- Figura 6.6.2, respuesta de  $T_2(t)$ , observada e indicada en TIT2, para estudiar el comportamiento del proceso debido al tiempo de retardo de los serpentines ante una entrada escalón  $T_c(t)$ . Observar la constante de tiempo del proceso.

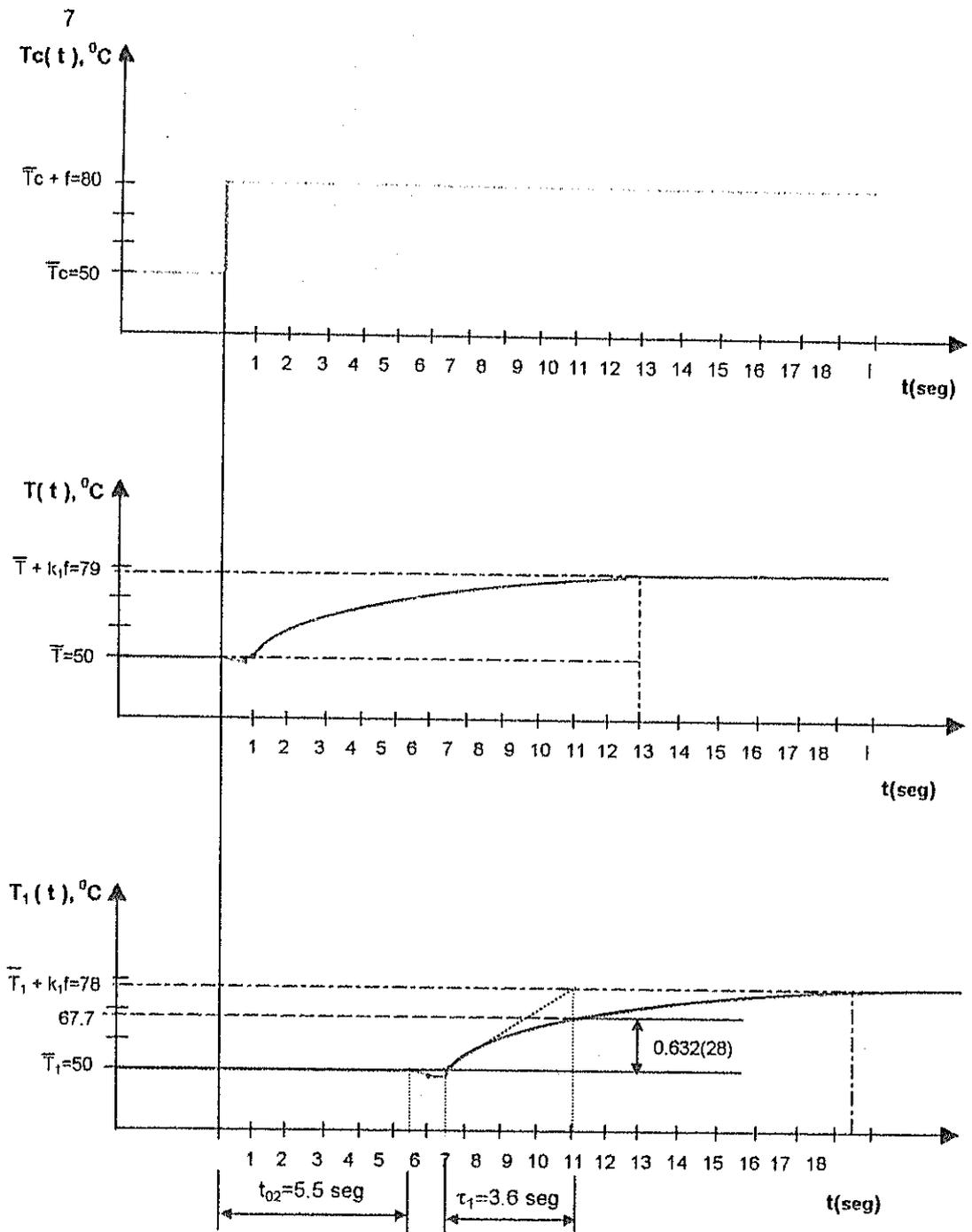
- 1) El conducto en consideración se supone aislado en primera aproximación.
- 2) El flujo a través del conducto es altamente turbulento ( Flujo de acoplamiento ), de tal manera que no hay mezcla de retorno en el líquido.

En la base de estas suposiciones planteadas, la respuesta de  $T_1(t)$  a los disturbios  $T_c(t)$  será igual que  $T(t)$ , pero que tiene un retardo de cierto intervalo de tiempo, o lo que es lo mismo, existe un lapso finito entre la respuesta de  $T(t)$  y la respuesta de  $T_1(t)$  como se muestra en el gráfico 6.6.1, al experimentarse un cambio en escalón de la temperatura de entrada  $T_c(t)$  producido en el controlador ON - OFF. El lapso de tiempo en que el disturbio entra al proceso y la temperatura  $T_1(t)$  empieza a responder se conoce como **tiempo muerto, retardo de tiempo o retardo de transporte** y se representa mediante el término  $t_0$ .

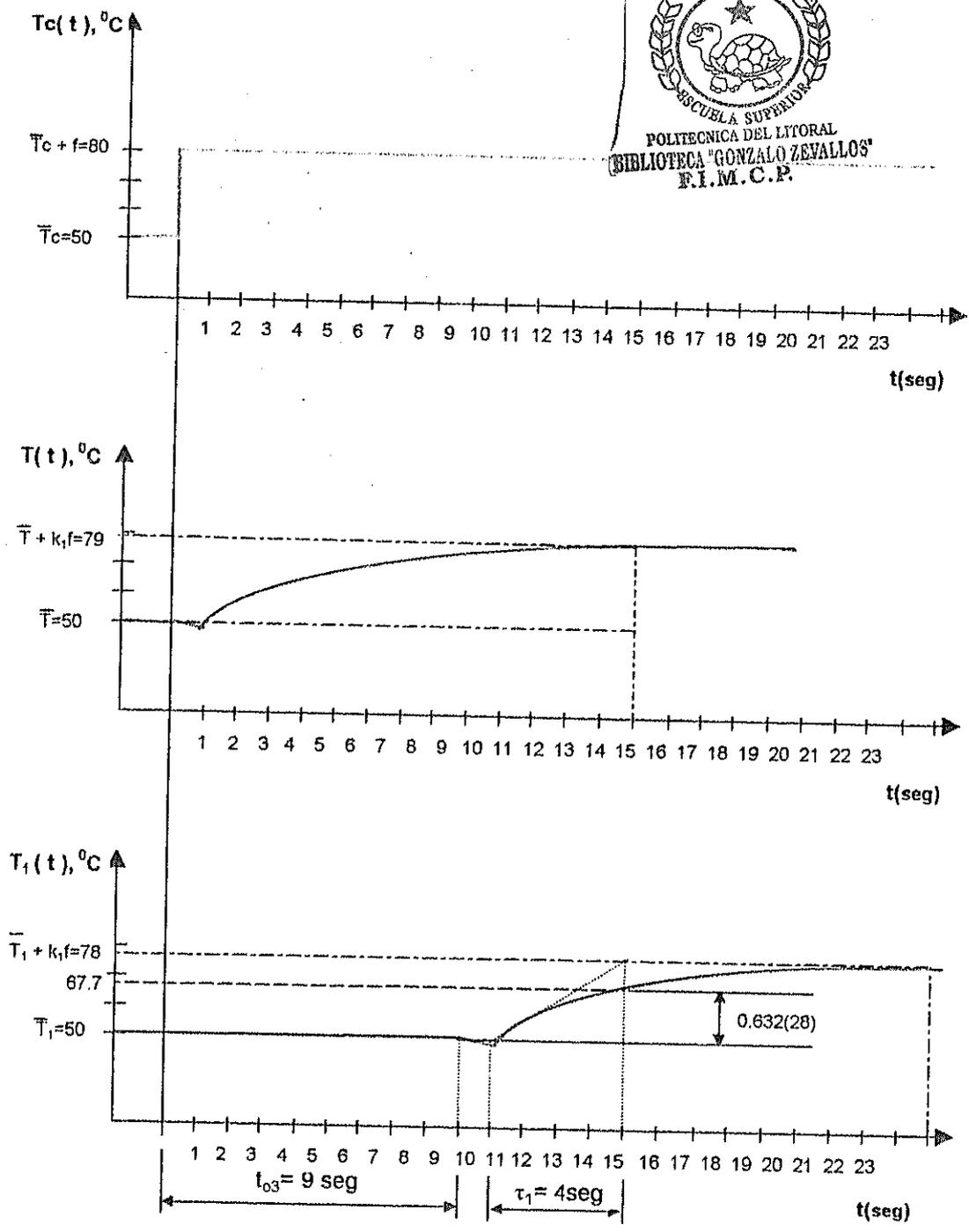
Podemos deducir como obtener el tiempo muerto para este caso particular :



Gráf. 6.6.1a Respuesta del proceso térmico  $R_1$  a un cambio escalón en la temperatura de entrada



Gráf. 6.6.1b Respuesta del proceso térmico  $R_2$  a un cambio escalón en la temperatura de entrada.



Gráf. 6.6.1c Respuesta del proceso térmico  $R_3$  a un cambio escalón en la temperatura de entrada.

$$t_0 = \text{Distancia} / \text{Velocidad} = L / [Q / At] = (At * L) / Q$$

donde :

$t_0$  = tiempo muerto, segundos.

$At$  = área transversal del conducto,  $m^2$ .

$L$  = longitud del conducto, m.

$Q$  = caudal del fluido que circula por el conducto,  $m^3/s$ .

El tiempo muerto es parte constitutiva del proceso, por consiguiente, se debe tomar en cuenta en las funciones de transferencia que relacionan  $T_{1/2}(t)$  con  $T_c(t)$  o  $T_{amb}(t)$ . De acuerdo a las formulaciones basadas en los fundamentos teóricos y matemáticos, expresan que la transformada de Laplace de una función con retardo es igual al producto de la transformada de Laplace de la función, sin retardo, por el término  $e^{-tos}$ , donde  $e^{-tos}$  es la transformada de Laplace del tiempo muerto. De aquí que la respuesta de  $T_{1/2}(t)$  a los cambios en  $T_c(t)$  y  $T_{amb}(t)$ , será :

$$T_{1/2}(s) / T_c(s) = K_{1/2} e^{-tos} / (\tau_{1/2} s + 1)$$

$$T_{1/2}(s) / T_{amb}(s) = K_{amb} e^{-tos} / (\tau_{1/2} s + 1)$$

Padé, cuando las funciones de transferencia de sistemas como el nuestro contienen al menos un término de tiempo muerto.

Al concluir, es necesario mencionar que la presencia de una cantidad considerable de tiempo muerto en un proceso, es un problema grave en un sistema de control.

### 3. Equipos

a) 1 Termostato Marca : Honeywell

Acción : ON - OFF

Rango : 100 - 240 °F

Min. Div ( Resolución ): 5 ° F

Franja : 5° F

b) 2 Transmisores indicadores neumáticos de temperatura de acción directa, TIT1 y TIT2, con las siguientes características:

Marca : Taylor

Acción : Proporcionalmente directa

Rango : 3 - 15 psi ( 0 - 100 °C )

Min. Div. (Resoluc.) : 1 ° C

- c) Un termómetro indicador de bulbo con las siguientes inscripciones :

Marca : Ness  
 N° : 20606  
 Rango : 0 - 200 °C  
 Mín. div ( Resoluc.) : 2 °C



- d) Calentador de agua de 30 Kw de potencia con 3 resistencias.
- e) Un tanque de proceso o tanque de almacenamiento de agua de mezcla.
- f) El arreglo del sistema térmico que se presenta en las figuras, 6.6.1 y 6.6.2, con sus respectivas conexiones de tuberías y válvulas.
- g) El sistema de tuberías y válvulas en consideración, que se muestran en las figuras.
- h) Termómetro indicador de la temperatura ambiente,  $T_{amb}(t)$  en °C.
- i) El apoyo complementario del sistema del lazo de control de temperatura: panel central de control, caja de breakers para energización de las resistencias, caja de pulsadores para

arrancar la bomba para agua, bomba para alimentación de agua a los sistemas térmicos.

### **Advertencias y precauciones**

- Percatarse que el termostato vaya a trabajar en un rango seguro de trabajo.
  - La franja del termostato estará en su valor mínimo.
  - Desconectar el controlador registrador neumático Temperatura (TRC) de los sistemas a estudiar y los demás instrumentos que se encuentran instalados en el lazo de control y que no participarán en este estudio.
  - Cerrar todos los posibles pasos o vías de acceso de agua fría de mezcla hacia los sistemas térmicos en estudio.
  - Asegurarse que el flujo de entrada a los sistemas sea igual al flujo de salida. La regulación se la realiza desde la válvula de alimentación ubicada a continuación de la bomba y la entrada del lazo de temperatura.
- j) Un reloj cronómetro digital para determinar el caudal de salida del agua desde los sistemas en consideración.

- k) Un flexómetro para medir longitud de tuberías en metros.
- l) Un calibrador Vernier y un manual de tuberías para determinar los diámetros internos y áreas transversales de tuberías.
- m) Un destornillador plano para fijación del set- point en el dial o perilla del controlador termostato.

#### 4. PROCEDIMIENTO

- a) Arreglar y considerar la instalación que se muestran en las figuras 6.6.1 y 6.6.2, para las condiciones de retardo A y B.
- b) Se deberán tomar las precauciones y advertencias. Poner en marcha el sistema y bloquear las vías de acceso de agua fría, cerrando las válvulas **HVc** que se muestran en las figuras citadas.
- c) Para los **sistemas térmicos**, existen 3 opciones de las cuales se determinará los 3 tiempos muertos correspondientes **to<sub>1</sub>**, **to<sub>2</sub>**, **to<sub>3</sub>**, uno a la vez, por consiguiente, eligiendo una opción sólo abriremos una sola válvula **HV<sub>R</sub>** y las demás deberán permanecer cerradas.



- d) Se medirá el flujo de entrada y salida para un cabezal de 1 cm. de drenaje del tanque de proceso, que es el flujo promedio  $Q$  de alimentación.

**Nota:** Primero llenamos el tanque de proceso unos 10 cm., apagamos la alimentación de agua y tomamos el tiempo de drenaje para 1 cm del mismo. Tomamos al menos 3 tiempos (promedio).

Sabemos que el caudal de salida o drenaje es:

$$Q = \text{Volumen} / \text{tiempo} = [\text{Area transversal del Tanque} \times \text{Cabezal}] / \text{tiempo}$$

$$Q = [\pi (\text{Diámetro del tanque})^2 / 4 \times \text{Cabezal}] / \text{tiempo}$$

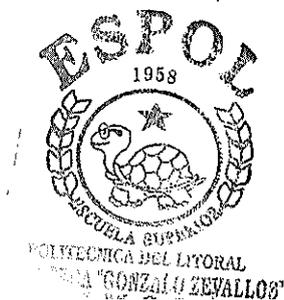
Observando el análisis dimensional:

$$Q (\text{m}^3/\text{s}) = [\text{Area transversal} (\text{m}^2) \times \text{Cabezal} (\text{m})] / [\text{tiempo} (\text{s})]$$

- e) Se regulará la alimentación de agua al caudal de drenaje, midiendo el tiempo que se demora la alimentación en llenar el cabezal de 1 cm. que deberá ser aproximadamente igual en

los dos casos. Para la medición del caudal de alimentación se cerrará la válvula manual **HVD** y se abrirá **HV<sub>10</sub>**, que es la vía de suministro de agua al sistema, desde la reserva a través de la bomba.

- f) Una vez regulado el caudal de alimentación igual al caudal de salida o drenaje, después de haber puesto en marcha el sistema, para el **sistema térmico A**, la apertura de **HV<sub>R1</sub>** ó **HV<sub>R2</sub>** ó **HV<sub>R3</sub>**, según el tiempo muerto que se desee determinar en el mismo orden **to<sub>1</sub>**, ó **to<sub>2</sub>** ó **to<sub>3</sub>** (uno a la vez), manteniendo 2 de las 3 válvulas cerradas, según sea el caso. Consecutivamente se tabularán los datos de diámetro interior, longitud de tubería, caudal, tiempo muerto y constante de tiempo para cada caso.
- g) Para el sistema térmico **B**, se fijará el nivel del agua en el tanque de proceso de 40 cm en promedio, se regulará el caudal de entrada igual al de salida aproximadamente de 8 lit/min, y se abrirán o cerrarán las válvulas manuales correspondientes **HV**, de manera que la alimentación al tanque de proceso sea a través de un solo serpentín a la vez y la evacuación del agua desde el tanque de proceso sea a la

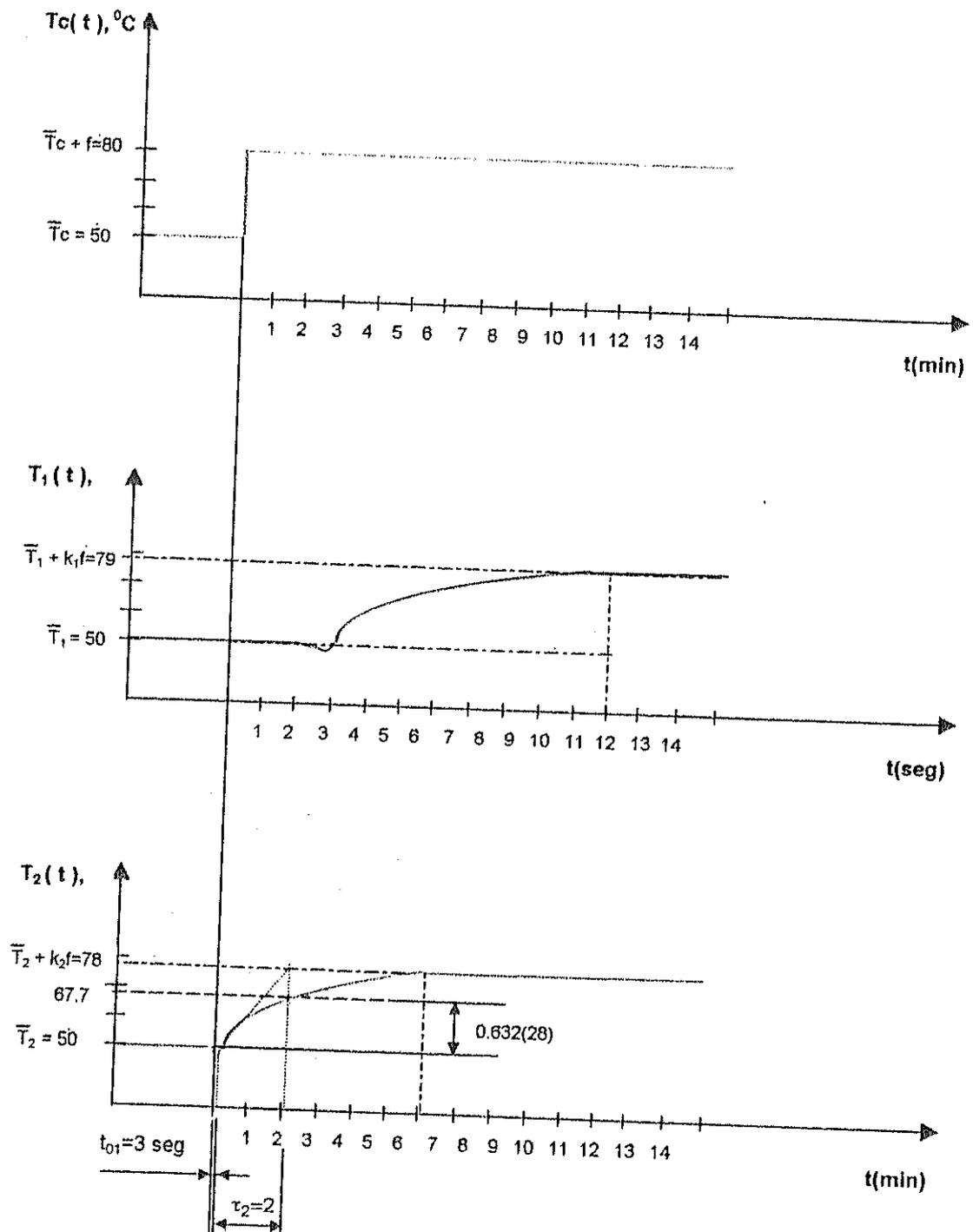


calle. A continuación se hará la respectiva tabulación de los resultados obtenidos de tiempo muerto y tiempo de respuesta.

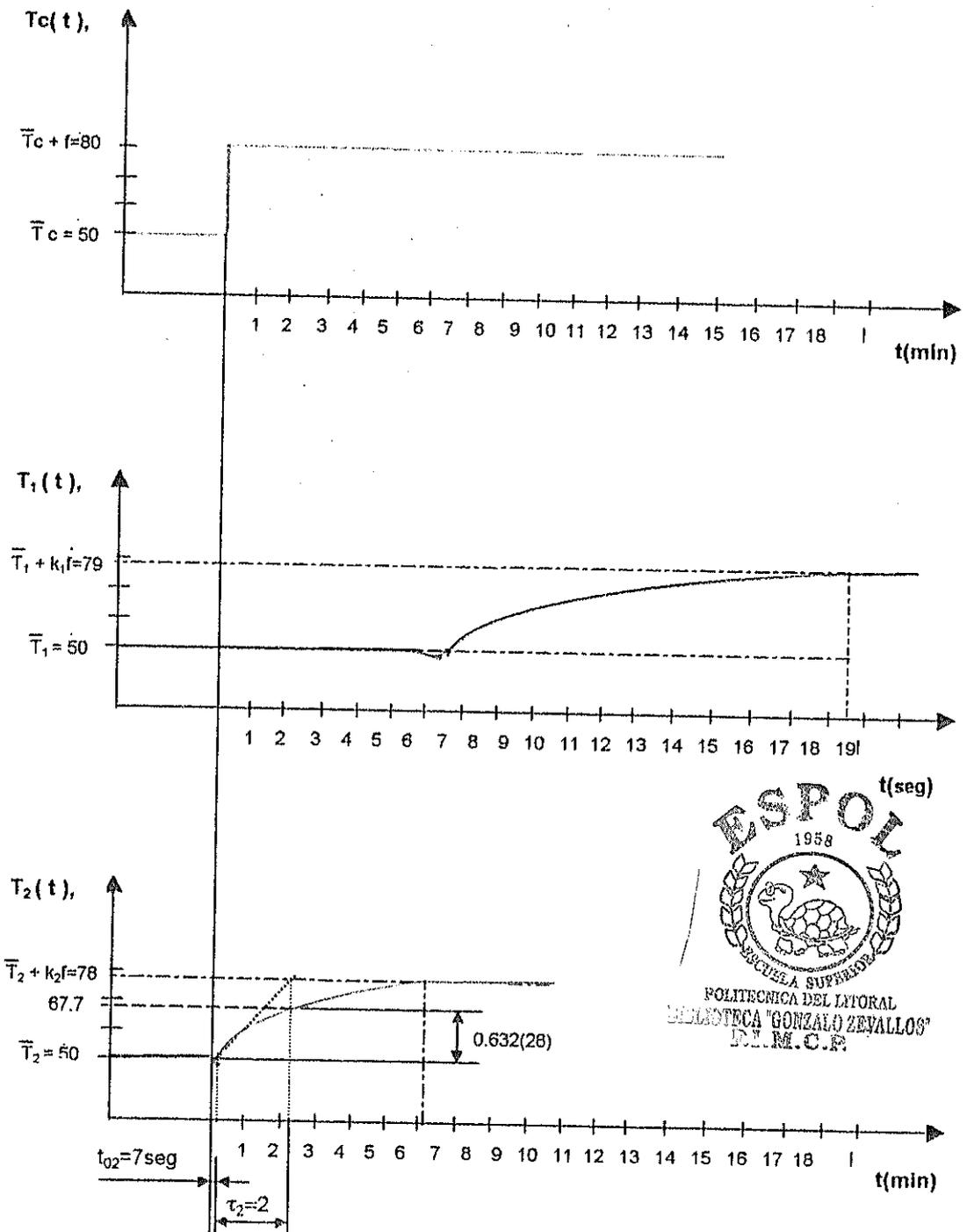
- h) Siguiendo las advertencias y precauciones de cuáles válvulas deberán estar cerradas con **HVD** cerrada o abierta, antes de activar el calentador fijamos la franja en  $\pm f$  [°C] o su equivalente  $\pm f$  [ °F ], en el dial correspondiente del termostato, que indica un rango de 5 a 30 °F.
- i) A continuación, podemos fijar el set - pointer en  $\bar{T}_c = 50$  °C o su equivalente en °F en el respectivo dial, cuyo rango es de 100 a 240 °F. Inmediatamente se escuchará el accionamiento del termostato en el cierre del circuito para energizar las resistencias del calentador y elevar la temperatura del fluido desde 25 °C hasta la temperatura fijada  $\bar{T}_c$  [ °C ] +  $f$  [ °C ] como se muestra en el primer pulso. Al llegar el fluido a alcanzar dicha temperatura el termostato detecta este máximo y envía la señal de apertura del circuito e inmediatamente disminuye la temperatura hasta su mínimo  $\bar{T}_c$  [ °C ] -  $f$  [ °C ].

Es en este momento en que nuestro análisis y observación comienza, ya que inmediatamente fijamos un escalón de temperatura hacia arriba, como de 30 °C, el termostato reacciona otra vez para cerrar el circuito, y comenzará a subir la temperatura hasta su máximo como se observa en los gráficos 6.6.1 y 6.6.2. Simultáneamente observamos la temperatura  $T(t)$ , en el respectivo instrumento, para cada caso, y anotamos el valor inicial  $\bar{T}$  [ °C ] en el gráfico correspondiente.

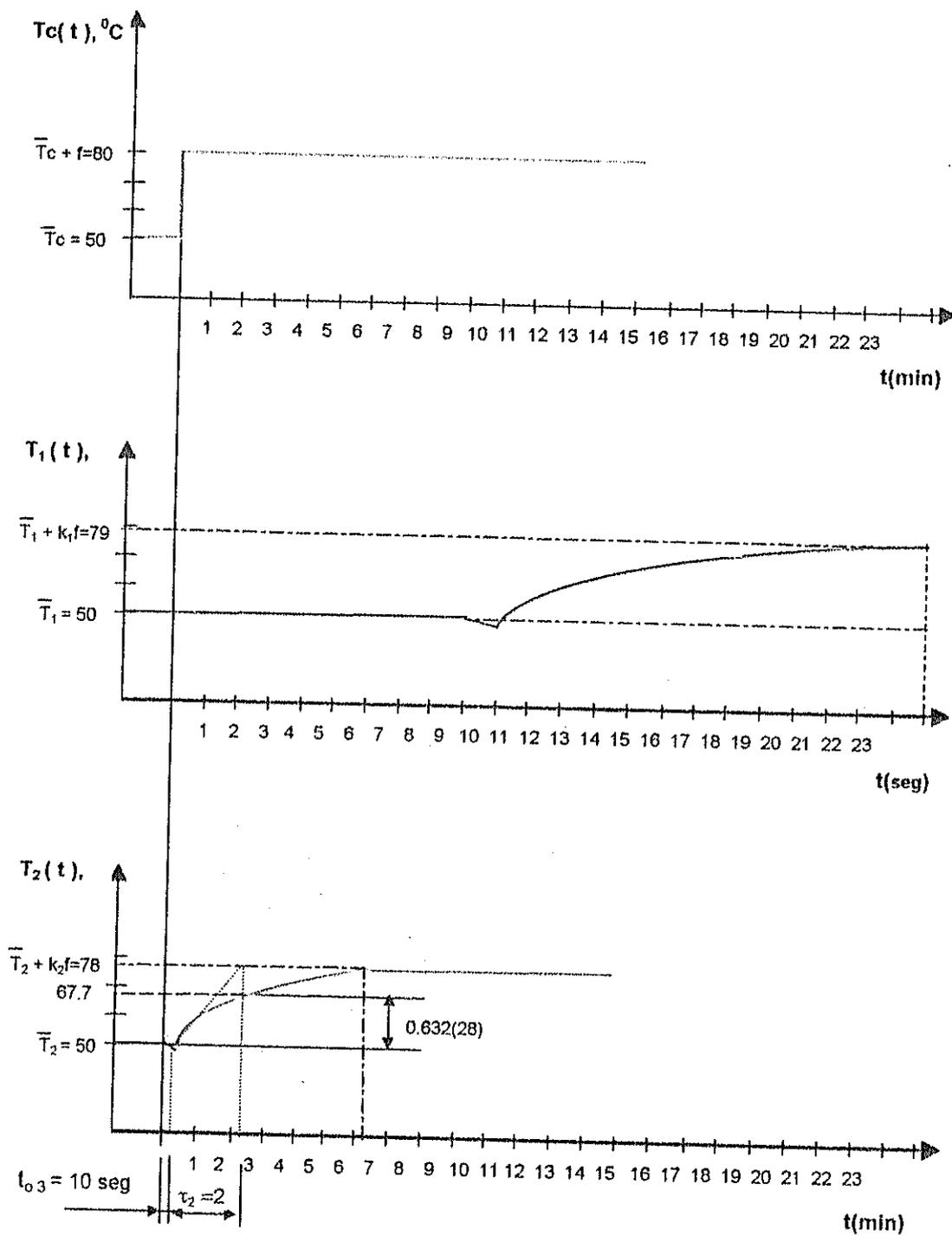
- j) Paralelamente, observamos las temperaturas  $T_{1/2}$  inicial en el transmisor TIT1 para las condiciones de **retardo A** y en el transmisor TIT2 para las condiciones de **retardo B**, y la ubicamos en el gráfico respectivo  $T_{1/2}(t)$ , comenzando a contar el tiempo con el cronómetro desde el accionamiento hasta cuando la pluma indicadora comienza a moverse, dándonos el valor  $t_0$  en segundos.
- k) Asumiendo que no disponemos de un graficador de temperaturas  $T(t)$  y nuestro termómetro de bulbo para esta información es un indicador de temperaturas, observamos la temperatura final a la que llega el mismo hasta que se escuche el accionamiento del termostato, lo cual será  $\bar{T} + K_1 f$  y la ubicamos en el gráfico  $T(t)$ . Como el valor de  $\bar{T} + K_1 f$ ,



Gráf. 6.6.2a Respuesta del proceso a un cambio escalón en la temperatura de entrada a través del serpentín  $R_1$ .



Gráf. 6.6.2b Respuesta del proceso a un cambio escalón en la temperatura de entrada a través del serpentín  $R_2$



Gráf. 6.6.2c Respuesta del proceso a un cambio escalón en la temperatura de entrada a través del serpentín  $R_3$ .

lo proporcionará el instrumento correspondiente y conociendo los valores de  $\bar{T}$  y  $f$  del gráfico  $T(t)$ , fácilmente podremos determinar  $K_1$ .

- l) Igualmente y al mismo tiempo observamos el valor final en TIT1 o TIT2, según el caso, antes de que se escuche el accionamiento del termostato. Un poco antes de este suceso, la temperatura en el transmisor tiende a llegar a su máximo y a estabilizarse, anotamos este valor y lo escribimos en el gráfico correspondiente  $T_1(t)$ . De este gráfico, también podemos determinar el valor de  $K_1$ , ya que conocemos el valor inicial  $\bar{T}_1$  y  $f$ ; este último valor, del gráfico  $T_c(t)$  o del termostato dependiendo de su escalón elegido.
- m) Se puede elegir el set - point en el termostato, el valor inicial  $\bar{T}_c$  y su escalón el valor de  $f$  para las condiciones establecidas y tabular los resultados con el fin de hacer las comparaciones experimentales, hacer las comparaciones teórico-experimentales, hacer el respectivo análisis de resultados y llegar a propias conclusiones.
- n) Para determinar el valor de  $\tau$  aproximado, de los gráficos  $T(t)$  ó  $T_1(t)$  cerramos una curva para valores de  $T(t)$  ó  $T_1(t)$ , desde el accionamiento inicial cuando comienza la

observación y análisis ( elegimos preferentemente  $T_1 ( t )$  ) y para cada tiempo transcurrido, anotamos un valor de  $T_1 ( t )$  hasta su valor máximo y los graficamos. De acuerdo al criterio de la respuesta del proceso a una entrada escalón en circuito abierto, trazamos una tangente a esta curva desde su valor inicial y lo interceptamos hasta su valor máximo, bajando una perpendicular al eje de los tiempos desde esta intersección, obteniéndose así el valor de  $\tau$  en segundos para un 63,2% de la respuesta obtenida, tal como lo muestran los gráficos.

El gráfico de  $T_1 ( t )$ , para esta prueba, se lo puede obtener, instalando la señal de salida del transmisor TIT1 hacia la señal de entrada o registro del controlador TRC, con un reloj más rápido y una carta con escala de segundos para las condiciones de retardo A. El mismo gráfico, para las condiciones de retardo B, se lo puede obtener, haciendo la instalación del párrafo anterior pero con el transmisor TIT2 y el controlador TRC con su mismo reloj y carta de registro, debido a que son condiciones más lentas.



- o) Podemos obtener las funciones de transferencia que estudia la respuesta de  $T_1(t)$  a los cambios producidos por las perturbaciones del termostato,  $T_c(t)$  para este caso,  $T_1(s)/T_c(s)$ .
- p) En caso de que necesitemos de un análisis más profundo de la función de transferencia anteriormente descrita y el valor de  $e^{-\text{tos}}$  no puede ser fácilmente evaluado recurrimos a la aproximación empírica de Padé de primer orden.
- q) Podemos recurrir al mismo procedimiento anterior para obtener los valores de  $K_2$ ,  $\tau$  y  $t_0$  para las condiciones de **retardo B** y obtener las funciones de transferencia correspondientes.
- r) Obtener una tabla de datos para las condiciones de retardo, y un valor fijo de  $\bar{T}_c$  y  $f$  del termostato, no olvidando que de la condición de **retardo A** salen 3 opciones para un solo valor fijo.
- s) Graficar los valores y obtener los resultados experimentales de  $t_0$  y  $\tau$ .



- t) Realizar los análisis de resultados y conclusiones de acuerdo a lo descrito en el literal (1)

### 5. Cálculos

$$t_o = (At \cdot L) / Q$$

#### Serpentín R<sub>1</sub>

Datos.- Para tubería de acero forjado comercial o tubo de fundición de hierro de  $\varnothing \frac{1}{2}$ " en diámetro nominal:

$$D_i = 0,622 \text{ pulg,}$$

$$A_t = 0,304 \text{ pulg}^2,$$

$$L = 0,6 \text{ m,}$$

$$Q = 5,1 \text{ lit/min } (8,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{seg}).$$

$$t_{o1} = 1,4 \text{ seg.}$$

#### Serpentín R<sub>2</sub>

Datos.- Para cañería de cobre de  $\varnothing \frac{5}{16}$ " en diámetro nominal:

$$D_i = 0,4345 \text{ pulg,}$$

$$A_t = 9,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2,$$

$$L = 5,34 \text{ m,}$$

$$Q = 5,1 \text{ lit/min.}$$

$$t_{o2} = 6,01 \text{ seg.}$$



**Serpentin R<sub>3</sub>**

Datos.- Para cañería de cobre de Ø 3/8" en diámetro nominal:

$$D_i = 0,494 \text{ pulg.}$$

$$A_t = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$L = 6,62 \text{ m,}$$

$$Q = 5,1 \text{ lit/min.}$$

$$t_{03} = 9,7 \text{ seg.}$$

Por otro lado, la respuesta  $T_1(s)$  de primer orden con tiempo muerto de un sistema ante una entrada en escalón  $T_i(s)$  es:

$$T_1(s)/T_i(s) = K_1 e^{-t_0 s} / (\tau s + 1)$$

- De acuerdo al gráfico 6.6.1a,

$$\bar{T}_i + f = 80 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$\bar{T}_i = 50 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$t_{01} = 2 \text{ seg,}$$

$$\tau_1 = 2,1 \text{ seg,}$$

entonces,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$



$$\bar{T}_1 + K_1 f = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

entonces,  $K_1 = 0,933$ .

En consecuencia, la función de transferencia para  $R_1$ , de primer orden, para la respuesta de  $T_1(s)$  a una perturbación  $T_i(s)$ , será:

$$T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-2,0s}/(2,1s+1)$$

- De acuerdo al gráfico 6.6.1b,

$$\bar{T}_i + f = 80 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_i = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{02} = 5,5 \text{ seg},$$

$$\tau_1 = 3,6 \text{ seg},$$

entonces,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\bar{T}_1 + K_1 f = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$f = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

entonces,  $K_1 = 0,933$



Por consiguiente, la función de transferencia para  $R_2$ , de primer orden, para la respuesta de  $T_1(s)$  a una perturbación  $T_i(s)$ , será:

$$T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-5,5s}/(3,6s+1)$$

- De la misma forma, respecto del gráfico 6.6.1c,

$$\bar{T}_i + f = 80 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_i = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{03} = 9,0 \text{ seg},$$

$$\tau_1 = 4,0 \text{ seg},$$

entonces,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$\bar{T}_1 + K_1 f = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$f = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

entonces,  $K_1 = 0,933$

Consecuentemente, la función de transferencia para  $R_3$ , de primer orden, para la respuesta de  $T_1(s)$  a una perturbación  $T_i(s)$ , será:

$$T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-9,0s}/(4,0s+1)$$

Se puede utilizar la aproximación de Padé de primer orden para evaluar  $e^{-t_0s}$ :

$$e^{-t_0s} = (1-1/2t_0s)/(1+1/2t_0s)$$

o la aproximación de primer orden en serie de Taylor para procesos rápidos:

$$e^{-t_0s} = 1 - t_0s$$

con lo cuál, la respuesta quedaría expresada:

$$T_1(s)/T_i(s) = K_1(1 - t_0s)/(\tau_1s + 1)$$

Sin embargo, evaluaremos las respuestas anteriormente obtenidas, para un forzamiento en escalón de 30°C:

$$a) T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-2,0s}/(2,1s+1) = 0,933(1 - 2s)/(2,1s+1)$$

$$b) T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-5,5s}/(3,6s+1) = 0,933(1 - 5,5s)/(3,6s+1)$$

$$c) T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-9,0s}/(4,0s+1) = 0,933(1 - 9s)/(4s+1)$$

Para una función de forzamiento:  $T_i(t) = 30 u(t)$ ,

en el dominio de Laplace :  $T_i(s) = 30/s$

Aplicando la transformada inversa a cada una de las respuestas tenemos:

$$a) T_1(s) = [0,933 e^{-2s} / (2,1s+1)] \cdot T_i(s)$$

$$= [0,933 e^{-2s} / (2,1s+1)] \cdot 30/s$$

$$T_1(s) = 27,99 e^{-2s} / [s(2,1s+1)] = [e^{-2s}/s] \cdot [27,99/(2,1s+1)]$$

Siendo:

$f(s) = e^{-2s}/s$  y  $g(s) = 27,99/(2,1s+1)$ , y aplicando las propiedades de la transformada inversa, tenemos:

$$T_1(t) = 27,99[1 - e^{-0,48(t-2)}] \text{ ó,}$$

$$T_1(t) = \overline{T_1} + 27,99[1 - e^{-0,48(t-2)}]$$

Es decir:

$$T_1(t) = \overline{T_1} + 27,99 [1 - e^{-1/\tau_1(t-t_0)}]$$

$$T_1(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,48(t-2)}]$$

De esta manera, obtendremos las tres respuestas aproximadas, en función del tiempo en segundos, de las condiciones de retardo A de primer orden, ante una entrada en escalón:

$$a) T_1(t) = 50 + 27,99 [1 - e^{-0,48(t-2)}]$$

$$b) T_1(t) = 50 + 27,99 [1 - e^{-0,28(t-5,5)}]$$

$$c) T_1(t) = 50 + 27,99 [1 - e^{-0,25(t-9)}]$$

Similarmente, se obtiene la respuesta en función del tiempo en minutos, para las condiciones de retardo B de primer orden, ante una entrada en escalón:

$$T_2(t) = \overline{T_2} + 27,99 [1 - e^{-1/\tau_2(t-t_0)}]$$

Empezando por obtener la respuesta  $T_2(s)$  de primer orden con tiempo muerto de un sistema ante una entrada en escalón  $T_i(s)$ :

$$T_2(s) / T_i(s) = K_2 e^{-t_0 s} / (\tau_2 s + 1)$$

Donde, según los gráficos 6.6.2,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $K_2 = 0,933$ ,  $T_i(s) = 30/s$

y

a)  $t_0 = 3 \text{ seg (0,05 min)}, \tau_2 = 2 \text{ min},$

b)  $t_0 = 7 \text{ seg(0,12 min)}, \tau_2 = 2 \text{ min y}$

c)  $t_0 = 10 \text{ seg (0,17 min)}, \tau_2 = 2 \text{ min.}$

Entonces, correspondientemente:

$$\text{a) } T_2(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,5(t - 0,05)}]$$

$$\text{b) } T_2(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,5(t - 0,12)}]$$

$$\text{c) } T_2(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,5(t - 0,17)}]$$

Otra forma de determinar las salidas  $T_2(t)$ , aproximadas, es considerando la figura 6.6.3, donde se presenta el diagrama de bloques para un sistema de orden superior formado por los bloques de primer orden de las condiciones A y B (figs.: 6.6.1 y 6.6.2).

De esta manera se obtiene la función de transferencia para este modelo de orden superior con tiempo muerto:

$$T_2(s)/T_i(s) = [K_1 \cdot K_2 e^{-t_0 s}] / [(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1)]$$

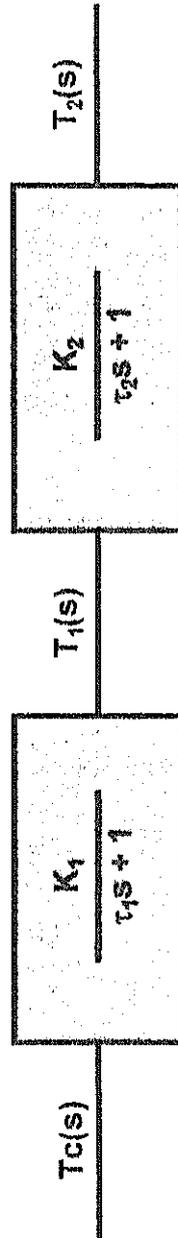


Fig. 6.6.3a Diagrama de bloques para el modelo de orden superior para las condiciones de retardo A y B combinadas

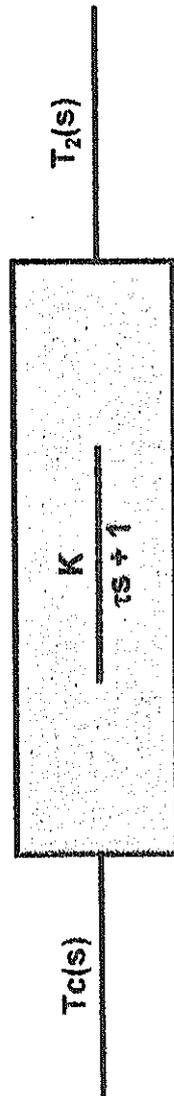


Fig. 6.6.3b Diagrama de bloques para un modelo de primer orden aproximado, para las condiciones de retardo A y B combinadas, con tiempo muerto



Aproximando la expresión anterior, a una de primer orden,

tenemos:

$$T_2(s)/T_i(s) = (K e^{-t_0 s})/(\tau s + 1)$$

Donde:

$$- K = K_1 * K_2 = 0,87$$

$$= 0,933 * 0,933$$

$$K = 0,87$$

$$- \tau = \tau_2 \text{ (se escoge el valor mucho mayor)}$$

$$\tau = 2 \text{ min}$$

$$- t_0 = t_{01}, t_{02} \text{ y } t_{03} \text{ (se evalúan las tres salidas para los tres serpentines)}$$

$$t_0 = 3 \text{ seg (0,05 min), } 7 \text{ seg(0,12 min), y } 10 \text{ seg(0,17 min)}$$

$$- \text{La excitación como ya sabemos es } T_i(s) = 30/s$$

Las expresiones obtenidas en el dominio de "s" serán:

$$a) T_2(s) = (0,87 e^{-0,05s})/(2s + 1) \cdot 30/s$$

$$b) T_2(s) = (0,87 e^{-0,12s})/(2s + 1) \cdot 30/s$$

$$c) T_2(s) = (0,87 e^{-0,17s})/(2s + 1) \cdot 30/s$$

Y las correspondientes expresiones en función del tiempo tendrán

la forma:

$$T_2(t) = \overline{T}_2 + [1 - e^{-1/\tau_2 (t-t_0)}]$$

a)  $T_2(t) = 50 + 26,11[1 - e^{-0,5(t-0,05)}]$

b)  $T_2(t) = 50 + 26,11[1 - e^{-0,5(t-0,12)}]$

c)  $T_2(t) = 50 + 26,11[1 - e^{-0,5(t-0,17)}]$

Lo que confirma los resultados anteriormente obtenidos.

## 6. Preguntas

a) ¿Cómo sería la función de transferencia para la respuesta de  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$  a un forzamiento en rampa de  $T_c(t)$ , para las condiciones de **retardo A y B**, en las mismas condiciones de perturbación?

b) Obtener  $T_1(t)$  a partir de la función de transferencia  $T_1(s)$  /  $T_c(s)$  obtenida del literal n) y si es necesario aplicar la aproximación de Padé, para el forzamiento en rampa.

- c) Evaluar el valor de  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$ , para el tiempo de 2 seg y 2 min, respectivamente, desde los resultados tabulados en 6.6.3.

**Nota:** Obtener los resultados y analizarlos.

## 7. Análisis de Resultados

- a) Experimentalmente se demuestra que, para un mayor diámetro o mayor longitud de serpentín, el tiempo muerto debe aumentar.
- b) Para las condiciones de retardo existentes, el tiempo de muerto es pequeño y se demuestra que no existe proporcionalidad directa entre este valor y el de la constante de tiempo de los serpentines.
- c) Las condiciones de retardo existentes influyen en la respuesta del proceso, pero su extensión no es considerable, comparado con la duración de la respuesta que tiene el mismo.
- d) Para las condiciones establecidas, se obtiene una gran rapidez de reacción en los serpentines y por lo tanto su

SERPENTIN	$\phi$ int.		L (m)	Q (m <sup>3</sup> /s) *10 <sup>-5</sup>	t <sub>o</sub> (seg.)		$\tau$ (seg.)
	(pulg.)	(m)			teórico	experimental	
R <sub>1</sub>	0,622	0,0158	0,6	8,5	1,4	2,0	2,1
R <sub>2</sub>	0,4345	0,0110	5,34	8,5	6,01	5,5	3,6
R <sub>3</sub>	0,494	0,0126	6,62	8,5	9,7	9,0	4,0

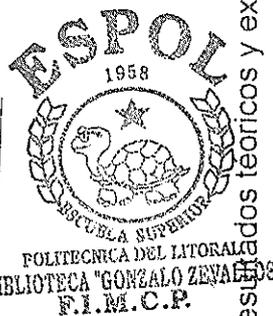


Tabla 6.6.1 Resultados teóricos y experimentales para las condiciones de retardo A

SERPENTIN	Ønt.		L (m)	Q*10 <sup>-6</sup> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>0</sub> (seg.)	τ (min.)
	(pulg.)	(m)				
R <sub>1</sub>	0,622	0,0158	0,6	8,5	3	2
R <sub>2</sub>	0,4345	0,0110	5,34	8,5	7	2
R <sub>3</sub>	0,494	0,0126	6,62	8,5	10	2

Tabla 6.6.2 Resultados obtenidos para la respuesta a la perturbación sobre el proceso en las condiciones de retardo B

Retardo	to	CONDICION A				
		1 <sup>er</sup> orden				
		teórico	K <sub>1</sub>	f	t <sub>0</sub>	τ <sub>1</sub>
seg		°C	seg	seg	°C	
R <sub>1</sub>	1,4	0,933	30	2	2,1	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,48(t-2)</sup> ]
R <sub>2</sub>	6,01	0,933	30	5,5	3,6	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,28(t-5,5)</sup> ]
R <sub>3</sub>	9,7	0,933	30	9	4	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,25(t-9)</sup> ]
Retardo	to	CONDICION B				
		1 <sup>er</sup> orden				
		teórico	K <sub>2</sub>	f	t <sub>0</sub>	τ <sub>2</sub>
seg		°C	min	min	°C	
R <sub>1</sub>	1,4	0,933	30	0,05	2	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,6(t-0,05)</sup> ]
R <sub>2</sub>	6,01	0,933	30	0,12	2	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,6(t-0,12)</sup> ]
R <sub>3</sub>	9,7	0,933	30	0,17	2	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,5(t-0,17)</sup> ]
Retardo	to	CONDICION A y B				
		2 <sup>do</sup> orden a 1 <sup>er</sup> orden				
		teórico	K	f	t <sub>0</sub>	τ
seg		°C	min	min	°C	
R <sub>1</sub>	1,4	0,87	30	0,05	2	50 + 26,11[1 - e <sup>-0,5(t-0,05)</sup> ]
R <sub>2</sub>	6,01	0,87	30	0,12	2	50 + 26,11[1 - e <sup>-0,5(t-0,12)</sup> ]
R <sub>3</sub>	9,7	0,87	30	0,17	2	50 + 26,11[1 - e <sup>-0,5(t-0,17)</sup> ]

Tabla 6.6.3 Respuestas obtenidas en función del tiempo ante una perturbación escalón, aplicada sobre cada condición de retardo: A, B, A y B

constante de tiempo es pequeña, con un valor mayor de hasta 4 segundos; al contrario con la respuesta del proceso, cuyo valor es mucho mayor, del orden de 2 minutos. El mayor valor de tiempo muerto obtenido en los serpentines es de 9 segundos, y el mayor valor del tiempo empleado para alcanzar la estabilidad en ellos, luego de la perturbación aplicada es de 13 segundos; estos resultados fueron obtenidos en el serpentín R3.

- e) Se comprueba que el retardo varía la respuesta  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$
- f) Se observa que, bajo ciertas condiciones de trabajo establecidas, cada serpentín posee su propia constante de tiempo y el proceso también.
- g) En este caso, se puede aproximar un modelo de orden superior con retardo, constituidos por dos modelos de primer orden con retardo, los cuales son: 1. Los serpentines y 2. El proceso.
- h) Se comprueba que el modelo de orden superior se puede aproximar a un modelo de primer orden con tiempo muerto.

- i) Para el modelo de orden superior, estableciendo las mismas condiciones de trabajo, sólo el tiempo muerto afecta la respuesta.
- j) De los valores teóricos y los valores experimentales, al respecto del tiempo muerto, según los resultados obtenidos y tabulados en 6.6.1 y 6.6.2, se observa consistencia.
- k) Se recomienda aumentar cambiando el diámetro de la tubería de descarga a continuación del tanque de proceso. Para un mejor análisis, evitar procesos muy lentos y rebose en el tanque de proceso.

## 6.7. Efecto de las perturbaciones en la respuesta del sistema de control

### 1. Objetivos

- a) Con base a un sistema de control ideal y un balance de energía de estado estable, estudiar el efecto de las perturbaciones en la respuesta de la temperatura de control para cada uno de los casos existentes en las condiciones de diseño del sistema de control real.
- b) Observar como influye el incremento de flujo de alimentación de la bomba y por consiguiente la velocidad de reacción de un sistema, en el ajuste de la ganancia del controlador, sin variar las condiciones establecidas de trabajo.
- c) Obtener los diagramas de bloques que describirán el comportamiento dinámico para las posibilidades de trabajo que puedan existir, hasta obtener el diagrama final de bloques que utilizaremos, de acuerdo a las perturbaciones a utilizar en nuestra unidad de control y a partir de ellos obtener el diagrama de bloques de estado estable.

## 2. Fundamentos teóricos

La figura 6.7.1 que se muestra, nos sirve para obtener el balance de energía y determinar la temperatura de mezcla  $T_1(t)$  ó  $T_2(t)$  de un sistema ideal aplicado al sistema real de control.

**Solución:** Suponer que las pérdidas de calor son despreciables como primera aproximación para esta unidad.

Se desea saber, cual es el flujo de agua caliente aproximado que se necesita para las siguientes condiciones de trabajo:

- Flujo de alimentación de la bomba regulado desde la válvula HV10, igual al flujo de salida para el sistema correspondiente:  
 $[F(t) + Q_c(t)] =$   
 8 litros/minutos = Flujo máximo de descarga [para el control de  $T_{1/2}(t)$ ].  
 22 litros/minutos = Flujo máximo de la bomba [solo para el control de  $T_1(t)$ ].
- Cuando se desee controlar la temperatura  $T_2(t)$ , fijar el nivel del agua en el tanque de proceso en 40 cm.



POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"  
F.I.M.C.P.

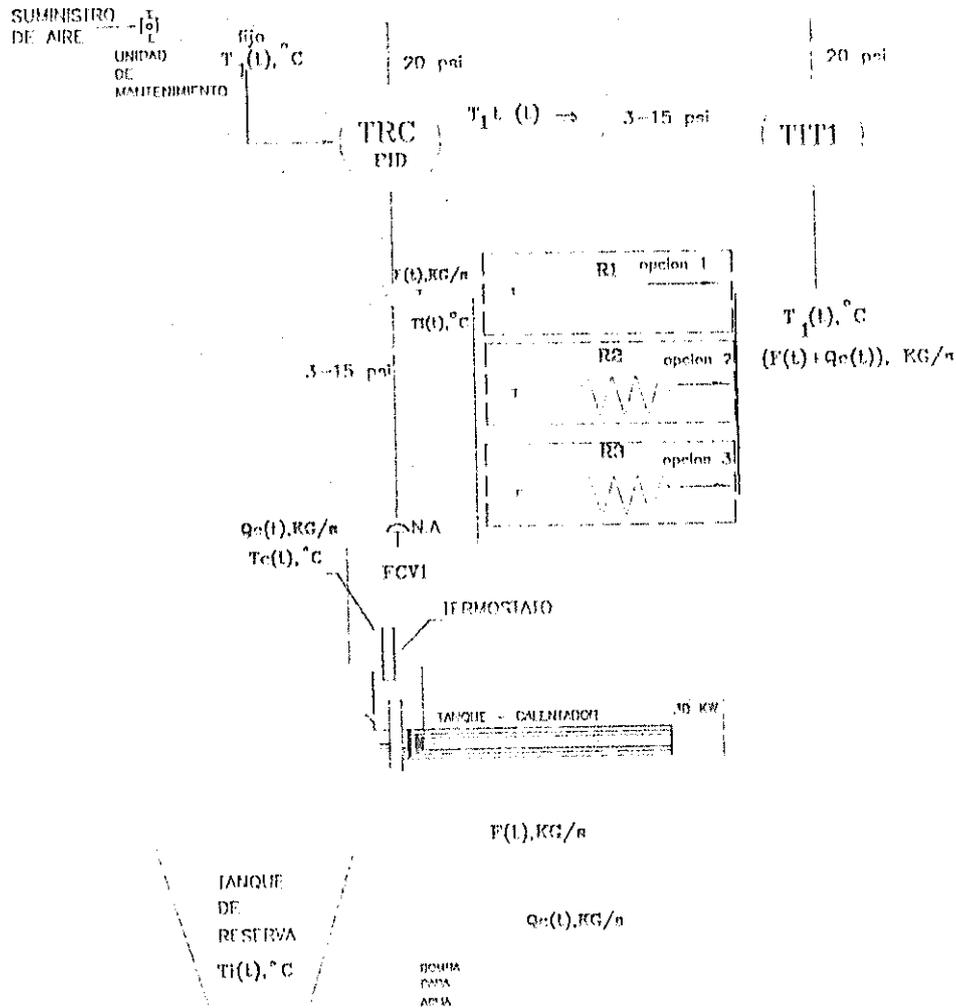


FIG. 6.7.1a CIRCUITO DE CONTROL POR RETROALIMENTACION PARA CONTROLAR LA TEMPERATURA DE MEZCLA EN LOS SERPENTINES  $R_1, R_2, R_3, T_1(t)$

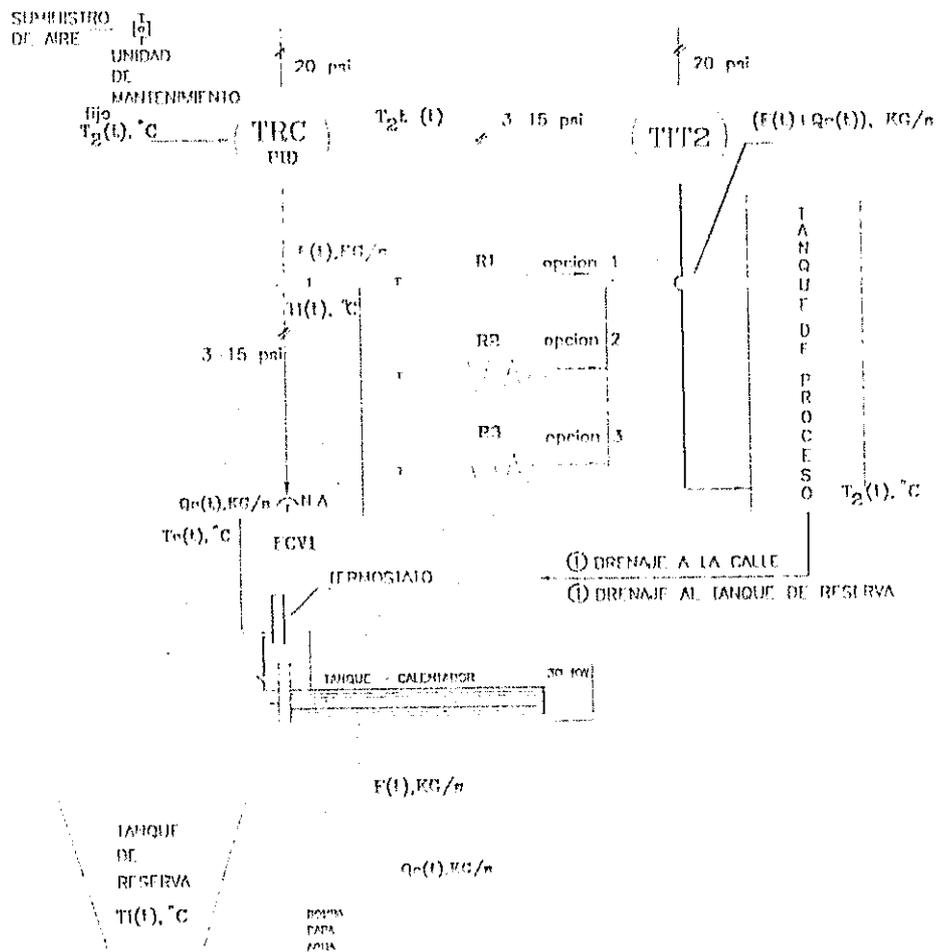


FIG. 6.7.1b CIRCUITO DE CONTROL POR RETROALIMENTACION PARA CONTROLAR LA TEMPERATURA DE MEZCLA EN EL TANQUE DE PROCESO  $T_2(t)$

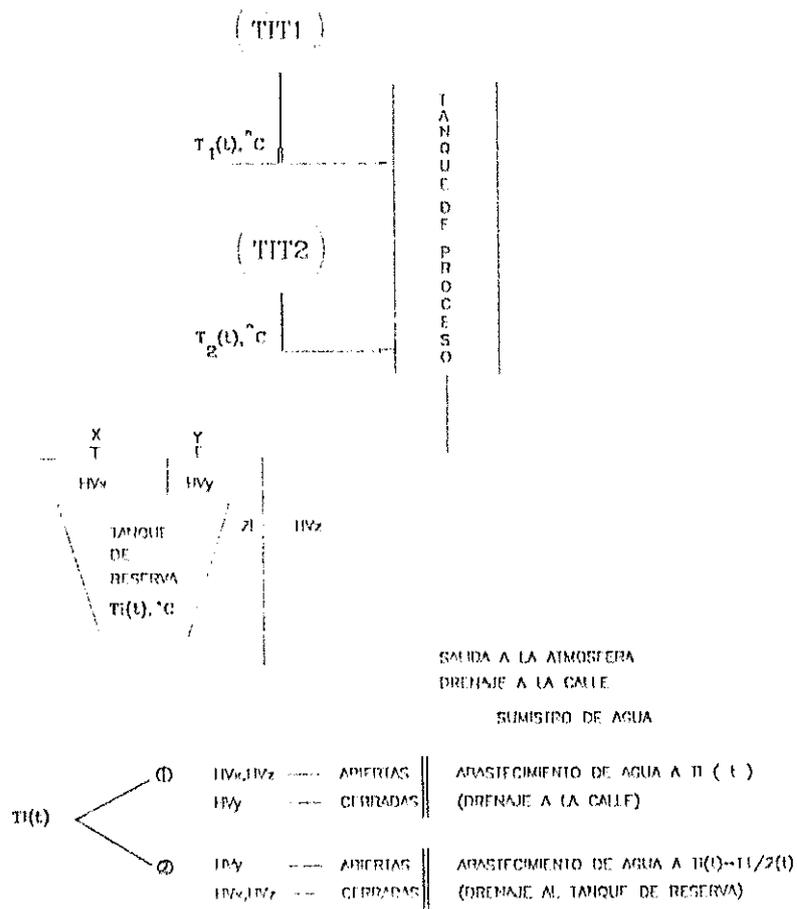


FIG. 6.7.1c OPCIONES PARA ESTABLECER  $T_3(t)$ .

- Temperatura de mezcla o producto (temperatura de control) a la salida del proceso.

$$T_{1/2}(t) = 50^{\circ}\text{C}(122^{\circ}\text{F}) \text{ ó } T_{1/2}(t) = 80^{\circ}\text{C}(176^{\circ}\text{F})$$

$$T_{1/2}(t) = T_1(t) \text{ ó } T_2(t)$$

$$cp_{50} = cp \text{ a } 50^{\circ}\text{C} \text{ ó } cp \text{ a } 80^{\circ}\text{C}$$

80

$$cp_{80} = cp \text{ a } 80^{\circ}\text{C} \text{ ó } cp \text{ a } 200^{\circ}\text{F}$$

200



- La temperatura de agua fría y por lo tanto del flujo de alimentación se mantiene constante en circuito abierto.

$$T_i(t) = 25^{\circ}\text{C} (77^{\circ}\text{F}).$$

- Se desea setear el termostato a una temperatura menor del punto de ebullición (por seguridad) y una franja pequeña para que  $T_c$  no varíe y se pueda considerar constante, por ejemplo:

$$T_c(t) = 80^{\circ}\text{C} (176^{\circ}\text{F}) \text{ ó } T_c(t) = 200^{\circ}\text{F}$$

- Las condiciones auxiliares son:

$$C_p(25^{\circ}\text{C}) = 1.0003 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(25^{\circ}\text{C}) = 996.78 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$C_p(50^{\circ}\text{C}) = 0.99888 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(50^{\circ}\text{C}) = 987.76 \text{ "}$$

$$C_p(80^{\circ}\text{C}) = 1.00312 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(80^{\circ}\text{C}) = 971.53 \text{ "}$$

$$C_p(200^{\circ}\text{F}) = 1.006 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(200^{\circ}\text{F}) = 962.6 \text{ "}$$



La ecuación de balance de energía es:

$$[F(t) + Q_c(t)] C_{p_{80}} T_{1/2}(t) = F(t) C_{p_{25}} T_i(t) + Q_c(t) C_{p_{80}} T_c(t) \quad 6.7.1$$

Despejando Qc, resulta:

$$Q_c = [F(C_{p_{25}} T_i - C_{p_{80}} T_{1/2})] / [C_{p_{80}} T_{1/2} - C_{p_{80}} T_c] \quad 6.7.2$$

Pero F, puede tener 2 condiciones de acuerdo al flujo de alimentación escogido.

$$F[\text{litros/min.}] = \begin{matrix} 8 & - & Q_c & \textcircled{1} \\ 22 & - & Q_c & \textcircled{2} \end{matrix}$$

reemplazando y volviendo a despejar tenemos:

$$Q_c = [F + Q_c] / [1 + (C_{p_{80}} T_{1/2} - C_{p_{80}} T_c) / (C_{p_{25}} T_i - C_{p_{80}} T_{1/2})] \quad 6.7.3$$

Sustituyendo valores con las condiciones establecidas para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$ .

	$T_c = 80^\circ\text{C}$	$T_c = 200^\circ\text{F}$
$Q_c =$	3.6 litros/minuto (3.3) 9.9 litros/minuto	$Q_c =$ 2.9 litros/minuto 8 litros/minuto

Sustituyendo valores con las condiciones establecidas para

$$T_{1/2} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$Q_c = \begin{array}{l} 8 \text{ litros/minuto} \\ 22 \text{ litros/minuto} \end{array}$$

$$Q_c = \begin{array}{l} 6.4 \text{ litros/minuto} \\ 17.6 \text{ litros/minuto} \end{array}$$

Se calculan las ganancias de circuito abierto en estado estacionario para cada uno de los elementos del circuito.

Despejando  $T_{1/2}$  a partir de la ecuación 6.7.1, resulta:

$$T_{1/2} = \frac{[F c_{p25} T_i + Q_c c_{p80} T_c]}{[c_{p50}(F + Q_c)]} \quad 6.7.4$$

**Linealizaciones.** - A partir de la ecuación 6.7.4

- La ganancia de estado estacionario del proceso para la temperatura  $T_{1/2}$  con respecto al flujo de agua fría que entra, se obtiene al derivar parcialmente  $T_{1/2}$  con respecto a  $F$ .

$$K_F = \delta T_{1/2} / \delta F = G_F(0)$$

y considerando que  $F + Q_c = \text{constante}$ , de la ecuación 6.7.4

$$K_F = \frac{[c_{p25} T_i]}{[c_{p50}(F + Q_c)]} \quad 6.7.5$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$189.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$189.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 69\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 69\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$188.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$188.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 68.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 68.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

O, de acuerdo a la figura 6.7.2, considerando que  $F + Q_c = C$  (constante),

$$K_F = T_i/(F+Q_c) \quad 6.7.5a$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$189.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$189.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 68.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 68.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

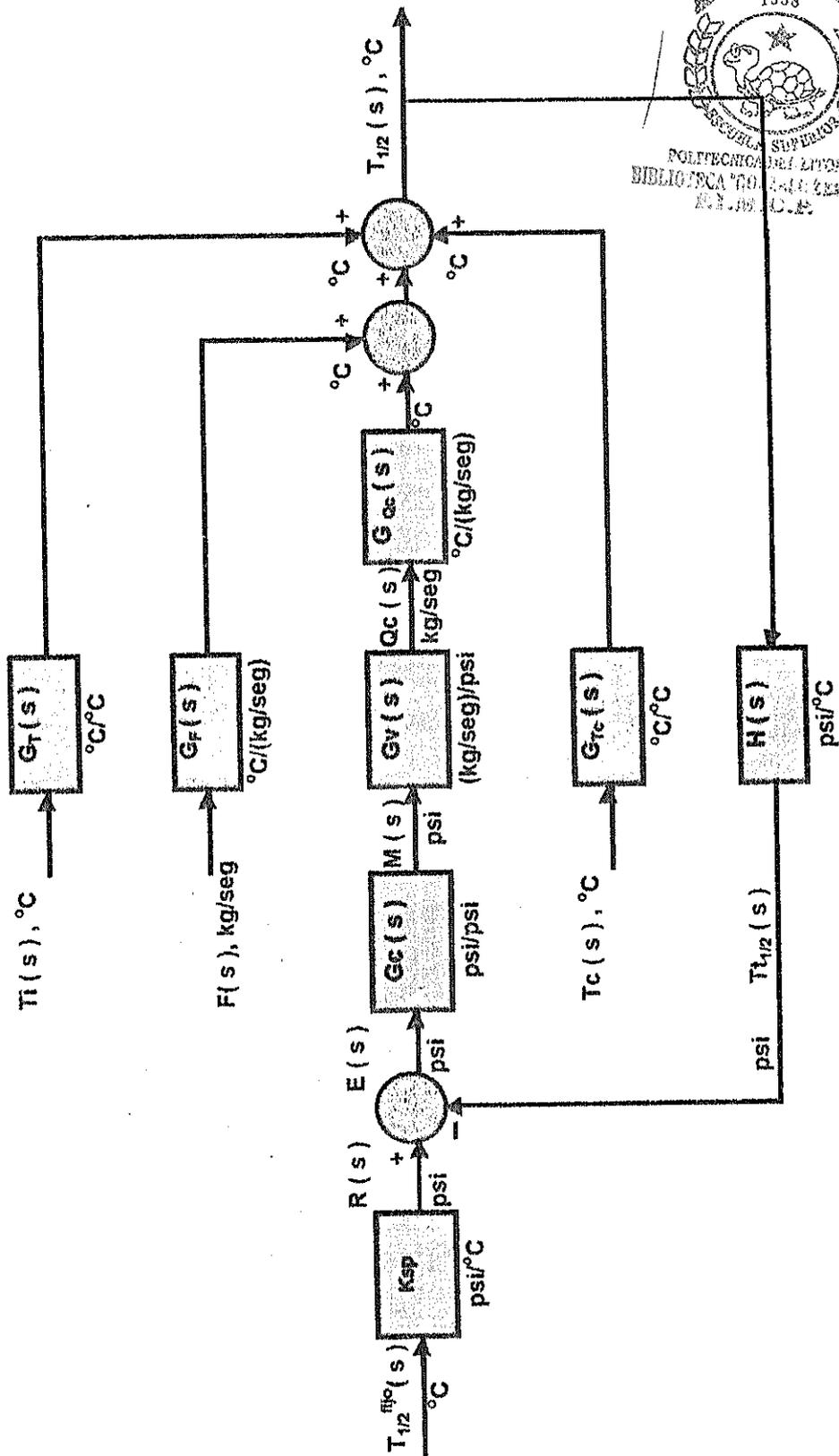


Fig. 6.7.2a Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante las perturbaciones que se muestran (modelo dinámico)

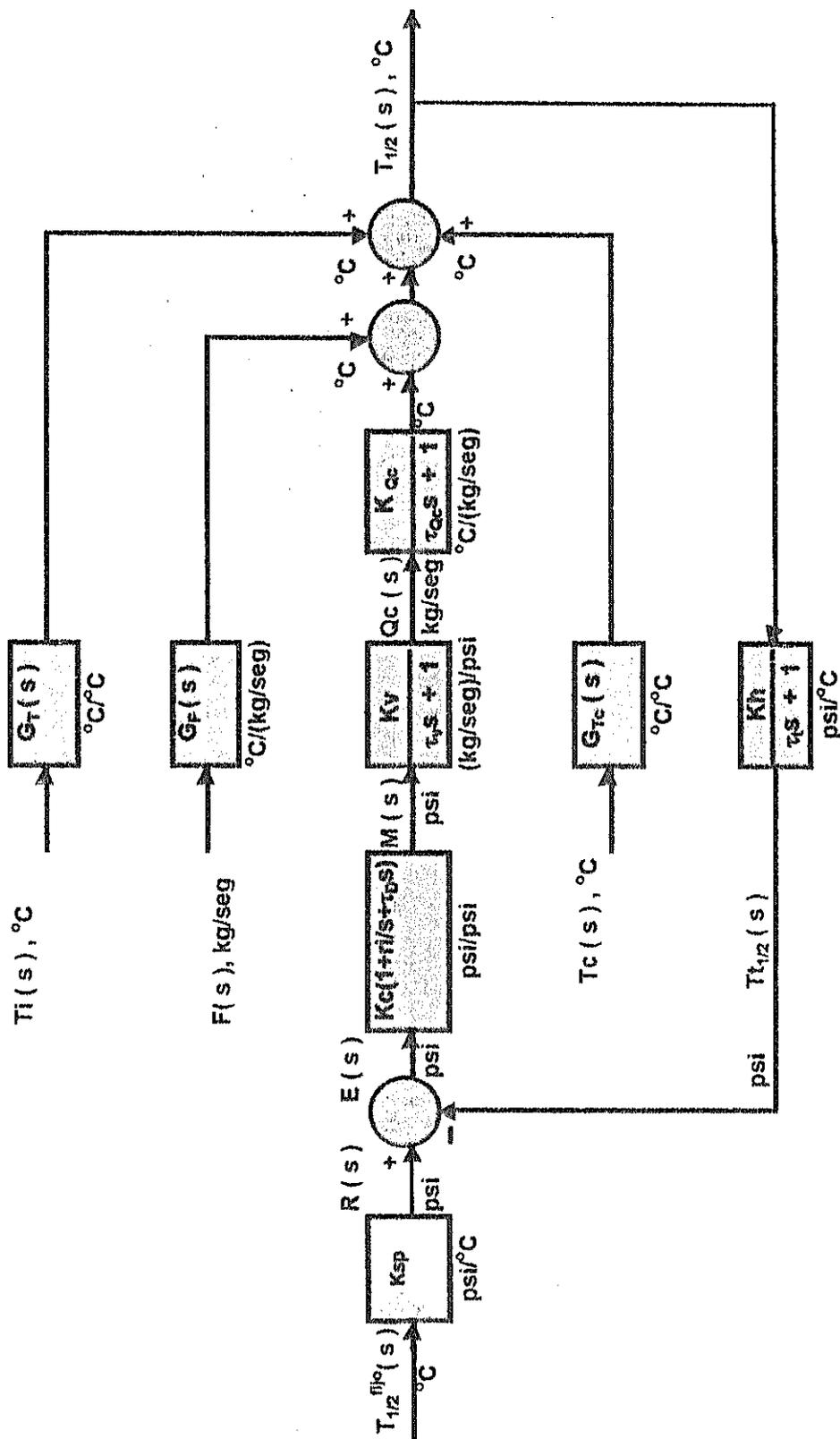


Fig. 6.7.2b Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante las perturbaciones que se muestran (modelo dinámico)

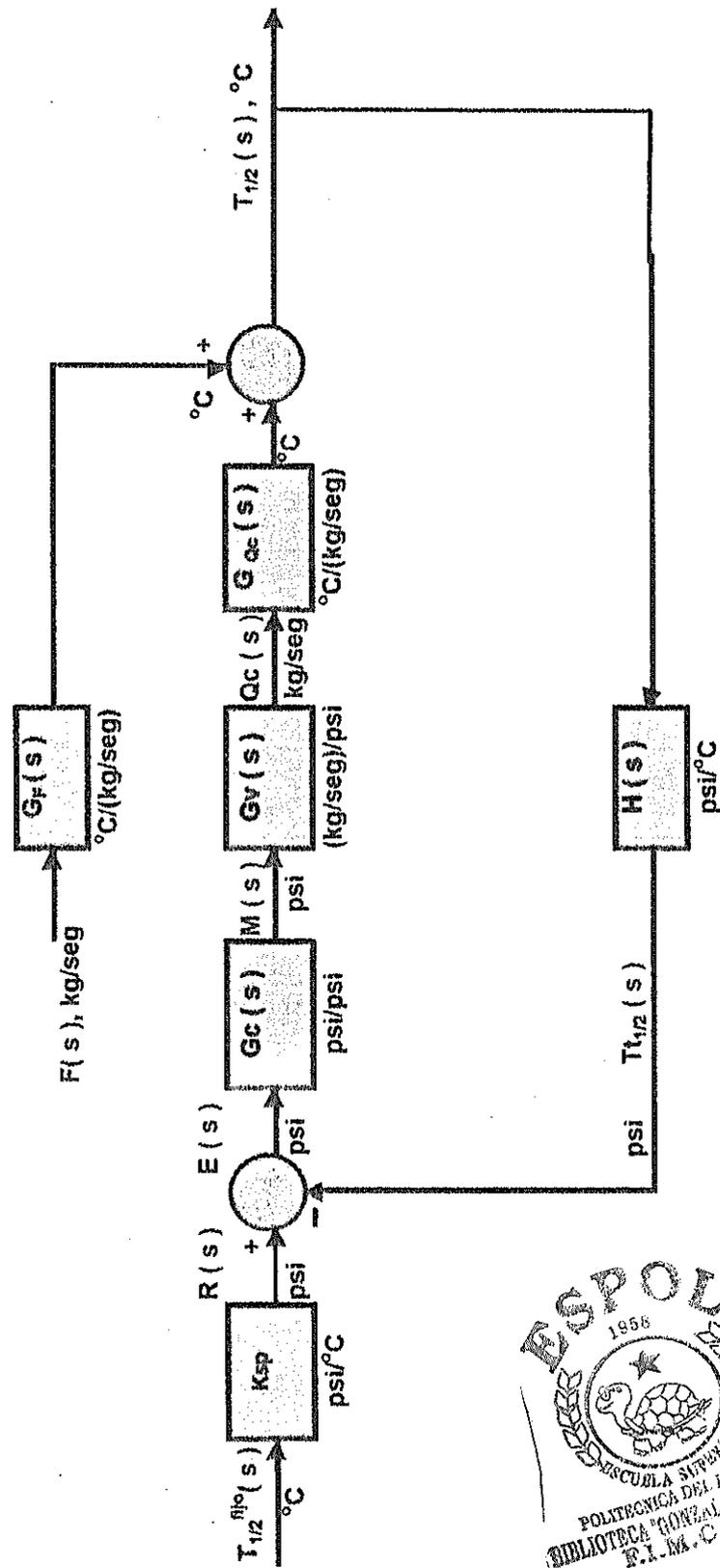


Fig. 6.7.2c Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, ante la perturbación y la variación del valor deseado (modelo dinámico)



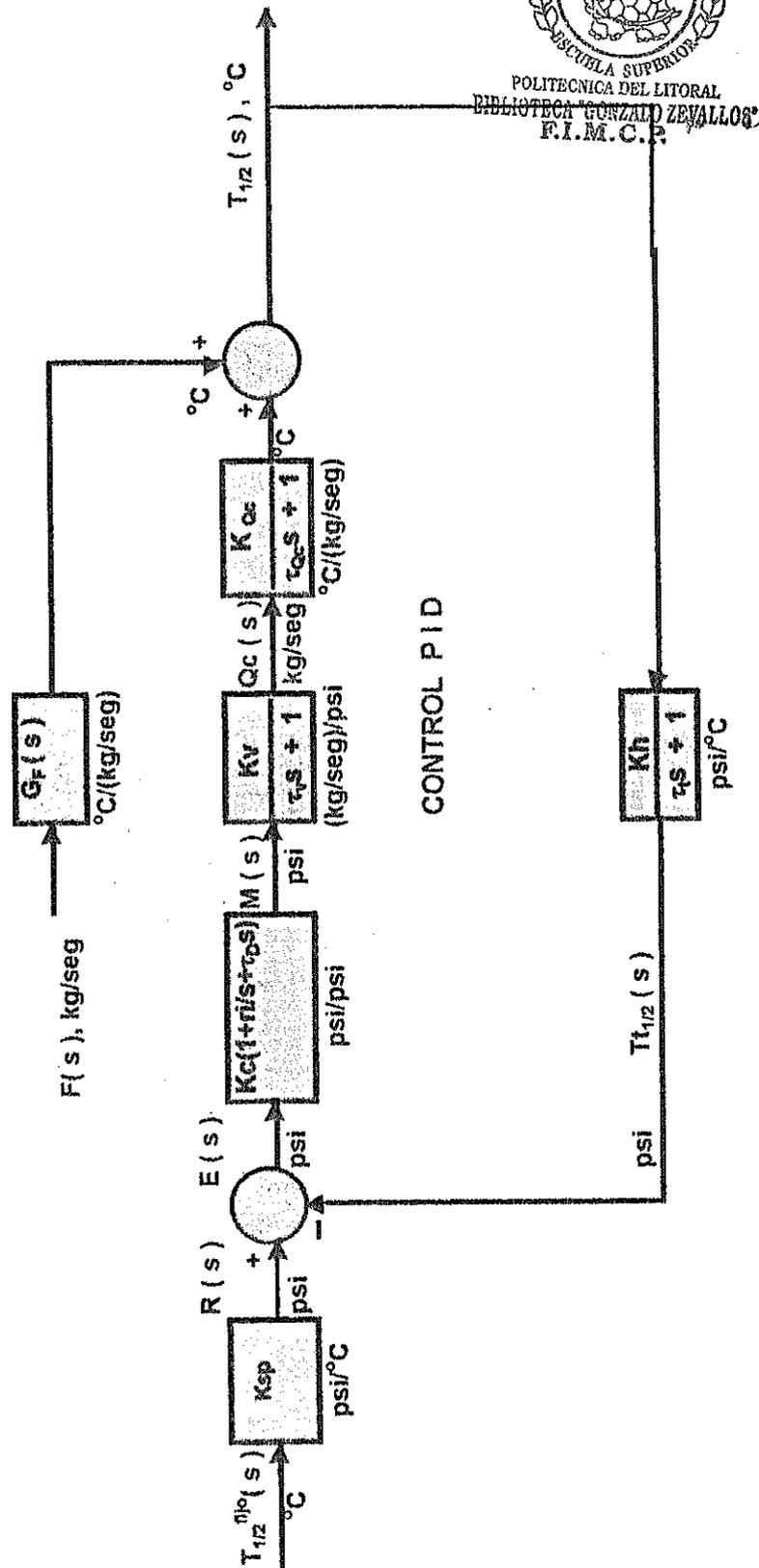


Fig. 6.7.2d Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante una perturbación y la variación del valor deseado (modelo dinámico)

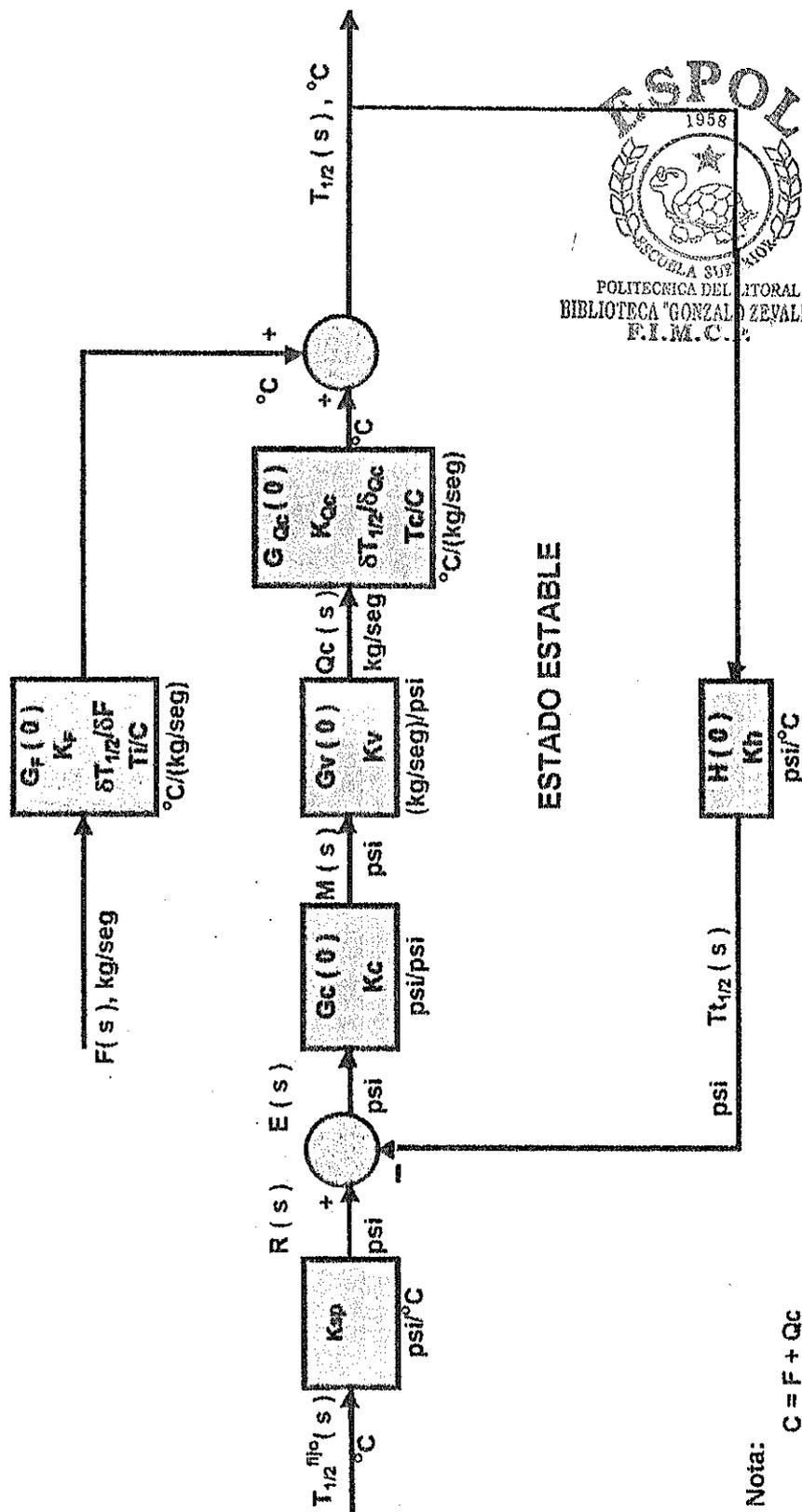
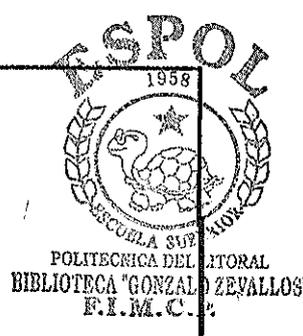


Fig. 6.7.2e Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante una perturbación y la variación del valor deseado (para el estado estable)



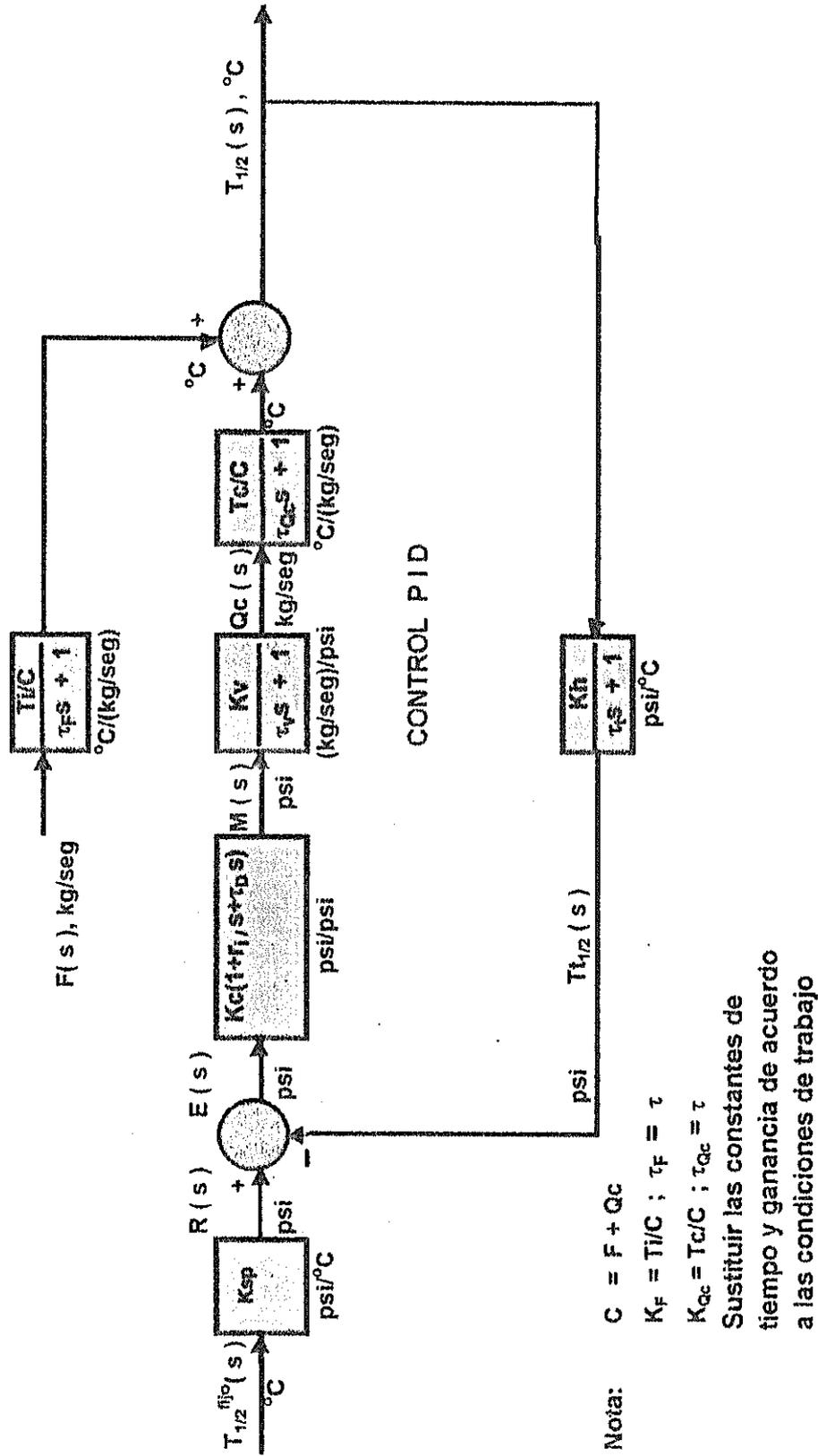


Fig. 6.7.2f Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante una perturbación y la variación del valor deseado (modelo dinámico con más detalle)

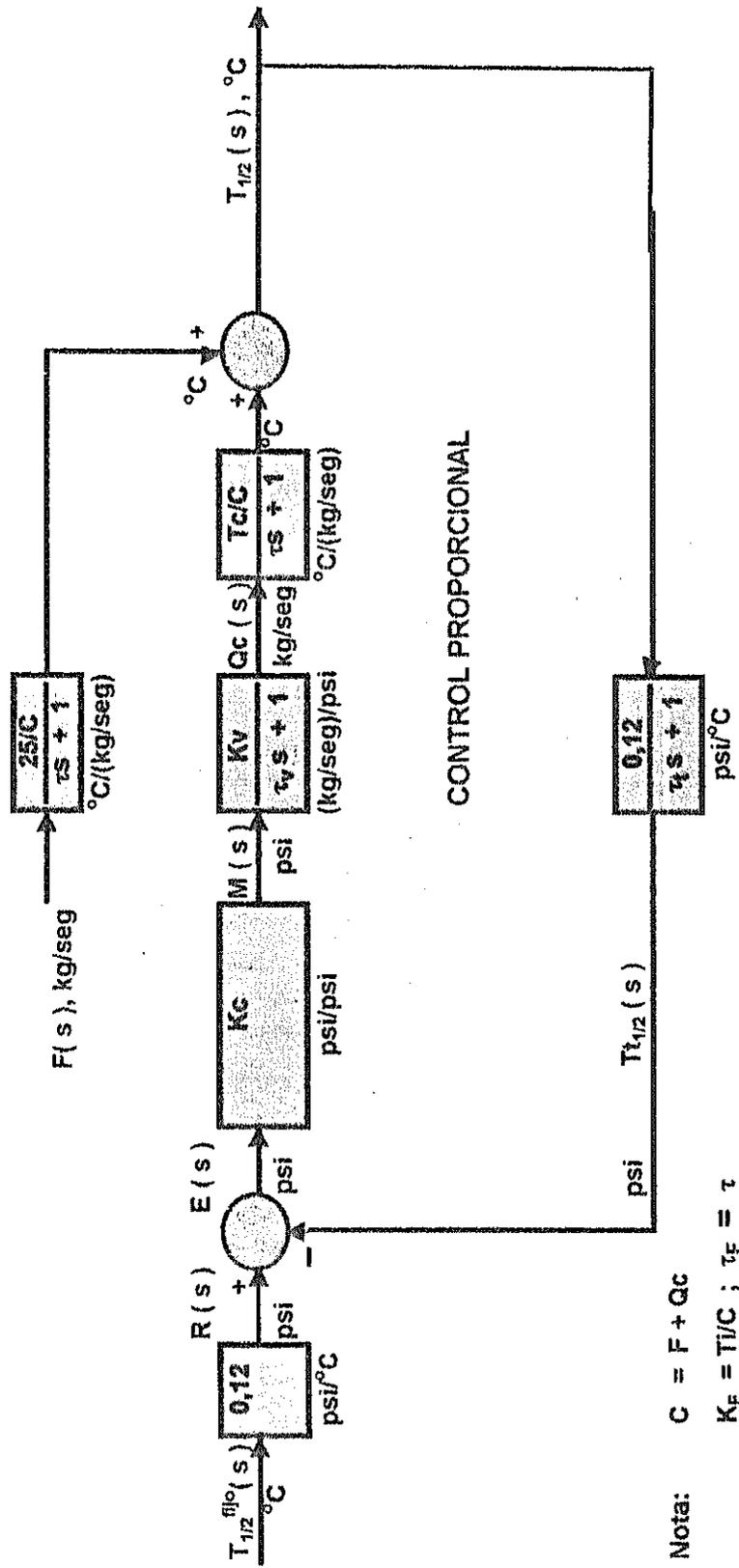


Fig. 6.7.2g Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante una perturbación y la variación del valor deseado (modelo dinámico para estudiar la estabilidad)

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$189.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$189.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 68.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 68.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

- La ganancia de estado estacionario del proceso que relaciona la temperatura de salida  $T_{1/2}$  con respecto a la temperatura de entrada al proceso de agua fría  $T_i$ :

$$K_T = \delta T_{1/2} / \delta T_i = G_T \text{ (o)}$$

$$K_T = \frac{[F c_{p25}]}{[c_{p50}(F+Q_c)]}$$

80



6.7.6

POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"  
F.I.M.C.P.

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}\text{ } \textcircled{1}$	$0.64\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}\text{ } \textcircled{1}$
$K_T = 0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}\text{ } \textcircled{2}$	$K_T = 0.64\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}\text{ } \textcircled{2}$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\begin{array}{rcc}
 & T_c = 80^\circ\text{C} & T_c = 200^\circ\text{F} \\
 K_T = & \begin{array}{l} 0 \quad ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \quad \textcircled{1} \\ 0 \quad ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \quad \textcircled{2} \end{array} & \begin{array}{l} 0.2 \quad ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \quad \textcircled{1} \\ 0.2 \quad ^\circ\text{C}/^\circ\text{C} \quad \textcircled{2} \end{array}
 \end{array}$$

El transmisor se puede representar mediante la siguiente relación lineal:

$$(T_{t_{1/2}} - 3)/(T_{1/2} - 0) = (15 - 3)/(100 - 0) \text{ psi}/^\circ\text{C}$$

$$T_{t_{1/2}} = 12/100 (T_{1/2} - 0) + 3$$

$$K_h = \delta T_{t_{1/2}} / \delta T_{1/2}$$

$$K_h = 0.12 \text{ psi}/^\circ\text{C} \quad 6.7.7$$

La ganancia del proceso a circuito abierto para un cambio en el flujo de agua caliente es:

$$K_{Q_c} = G_{Q_c}(o) = \delta T_{1/2} / \delta Q_c$$

y considerando  $F + Q_c = \text{constante}$ , de la ecuación 6.7.4

$$K_{Q_c} = \left[ \frac{c_{p80} T_c}{200} \right] / \left[ \frac{(F + Q_c) c_{p50}}{80} \right] \quad 6.7.8$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$K_{Qc} = 608.6 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$221.3 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_{Qc} = 712.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$258.9 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$K_{Qc} = 606.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$220.4 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_{Qc} = 709.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$257.9 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

O, considerando la figura 6.7.2, donde  $F + Q_c = C$  (constante)

$$K_{Qc} = T_c / (F + Q_c)$$

6.7.8a

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$K_{Qc} = 606.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$220.4 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_{Qc} = 707.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$257.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$K_{Qc} = 606.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$220.4 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_{Qc} = 707.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

$$257.1 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$$

### Válvula de Control

Linealizando u obteniendo la pendiente de la curva flujo de agua vs. % de apertura del actuador, para el rango de operación de la válvula:

$$Q_c [\%] = -3.4985 + 3.8824x - 0.0487x^2 + 0.0002x^3 \quad 6.7.9$$

$$\delta Q_c / \delta X = 3.8824 - 2 * 0.0487x + 3 * 0.0002x^2 \quad 6.7.10$$

Evaluando esta derivada en la posición de máximo cierre, ya que se trata de una válvula de apertura rápida:

$$\delta Q_c / \delta X \Big|_0 = 3.8824 \text{ \% / \%} \quad 6.7.11$$

Calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  se obtiene:

$$K_v = \delta Q_c / \delta X \Big|_0 = 3.8824 \text{ \% / \%} * (0.054 \text{ kg/seg} / 100\%) * (100\% / 12 \text{ psi})$$

$$K_v = 0.017 \text{ (Kg/seg)/psi.}$$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$K_v = 0.017 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

$$0.05 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_v = 0.015 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

$$0.042 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$K_v = 0.043 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

$$0.12 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_v = 0.034 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

$$0.094 \text{ (Kg/seg)/psi}$$

Considerando el diagrama de bloques de la figura 6.7.2, se observa que las relaciones de estado estacionario para un cambio en las temperaturas de salida  $\Delta T_1$  ó  $\Delta T_2$  de las perturbaciones:

a) Con un cambio en el flujo de agua fría en  $^\circ\text{C}/(\text{Kg/seg})$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = K_F / (1 + K_v K_c K_h K_{Qc}) \quad 6.7.12$$

Considerando  $K_F$ , como 6.7.5

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{189.7/(1+1.2Kc)}{69/(1+1.3Kc)}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{189.7/(1+1.3Kc)}{69/(1+1.3Kc)}$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{188.9/(1+3.1Kc)}{68.7/(1+3.2Kc)}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{188.9/(1+2.9Kc)}{68.7/(1+2.9Kc)}$$

O, considerando  $K_F$ , como 6.7.5a

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{189.4/(1+1.2Kc)}{68.9/(1+1.3Kc)}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{189.4/(1+1.3Kc)}{68.9/(1+1.3Kc)}$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:



$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{189.4/(1+3.1 K_c)}{68.9/(1+3.2 K_c)}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = \frac{189.4/(1+2.9 K_c)}{68.9/(1+2.9 K_c)}$$

b) Con un cambio en la temperatura de agua fría en °C/°C.

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = K_T / (1 + K_v K_h K_{Qc} K_c)$$

6.7.13

Para  $K_{Qc}$  como 6.7.8



Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = \frac{0.59/(1+1.24 K_c)}{0.55/(1+1.33 K_c)}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = \frac{0.64/(1+1.28 K_c)}{0.64/(1+1.3 K_c)}$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = 0 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$0 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = 0.2/(1+2.89K_c)$$

$$0.2/(1+2.91K_c)$$

Para  $K_{Qc}$  como 6.7.8a

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$0.59/(1+1.24K_c)$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = 0.55/(1+1.32K_c)$$

$$T_c = 200 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$0.64/(1+1.27K_c)$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = 0.64/(1+1.3K_c)$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = 0 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$0 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

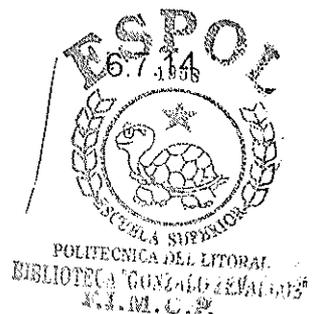
$$T_c = 200 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = 0.2/(1+2.88K_c)$$

$$0.2/(1+2.9K_c)$$

c) Con un cambio en el set-point o temperatura de fijación.

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = (K_v K_{Qc} K_{sp} K_c) / (1 + K_v K_h K_{Qc} K_c)$$



Para  $K_{Qc}$  como 6.7.8

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$T_c = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200\text{ }^{\circ}\text{F}$
$\frac{1.2 Kc}{(1+1.2Kc)}$	$\frac{1.3 Kc}{(1+1.3Kc)}$
$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = 1.3Kc / (1+1.3Kc)$	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = 1.3 Kc / (1+1.3Kc)$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$T_c = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200\text{ }^{\circ}\text{F}$
$\frac{3.1 Kc}{(1+3.1Kc)}$	$\frac{2.9Kc}{(1+2.9Kc)}$
$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = 3.2Kc / (1+3.2Kc)$	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = 2.9 Kc / (1+2.9Kc)$

Para  $K_{Qc}$  como 6.7.8a

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\frac{\Delta T_{1/2}}{\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}}} = \frac{1.2 K_c / (1 + 1.2 K_c)}{1.3 K_c / (1 + 1.3 K_c)}$$

$$\frac{\Delta T_{1/2}}{\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}}} = \frac{1.3 K_c / (1 + 1.3 K_c)}{1.3 K_c / (1 + 1.3 K_c)}$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$\frac{\Delta T_{1/2}}{\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}}} = \frac{3.1 K_c / (1 + 3.1 K_c)}{3.2 K_c / (1 + 3.2 K_c)}$$

$$\frac{\Delta T_{1/2}}{\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}}} = \frac{2.9 K_c / (1 + 2.9 K_c)}{2.9 K_c / (1 + 2.9 K_c)}$$

d) Con un cambio de temperatura de agua caliente:

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_c = K_{T_c} / (1 + K_v K_h K_{Q_c} K_c) \quad 6.7.15$$

- La ganancia de estado estacionario del proceso de la temperatura de salida  $T_{1/2}$  con respecto a la temperatura de entrada de agua caliente  $T_c$ :

$$G_{T_c}(0) = K_{T_c} \quad 6.7.16$$

$$K_{T_c} = \delta T_{1/2} / \delta T_c \text{ aplicada a la ecuación 6.7.4}$$

$$K_{T_c} = (Q_c c_{p_{80}}) / [c_{p_{50}}(F + Q_c)] \quad 6.7.16a$$

Substituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_{T_c} = 0.41^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$0.45^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$K_{T_c} = 0.36^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$0.36^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

Substituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$K_{T_c} = 1^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$1^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$K_{T_c} = 0.8^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

$$0.8^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$$

De acuerdo a 6.7.16a, con  $K_{Q_c}$  como 6.7.8

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_c = 0.41 / (1 + 1.24K_c)$$

$$0.45 / (1 + 1.33K_c)$$

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_c = 0.36 / (1 + 1.28K_c)$$

$$0.36 / (1 + 1.3K_c)$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$\begin{array}{l} \Delta T_{1/2}/\Delta T_c = 1/(1+3.1Kc) \\ 1/(1+3.2Kc) \end{array} \qquad \begin{array}{l} \Delta T_{1/2}/\Delta T_c = 0.8/(1+2.9Kc) \\ 0.8/(1+2.9Kc) \end{array}$$

De acuerdo a 6.7.16a, con  $K_{Qc}$  como 6.7.8a

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$\begin{array}{l} \Delta T_{1/2}/\Delta T_c = 0.41/(1+1.24Kc) \\ 0.45/(1+1.32Kc) \end{array} \qquad \begin{array}{l} \Delta T_{1/2}/\Delta T_c = 0.36/(1+1.3Kc) \\ 0.36/(1+1.3Kc) \end{array}$$

Reemplazando, resolviendo para  $T_{1/2} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  y observando la compatibilidad de unidades:

$$\begin{array}{l} \Delta T_{1/2}/\Delta T_c = 1/(1+3.1Kc) \\ 1/(1+3.2Kc) \end{array} \qquad \begin{array}{l} \Delta T_{1/2}/\Delta T_c = 0.8/(1+2.9Kc) \\ 0.8/(1+2.9Kc) \end{array}$$

### 3. Equipos y materiales.

- La unidad de control de temperatura lista para funcionar, para las condiciones de trabajo especificadas en el literal anterior.

- Desarmadores planos y de estrella, para fijar  $T_c$  en el termostato.
- Protectores contra la temperatura para las manos, para maniobrar las partes más calientes de la unidad como tuberías y válvulas.
- Cartas y tinta de registro.
- Esferográfico, para escribir sobre la carta de registro, la ganancia del controlador en control proporcional que reduce al valor mínimo el error, para las condiciones de trabajo establecidas.

#### 4. Procedimiento.

- Alistar la unidad de temperatura para las condiciones de trabajo predeterminadas.
- Empezar con el control proporcional de temperatura  $T_1 ( t )$ , a continuación de los serpentines y a la entrada del tanque de proceso, y observar como debería variar la ganancia, sintonizada en el controlador para eliminar el error existente.

- Observar la respuesta  $T_2 ( t )$ , en el tanque de proceso, al sintonizar la ganancia en control proporcional, para tratar de eliminar el error.
- Bosquejar el diagrama de bloques correspondiente y obtener las ecuaciones para el estado estable.
- Tabular los resultados teóricos y compararlos con los resultados experimentales obtenidos.

#### 5. Preguntas.

- a) ¿ Qué sucedería con la ganancia del controlador al tratar de eliminar el error si disminuyéramos el flujo de alimentación hacia el sistema de control, sin variar las condiciones de trabajo (flujo de salida igual al flujo de entrada)?.
- b) ¿ Si la ganancia de la válvula aumentara, que sucedería con la ganancia necesaria en el controlador para sintonizar la unidad y tratar de eliminar el error existente?.

## 6. Análisis de Resultados

- La ganancia de la válvula aumenta con el aumento del flujo.

De los diagramas de bloques obtenidos para las condiciones dinámicas, se recomienda hacer  $s = 0$ , ya que  $t \rightarrow \alpha$ , y así obtener el diagrama de bloques para las condiciones estables.

De acuerdo a los resultados tabulados en 6.7.1 y recordando que se trata de un análisis de estado estable:

- Se observa que el cambio de la temperatura de salida debido a las perturbaciones como el cambio de: temperatura y flujo de agua fría, temperatura y flujo de agua caliente se aproximan a cero con el aumento de la ganancia del controlador.
- Se observa que el cambio de la temperatura de salida debido a un cambio en el punto de control, al contrario, se aproxima a la unidad con el aumento de la ganancia del controlador.
- Se observa también que para las condiciones dadas de trabajo, para una ganancia desde 10 en adelante en general, empieza a reducirse el error hasta que la temperatura de salida se sitúe cerca de la temperatura de fijación con la limitante de la

T <sub>c</sub> ( °C ) = 80											
T <sub>1/2</sub> ( °C ) = 50											
Kc	$\Delta T_{1/2}/\Delta F$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta F$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta Ti$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta Ti$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①
psi/psi	°C/Kg/seg	°C/Kg/seg	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C
0,5	118,38	41,76	0,36	0,33	0,38	0,39	0,25	0,18	0,06	0,03	0,02
1	86,09	29,96	0,26	0,24	0,55	0,57	0,18	0,06	0,03	0,02	0,01
5	27,06	9,19	0,08	0,07	0,86	0,87	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00
10	14,57	4,92	0,04	0,04	0,92	0,93	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
20	7,58	2,55	0,02	0,02	0,96	0,96	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
50	3,10	1,04	0,01	0,01	0,98	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	1,57	0,53	0,00	0,00	0,99	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T <sub>1/2</sub> ( °C ) = 80											
Kc	$\Delta T_{1/2}/\Delta F$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta F$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta Ti$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta Ti$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ②	$\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{110}$ ①
psi/psi	°C/Kg/seg	°C/Kg/seg	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C
0,5	74,27	26,50	0,00	0,00	0,61	0,62	0,39	0,24	0,06	0,03	0,02
1	46,20	16,40	0,00	0,00	0,76	0,76	0,24	0,06	0,03	0,02	0,01
5	11,48	4,05	0,00	0,00	0,94	0,94	0,06	0,03	0,02	0,01	0,00
10	5,92	2,09	0,00	0,00	0,97	0,97	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
20	3,01	1,06	0,00	0,00	0,98	0,98	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
50	1,21	0,43	0,00	0,00	0,99	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,61	0,21	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota: ① con F + Qc = 8 lit/min

② con F + Qc = 22 lit/min

Tabla 6.7.1a Resultados para valores de Kc, debido a perturbaciones en la respuesta del sistema de control

Tc ( °F ) = 200											
T <sub>1/2</sub> ( °C ) = 50											
Kc	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔF <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔF <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTi <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTi <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>③</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>③</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>④</sup>
psi/psi	°C/Kg/seg	°C/Kg/seg	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C
0.5	114.79	41.76	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.22
1	82.35	29.96	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.16
5	25.25	9.19	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.05
10	13.53	4.92	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03
20	7.01	2.55	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
50	2.87	1.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
100	1.45	0.53	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
T <sub>1/2</sub> ( °C ) = 80											
Kc	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔF <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔF <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTi <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTi <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>③</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>①</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>②</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>③</sup>	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔTc <sup>④</sup>
psi/psi	°C/Kg/seg	°C/Kg/seg	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C
0.5	77.31	28.12	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.33
1	48.56	17.67	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.21
5	12.22	4.45	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
10	6.31	2.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
20	3.21	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
50	1.30	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
100	0.65	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: ① con F + Qc = 8 lit/min  
 ② con F + Qc = 22 lit/min

Tabla 6.7.1b Resultados para valores de Kc, debido a perturbaciones en la respuesta del sistema de control



estabilidad del circuito. Es decir, el sistema se vuelve muy oscilatorio, con amplitud constante o variable cerca del valor fijado, según los resultados obtenidos en las pruebas.

- En cualquier caso, si solo existiera la perturbación dada por el cambio en los flujos de agua fría o agua caliente o el cambio en el punto de control, los resultados no variarían con respecto a la ganancia estimada, para las mismas condiciones de trabajo.
- Experimentalmente se logró obtener ganancias superiores a 10 como el valor de 18 aproximadamente, para alcanzar la respuesta oscilatoria cerca del set-point, para el control con TIT1.
- Experimentalmente se logró obtener ganancias altas como de 50 en adelante, para alcanzar la respuesta oscilatoria cerca del set-point, para el control con TIT2.

Con lo cuál demostramos que los resultados teóricos con los resultados experimentales se asemejan bastante y por lo tanto, pueden ser aceptados con cierto grado de confianza.

- Nuestra unidad de temperatura avisa por ruido como golpeteo en las tuberías y variaciones de presión de aire, cuando bajo ciertas condiciones de trabajo y a una determinada ganancia el sistema comienza a responder al control.
- Finalmente se recomienda, no fijar el termostato a temperaturas superiores de 200 °F, para la temperatura del agua caliente ya que produciría vapor en el interior del tanque calentador aumentando la presión haciendo que este colapse. Además elegir una franja de control pequeña y adecuada para reducir la variación de la temperatura  $T_c$ , si es que no deseamos esta perturbación.

## 6.8 Métodos de ajuste del controlador neumático

### 1. Objetivos

- a) Presentación, familiarización y pruebas del sistema de control neumático de temperatura.
- b) A partir de un balance de energía aplicado al sistema de control por retroalimentación, obtener las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico del sistema construyendo el diagrama de bloques y hacer el análisis de la estabilidad por medio de los criterios conocidos.
- c) Aplicación de los métodos de ajuste más utilizados del controlador registrador neumático del lazo en consideración.

### 2. Fundamentos teóricos

Los componentes básicos de los sistemas de control son los sensores, los transmisores, los controladores y los elementos finales de control; de tales componentes básicos se obtienen las tres operaciones básicas de todo sistema de control: **Medición (M)**, **Decisión (D)**, y **Acción (A)**.

## Sensores y transmisores

Los sensores y transmisores realizan las operaciones de medición en el sistema de control. En el sensor se produce un fenómeno eléctrico, mecánico o análogo, el mismo que se relaciona con la variable de proceso que se mide; el transmisor, toma la señal del sensor y convierte este fenómeno en una señal que se puede transmitir, por consiguiente tiene relación con la variable de proceso.

Como hemos estudiado, existen tres términos importantes que se relacionan con la combinación *sensor/transmisor*: **la escala, el rango y el cero** del instrumento. A la escala del instrumento la definen los valores superior e inferior de la variable a medir del proceso; esto es, si se considera que un sensor transmisor se calibra para medir la temperatura entre 0°C y 100°C de un proceso, se dice que la escala de la combinación sensor/transmisor es de 0 - 100°C.

En otras palabras, para definir la escala del instrumento se deben especificar un valor superior y otro inferior; es decir, es necesario definir dos números; mientras que el rango es la diferencia entre

los dos valores. En tanto que al valor inferior se lo conoce como cero del instrumento, este valor no necesariamente debe ser cero para llamarlo así; en nuestra unidad el cero del instrumento es 0°C.

Para el análisis del sistema algunas veces es importante obtener los parámetros con que se describe el comportamiento del sensor/transmisor, la ganancia se puede obtener una vez que se conoce el rango. Considérese un sensor/transmisor neumático de presión cuya escala va de 0 - 100°C; la ganancia, por definición, es el cambio en la salida o variable de respuesta entre el cambio en la entrada o función de forzamiento. En este ejemplo, la salida es la señal neumática de 3-15 psi y la entrada es la temperatura en el proceso, 0 - 100°C, por tanto:

$$K_h = (15 \text{ psi} - 3 \text{ psi}) / (100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 12 \text{ psi} / 100^\circ\text{C} = 0.12 \text{ psi} / ^\circ\text{C}$$

Se puede decir que la ganancia del sensor/transmisor es la relación del rango de la entrada respecto al rango de la salida; siendo esta ganancia constante, sobre todo el rango de operación, lo cual es cierto para la mayoría de los sensores/transmisores; sin embargo, existen algunos casos en

que esto no es cierto, por ejemplo, en el sensor diferencial de presión que se usa para medir flujo.

La respuesta dinámica de la mayoría de los sensores/transmisores es mucho más rápida que la del proceso, en consecuencia, sus constantes de tiempo y tiempo muerto se pueden considerar despreciables y, por tanto, su función de transferencia la da la ganancia pura; sin embargo, cuando se analiza la dinámica, la función de transferencia del instrumento generalmente se representa mediante un sistema de primer o segundo orden:

$$G_h(s) = K_h / (\tau s + 1) \quad \text{ó}$$

$$G_h(s) = K_h / (\tau^2 s^2 + 2\tau\xi s + 1)$$

Los parámetros dinámicos se obtienen casi siempre de manera empírica.

### **Controladores por retroalimentación**

Los controladores industriales son el "**cerebro**" del circuito de control. Se dice que es el dispositivo que toma la decisión ( **D** ) en el sistema de control y, para hacerlo, el controlador:

- a) Compara la señal del proceso que llega del transmisor, la variable que se controla contra el punto de control y,
- b) envía la señal apropiada a la válvula de control, o cualquier otro elemento final de control para mantener la variable que se controla en el punto de control.

### **Tipos de controladores por retroalimentación**

Los tipos más comunes de controladores describen su operación por medio de sus ecuaciones respectivas.

**Controlador proporcional (P).**- Este controlador es del tipo más simple y la ecuación que describe su funcionamiento es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c [r(t) - c(t)] \quad \text{Acción inversa}$$

y,

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t)$$

Donde:  $m(t)$  = salida del controlador, psig.

$r(t)$  = punto de control, °C (psig).

$c(t)$  = variable que se controla, psig; esta es la señal de salida del transmisor

$e(t)$  = señal de error, psi;

$K_c$  = ganancia o sensibilidad del controlador, psi/psi

$m$  = valor base, psig. El significado de este valor es la salida del controlador cuando el error es cero; generalmente se fija durante la calibración del controlador, en el medio de la escala, 9 psig.

Ya que los rangos de entrada y salida son los mismos (3 - 15 psig), algunas veces las señales de entrada y salida, así como el punto de control se expresan en porcentaje o fracción de rango.

Los controladores industriales que son únicamente proporcionales tienen la ventaja que solo cuentan con un parámetro de ajuste,  $K_c$ , sin embargo tienen una desventaja, operan con una **desviación**, o "**error de estado estacionario**" en la variable que se controla, como lo muestran los resultados experimentales en los gráficos 6.8 (de los discos), en control puramente proporcional.



El controlador lleva de nuevo a la variable a un valor estacionario pero este valor no es el punto de control requerido; la diferencia entre el punto de control y el valor de estado estacionario de la variable que se controla es la desviación.

En los resultados experimentales, también se puede observar que cuanto mayor es el valor de  $K_c$ , tanto menor es la desviación, pero la respuesta del proceso se hace más oscilatoria; sin embargo, para la mayoría de los procesos existe un valor máximo de  $K_c$ , más allá del cuál el proceso se hace inestable. Existen formas de calcular el valor máximo de la ganancia, que es básicamente uno de los objetivos de esta práctica y que se presentarán más adelante. A este valor máximo se lo conoce como *ganancia última*,  $K_{cu}$ .

Muchos fabricantes de controladores no utilizan el término ganancia para designar la cantidad de sensibilidad del controlador, y utilizan el término banda proporcional,  $PB$ . La relación entre la ganancia y la banda proporcional se expresa mediante:

$$PB = 100 / Kc$$

Se utiliza el término "100" porque la PB se conoce generalmente como "*porcentaje de banda proporcional*".

La ecuación con que se describe al controlador proporcional, se escribe ahora de la siguiente forma:

$$m(t) = \bar{m} + 100 / PB [r(t) - c(t)]$$

$$m(t) = \bar{m} + 100 / PB [e(t)]$$

Para obtener la función de transferencia del controlador proporcional, la ecuación, que define la salida de nuestro controlador, se puede escribir:

$$m(t) - \bar{m} = Kc [e(t) - 0]$$

Y se pueden definir las siguientes variables de desviación:

$$M(t) = m(t) - \bar{m}$$

$$E(t) = e(t) - 0$$

**Serpentin R<sub>3</sub>**

Datos.- Para cañería de cobre de Ø 3/8" en diámetro nominal:

$$D_i = 0,494 \text{ pulg,}$$

$$A_t = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$L = 6,62 \text{ m,}$$

$$Q = 5,1 \text{ lit/min.}$$

$$t_{03} = 9,7 \text{ seg.}$$

Por otro lado, la respuesta  $T_1(s)$  de primer orden con tiempo muerto de un sistema ante una entrada en escalón  $T_i(s)$  es:

$$T_1(s)/T_i(s) = K_1 e^{-t_0 s} / (\tau s + 1)$$

- De acuerdo al gráfico 6.6.1a,

$$\bar{T}_i + f = 80 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$\bar{T}_i = 50 \text{ }^\circ\text{C,}$$

$$t_{01} = 2 \text{ seg,}$$

$$\tau_1 = 2,1 \text{ seg,}$$

entonces,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$



$$\bar{T}_1 + K_1 f = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

entonces,  $K_1 = 0,933$ .

En consecuencia, la función de transferencia para  $R_1$ , de primer orden, para la respuesta de  $T_1(s)$  a una perturbación  $T_i(s)$ , será:

$$T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-2,0s}/(2,1s+1)$$

- De acuerdo al gráfico 6.6.1b,

$$\bar{T}_i + f = 80 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_i = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{02} = 5,5 \text{ seg},$$

$$\tau_1 = 3,6 \text{ seg},$$

entonces,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\bar{T}_1 + K_1 f = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$f = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

entonces,  $K_1 = 0,933$



Por consiguiente, la función de transferencia para  $R_2$ , de primer orden, para la respuesta de  $T_1(s)$  a una perturbación  $T_i(s)$ , será:

$$T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-5,5s}/(3,6s+1)$$

- De la misma forma, respecto del gráfico 6.6.1c,

$$\bar{T}_i + f = 80 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_i = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_{03} = 9,0 \text{ seg},$$

$$\tau_1 = 4,0 \text{ seg},$$

entonces,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$\bar{T}_1 + K_1 f = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\bar{T}_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$f = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

entonces,  $K_1 = 0,933$

Consecuentemente, la función de transferencia para  $R_3$ , de primer orden, para la respuesta de  $T_1(s)$  a una perturbación  $T_i(s)$ , será:

$$T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-9,0s}/(4,0s+1)$$

Se puede utilizar la aproximación de Padé de primer orden para evaluar  $e^{-t_0s}$ :

$$e^{-t_0s} = (1-1/2t_0s)/(1+1/2t_0s)$$

o la aproximación de primer orden en serie de Taylor para procesos rápidos:

$$e^{-t_0s} = 1 - t_0s$$

con lo cuál, la respuesta quedaría expresada:

$$T_1(s)/T_i(s) = K_1(1 - t_0s)/(\tau_1s + 1)$$

Sin embargo, evaluaremos las respuestas anteriormente obtenidas, para un forzamiento en escalón de 30°C:

$$a) T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-2,0s}/(2,1s+1) = 0,933(1 - 2s)/(2,1s+1)$$

$$b) T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-5,5s}/(3,6s+1) = 0,933(1 - 5,5s)/(3,6s+1)$$

$$c) T_1(s)/T_i(s) = 0,933 e^{-9,0s}/(4,0s+1) = 0,933(1 - 9s)/(4s+1)$$

Para una función de forzamiento:  $T_i(t) = 30 u(t)$ ,

en el dominio de Laplace :  $T_i(s) = 30/s$

Aplicando la transformada inversa a cada una de las respuestas tenemos:

$$a) T_1(s) = [0,933 e^{-2s} / (2,1s+1)] \cdot T_i(s)$$

$$= [0,933 e^{-2s} / (2,1s+1)] \cdot 30/s$$

$$T_1(s) = 27,99 e^{-2s} / [s(2,1s+1)] = [e^{-2s}/s] \cdot [27,99/(2,1s+1)]$$

Siendo:

$f(s) = e^{-2s}/s$  y  $g(s) = 27,99/(2,1s+1)$ , y aplicando las propiedades de la transformada inversa, tenemos:

$$T_1(t) = 27,99[1 - e^{-0,48(t-2)}] \text{ ó,}$$

$$T_1(t) = \overline{T_1} + 27,99[1 - e^{-0,48(t-2)}]$$

Es decir:

$$T_1(t) = \overline{T_1} + 27,99 [1 - e^{-1/\tau_1(t-t_0)}]$$

$$T_1(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,48(t-2)}]$$

De esta manera, obtendremos las tres respuestas aproximadas, en función del tiempo en segundos, de las condiciones de retardo A de primer orden, ante una entrada en escalón:

$$a) T_1(t) = 50 + 27,99 [1 - e^{-0,48(t-2)}]$$

$$b) T_1(t) = 50 + 27,99 [1 - e^{-0,28(t-5,5)}]$$

$$c) T_1(t) = 50 + 27,99 [1 - e^{-0,25(t-9)}]$$

Similarmente, se obtiene la respuesta en función del tiempo en minutos, para las condiciones de retardo B de primer orden, ante una entrada en escalón:

$$T_2(t) = \overline{T_2} + 27,99 [1 - e^{-1/\tau_2(t-t_0)}]$$

Empezando por obtener la respuesta  $T_2(s)$  de primer orden con tiempo muerto de un sistema ante una entrada en escalón  $T_i(s)$ :

$$T_2(s) / T_i(s) = K_2 e^{-t_0 s} / (\tau_2 s + 1)$$

Donde, según los gráficos 6.6.2,  $f = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $K_2 = 0,933$ ,  $T_i(s) = 30/s$

y

a)  $t_0 = 3 \text{ seg (0,05 min)}, \tau_2 = 2 \text{ min},$

b)  $t_0 = 7 \text{ seg(0,12 min)}, \tau_2 = 2 \text{ min y}$

c)  $t_0 = 10 \text{ seg (0,17 min)}, \tau_2 = 2 \text{ min.}$

Entonces, correspondientemente:

$$\text{a) } T_2(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,5(t - 0,05)}]$$

$$\text{b) } T_2(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,5(t - 0,12)}]$$

$$\text{c) } T_2(t) = 50 + 27,99[1 - e^{-0,5(t - 0,17)}]$$

Otra forma de determinar las salidas  $T_2(t)$ , aproximadas, es considerando la figura 6.6.3, donde se presenta el diagrama de bloques para un sistema de orden superior formado por los bloques de primer orden de las condiciones A y B (figs.: 6.6.1 y 6.6.2).

De esta manera se obtiene la función de transferencia para este modelo de orden superior con tiempo muerto:

$$T_2(s)/T_i(s) = [K_1 \cdot K_2 e^{-t_0 s}]/[(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1)]$$

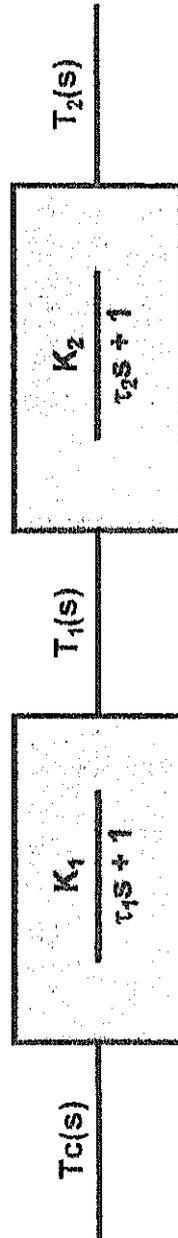


Fig. 6.6.3a Diagrama de bloques para el modelo de orden superior para las condiciones de retardo A y B combinadas

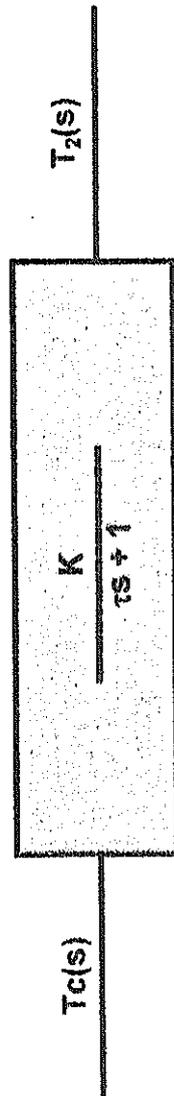


Fig. 6.6.3b Diagrama de bloques para un modelo de primer orden aproximado, para las condiciones de retardo A y B combinadas, con tiempo muerto



Aproximando la expresión anterior, a una de primer orden,

tenemos:

$$T_2(s)/T_i(s) = (K e^{-t_0 s})/(\tau s + 1)$$

Donde:

$$- K = K_1 * K_2 = 0,87$$

$$= 0,933 * 0,933$$

$$K = 0,87$$

$$- \tau = \tau_2 \text{ (se escoge el valor mucho mayor)}$$

$$\tau = 2 \text{ min}$$

$$- t_0 = t_{01}, t_{02} \text{ y } t_{03} \text{ (se evalúan las tres salidas para los tres serpentines)}$$

$$t_0 = 3 \text{ seg (0,05 min), 7 seg(0,12 min), y 10 seg(0,17 min)}$$

$$- \text{La excitación como ya sabemos es } T_i(s) = 30/s$$

Las expresiones obtenidas en el dominio de "s" serán:

$$a) T_2(s) = (0,87 e^{-0,05s})/(2s + 1) \cdot 30/s$$

$$b) T_2(s) = (0,87 e^{-0,12s})/(2s + 1) \cdot 30/s$$

$$c) T_2(s) = (0,87 e^{-0,17s})/(2s + 1) \cdot 30/s$$

Y las correspondientes expresiones en función del tiempo tendrán

la forma:

$$T_2(t) = \overline{T}_2 + [1 - e^{-1/\tau_2 (t-t_0)}]$$

a)  $T_2(t) = 50 + 26,11[1 - e^{-0,5(t-0,05)}]$

b)  $T_2(t) = 50 + 26,11[1 - e^{-0,5(t-0,12)}]$

c)  $T_2(t) = 50 + 26,11[1 - e^{-0,5(t-0,17)}]$

Lo que confirma los resultados anteriormente obtenidos.

## 6. Preguntas

a) ¿Cómo sería la función de transferencia para la respuesta de  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$  a un forzamiento en rampa de  $T_c(t)$ , para las condiciones de **retardo A y B**, en las mismas condiciones de perturbación?

b) Obtener  $T_1(t)$  a partir de la función de transferencia  $T_1(s)$  /  $T_c(s)$  obtenida del literal n) y si es necesario aplicar la aproximación de Padé, para el forzamiento en rampa.

- c) Evaluar el valor de  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$ , para el tiempo de 2 seg y 2 min, respectivamente, desde los resultados tabulados en 6.6.3.

**Nota:** Obtener los resultados y analizarlos.

## 7. Análisis de Resultados

- a) Experimentalmente se demuestra que, para un mayor diámetro o mayor longitud de serpentín, el tiempo muerto debe aumentar.
- b) Para las condiciones de retardo existentes, el tiempo de muerto es pequeño y se demuestra que no existe proporcionalidad directa entre este valor y el de la constante de tiempo de los serpentines.
- c) Las condiciones de retardo existentes influyen en la respuesta del proceso, pero su extensión no es considerable, comparado con la duración de la respuesta que tiene el mismo.
- d) Para las condiciones establecidas, se obtiene una gran rapidez de reacción en los serpentines y por lo tanto su

SERPENTIN	$\phi$ int.		L (m)	Q (m <sup>3</sup> /s) *10 <sup>-5</sup>	t <sub>o</sub> (seg.)		$\tau$ (seg.)
	(pulg.)	(m)			teórico	experimental	
R <sub>1</sub>	0,622	0,0158	0,6	8,5	1,4	2,0	2,1
R <sub>2</sub>	0,4345	0,0110	5,34	8,5	6,01	5,5	3,6
R <sub>3</sub>	0,494	0,0126	6,62	8,5	9,7	9,0	4,0



Tabla 6.6.1 Resultados teóricos y experimentales para las condiciones de retardo A

SERPENTIN	Ønt.		L (m)	Q*10 <sup>-6</sup> (m <sup>3</sup> /s)	t <sub>0</sub> (seg.)	τ (min.)
	(pulg.)	(m)				
R <sub>1</sub>	0,622	0,0158	0,6	8,5	3	2
R <sub>2</sub>	0,4345	0,0110	5,34	8,5	7	2
R <sub>3</sub>	0,494	0,0126	6,62	8,5	10	2

Tabla 6.6.2 Resultados obtenidos para la respuesta a la perturbación sobre el proceso en las condiciones de retardo B

Retardo	to	CONDICION A				
		1 <sup>er</sup> orden				
		teórico	K <sub>1</sub>	f	t <sub>0</sub>	τ <sub>1</sub>
seg		°C	seg	seg	°C	
R <sub>1</sub>	1,4	0,933	30	2	2,1	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,48(t-2)</sup> ]
R <sub>2</sub>	6,01	0,933	30	5,5	3,6	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,28(t-5,5)</sup> ]
R <sub>3</sub>	9,7	0,933	30	9	4	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,25(t-9)</sup> ]
Retardo	to	CONDICION B				
		1 <sup>er</sup> orden				
		teórico	K <sub>2</sub>	f	t <sub>0</sub>	τ <sub>2</sub>
seg		°C	min	min	°C	
R <sub>1</sub>	1,4	0,933	30	0,05	2	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,6(t-0,05)</sup> ]
R <sub>2</sub>	6,01	0,933	30	0,12	2	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,6(t-0,12)</sup> ]
R <sub>3</sub>	9,7	0,933	30	0,17	2	50 + 27,99[1 - e <sup>-0,5(t-0,17)</sup> ]
Retardo	to	CONDICION A y B				
		2 <sup>do</sup> orden a 1 <sup>er</sup> orden				
		teórico	K	f	t <sub>0</sub>	τ
seg		°C	min	min	°C	
R <sub>1</sub>	1,4	0,87	30	0,05	2	50 + 26,11[1 - e <sup>-0,5(t-0,05)</sup> ]
R <sub>2</sub>	6,01	0,87	30	0,12	2	50 + 26,11[1 - e <sup>-0,5(t-0,12)</sup> ]
R <sub>3</sub>	9,7	0,87	30	0,17	2	50 + 26,11[1 - e <sup>-0,6(t-0,17)</sup> ]

Tabla 6.6.3 Respuestas obtenidas en función del tiempo ante una perturbación escalón, aplicada sobre cada condición de retardo: A, B, A y B

constante de tiempo es pequeña, con un valor mayor de hasta 4 segundos; al contrario con la respuesta del proceso, cuyo valor es mucho mayor, del orden de 2 minutos. El mayor valor de tiempo muerto obtenido en los serpentines es de 9 segundos, y el mayor valor del tiempo empleado para alcanzar la estabilidad en ellos, luego de la perturbación aplicada es de 13 segundos; estos resultados fueron obtenidos en el serpentín R3.

- e) Se comprueba que el retardo varía la respuesta  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$
- f) Se observa que, bajo ciertas condiciones de trabajo establecidas, cada serpentín posee su propia constante de tiempo y el proceso también.
- g) En este caso, se puede aproximar un modelo de orden superior con retardo, constituidos por dos modelos de primer orden con retardo, los cuales son: 1. Los serpentines y 2. El proceso.
- h) Se comprueba que el modelo de orden superior se puede aproximar a un modelo de primer orden con tiempo muerto.

- i) Para el modelo de orden superior, estableciendo las mismas condiciones de trabajo, sólo el tiempo muerto afecta la respuesta.
- j) De los valores teóricos y los valores experimentales, al respecto del tiempo muerto, según los resultados obtenidos y tabulados en 6.6.1 y 6.6.2, se observa consistencia.
- k) Se recomienda aumentar cambiando el diámetro de la tubería de descarga a continuación del tanque de proceso. Para un mejor análisis, evitar procesos muy lentos y rebose en el tanque de proceso.

## 6.7. Efecto de las perturbaciones en la respuesta del sistema de control

### 1. Objetivos

- a) Con base a un sistema de control ideal y un balance de energía de estado estable, estudiar el efecto de las perturbaciones en la respuesta de la temperatura de control para cada uno de los casos existentes en las condiciones de diseño del sistema de control real.
- b) Observar como influye el incremento de flujo de alimentación de la bomba y por consiguiente la velocidad de reacción de un sistema, en el ajuste de la ganancia del controlador, sin variar las condiciones establecidas de trabajo.
- c) Obtener los diagramas de bloques que describirán el comportamiento dinámico para las posibilidades de trabajo que puedan existir, hasta obtener el diagrama final de bloques que utilizaremos, de acuerdo a las perturbaciones a utilizar en nuestra unidad de control y a partir de ellos obtener el diagrama de bloques de estado estable.

## 2. Fundamentos teóricos

La figura 6.7.1 que se muestra, nos sirve para obtener el balance de energía y determinar la temperatura de mezcla  $T_1(t)$  ó  $T_2(t)$  de un sistema ideal aplicado al sistema real de control.

**Solución:** Suponer que las pérdidas de calor son despreciables como primera aproximación para esta unidad.

Se desea saber, cual es el flujo de agua caliente aproximado que se necesita para las siguientes condiciones de trabajo:

- Flujo de alimentación de la bomba regulado desde la válvula HV10, igual al flujo de salida para el sistema correspondiente:  
 $[F(t) + Q_c(t)] =$   
 8 litros/minutos = Flujo máximo de descarga [para el control de  $T_{1/2}(t)$ ].  
 22 litros/minutos = Flujo máximo de la bomba [solo para el control de  $T_1(t)$ ].
- Cuando se desee controlar la temperatura  $T_2(t)$ , fijar el nivel del agua en el tanque de proceso en 40 cm.



POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"  
F.I.M.C.P.

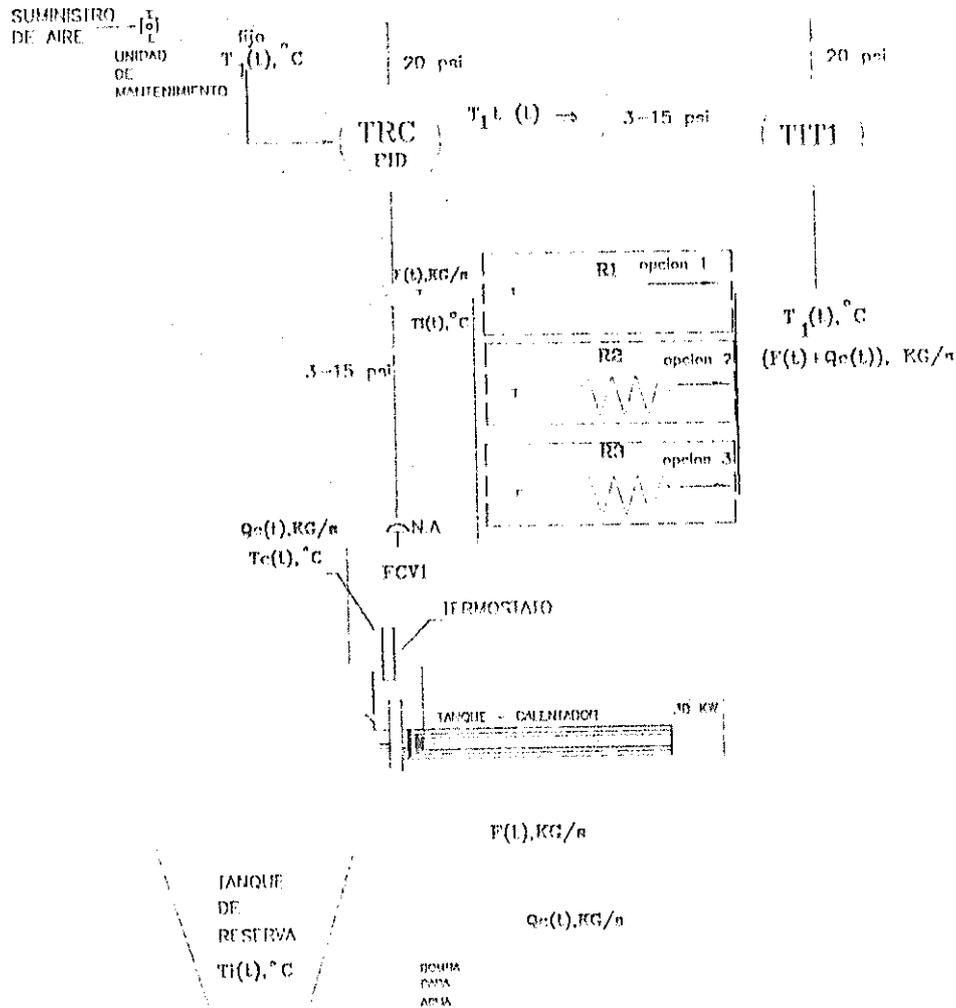


FIG. 6.7.1a CIRCUITO DE CONTROL POR RETROALIMENTACION PARA CONTROLAR LA TEMPERATURA DE MEZCLA EN LOS SERPENTINES  $R_1, R_2, R_3, T_1(t)$



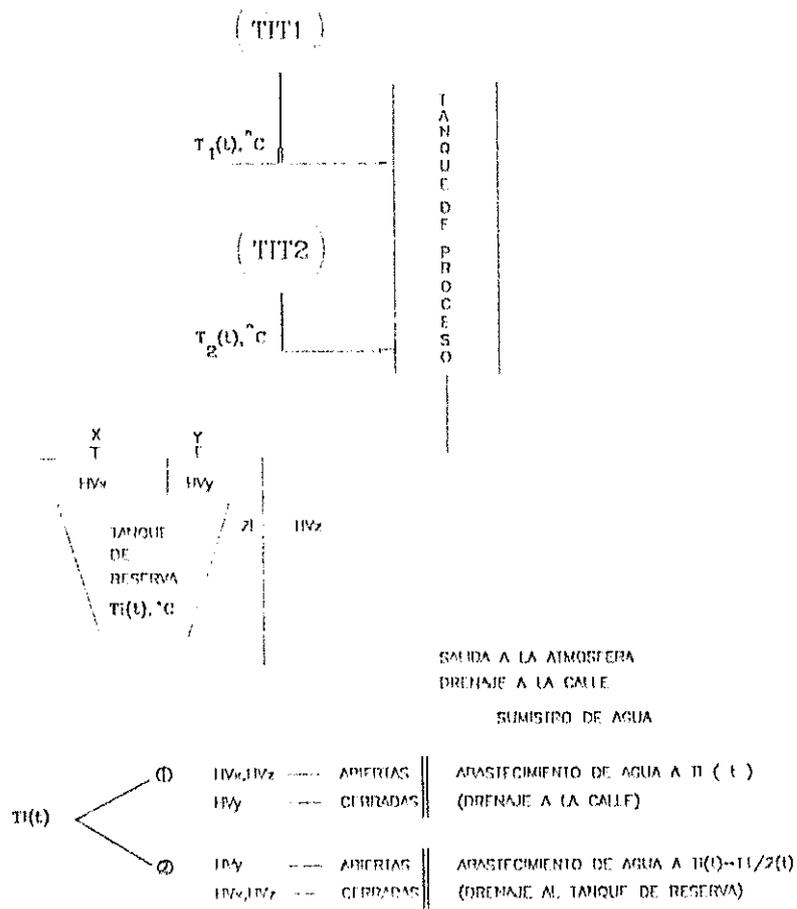


FIG. 6.7.1c OPCIONES PARA ESTABLECER  $T_i(t)$ .

- Temperatura de mezcla o producto (temperatura de control) a la salida del proceso.

$$T_{1/2}(t) = 50^{\circ}\text{C}(122^{\circ}\text{F}) \text{ ó } T_{1/2}(t) = 80^{\circ}\text{C}(176^{\circ}\text{F})$$

$$T_{1/2}(t) = T_1(t) \text{ ó } T_2(t)$$

$$cp_{50} = cp \text{ a } 50^{\circ}\text{C} \text{ ó } cp \text{ a } 80^{\circ}\text{C}$$

80

$$cp_{80} = cp \text{ a } 80^{\circ}\text{C} \text{ ó } cp \text{ a } 200^{\circ}\text{F}$$

200



- La temperatura de agua fría y por lo tanto del flujo de alimentación se mantiene constante en circuito abierto.

$$T_i(t) = 25^{\circ}\text{C} (77^{\circ}\text{F}).$$

- Se desea setear el termostato a una temperatura menor del punto de ebullición (por seguridad) y una franja pequeña para que  $T_c$  no varíe y se pueda considerar constante, por ejemplo:

$$T_c(t) = 80^{\circ}\text{C} (176^{\circ}\text{F}) \text{ ó } T_c(t) = 200^{\circ}\text{F}$$

- Las condiciones auxiliares son:

$$C_p(25^{\circ}\text{C}) = 1.0003 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(25^{\circ}\text{C}) = 996.78 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$C_p(50^{\circ}\text{C}) = 0.99888 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(50^{\circ}\text{C}) = 987.76 \text{ "}$$

$$C_p(80^{\circ}\text{C}) = 1.00312 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(80^{\circ}\text{C}) = 971.53 \text{ "}$$

$$C_p(200^{\circ}\text{F}) = 1.006 \text{ Btu}/(\text{lb}^{\circ}\text{F}); \rho(200^{\circ}\text{F}) = 962.6 \text{ "}$$



La ecuación de balance de energía es:

$$[F(t) + Q_c(t)] C_{p_{80}} T_{1/2}(t) = F(t) C_{p_{25}} T_i(t) + Q_c(t) C_{p_{80}} T_c(t) \quad 6.7.1$$

Despejando Qc, resulta:

$$Q_c = [F(C_{p_{25}} T_i - C_{p_{80}} T_{1/2})] / [C_{p_{80}} T_{1/2} - C_{p_{80}} T_c] \quad 6.7.2$$

Pero F, puede tener 2 condiciones de acuerdo al flujo de alimentación escogido.

$$F[\text{litros/min.}] = \begin{matrix} 8 & - & Q_c & \textcircled{1} \\ 22 & - & Q_c & \textcircled{2} \end{matrix}$$

reemplazando y volviendo a despejar tenemos:

$$Q_c = [F + Q_c] / [1 + (C_{p_{80}} T_{1/2} - C_{p_{80}} T_c) / (C_{p_{25}} T_i - C_{p_{80}} T_{1/2})] \quad 6.7.3$$

Sustituyendo valores con las condiciones establecidas para  $T_{1/2} = 50^\circ\text{C}$ .

	$T_c = 80^\circ\text{C}$	$T_c = 200^\circ\text{F}$
$Q_c =$	3.6 litros/minuto (3.3) 9.9 litros/minuto	$Q_c =$ 2.9 litros/minuto 8 litros/minuto

Sustituyendo valores con las condiciones establecidas para

$$T_{1/2} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$T_c = 80^\circ\text{C}$$

$$T_c = 200^\circ\text{F}$$

$$Q_c = \begin{array}{l} 8 \text{ litros/minuto} \\ 22 \text{ litros/minuto} \end{array}$$

$$Q_c = \begin{array}{l} 6.4 \text{ litros/minuto} \\ 17.6 \text{ litros/minuto} \end{array}$$

Se calculan las ganancias de circuito abierto en estado estacionario para cada uno de los elementos del circuito.

Despejando  $T_{1/2}$  a partir de la ecuación 6.7.1, resulta:

$$T_{1/2} = \frac{[F c_{p25} T_i + Q_c c_{p80} T_c]}{[c_{p50}(F + Q_c)]} \quad 6.7.4$$

**Linealizaciones.** - A partir de la ecuación 6.7.4

- La ganancia de estado estacionario del proceso para la temperatura  $T_{1/2}$  con respecto al flujo de agua fría que entra, se obtiene al derivar parcialmente  $T_{1/2}$  con respecto a  $F$ .

$$K_F = \delta T_{1/2} / \delta F = G_F(0)$$

y considerando que  $F + Q_c = \text{constante}$ , de la ecuación 6.7.4

$$K_F = \frac{[c_{p25} T_i]}{[c_{p50}(F + Q_c)]} \quad 6.7.5$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$189.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$189.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 69\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 69\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$188.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$188.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 68.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 68.7\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

O, de acuerdo a la figura 6.7.2, considerando que  $F + Q_c = C$  (constante),

$$K_F = T_i / (F + Q_c) \quad 6.7.5a$$

Sustituyendo valores, calculando y convirtiendo para  $T_{1/2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_c = 80^{\circ}\text{C}$	$T_c = 200^{\circ}\text{F}$
$189.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$	$189.4\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{1}$
$K_F = 68.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$	$K_F = 68.9\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})\text{ } \textcircled{2}$

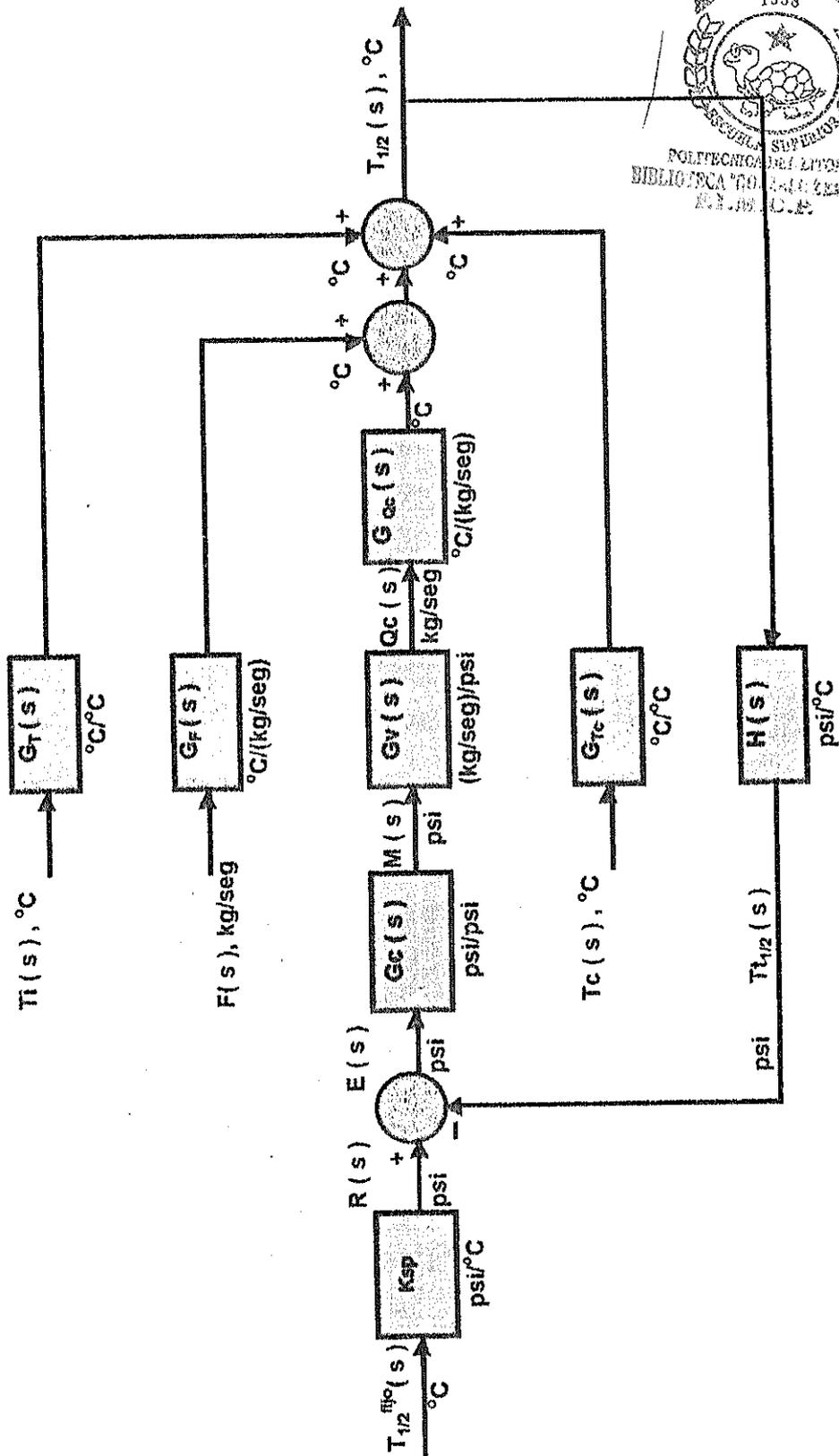


Fig. 6.7.2a Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante las perturbaciones que se muestran (modelo dinámico)

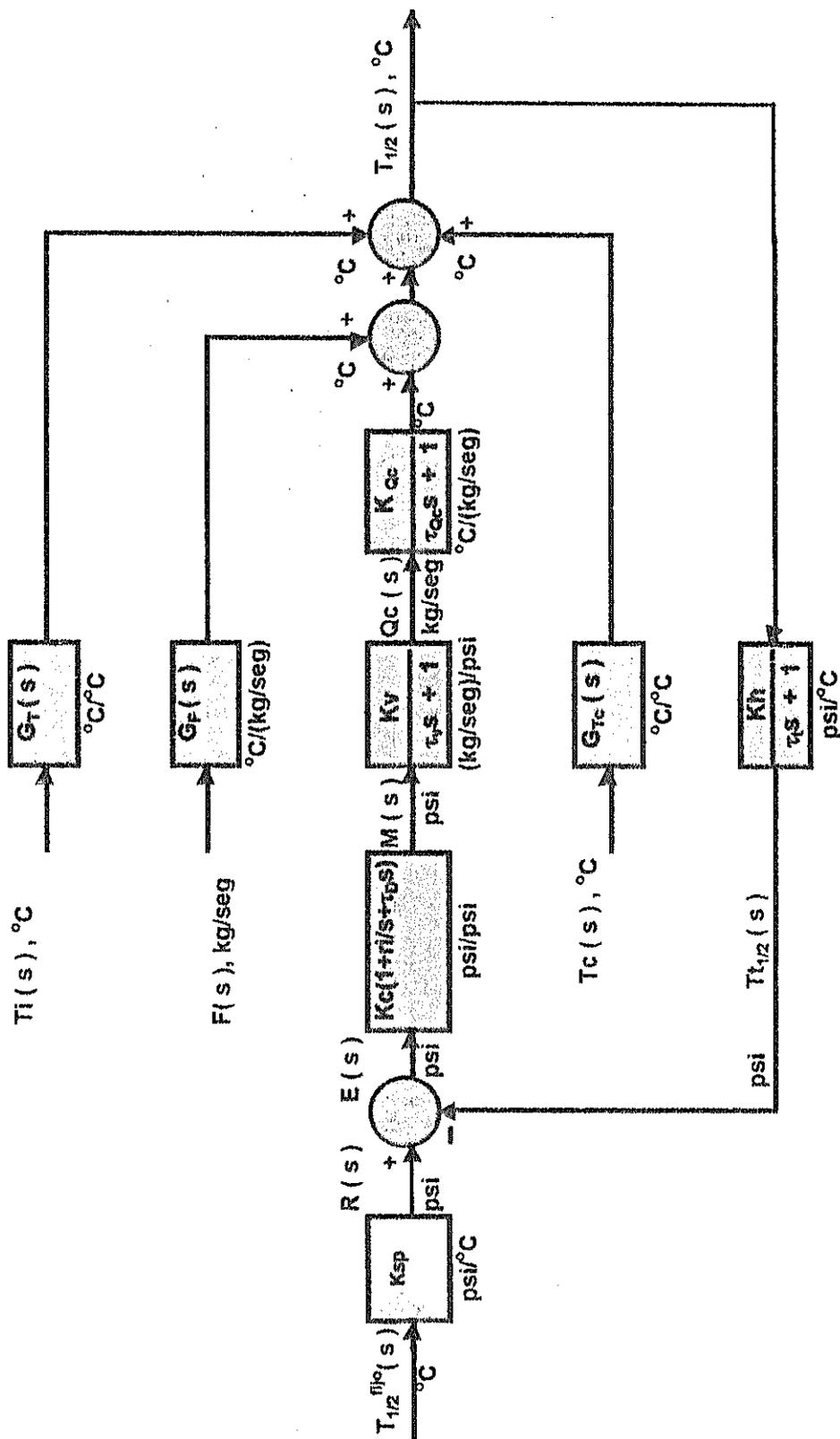


Fig. 6.7.2b Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante las perturbaciones que se muestran (modelo dinámico)

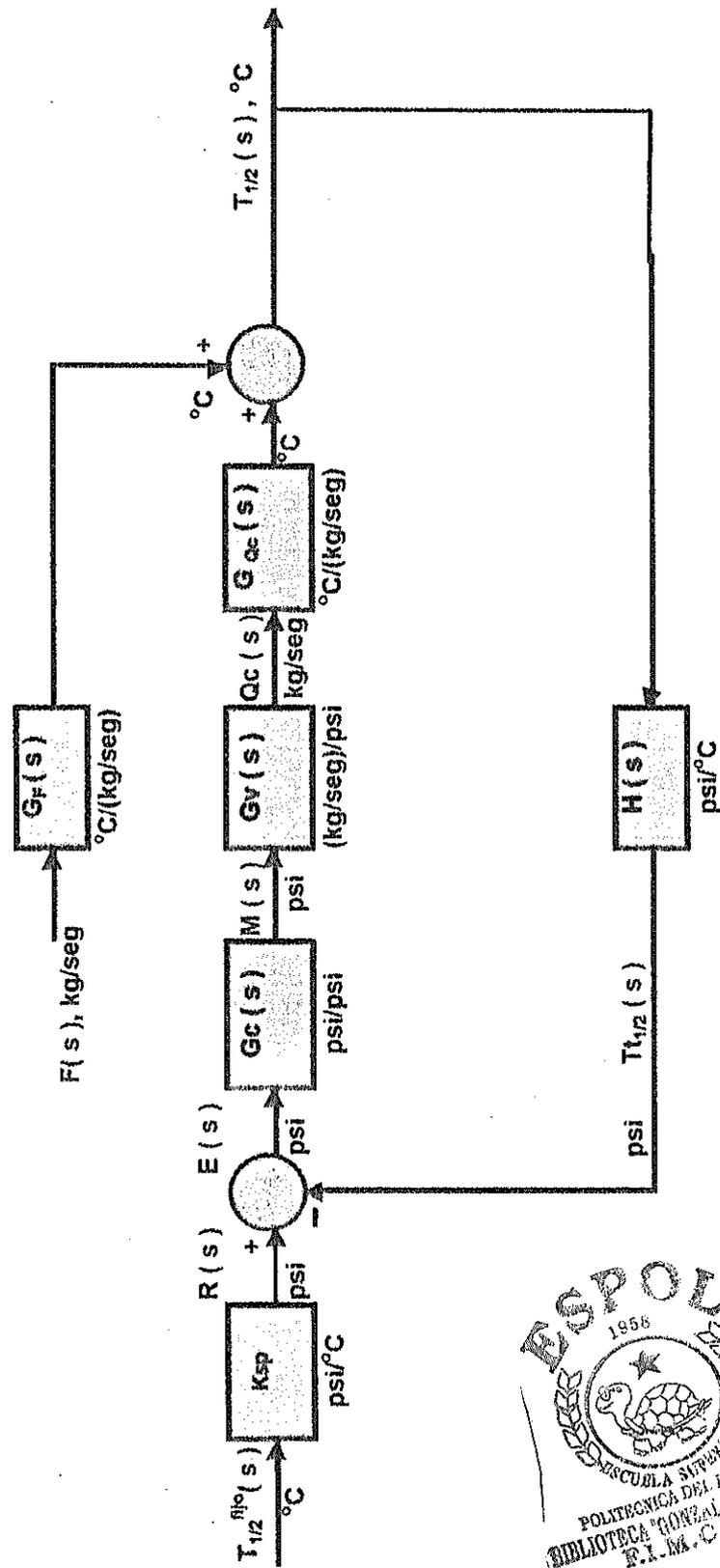


Fig. 6.7.2c Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, ante la perturbación y la variación del valor deseado (modelo dinámico)



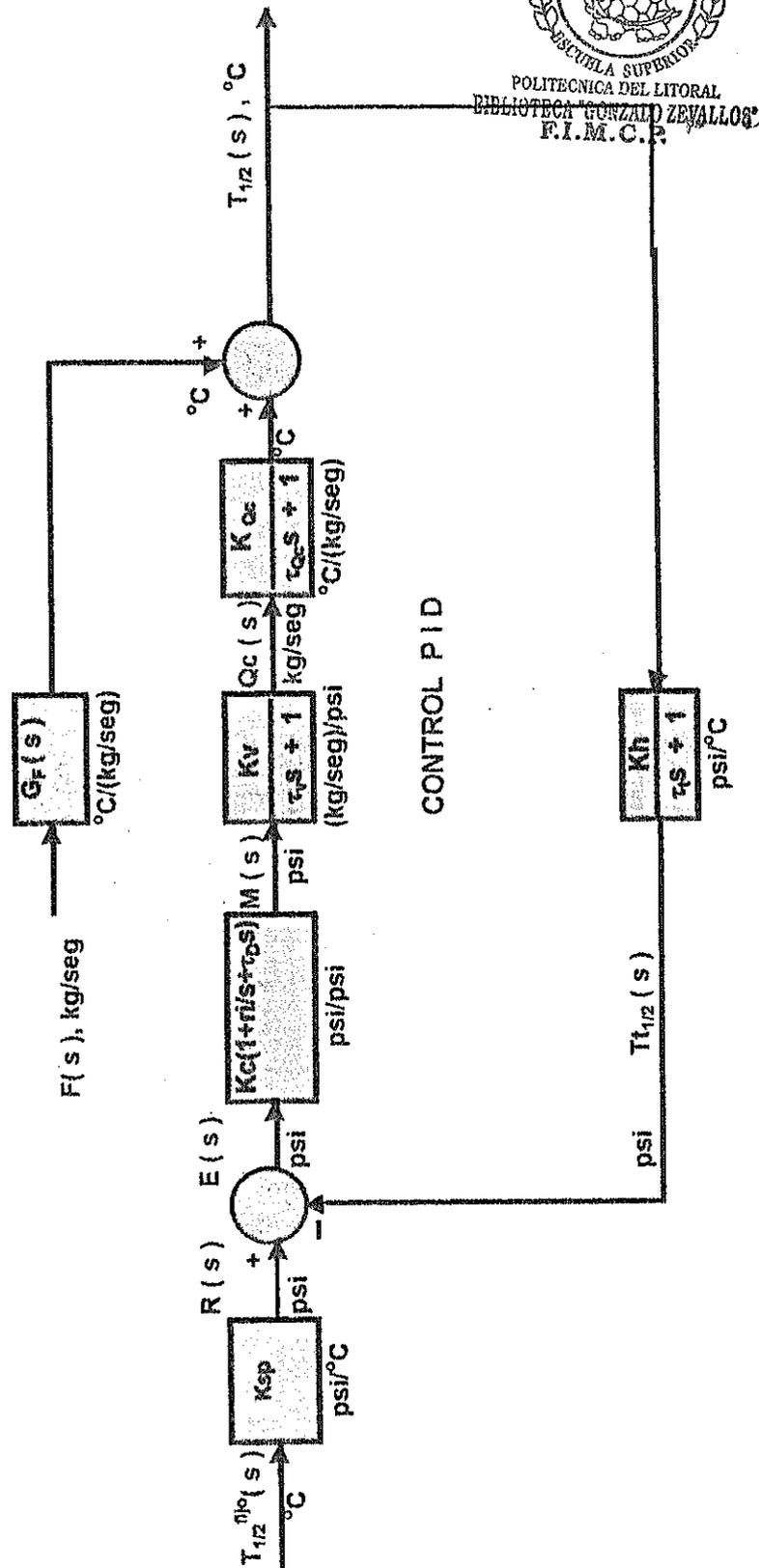


Fig. 6.7.2d Diagrama de bloques del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura ante una perturbación y la variación del valor deseado (modelo dinámico)

$$M(t) = K_c E(t)$$

Se obtiene *la transformada de Laplace*, y de ahí resulta la siguiente función de transferencia.

$$M(s)/E(s) = K_c$$

En resumen, los controladores proporcionales son los más sencillos, y poseen un parámetro de ajuste  $K_c$  ó **PB**; su desventaja es que opera con una desviación en la variable que se controla. En algunos procesos esto puede resultar suficiente pero en procesos en que el control debe estar en el punto de control, los controladores proporcionales no ofrecen un control satisfactorio.

### **Controlador proporcional - integral. (P.I.)**

Cuando los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Esta inteligencia o nuevo modo de control

$$r_i = 1/\tau_i \text{ en repeticiones/min}$$

Fabricantes como la Taylor Co., Honeywell, Inc. Definen la salida en sus controladores P.I. como:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c r_i \int e(t) dt.$$

Para obtener la función de transferencia del controlador P.I., la ecuación anterior se escribe como sigue:

$$m(t) - \bar{m} = K_c [e(t) - 0] + K_c r_i \int [e(t) - 0] dt.$$

En donde se aplican las definiciones de variables de desviación y de transformada de Laplace, reordenando para obtener:

$$M(s)/E(s) = K_c (1 + r_i/s)$$

Se observa, que los controladores proporcionales - integracionales tienen dos parámetros de ajuste: la ganancia o sensibilidad y la rapidez de reajuste con la ventaja que con este tipo de controlador eliminamos el error, afectando en cambio la estabilidad del circuito de control.

### Controlador proporcional - integral - derivativo (P.I.D)

En ocasiones se añade otro modo de control al controlador P. I., este nuevo modo de control es la acción derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación o preactuación; y su objetivo es anticipar hacia donde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error. Su ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c r_i \int e(t) dt + K_c \tau_D d e(t)/dt$$

donde:

$\tau_D$  = rapidez de derivación en minutos.

Por lo tanto, el controlador P.I.D. tiene tres parámetros,  $K_c$ ,  $r_i$ , y  $\tau_D$ , que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. Se puede observar que solo existe un parámetro para ajuste de derivación,  $\tau_D$ , el cual tiene las mismas unidades, minutos, para todos los fabricantes.

Como se expuso, con la acción derivativa se da al controlador la capacidad de anticipar hacia donde se dirige el proceso, es decir,

**“ver hacia adelante”**, mediante el cálculo de la derivada del error. La cantidad de **“anticipación”**, se decide mediante el valor del parámetro de ajuste,  $\tau_D$ .

Mediante la observación de la derivada del error, el controlador sabe que la variable que se controla se aleja con rapidez del punto de control y, por consiguiente, utiliza este hecho para ayudar en el control.

Los controladores P.I.D. se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos típicos son los circuitos de temperatura.

Los procesos en que las constantes de tiempo son cortas (capacitancia pequeña) son rápidos y susceptibles al ruido del proceso como es el caso del circuito que es controlado mediante la opción del transmisor TIT1. Los procesos en que las constantes de tiempo son largas (capacitancia grande) son lentas como el caso del circuito que es controlado mediante la opción del transmisor TIT2, y que, por lo general es amortiguado y, en consecuencia, menos susceptible al ruido; sin embargo, se debe



estar alerta, ya que se puede tener un proceso con constante de tiempo larga en que el transmisor sea ruidoso, en cuyo caso se debe reparar el transmisor antes de utilizar el controlador P.I.D.

La función de transferencia de un controlador P.I.D. "*ideal*" se obtiene a partir de la ecuación precedente, la cual se reordena como sigue:

$$m(t) - \bar{m} = K_c [e(t) - 0] + K_c r_i \int [e(t) - 0] dt + K_c \tau_D d[e(t) - 0] / dt$$

Se usan las mismas definiciones de variables de desviación que aplicamos anteriormente, se aplica la transformada de Laplace y se reordena para obtener:

$$M(s) / E(s) = K_c (1 + r_i/s + \tau_D s)$$

La anterior, es una función de transferencia "*ideal*" porque en la práctica es imposible implantar el cálculo de la derivada, por lo cual se hace una aproximación mediante la utilización de un **adelanto/retardo** de lo que resulta la siguiente **función de transferencia "real"**.

$$M(s) / E(s) = K_c (1 + r_i/s) (\tau_D s + 1) / (\alpha \tau_D s + 1)$$

Los valores de  $\alpha$  están comprendidos entre 0.05 y 0.1.

Resumiendo, los controladores P.I.D. tienen tres parámetros de ajuste:

La **sensitividad o ganancia**, la **rapidez de reajuste** y la **rapidez derivativa**.

La **rapidez derivativa** se da siempre en **minutos**. Los controladores **P.I.D.** se recomiendan para circuitos con constante de tiempo larga (**TIT2**) en los que no hay ruido. Los controladores **P.I.**, se recomiendan para circuitos con constante de tiempo corta (**TIT1**) en los que existe ruido. La ventaja del modo derivativo es que proporciona la capacidad de "**ver hacia donde se dirige el proceso**".

Más adelante se explicará la manera en que el uso de este controlador mejora el control y cómo afecta la estabilidad de los circuitos de control.

**Controlador proporcional derivativo. (P.D.).**

Se lo utiliza en los procesos donde es posible utilizar un controlador proporcional, pero se desea cierta cantidad de "anticipación".

La ecuación descriptiva es:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + K_c \tau_D d[e(t)]/dt$$

Y la función de transferencia "ideal" es:

$$M(s)/E(s) = K_c (1 + \tau_D s)$$

Una de las desventajas del controlador **P.D.**, es que opera con una **desviación** en la variable que se controla; la misma que, solamente se puede eliminar con la acción de integración, no obstante, un controlador P.D. puede soportar mayor ganancia, cuyo resultado da una menor desviación que cuando se utiliza un controlador únicamente proporcional en el mismo circuito.

### **Reajuste excesivo**

Se trata de un problema real e importante en el control de proceso y puede ocurrir en cualquier momento cuando el controlador tiene el modo integral de control.

Supóngase que la temperatura de entrada de agua caliente  $T_c(t)$ , aumenta en una cantidad significativa; este disturbio provoca que suba la temperatura del proceso  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$ , y a su vez el controlador hace que la válvula se cierre; puesto que la válvula es de aire para cerrar, la señal neumática del controlador se incrementa hasta que, a consecuencia de acción de reajuste, la temperatura del proceso se iguala con el punto de control que se desea.

Supóngase un proceso de temperatura como el nuestro, controlado por un controlador registrador neumático de temperatura TRC con modo integral incluido, en su esfuerzo por restablecer la ubicación de la variable que se controla en el punto de control, integra hasta 15 psig., punto en el cual la válvula está completamente cerrada y, por consiguiente, el circuito de control, ya no puede hacer más; en otras palabras, el proceso está fuera de control, ya que la válvula está completamente cerrada y la variable que se controla (temperatura del proceso) no llega al punto de control y, puesto que todavía existe el error, el controlador trata de corregirlo mediante un mayor incremento (integración del error) en su presión de salida, aún cuando la válvula no se pueda cerrar más allá de 15 psig. En efecto, la

salida del controlador se puede integrar hasta la presión de suministro, la cual es generalmente de casi 20 psig; en este punto ya no se puede incrementar la salida del controlador, debido que la salida está saturada.

La saturación se debe a la acción de integración (reajuste) del controlador; mientras el error esté presente, el controlador continuará cambiando su salida.

Dicho estado de saturación se conoce como "**reajuste excesivo**".

Contrariamente, si se supone que la temperatura  $T_c(t)$  baja ligeramente, la temperatura del proceso a su vez empezará a disminuir, con esta perturbación la temperatura de salida  $T_1(t)$  y  $T_2(t)$  alcanza y pasa el punto de control y la válvula permanece completamente cerrada, aunque, debería estar abriéndose, la razón de que no se abra es porque el controlador debe integrar hacia abajo; desde 20 a 15 psig, antes de que empiece a abrir la válvula, pero en el momento en que eso sucede, la temperatura de salida, ha sobrepasado el punto de control en una cantidad considerable.

Anteriormente se mencionó, el problema de reajuste excesivo puede ocurrir en cualquier momento en que esté presente la integración en el controlador.

La mayoría de los controladores que hay a la venta tienen "**protección contra reajuste excesivo**", con lo cual se detiene la integración automáticamente cuando el controlador alcanza 15psig o 3 psig.

### **Otras consideraciones**

El reajuste excesivo se presenta típicamente en los procesos por lotes, el control en cascada cuando el elemento final de control se lo maneja mediante varios controladores, como es el caso de los controles por sobreposición.

### **Resumen del controlador por retroalimentación**

- Toma decisiones acerca de la manera en que se maneja la variable para mantener la variable que se controla en el punto de control.

- Observar la ubicación de los selectores para los diales de ganancia, velocidad de reajuste y tiempo derivativo.
- Observar la ubicación del selector para elegir la acción del controlador, **inversa/directa**.

Más adelante se estudiará la manera de obtener la afinación óptima de los parámetros de ajuste, lo que se conoce como "**ajuste del controlador**" y consiste en ajustar la personalidad del controlador de manera que concuerde con la personalidad del proceso.

### **Sistema de control por retroalimentación con un solo circuito**

En esta sección se aborda la manera de reunir los conceptos de: características dinámicas de los procesos, sensores, transmisores, válvulas de control y controladores; las maneras de escribir las funciones de transferencia en forma lineal para cada uno de estos componentes, así como la forma de reconocer los parámetros importantes para el diseño de sistemas automáticos de control, tales como: ganancia de estado estacionario, las constantes de tiempo y el tiempo muerto (retardo de

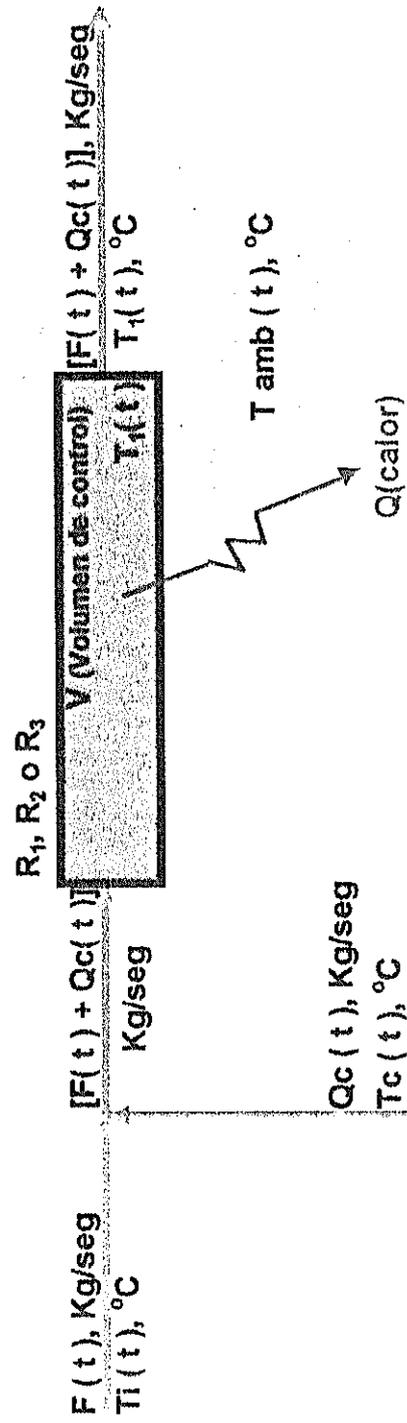
transportación o retardo en tiempo), para el diseño y ajuste de sistemas de control con un circuito de retroalimentación.

Se presenta los dos casos de circuito de control por retroalimentación que tiene nuestro lazo de control de temperatura como lo muestra la figura 6.8.1, y se expone el procedimiento para dibujar sus respectivos diagramas de bloques y determinar su ecuación característica; seguidamente se examina el significado de la ecuación característica, en términos de su utilización para determinar la estabilidad del circuito. Los dos métodos que se emplean en la determinación de la estabilidad del circuito son el de **Routh** y el de **sustitución directa**.

Los métodos que se exponen en esta sección son los que tienen más aplicación en el diseño y ajuste de los circuitos de control por retroalimentación para procesos industriales.

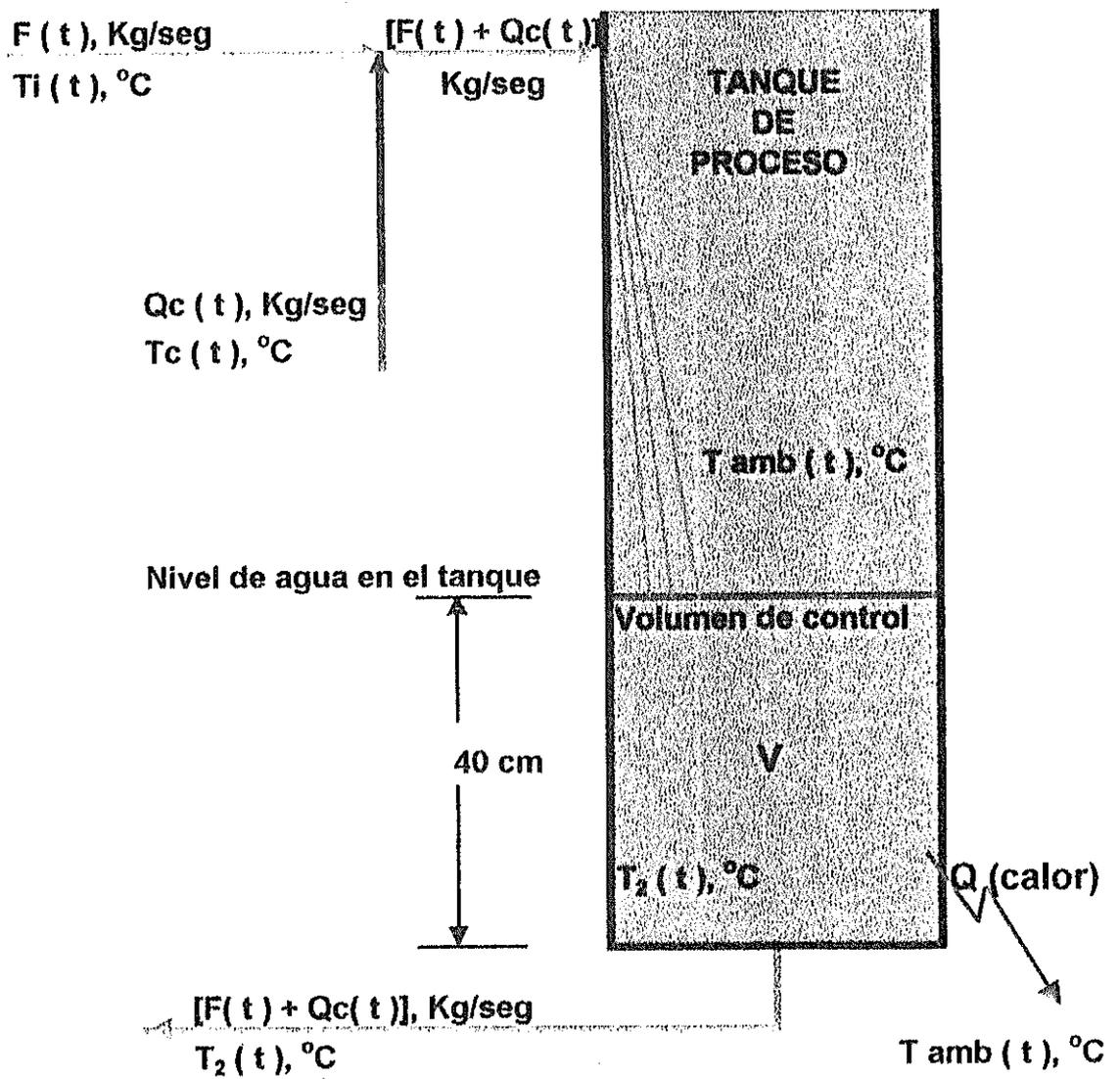
### **Circuito de control por retroalimentación**

Para revisar el concepto de control por retroalimentación se utiliza el ejemplo que nos da nuestro lazo de control de temperatura; en



Nota:  $[F(t) + Q_c(t)] = C$  (constante)

Fig. 6.8.1a Control de temperatura a la salida de los serpentines o a la entrada del tanque de proces



Nota:  $[F(t) + Q_c(t)] = C$  (constante)

Fig. 6.8.1b Control de temperatura dentro del tanque de proceso o en la salida del mismo

las figs.6.7.2, aparecen sendos diagramas del mencionado lazo de control para varias opciones.

El objetivo es mantener la temperatura de salida del fluido que se procesa (o de mezcla),  $T_1(t)$  o  $T_2(t)$ , en el valor que se desea o punto de control,  $T_{1/2}^{fijo}(t)$ , en presencia de posibles variaciones como la temperatura de entrada de "agua fría"  $T_i(t)$ , cuyo flujo viene del tanque de reserva, el mismo flujo anterior  $F(t)$ , la temperatura de entrada de "agua caliente"  $T_c(t)$ , cuyo flujo viene del tanque de reserva pero tratada en un *tanque - calentador*.

La variable que se puede ajustar para controlar la temperatura de salida es el flujo de agua caliente  $Q_c(t)$ , ya que determina la cantidad de energía que se suministra al proceso del fluido.

La sesión de control se perfila de la siguiente manera: la temperatura de salida o variable controlada se mide con un sensor transmisor - indicador neumático de temperatura **TIT1** ó **TIT2** (según se mida la temperatura  $T_1(t)$  o  $T_2(t)$  respectivamente) que generan una señal  $T_{1/2}(t)$  proporcional a la temperatura; la señal del transmisor o medición se envía al controlador

registrador neumático de temperatura **TRC**, donde se compara contra el punto de control, entonces la función del controlador es generar una señal de salida o variable manipulada  **$m(t)$** , con base en el error o diferencia entre la medición y el punto de control. La señal de salida del controlador se conecta entonces al actuador de la válvula de control (**FCV1**) de flujo de agua caliente  **$Q_c(t)$** .

En el presente ejemplo, como se puede notar, todos los instrumentos de medición tienen naturaleza neumática. La función del actuador de la válvula es situar la válvula en proporción con la señal de salida del controlador; entonces, el flujo de agua caliente es función de la posición del actuador de la válvula.

El término “**retroalimentación**” proviene del hecho de que se mide la variable controlada y dicha medición es “**alimentada hacia atrás**” para reajustar la válvula, lo cual ocasiona que las variaciones de la señal se muevan alrededor del circuito como sigue:

Las variaciones en la temperatura de salida se captan en el sensor-transmisor y se envían al controlador, donde varía la señal

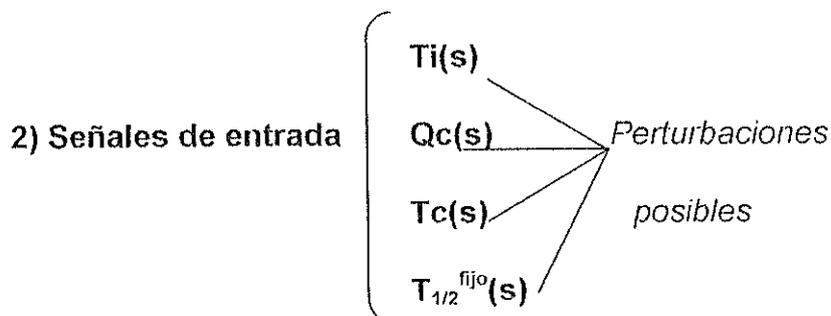
de salida, lo cual, a su vez, ocasiona que la posición de la válvula de control y, consecuentemente, el flujo de agua caliente, varíen; las variaciones en el flujo de agua caliente ocasionan que varíe la temperatura de salida, con lo que se completa el circuito.

El desempeño del circuito de control se puede analizar mejor si se dibuja el diagrama de bloques del circuito completo; para esto se dibujan los bloques de cada componente y se conecta la señal de salida de cada bloque con la entrada del siguiente.

El resultado final, es el diagrama de bloque del circuito de control de temperatura por retroalimentación para controlar  $T_1(s)$  ó  $T_2(s)$  o simplemente  $T_{1/2}(s)$  en °C.

A continuación se observa lo siguiente en la figura 6.7.2a desde la figura 6.8.1:

**1) Procesos a)  $R_1$ ,  $R_2$  ó  $R_3$  (Mezclador)**

b) *Tanque de proceso*

En esta prueba nos concentraremos más en la fijación del punto de control  $T_{1/2}^{\text{fijo}}$ , y la variación del flujo de suministro  $F+Q_c$  (fig. 6.7.2).

Mediante la aplicación de las reglas del álgebra de los diagramas de bloques, se puede determinar la función de transferencia de circuito cerrado de la temperatura de salida respecto a cualquiera de sus entradas (Tabla 6.8.1).

A continuación, se presenta el significado de cada una de las representaciones literales utilizadas en los diagramas de bloques del circuito de control de temperatura por retroalimentación y de las ecuaciones para determinar la función de transferencia de

circuito cerrado entre las diferentes señales de entrada y señales de salida requeridas (Tabla 6.8.2).

**Observaciones:** Debe observarse que, dentro de las ecuaciones para determinar las funciones de transferencia de circuito cerrado entre alguna señal de entrada y señal de salida, obtenidas a partir de algún diagrama de bloques de un circuito de control por retroalimentación, la combinación de unidades debe estar en correspondencia con el resultado que se requiere obtener.

### **Ecuaciones característica del circuito**

Obsérvese que como existen las alternativas a) y b) y diagramas de bloques del circuito de control por retroalimentación de temperatura para controlar la temperatura  $T_1(s)$  o  $T_2(s)$  de los procesos [A] ó [B] respectivamente figuras 6.7.1 o 6.8.1, existen denominadores que son similares en todas las funciones de transferencia solicitadas para cada alternativa, y estos son indiferentes de la ubicación de la entrada en el circuito y, por lo tanto, característica del circuito. La respuesta sin forzamiento del circuito y su estabilidad dependen de los eigenvalores o raíces de

la ecuación que se obtiene cuando el denominador de la función de transferencia del circuito se iguala a cero.

La ecuación característica es la siguiente:

$$1 + G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s) = 0$$

Se observa que la función de transferencia del controlador forma parte de la ecuación característica del circuito; a esto se debe que se pueda dar forma a la respuesta del circuito mediante el ajuste del controlador. Los otros elementos que forman parte de la ecuación característica son el sensor - transmisor, la válvula de control y la parte del proceso que afecta la respuesta de la variable controlada a la variable manipulada, es decir  $G_{Qc}(s)$ . Además, las funciones de transferencia del proceso que se relacionan con las perturbaciones  $G_T(s)$ ,  $G_F(s)$  y  $G_{Tc}(s)$  no constituyen la ecuación característica.

Podemos demostrar que la ecuación característica determina la respuesta sin forzamiento del circuito, se deriva la respuesta de circuito cerrado a un cambio de temperatura de entrada de agua

fría  $T_i(s)$ , mediante la inversión de la transformada de Laplace de la señal de salida. Se supone que la ecuación característica se puede reducir a un polinomio de grado  $n$  en la variable de la transformada de Laplace,  $s$ :

$$1 + G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 = 0$$

donde:  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  son los coeficientes del polinomio, factorizando se obtiene:

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 = a_n (s - r_1)(s - r_2) \dots (s - r_n) = 0$$

donde:  $r_1, r_2, \dots, r_n$  son los eigenvalores o raíces de la ecuación característica, las cuales pueden ser números reales o pares de complejos conjugados, y pueden ser repetidas.

De las ecuaciones para determinar la función de transferencia de circuito cerrado entre las señales de entrada y las temperaturas de salida  $T_1(s)$  ó  $T_2(s)$ . Tomemos la siguiente:

$$T_1(s)/T_i(s) = G_T(s) / [1 + G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s)]$$



También:

$$T_1(s) = [G_T(s) / (1 + G_V(s)G_C(s)H(s)G_{QC}(s))] T_i(s)$$

Seguidamente, se substituye el denominador por la ecuación característica factorizada, y se suponen que los otros términos aparecen a causa de la función de forzamiento de entrada  $T_i(s)$ ; resulta para cualquiera de las dos ecuaciones anteriores:

$$T_1(s) = (\text{términos del numerador}) / [a_n (s-r_1)(s-r_2)\dots(s-r_n) (\text{términos de entrada})]$$

Al expandir esta expresión en fracciones parciales:

$$T_1(s) = b_1 / (s-r_1) + b_2 / (s-r_2) + \dots + b_n / (s-r_n) + \text{términos de entrada}$$

donde  $b_1, b_2, \dots, b_n$  son los coeficientes constantes que se determinan con el método de expansión de fracciones parciales (tal como se presentan en los textos de transformada de Laplace).

Al invertir esta expresión con la ayuda de tablas de transformadas de Laplace, se obtienen:

**Respuesta sin forzamiento      Respuesta forzada.**

$$T_1(t) = b_1 e^{r_1 t} + b_2 e^{r_2 t} + \dots + b_n e^{r_n t} + (\text{términos de entrada})$$

Se demuestra que cada uno de los términos de la respuesta sin forzamiento contiene una raíz de la ecuación característica; siendo los coeficientes  $b_1, b_2, \dots, b_n$  dependientes de la función de forzamiento de entrada real, de la misma manera que la respuesta exacta del circuito; no obstante, la velocidad con que los términos de la respuesta desaparecen ( $r_1 < 0$ ), divergen ( $r_1 > 0$ ) u oscilan ( $r_1$  es compleja) se determina completamente por las raíces de la ecuación característica. Las cuales determinarán la estabilidad del circuito.

A continuación se muestra el diagrama de bloques para un proceso simple, suponiendo que el proceso se puede representar mediante un retardo de primer orden.

La función de transferencia del proceso de primer orden es:

$$G(s) = K/(\tau s + 1)$$

Al proceso anterior se lo quiere controlar con un control neumático proporcional por ejemplo, cuya función de transferencia es:

$$G_c(s) = K_c$$

Ecuaciones para determinar la función de transferencia de circuito cerrado entre las señales de entrada y la temperatura de salida $T_{1/2}(s)$ correspondiente a la medición con los transmisores TIT1 o TIT2 para los diagramas de bloques obtenidos	
Nº	TEMPERATURAS $T_1$ O $T_2$ ( $T_{1/2}$ )
1	La temperatura de entrada $T_i(s)$ y la temperatura de salida $T_{1/2}(s)$ .
	$T_{1/2}(s)/T_i(s) = G_T(s)/(1+G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s))$
2	El flujo de agua fría $F(s)$ y la temperatura de salida $T_{1/2}(s)$
	$T_{1/2}(s)/F(s) = G_F(s)/(1+G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s))$
3	El punto de control $T_{1/2}^{fijo}(s)$ y la temperatura de salida $T_{1/2}(s)$
	$T_{1/2}(s)/T_{1/2}^{fijo}(s) = G_{T1/2}^{fijo}(s)/(1+G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s))$ $G_{T1/2}^{fijo}(s) = G_v(s)G_c(s)G_{Qc}(s)K_{sp}$
4	La temperatura de agua caliente $T_c(s)$ y la temperatura de salida $T_{1/2}(s)$
	$T_{1/2}(s)/T_c(s) = G_{Tc}(s)/(1+G_v(s)G_c(s)H(s)G_{Qc}(s))$

Tabla 6.8.1

Representación	Significado	Unidades
$T_{1/2}^{fijo}(s)$	Punto de control fijo, función en el dominio "s"	°C
Ksp	Es el factor de escala para el punto de control de la temperatura	psi/ °C
E(s)	Es la señal de error, función en el dominio "s"	Psi
Gc(s)	Es la función de transferencia del controlador	psi/psi
M(s)	Variable manipulada, señal que sale del controlador	Psi
Gv(s)	Es la función de transferencia de la válvula de control.	(Kg/s)/psi
Qc(s)	Es el flujo de agua caliente, a la salida de la válvula FCV <sub>1</sub> , función en el dominio "s".	Kg/s
G <sub>Qc</sub> (s)	Es la función de transferencia del proceso que relaciona la temperatura de salida con el flujo de agua caliente.	°C/(Kg/s)
H(s)	Es la función de transferencia del sensor-transmisor.	psi/°C
Ti(s)	Temperatura de entrada al proceso de agua fría.	°C
G <sub>T</sub> (s)	Es la función de transferencia del proceso, la cual relaciona la temperatura de salida con la temperatura de entrada al proceso de agua fría.	°C/°C

Tabla 6.8.2

Representación	Significado	Unidades
$F(s)$	Es el flujo de entrada de agua fría al proceso, función en el dominio "s"	Kg/s
$G_F(s)$	Es la función de transferencia del proceso que relaciona la temperatura de salida con el flujo de entrada de agua fría al proceso	$^{\circ}\text{C}/(\text{Kg/s})$
$T_c(s)$	Temperatura de entrada al proceso de agua caliente	$^{\circ}\text{C}$
$G_{T_c}(s)$	Es la función de transferencia del proceso, la cual relaciona la temperatura de salida con la temperatura de entrada al proceso de agua caliente	$^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$
$T_{f_1}(s)$	Señal de transmisor neumático de temperatura TIT1 que va al controlador	Psi
$T_{f_2}(s)$	Señal de transmisor neumático de temperatura TIT2 que va al controlador	Psi
$T_1(s)$	Temperatura a la salida del proceso medida con el transmisor TIT1	$^{\circ}\text{C}$
$T_2(s)$	Temperatura a la salida del proceso medida con el transmisor TIT2	$^{\circ}\text{C}$

Tabla 6.8.2

Se debe determinar la función de transferencia de circuito cerrado y la respuesta a un cambio escalón unitario en el punto de control de dicho controlador proporcional.

La función de transferencia de circuito cerrado se obtiene del álgebra para diagrama de bloques:

$$C(s)/R(s) = [G(s)G_c(s)]/[1+G(s)G_c(s)]$$

Al sustituir la función de transferencia del proceso, del controlador y simplificar, se obtienen:

$$C(s)/R(s) = (K K_c)/[(1+K K_c)+\tau s]$$

Al dividir el segundo miembro tanto numerador como denominador para  $1 + K K_c$ , se obtiene:

$$C(s)/R(s) = [(K K_c)/(1 + K K_c)]/[(\tau/(1+K K_c))s+1]$$

$$C(s)/R(s) = K'/( \tau' s + 1)$$

Donde la ganancia de estado estacionario es:

$$K' = K K_c / (1 + K K_c)$$

Siempre menor que 1; y que la constante de tiempo de circuito cerrado

$$\tau' = \tau / (1 + K K_c)$$

Siempre es menor que la constante de tiempo de circuito abierto  $\tau$ , es decir, el circuito siempre responde más rápido que el sistema original, pero no coinciden completamente con el punto de control, en estado estacionario; en consecuencia, hay una desviación.

Para un cambio escalón unitario en el punto de control, según las tablas de transformadas de Laplace, se tiene:

$$R(s) = (1/s)$$

Se substituye en la función de transferencia y se expande por fracciones parciales para obtener:

$$C(s) = K' / (\tau' s + 1) \cdot (1/s) = K' / (s) - K' \tau' / (\tau' s + 1)$$

Al invertir, resulta:

$$c(t) = K' (1 - e^{-t/\tau'})$$

$$c(t) = K K_c / (1 + K K_c) [1 - e^{-(1 + k k c) t / \tau}]$$

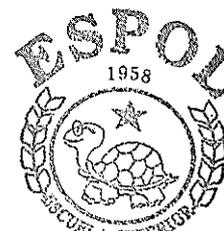
$$\text{Conforme } t \rightarrow \infty, \quad c(t) \rightarrow K K_c / (1 + K K_c)$$

Ya que el cambio en el punto de fijación es 1.0 (cambio en escalón unitario), el error se expresa mediante

$$e(t) = r(t) - c(t) = 1.0 - K K_c / (1 + K K_c) [1 - e^{-(1 + k k c) t / \tau}]$$

Conforme  $t \rightarrow \infty$

$$e(t) \rightarrow 1 - K K_c / (1 + K K_c) = 1 / (1 + K K_c)$$



POLITECNICA DEL LITORAL  
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"  
F.I.M.C.P.

Entonces, mientras más alta sea la ganancia del controlador,  $K_c$ , más se acerca la variable controlada al punto de control de estado estacionario, es decir, la desviación es menor.

Por ejemplo, para un cambio escalón de 5°C en el punto de control, según las tablas de transformadas de Laplace, se tiene.

$$R(s) = 5/s$$

De igual manera, se substituye en la función de transferencia y se expande por fracciones parciales para obtener:

$$C(s) = K' / (\tau's + 1) \cdot 5/s = 5 K'/s - K'\tau' / (\tau's + 1)$$

Al invertir, resulta:

$$\begin{aligned} c(t) &= K' (5 - e^{-t/\tau'}) \\ &= K K_c / (1 + K K_c) [5 - e^{-(1 + k k c) t/\tau}] \end{aligned}$$

Conforme  $t \rightarrow \infty$

$$c(t) \rightarrow 5K K_c / (1 + K K_c)$$

Ya que el cambio en el punto de fijación es 5.0°C, el error se expresa mediante:

$$e(t) = r(t) - c(t) = 5.0 - 5.0K K_c / (1 + K K_c) [1 - e^{-(1 + k k c) t/\tau}]$$

Conforme  $t \rightarrow \infty$

$$e(t) = 5 - 5K K_c / (1 + K K_c) = 5 / (1 + K K_c)$$

De la misma manera, mientras más alta sea la ganancia del controlador,  $K_c$ , más se acerca la variable controlada al punto de control de estado estacionario, es decir, la desviación es menor.

Ahora, imaginamos que nuestro control es puramente integral aplicado al mismo proceso. Se debe determinar la función de transferencia de circuito cerrado y la respuesta a un cambio escalón unitario en el punto de control del proceso, con un controlador integral.

La función de transferencia para dicho control es

$$G_c(s) = K_c/s$$

Donde  $K_c$  es la ganancia del controlador.

Al substituir la función de transferencia del controlador integracional en la función de transferencia de circuito cerrado.

$$C(s)/R(s) = (K K_c/s) / (1 + \tau s + K K_c/s) = K K_c (\tau s^2 + s + K K_c)$$

Partiendo del teorema del valor final a las funciones de transferencia se substituye  $s = 0$ , para obtener la ganancia de estado estacionario:

$$\lim_{s \rightarrow 0} C(s)/R(s) = KK_c/KK_c = 1.0$$

Lo que significa que, para el controlador integral, la variable controlada, siempre coincide con el punto de control de estado estacionario, es decir, no hay corrimiento (desviación).

La ecuación característica del circuito es:

$$\tau s^2 + s + K K_c = 0$$

Las raíces de esta ecuación cuadrática son:

$$s = [-1 \pm \text{sqr}(1 - 4K K_c \tau)] / (2\tau)$$

Estas raíces son:

reales en

$$0 \leq K K_c \tau \leq \frac{1}{4}$$

Y complejas conjugadas en

$$K K_c \tau > \frac{1}{4}$$

Seguidamente, se determina la respuesta del circuito a un cambio escalón en el punto de fijación para varios valores de  $K K_c$ . De las tablas de transformadas de Laplace se tiene que, para un cambio escalón de  $5^\circ\text{C}$  en el punto de control,  $R(s) = 5/(s)$

Al substituir en la función de transferencia, se tiene:

$$C(s) = 5K K_c / [\tau s^2 + s + K K_c]$$

#### Caso A

Dos raíces reales y diferentes:

$$r_1 = [-1 + \sqrt{1 - 4K K_c \tau}] / (2\tau)$$

$$r_2 = [-1 - \sqrt{1 - 4K K_c \tau}] / (2\tau)$$

Por expansión de fracciones parciales:

$$C(s) = 5/(s) + K K_c / (\tau r_1 (r_1 - r_2)) \cdot 1/(s - r_1) + K K_c / (\tau r_2 (r_2 - r_1)) \cdot 1/(s - r_2)$$

Al invertir la transformada de Laplace, se tiene:

$$c(t) = 5 + K K_c / (\tau r_1 (r_1 - r_2)) e^{r_1 t} + K K_c / (\tau r_2 (r_2 - r_1)) e^{r_2 t}$$

Puesto que tanto  $r_1$  como  $r_2$  son negativas para  $K_c$  positiva, en esta respuesta los términos exponenciales, tienden a cero conforme el tiempo se incrementa ( $t \rightarrow \infty$ ), y entonces el valor de estado estacionario de  $c$  es 5.0, o igual al punto de control. **Este tipo de respuesta, que se conoce como “sobreamortiguada”** se ilustra en la siguiente figura 6.8.2. Conforme la ganancia  $K_c$  del controlador se incrementa, la respuesta se vuelve más rápida, hasta que se torna “críticamente amortiguada” en  $K_c \tau = 1/4$ ; a continuación se considera este caso.

### Caso B

Raíces reales repetidas:

$$K_c \tau = 1/4;$$

Entonces:

$$r_1 = r_2 = -1/(2\tau)$$

Se substituye  $K_c \tau = 1/(4\tau)$  y se sigue el procedimiento de expansión de fracciones parciales para raíces repetidas:

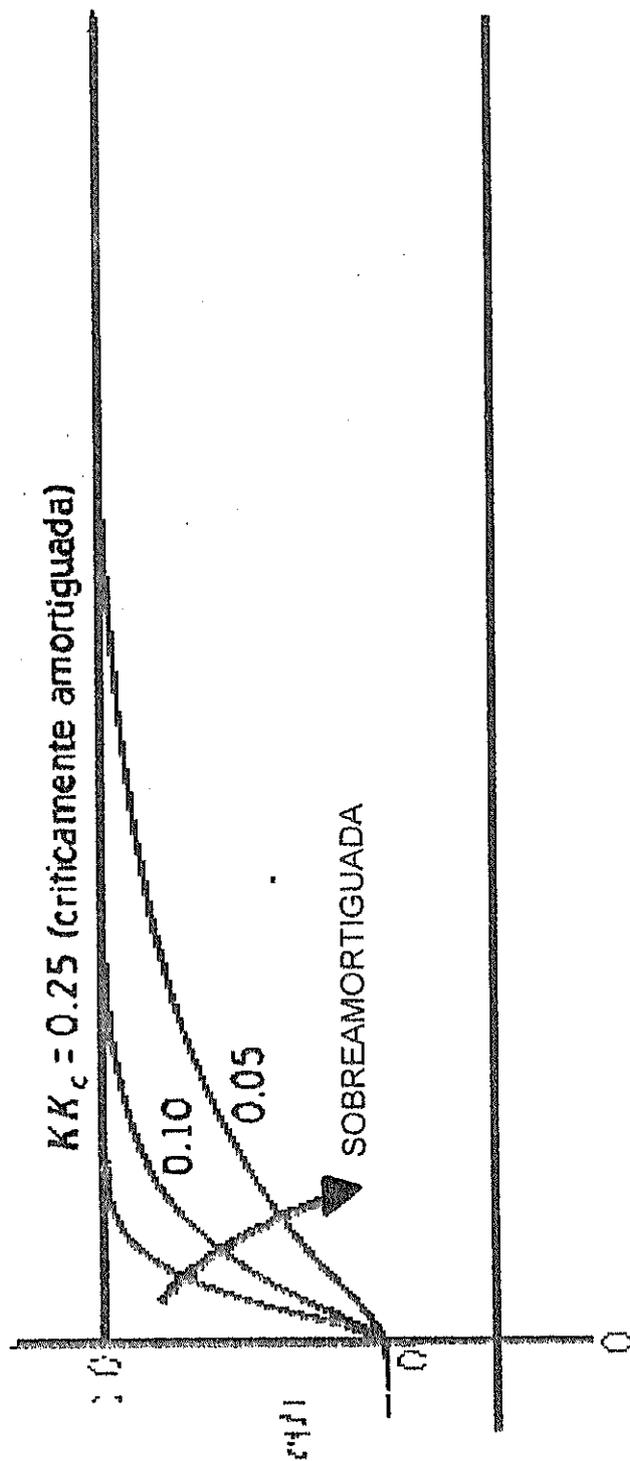


Fig. 6. 8. 2 EJEMPLOS DE RESPUESTA SOBREAMORTIGUADA Y CRÍTICAMENTE AMORTIGUADA EN UNA UNIDAD DE CONTROL

$$C(s) = [5 \cdot 1 / (4\tau^2)] / [s(s + 1/2\tau)^2] = 5/s - \frac{1}{2}(1/\tau) / (s + 1/2\tau)^2 - 1 / (s + 1/2\tau)$$

Al invertir, con ayuda de una tabla de transformadas de Laplace resulta:

$$c(t) = 5 - (1/2 t/\tau + 1) e^{-t/2\tau}$$

Esta respuesta críticamente amortiguada también se ilustra en la figura.6.8.2. Si la ganancia del controlador se incrementa aún más, se obtiene una respuesta "subamortiguada", que es el siguiente y último caso.

### Caso C.

Raíces complejas conjugadas

$$K K_c \tau > 1/4$$

Sea:  $\omega = 1/2\tau$

Entonces

$$r_1 = -1/2\tau + i\omega$$

$$r_2 = -1/2\tau - i\omega$$

Se sigue el procedimiento para raíces complejas y, con la expansión de fracciones parciales, se obtiene:

$$C(s) = 5K K_c / (s(\tau s^2 + s + K K_c)) = 5/s - (s + 1/\tau) / [(s + 1/2\tau)^2 + \omega^2]$$

Al invertir, con una tabla de transformadas de Laplace, se tiene:

$$c(t) = 5 - e^{-t/2\tau} (\cos \omega t + 1/(2\omega\tau) \operatorname{sen} \omega t)$$

De este resultado se observa que, conforme se incrementa la ganancia  $K K_c$  del circuito, la respuesta oscila alrededor del punto de control (5.0) con frecuencia creciente ( $\omega$ ); no obstante, la amplitud de estas oscilaciones siempre decae a cero, a causa del término exponencial  $e^{-t/2\tau}$ , lo cual se ilustra en la figura 6.8.3.

En los ejemplos anteriores, el circuito de control que se muestra en la figura 6.8.4, es un circuito por "retroalimentación unitaria", es decir, un circuito en el que no hay alimentos en la trayectoria de retroalimentación; en esto se supone que las ganancias del transmisor se incluye en la función de transferencia del proceso  $G(s)$  (Dentro de ella también se incluye la ganancia de la válvula).

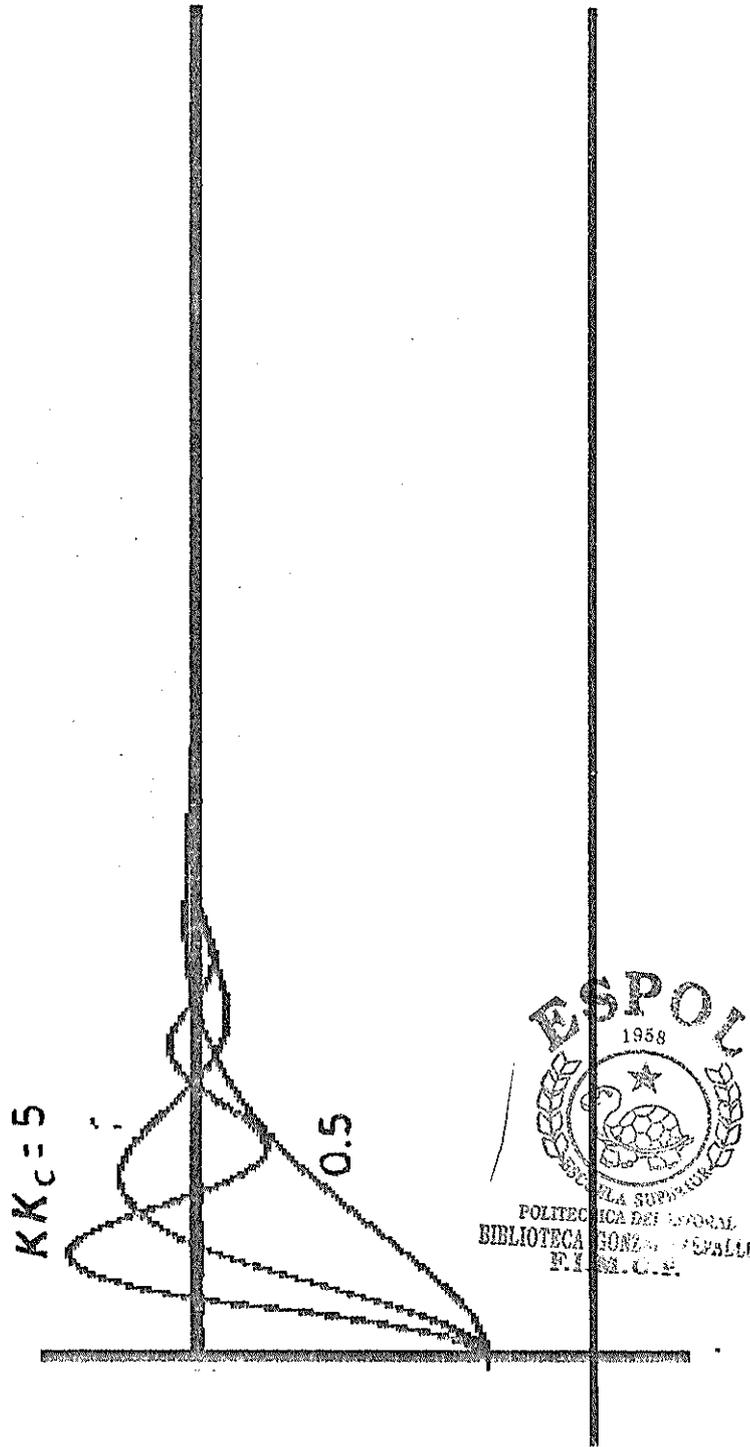


Fig. 6. 8.3 DECAIMIENTO DE LA AMPLITUD DE OSCILACIÓN EN LA RESPUESTA DEBIDO AL TERMINO EXPONENCIAL EN EL AJUSTE DE LA UNIDAD DE CONTROL

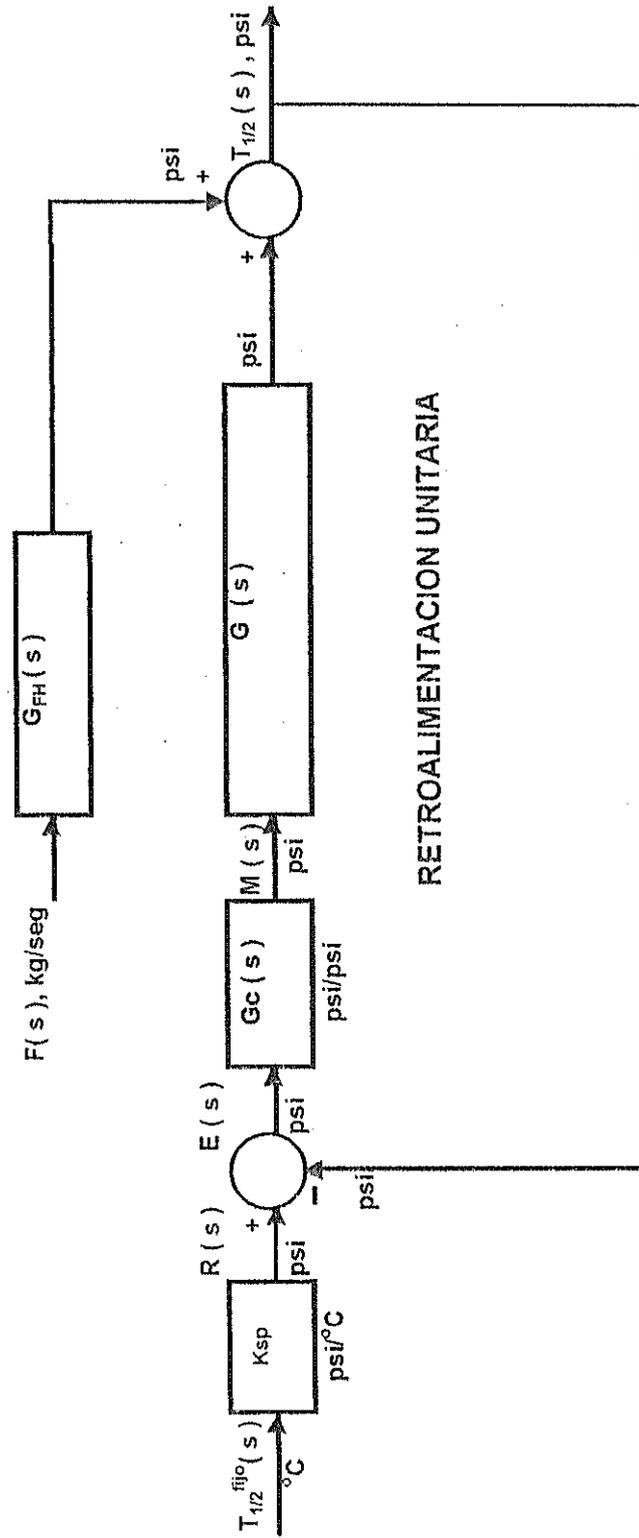


Fig. 6.8.4a Diagrama de bloques equivalente y simplificado del circuito de control por retroalimentación para controlar la temperatura  $T_{1/2}$ , para el ajuste en línea de Ziegler y Nichols

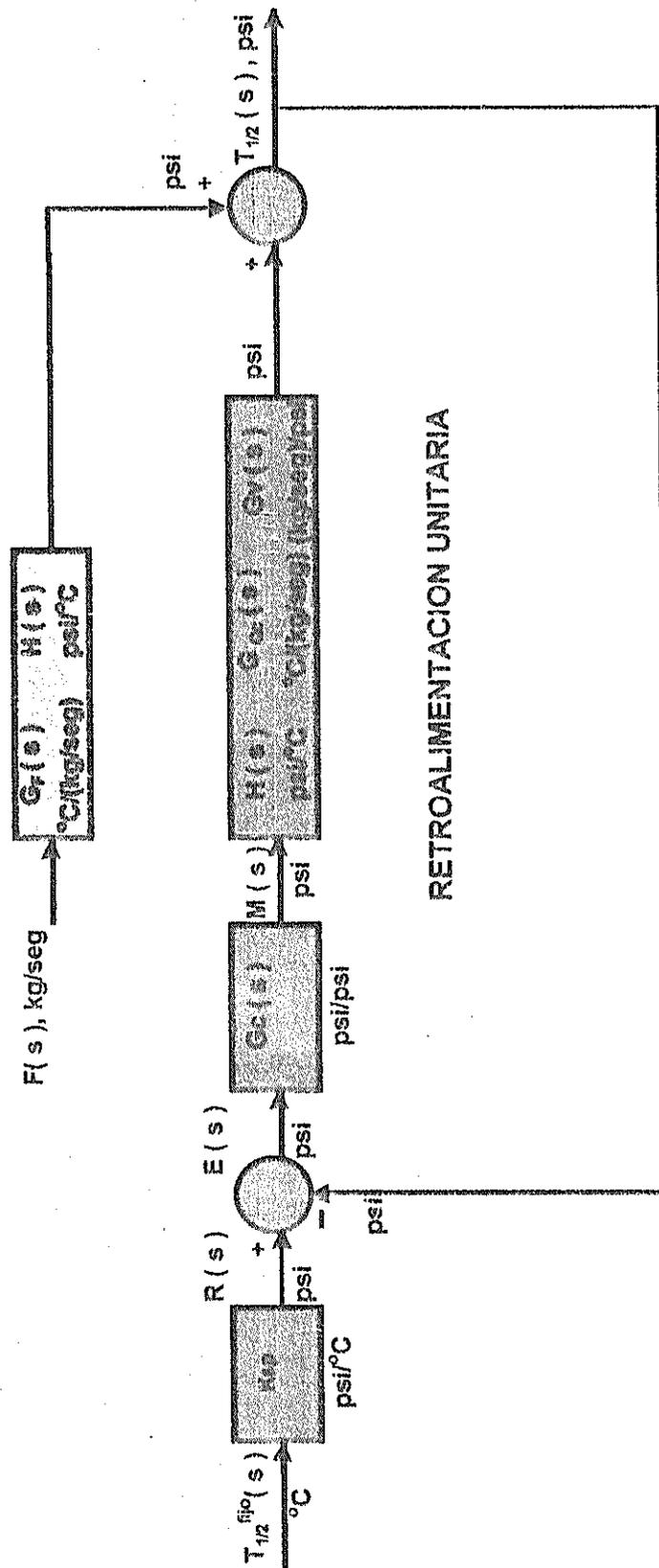


Fig. 6.8.4b Diagrama de bloques equivalente y simplificado del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, para el ajuste en línea de Ziegler y Nichols

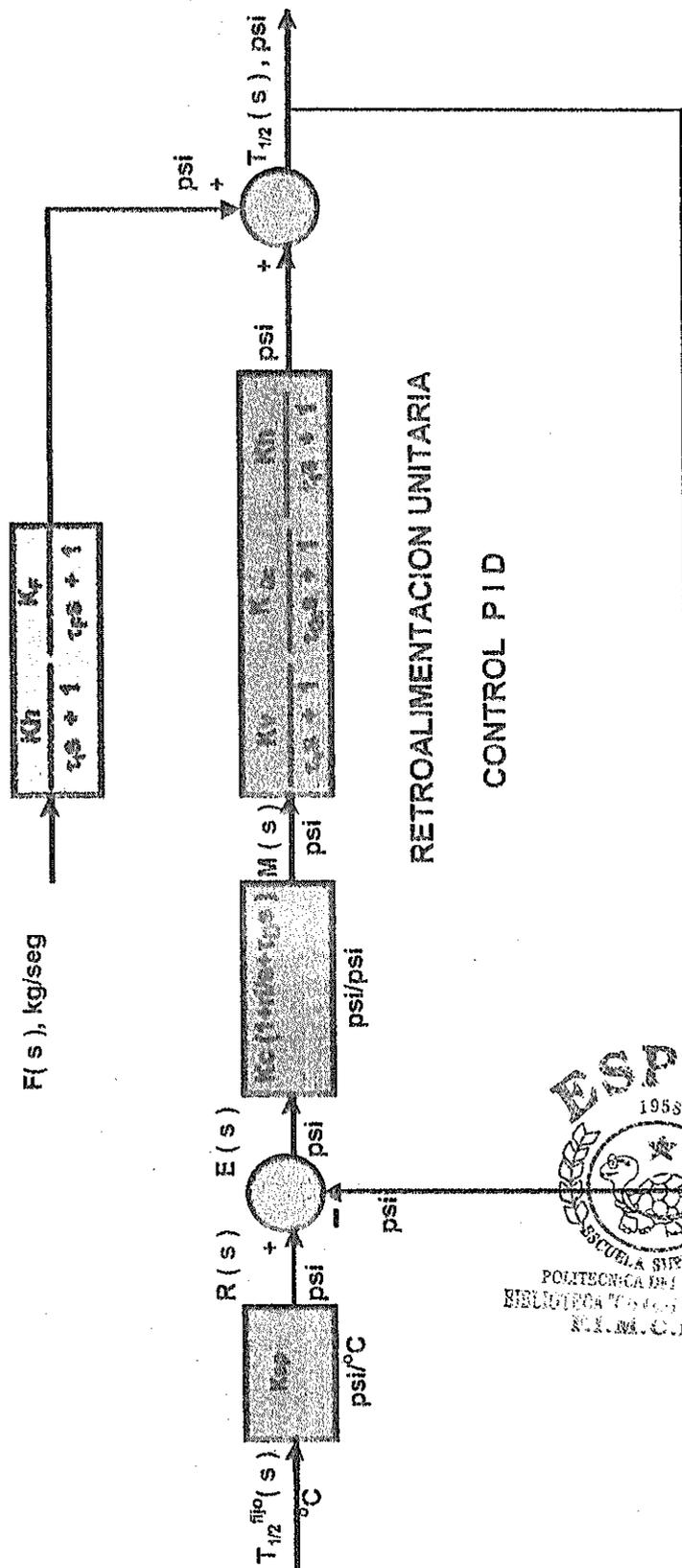


Fig. 6.8.4c Diagrama de bloques equivalente y simplificado del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, para el ajuste de Ziegler y Nichols en control PID

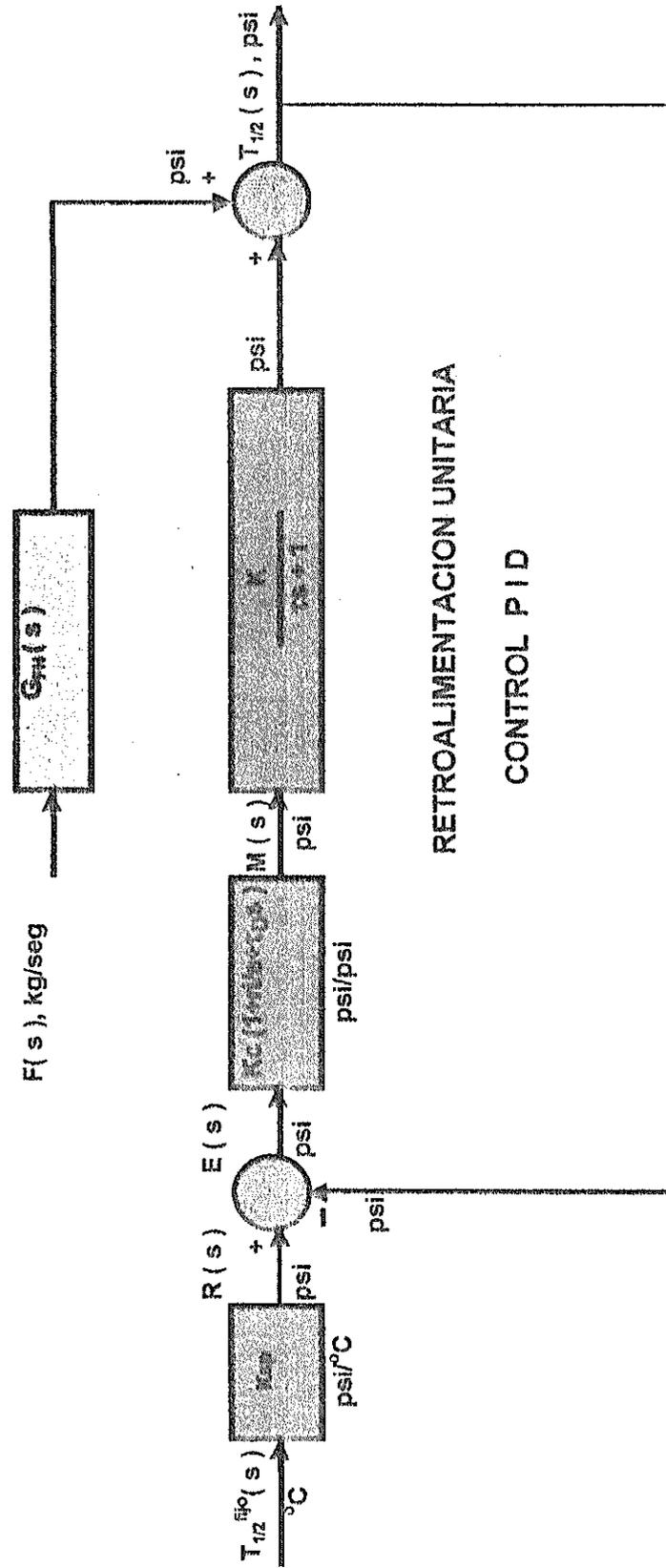


Fig. 6.8.4d Diagrama de bloques equivalente y simplificado del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, para el ajuste de Ziegler y Nichols en control PID

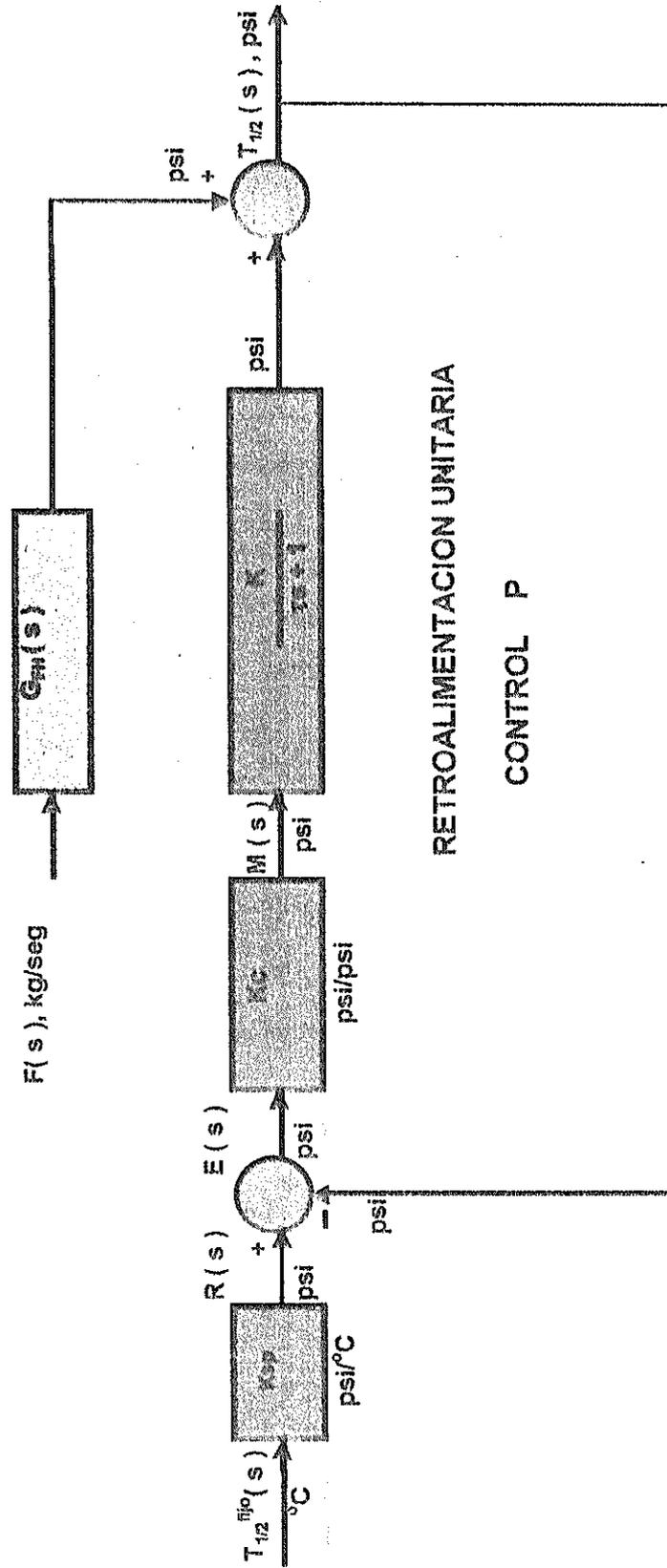


Fig. 6.8.4e Diagrama de bloques equivalente y simplificado del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, para el ajuste de Ziegler y Nichols en control P

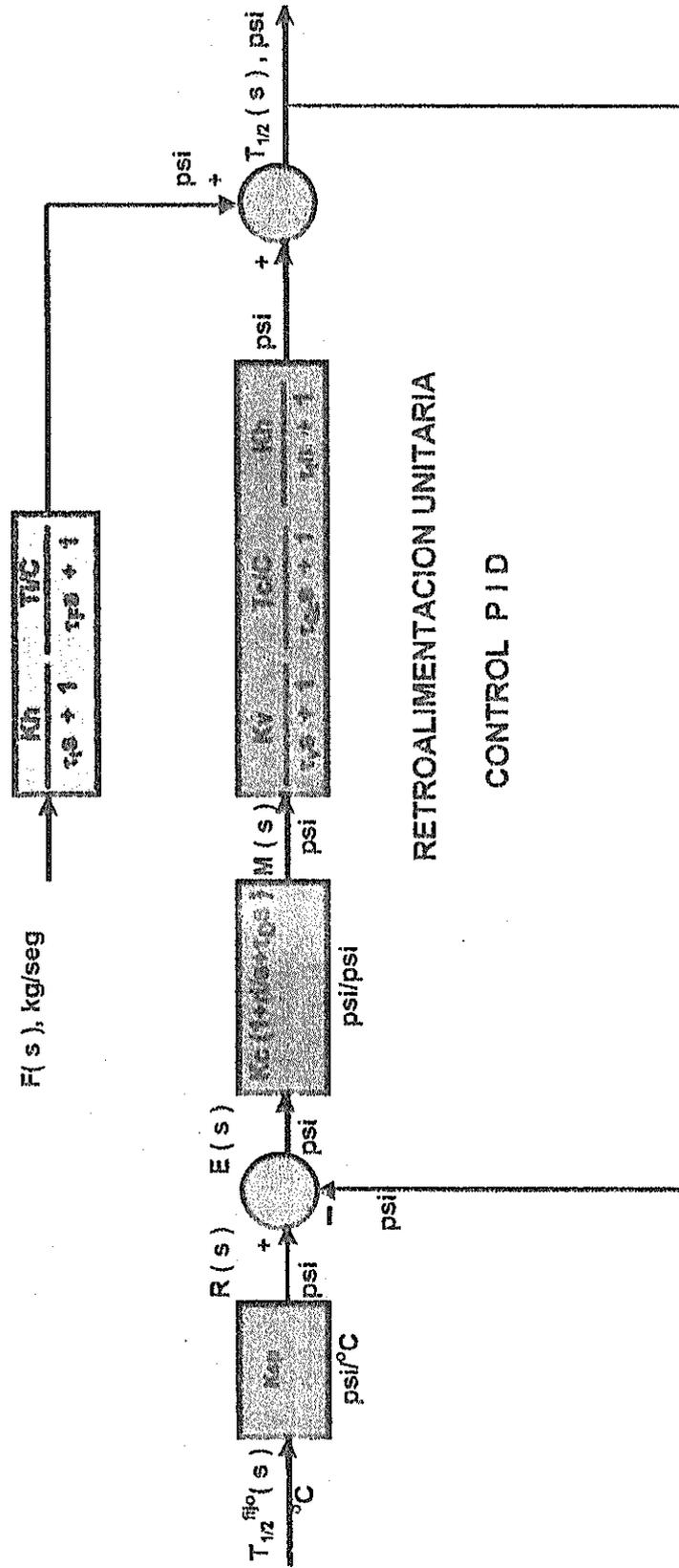


Fig. 6.8.4f Diagrama de bloques equivalente y simplificado del circuito de control por retroalimentación para controlar la Unidad de temperatura, para el ajuste de Ziegler y Nichols en control PID

### Respuesta de circuito cerrado en estado estacionario

El ejemplo anterior explica que el valor final o estado estacionario (o estático) es un aspecto importante de la respuesta de circuito cerrado, lo cual se debe a que, en la práctica del control de procesos industriales, la presencia del error de estado estacionario o desviación es en general inaceptable. Trataremos de calcular aquí, la desviación cuando se encuentra presente y, para hacerlo, tomaremos el lazo de control de temperatura. El objetivo es obtener las relaciones de circuito en estado estacionario entre la variable de salida y cada una de las entradas al circuito, mediante la aplicación del teorema del valor final a la función de transferencia del circuito cerrado. Podemos tomar las ecuaciones de temperatura de salida  $T_1(s)$  ó  $T_2(s)$  para sus respectivos transmisores TIT1 ó TIT2 según tabla 6.8.1.

Por ejemplo tomemos la salida  $T_{1/2}(s)$  con cualquiera de los transmisores, para cada una de las señales de entrada.

$$T_{1/2}(s)/(F(s)) = G_F(s)/(1 + G_V(s)G_C(s)H(s)G_{QC}(s))$$

Vale recordar que, en esta expresión, se supone que las variables de desviación para las entradas: Temperatura de entrada de agua fría  $T_i$ , punto de control  $T_{1/2}^{\text{fijo}}$ , y temperatura de agua caliente  $T_c$  son cero cuando estas entradas permanecen constantes. También, la relación de estado estacionario entre la entrada y la salida, con una función de transferencia, se obtiene al hacer  $s = 0$  en la función de transferencia, lo cual se deduce del teorema del valor final de las transformadas de Laplace.

Aplicando este método a la ecuación precedente se obtiene:

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = G_F(0)/(1 + G_V(0)G_C(0)H(0)G_{Qc}(0)), \quad [^{\circ}\text{C}/(\text{Kg/s})]$$

Donde:

$\Delta T_{1/2}$ , es el cambio de estado estacionario en la temperatura de salida del proceso medida con los transmisores, en  $^{\circ}\text{C}$

$\Delta F$ , es el cambio de estado estacionario en el flujo de agua fría que entra al proceso, en Kg/s

Se supone que el proceso es estable, entonces:

$G_F(o) = K_F$ , Ganancia de circuito abierto para un cambio en el flujo de agua fría que se procesa, °C/(KG/s).

$G_{Qc}(o) = K_{Qc}$ , Ganancia del proceso a circuito abierto para un cambio en el flujo de agua caliente, °C/KG/s.

Y, para la válvula y el sensor transmisor:

$G_v(o) = K_v$  Ganancia de la válvula, (Kg/s)/psi.

$H(o) = K_h$  Ganancia del sensor-transmisor, psi/°C.

Si el controlador es puramente proporcional.

$G_c(o) = K_c$  Ganancia proporcional, psi/psi.

Al sustituir todos estos términos para las relaciones de la tabla 6.8.1, se obtiene:

$$\Delta T_{1/2}/\Delta F = K_F/(1+K_vK_cK_hK_{Q_c}), [^{\circ}\text{C}/(\text{Kg/s})]$$

La relación de estado estacionario con un cambio en la temperatura de entrada al proceso de agua fría  $\Delta T_i$ , y la temperatura de salida  $\Delta T_{1/2}$ , con el punto de control  $T_{1/2}^{\text{fijo}}(s)$ , el flujo de entrada de agua fría al proceso  $F(s)$ , y la temperatura de entrada al proceso de agua caliente  $T_c(s)$  constantes por el teorema de valor final.

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = G_T(o)/(1+G_v(o)G_c(o)H(o)G_{Q_c}(o))$$

De la misma manera se obtiene:

$$\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = K_T/(1 + K_vK_cK_hK_{Q_c}); [^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}]$$

Donde:

$\Delta T_i$  es el cambio de estado estacionario en la temperatura de entrada al proceso de agua fría,  $^{\circ}\text{C}$

$G_T(o) = K_T$ , Ganancia de circuito abierto para un cambio en la temperatura de agua fría,  $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ .

La relación de estado estacionario con un cambio en el punto de control,  $\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}}$  y la temperatura de salida  $\Delta T_{1/2}$ , con el resto de señales de entrada,  $T_i(s)$ ,  $F(s)$  y  $T_c(s)$  constantes es:

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = [G_v(o)G_c(o)G_{Qc}(o)K_{sp}] / [1 + G_v(o)G_c(o)G_{Qc}(o)H(o)]$$

Donde:

$\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}}$ , es el cambio de estado estacionario en la temperatura del punto de control, °C.

$K_{sp}$ , Factor de escala para el punto de control de la temperatura, psi/°C.

Así:

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = (K_v K_c K_{Qc} K_{sp}) / (1 + K_v K_c K_{Qc} K_h), \text{ °C/°C}$$

Finalmente, la relación de estado estacionario con un cambio en la temperatura de entrada de agua caliente al proceso,  $\Delta T_c$  y la



temperatura de salida  $\Delta T_{1/2}$ , con el resto de señales de entrada constantes  $T_i(s)$ ,  $F(s)$ ,  $T_{1/2}^{\text{fijo}}(s)$ .

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_c = G_{T_c}(o) / (1 + G_v(o)G_c(o)H(o)G_{Qc}(o))$$

Donde:

$G_{T_c}(o) = K_{T_c}$ , Ganancia de circuito abierto para un cambio en la temperatura de entrada de agua caliente al proceso, °C/°C.

Entonces:

$$\Delta T_{1/2} / \Delta T_c = K_{T_c} / (1 + K_v K_c K_h K_{Qc})$$

Ya que el cambio en el punto de consigna es cero, el error de estado estacionario o desviación se expresa mediante:

$$e = \Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} - \Delta T_{1/2} = - \Delta T_{1/2}$$

Y, de la combinación de esta relación con las ecuaciones anteriormente obtenidas:

- a)  $e/\Delta F = -\Delta T_{1/2}/\Delta F = -K_F/(1+K_vK_cK_hK_{Qc}), \text{ }^\circ\text{C/Kg/s}$
- b)  $e/\Delta T_i = -\Delta T_{1/2}/\Delta T_i = -K_T/(1+K_vK_cK_hK_{Qc}), \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$
- c)  $e/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = -\Delta T_{1/2}/\Delta T_{1/2}^{\text{fijo}} = -(K_vK_cK_{Qc}K_{sp})/(1+K_vK_cK_{Qc}K_h), \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$
- d)  $e/\Delta T_c = -\Delta T_{1/2}/\Delta T_c = -K_{Tc}/(1+K_vK_cK_hK_{Qc}), \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$

Se verifica que la desviación u error se reduce conforme se incrementa la ganancia  $K_c$  del controlador.

Para el controlador proporcional – integral – derivativo (PID),

$$G_c(s) = \lim_{s \rightarrow 0} K_c(1 + r_i/s + \tau_D s) = \infty$$

En este caso, mediante la substitución en las ecuaciones anteriores a), b), c) y d), se puede observar que para la desviación para cualquier valor de  $K_c$  es cero; esto también es verdad para el controlador PI ( $\tau_D=0$ ).

Para que el punto de control y las mediciones estén en las mismas escalas,  $K_{sp} = K_h$ .

Caudal de la bomba	22 litros/minuto.
Caudal de agua o flujo de agua de suministro	8 litros/minutos.
Temperatura de entrada de agua caliente	$T_c = 80^\circ\text{C}$ o $200^\circ\text{F}$
Temperatura de entrada promedio	$T_i = 25^\circ\text{C}$ ó $T_i = 50^\circ\text{C}$
Punto de control	$T_{1/2}^{\text{fijo}} = 50^\circ\text{C}$ a $80^\circ\text{C}$

De las figuras 6.8.1, se obtiene el siguiente balance de energía en el volumen de control:

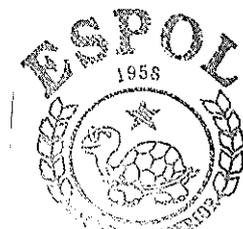
$$V \varphi_{50} \text{cp} [dT_{1/2}(t)/dt] = F(t) \varphi_{25} \text{cp} T_i(t) + Q_c(t) \varphi_{80} \text{cp} T_c(t) - UA[T_{1/2}(t) - T_{\text{amb}}(t)] - [(F(t) + Q_c(t)) \varphi_{50} \text{cp} T_{1/2}(t)]$$

Linealización y transformada de Laplace, considerando:

$$F(t) + Q_c(t) = F + Q_c = C, T_{\text{amb}}(t) = T_{\text{amb}}$$

tenemos:

$$V \varphi_{50} \text{cp} [dT_{1/2}/dt] = F \varphi_{25} \text{cp} T_i(t) + \varphi_{25} \text{cp} T_i F(t) + Q_c \varphi_{80} \text{cp} T_c(t) + \varphi_{80} \text{cp} T_c Q_c(t) - UAT_{1/2}(t) + UAT_{\text{amb}}(t) - [(F+Q_c) \varphi_{50} \text{cp} T_{1/2}(t)]$$



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ESTADO DE SONORA  
C. I. E. A. S. C. A.

$$\begin{aligned}
 V_{50} \rho c_p [dT_{1/2}(t)/dt] + UA T_{1/2}(t) + [(F+Q_c) \rho c_p T_{1/2}(t)] &= F_{25} \rho c_p T_i(t) + \\
 &+ \rho c_p T_i F(t) + Q_c \rho c_p T_c(t) + \rho c_p T_c Q_c(t) + UA T_{amb}(t)
 \end{aligned}$$

$$V_{50} \rho c_p s T_{1/2}(s) + UA T_{1/2}(s) + [(F+Q_c) \rho c_p] T_{1/2}(s) = F_{25} \rho c_p T_i(s) +$$

$$\rho c_p T_i F(s) + Q_c \rho c_p T_c(s) + \rho c_p T_c Q_c(s) + UA T_{amb}(s)$$

Si no hay perturbación de  $T_{amb}(t)$ , es decir  $T_{amb}(t) = \text{constante}$ ;

entonces:

$$T_{amb}(s) = 0$$

$$V_{80} \rho c_p s T_{1/2}(s) + [UA + (F+Q_c) \rho c_p] T_{1/2}(s) = F_{25} \rho c_p T_i(s) +$$

$$\rho c_p T_i F(s) + Q_c \rho c_p T_c(s) + \rho c_p T_c Q_c(s)$$

Dividiendo para  $[UA + (F+Q_c) \rho c_p]$ , toda la expresión, tenemos:

$$\tau s T_{1/2}(s) + T_{1/2}(s) = K_{Ti} T_i(s) + K_F F(s) + K_{Tc} T_c(s) + K_{Qc} Q_c(s)$$



UA = Coeficiente global de transferencia de calor en Btu/(hr\*°F)

A = Area transversal a la dirección del flujo de calor en m<sup>2</sup>

$\rho$  = Densidad de fluido a temperatura x o y °C en Kg/m<sup>3</sup>

$\frac{x}{y}$

$c_p$  = Calor específico del fluido a t, x o y °C en Btu/(Kg\*°F)

$\frac{x}{y}$

F + Qc = Valor promedio de suministro de fluido o flujo total en  
m<sup>3</sup>/min

F = Flujo de agua fría en m<sup>3</sup>/min

Qc = Flujo de agua caliente en m<sup>3</sup>/min

Reemplazando y resolviendo para las condiciones establecidas o para otras condiciones en las tablas 6.8.3, 6.8.4, 6.8.5, 6.8.6, se ha elaborado un programa para obtener los resultados deseados de ganancias y constante de tiempo, entre otros y para el análisis de la estabilidad, variando el flujo de suministro y la temperatura deseada, con las limitantes ya descritas para todo el sistema.

En la tabla 6.8.7, se calcula el umbral de inestabilidad y el respectivo ajuste por el método de razón de asentamiento de

Nota.- Introducir en la hoja de cálculo otras condiciones variables de trabajo:  
 -  $T_{12}x$ ,  $x^{\circ}C$   
 -  $(F+Qc)y$ , y lit/min.  
 Para obtener resultados como:  
 -  $\phi_x$ ,  $cp_x$ ,  $Qc_x$ , etc

CONDICIONES DE TRABAJO	R1	R2	R3	TANQUE
$T_{12}x$ , ( $^{\circ}C$ ), [x - temperatura]	65			
$(F+Qc)y$ , (lit/min), [y - flujo]	8			
V(m <sup>3</sup> )	0,0001176	0,000510833	0,0008186	0,031696
A(pie <sup>2</sup> )	1,55	2,79	3,84	5,15
$\phi_x$ (Kg/m <sup>3</sup> ) <sub>25</sub>	996,78	996,78	996,78	996,78
$\phi_x$ (Kg/m <sup>3</sup> ) <sub>50</sub>	987,76	987,76	987,76	987,76
$\phi_x$ (Kg/m <sup>3</sup> ) <sub>80</sub>	971,53	971,53	971,53	971,53
$\phi_x$ (Kg/m <sup>3</sup> ) <sub>200</sub>	962,60	962,60	962,60	962,60
$\phi_x$ (Kg/m <sup>3</sup> ) <sub>x</sub>	978,11	978,11	978,11	978,11
cp(Btu/lb <sup>o</sup> F) <sub>25</sub>	1,0003	1,0003	1,0003	1,0003
cp(Btu/lb <sup>o</sup> F) <sub>50</sub>	0,99888	0,99888	0,99888	0,99888
cp(Btu/lb <sup>o</sup> F) <sub>80</sub>	1,00312	1,00312	1,00312	1,00312
cp(Btu/lb <sup>o</sup> F) <sub>200</sub>	1,006	1,006	1,006	1,006
cp(Btu/lb <sup>o</sup> F) <sub>x</sub>	1	1	1	1
F+Qc(m <sup>3</sup> /min) <sub>s</sub>	0,008	0,008	0,008	0,008
F+Qc(m <sup>3</sup> /min) <sub>z</sub>	0,022	0,022	0,022	0,022
F+Qc(m <sup>3</sup> /min) <sub>y</sub>	0,008	0,008	0,008	0,008
U(Btu/hr <sup>o</sup> F)				
UA(Btu/hr <sup>o</sup> F)	0	0	0	0
U(Btu/hr <sup>o</sup> F) <sub>x,y</sub>	0,09	1,49	1,45	0,23
UA(Btu/hr <sup>o</sup> F) <sub>x,y</sub>	0,14	4,15	5,57	1,17
cp(Btu/Kg <sup>o</sup> F) <sub>25</sub>	2,2057	2,2057	2,2057	2,2057
cp(Btu/Kg <sup>o</sup> F) <sub>50</sub>	2,2025	2,2025	2,2025	2,2025
cp(Btu/Kg <sup>o</sup> F) <sub>80</sub>	2,2119	2,2119	2,2119	2,2119
cp(Btu/Kg <sup>o</sup> F) <sub>200</sub>	2,2182	2,2182	2,2182	2,2182
cp(Btu/Kg <sup>o</sup> F) <sub>x</sub>	2,2050	2,2050	2,2050	2,2050
U(Btu/min <sup>o</sup> F) <sub>x,y</sub>	0	0	0	0
UA(Btu/min <sup>o</sup> F)	0	0	0	0
U(Btu/min <sup>o</sup> F) <sub>x,y</sub>	0,00	0,02	0,02	0,00
UA(Btu/min <sup>o</sup> F) <sub>x,y</sub>	0,00	0,07	0,09	0,02

Tabla 6.8.3 Valores físicos para las condiciones de trabajo establecidas y otras condiciones (con programa de computadora)

RESULTADOS PARA EL ESTADO ESTACIONARIO	[F+Qc] <sub>a</sub>			[F+Qc] <sub>z</sub>			[F+Qc] <sub>y</sub>					
	R1	R2	R3	TANQUE	R1	R2	R3	TANQUE	R1	R2	R3	TANQUE
Qc (m <sup>3</sup> /min)x, para Tc=200°F	0,004637	0,004637	0,004637	0,004637	0,012752	0,012752	0,012752	0,012752	0,004637	0,004637	0,004637	0,004637
Qc (gal/min)x, para Tc=200°F	1,224897	1,224897	1,224897	1,224897	3,368468	3,368468	3,368468	3,368468	1,224897	1,224897	1,224897	1,224897
Qc (m <sup>3</sup> /min)x, para Tc= 80 °C	0,005786	0,005786	0,005786	0,005786	0,015910	0,015910	0,015910	0,015910	0,005786	0,005786	0,005786	0,005786
Qc (gal/min)x, para Tc= 80 °C	1,528283	1,528283	1,528283	1,528283	4,202779	4,202779	4,202779	4,202779	1,528283	1,528283	1,528283	1,528283
τ (min) <sub>50</sub>	0,01	0,06	0,10	3,96	0,01	0,02	0,04	1,44	0,01	0,06	0,10	3,96
τ (seg) <sub>50</sub>	0,88	3,83	6,14	237,72	0,32	1,39	2,23	86,41	0,88	3,82	6,11	237,46
τ (min) <sub>80</sub>	0,01	0,06	0,10	3,96	0,01	0,02	0,04	1,44	0,01	0,06	0,10	3,96
τ (seg) <sub>80</sub>	0,88	3,83	6,14	237,72	0,32	1,39	2,23	86,41	0,88	3,82	6,11	237,45
τ (min)x	0,01	0,06	0,10	3,96	0,01	0,02	0,04	1,44	0,01	0,06	0,10	3,96
τ (seg)x	0,88	3,82	6,11	237,45	0,32	1,39	2,23	86,41	0,88	3,82	6,11	237,45
K <sub>T50</sub> (Tc=80°C), [°C/°C]	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55
K <sub>T50</sub> (Tc=200°F), [°C/°C]	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
K <sub>T80</sub> (Tc=80°C), [°C/°C]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K <sub>T80</sub> (Tc=200°C), [°C/°C]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
K <sub>Tx</sub> (Tc=80°C), [°C/°C]	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
K <sub>Tx</sub> (Tc=200°C), [°C/°C]	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
K <sub>50</sub> (°C/Kg/seg)	189,48	189,48	189,48	189,48	68,90	68,80	68,77	68,87	189,46	188,73	188,48	189,27
K <sub>80</sub> (°C/Kg/seg)	189,54	188,80	188,54	189,35	69,24	69,14	69,11	69,21	190,39	189,65	189,39	190,20
K <sub>x</sub> (°C/Kg/seg)	191,11	190,37	190,11	190,92	69,50	69,40	69,37	69,48	191,11	190,37	190,11	190,92
K <sub>T50</sub> (Tc=80, T1/2=50h), [°C/°C]	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
K <sub>T50</sub> (Tc=80, T1/2=80h), [°C/°C]	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00
K <sub>T80</sub> (Tc=200, T1/2=50h), [°C/°C]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
K <sub>T80</sub> (Tc=200, T1/2=80h), [°C/°C]	0,80	0,79	0,79	0,80	0,80	0,80	0,79	0,80	0,80	0,79	0,79	0,80
K <sub>Tx</sub> (Tc=80, T1/2=5h), [°C/°C]	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
K <sub>Tx</sub> (Tc=200, T1/2=5h), [°C/°C]	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
K <sub>50</sub> (Tc=80, T1/2=50h), [°C/Kg/seg]	607,04	607,04	607,04	607,04	220,73	220,42	220,32	220,65	606,96	604,64	603,82	606,37
K <sub>80</sub> (Tc=80, T1/2=80h), [°C/Kg/seg]	606,41	604,04	603,21	605,80	220,53	220,22	220,11	220,45	606,41	604,04	603,21	605,80
K <sub>50</sub> (Tc=200, T1/2=50h), [°C/Kg/seg]	706,71	706,71	706,71	706,71	256,97	256,61	256,49	256,88	706,62	703,91	702,96	705,92
K <sub>80</sub> (Tc=200, T1/2=80h), [°C/Kg/seg]	707,07	704,33	703,36	706,36	257,14	256,77	256,65	257,04	707,07	704,33	703,36	706,36
K <sub>50</sub> (Tc=80, T1/2=5h), [°C/Kg/seg]	612,35	612,35	612,35	612,35	222,66	222,35	222,24	222,58	612,27	609,90	609,07	611,66
K <sub>80</sub> (Tc=80, T1/2=8h), [°C/Kg/seg]	712,79	710,04	709,07	712,09	259,22	258,85	258,73	259,13	712,79	710,04	709,07	712,09

Tabla 6.8.4 Resultados de flujo de agua caliente, constantes de tiempo y ganancias en estado estacionario para las condiciones de trabajo establecidas y otras condiciones (con programa de computadora)

		Tc (°C) = 80			Tc (°C) = 50			Tc (°C) = 200		
AJUSTE		T <sub>1/2</sub> (°C) = 80			T <sub>1/2</sub> (°C) = 50			T <sub>1/2</sub> (°C) = 200		
Kc	psi/psi	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>80</sup> 8	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>50</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>200</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>80</sup> 8	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>50</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>200</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>80</sup> 8	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>50</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>200</sup> 22
		°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C
		0.38	0.39	0.61	0.62	0.61	0.62	0.61	0.62	0.63
0.5		0.55	0.57	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.69
1		0.66	0.67	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.92
5		0.92	0.93	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.96
10		0.96	0.96	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
20		0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
50		0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100										
		T <sub>1/2</sub> (°C) = 80			T <sub>1/2</sub> (°C) = 50			T <sub>1/2</sub> (°C) = 200		
AJUSTE		T <sub>1/2</sub> (°C) = 80			T <sub>1/2</sub> (°C) = 50			T <sub>1/2</sub> (°C) = 200		
Kc	psi/psi	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>80</sup> 8	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>50</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>200</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>80</sup> 8	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>50</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>200</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>80</sup> 8	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>50</sup> 22	ΔT <sub>1/2</sub> /ΔT <sub>1/2</sub> <sup>200</sup> 22
		°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C	°C/°C
		0.39	0.39	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.51
0.5		0.57	0.57	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.68
1		0.67	0.67	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.91
5		0.93	0.93	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.95
10		0.96	0.96	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
20		0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
50		0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100										

Nota: 8 con F + Qc = 8 lit/min  
 22 con F + Qc = 22 lit/min  
 X, Y con cualquier Temperatura T<sub>1/2</sub> en °C, y cualquier flujo de alimentación F+Qc, lit/min

Tabla 6.8.5 Resultados para valores de Kc, debido a cambios en la respuesta por cambios en el punto de control (con programa de computadora)



METODO DE AJUSTE CONDICIONES DE	ROUTH										SUBSTITUCION DIRECTA			
	$T_t$	$\tau_v$	$\tau$	Kh	KV <sub>x,y</sub>	K <sub>ocx,y</sub>	K <sub>Cu</sub>	K <sub>Cu</sub>	W <sub>u</sub>	T <sub>u</sub>	K <sub>Cu</sub>	K <sub>Cu</sub>	W <sub>u</sub>	T <sub>u</sub>
	(min)	(min)	(min)	psi / °C	(Kg/seg)/psi	°C/(Kg/seg)	(%) / (%)	(psi)/(psi)	rad/seg	min				
<b>R1</b>														
TRABAJO														
Tc = 80°C, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.01	0.12	0.03	612.35	9.2	9.2	0.65	0.16				
Tc = 80°C, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.01	0.12	0.09	222.56	21.2	21.2	1.06	0.10				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.01	0.12	0.03	712.79	9.9	9.9	0.65	0.16				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.01	0.12	0.07	259.22	22.7	22.7	1.06	0.10				
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.01	0.12	0.03	612.27	9.2	9.2	0.65	0.15				
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.01	0.12	0.03	712.79	9.9	9.9	0.65	0.15				
<b>R2</b>														
Tc = 80°C, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.06	0.12	0.03	612.35	4.3	4.3	0.34	0.31				
Tc = 80°C, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.02	0.12	0.09	222.35	6.7	6.7	0.53	0.20				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.06	0.12	0.03	710.04	4.6	4.6	0.34	0.31				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.02	0.12	0.07	258.65	7.2	7.2	0.53	0.20				
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.06	0.12	0.03	609.50	4.3	4.3	0.34	0.31				
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.06	0.12	0.03	710.04	4.6	4.6	0.34	0.31				
<b>R3</b>														
Tc = 80°C, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.10	0.12	0.03	612.35	4.1	4.1	0.29	0.36				
Tc = 80°C, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.04	0.12	0.09	222.24	5.2	5.2	0.43	0.25				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.10	0.12	0.03	709.07	4.4	4.4	0.29	0.36				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.04	0.12	0.07	258.73	5.6	5.6	0.43	0.25				
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.10	0.12	0.03	609.07	4.1	4.1	0.29	0.36				
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	0.10	0.12	0.03	709.07	4.4	4.4	0.29	0.36				
<b>TANQUE</b>														
Tc = 80°C, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	3.96	0.12	0.03	612.35	38.4	38.4	0.16	0.64				
Tc = 80°C, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	1.44	0.12	0.09	222.58	15.4	15.4	0.17	0.61				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 811t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	3.96	0.12	0.03	712.09	41.2	41.2	0.16	0.64				
Tc = 200°F, (F+Qc) = 221t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	1.44	0.12	0.07	259.13	16.5	16.5	0.17	0.61				
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	3.96	0.12	0.03	611.66	38.5	38.5	0.16	0.64				
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y t/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	0.17	0.07	3.96	0.12	0.03	712.09	41.2	41.2	0.16	0.64				

Tabla 6.8.6 Resultados para el umbral de la estabilidad por el método de Routh y de substitución directa, para condiciones establecidas de trabajo y otras condiciones (con programa de computadora)



METODO DE AJUSTE CONDICIONES DE TRABAJO	ROUTH				SUBSTITUCION DIRECTA				RAZON DE ASENTAMIENTO 1/4			
	Kc <sub>u</sub>	Kc <sub>u</sub>	W <sub>u</sub>	T <sub>u</sub>	Kc	T <sub>u</sub>	Kc	ψ <sub>o</sub>	ri	ψ <sub>o</sub>	ri	ψ <sub>o</sub>
	(%)(%)	(psi)(psi)	rad/seg	min	psi/psi	min	psi/psi	rep/min	rep/min	min	rep/min	min
	R1											
Tc = 80°C, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	9.2	9.2	0.65	0.16	5.4	0.16	5.4	12.4	12.4	0.02	12.4	0.02
Tc = 80°C, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	21.2	21.2	1.06	0.10	12.5	0.10	12.5	20.2	20.2	0.01	20.2	0.01
Tc = 200°F, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	9.9	9.9	0.65	0.16	5.8	0.16	5.8	12.4	12.4	0.02	12.4	0.02
Tc = 200°F, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	22.7	22.7	1.06	0.10	13.4	0.10	13.4	20.2	20.2	0.01	20.2	0.01
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	9.2	9.2	0.65	0.16	5.4	0.16	5.4	12.4	12.4	0.02	12.4	0.02
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	9.9	9.9	0.65	0.16	5.8	0.16	5.8	12.4	12.4	0.02	12.4	0.02
	R2											
Tc = 80°C, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.3	4.3	0.34	0.31	2.5	0.31	2.5	6.5	6.5	0.04	6.5	0.04
Tc = 80°C, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	6.7	6.7	0.53	0.20	4.0	0.20	4.0	10.0	10.0	0.02	10.0	0.02
Tc = 200°F, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.6	4.6	0.34	0.31	2.7	0.31	2.7	6.5	6.5	0.04	6.5	0.04
Tc = 200°F, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	7.2	7.2	0.53	0.20	4.3	0.20	4.3	10.0	10.0	0.02	10.0	0.02
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.3	4.3	0.34	0.31	2.6	0.31	2.6	6.5	6.5	0.04	6.5	0.04
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.6	4.6	0.34	0.31	2.7	0.31	2.7	6.5	6.5	0.04	6.5	0.04
	R3											
Tc = 80°C, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.1	4.1	0.29	0.36	2.4	0.36	2.4	5.5	5.5	0.05	5.5	0.05
Tc = 80°C, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	5.2	5.2	0.43	0.25	3.1	0.25	3.1	6.1	6.1	0.03	6.1	0.03
Tc = 200°F, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.4	4.4	0.29	0.36	2.6	0.36	2.6	5.5	5.5	0.05	5.5	0.05
Tc = 200°F, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	5.6	5.6	0.43	0.25	3.3	0.25	3.3	8.1	8.1	0.03	8.1	0.03
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.1	4.1	0.29	0.36	2.4	0.36	2.4	5.5	5.5	0.05	5.5	0.05
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	4.4	4.4	0.29	0.36	2.6	0.36	2.6	5.5	5.5	0.05	5.5	0.05
	TANQUE											
Tc = 80°C, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	38.4	38.4	0.16	0.64	22.6	0.64	22.6	3.1	3.1	0.08	3.1	0.08
Tc = 80°C, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	15.4	15.4	0.17	0.61	9.1	0.61	9.1	3.3	3.3	0.08	3.3	0.08
Tc = 200°F, (F+Qc) = 8 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	41.2	41.2	0.16	0.64	24.2	0.64	24.2	3.1	3.1	0.08	3.1	0.08
Tc = 200°F, (F+Qc) = 22 lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	16.5	16.5	0.17	0.61	9.7	0.61	9.7	3.3	3.3	0.08	3.3	0.08
Tc = 80°C, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	38.5	38.5	0.16	0.64	22.6	0.64	22.6	3.1	3.1	0.08	3.1	0.08
Tc = 200°F, (F+Qc) = Y lit/min, T <sub>1/2</sub> = X°C	41.2	41.2	0.16	0.64	24.2	0.64	24.2	3.1	3.1	0.08	3.1	0.08

Tabla 6.8.7 Resultados para el umbral de la estabilidad por el método de Routh, substitución directa y su respectivo ajuste por razón de asentamiento de un cuarto, para condiciones establecidas de trabajo y otras condiciones.



POLITECNICA SUPERIOR  
BIBLIOTECA DE INVESTIGACIONES

$\frac{1}{4}$ (Ziegler y Nichols). Algo que vale resaltar es que para una determinada condición de trabajo de flujo de suministro y temperatura deseada, se puede saber el caudal de agua caliente necesaria que debe circular hacia el proceso, la cuál se puede medir en el rotámetro instalado en la vía por donde este circula.

### Análisis de la estabilidad del circuito

Sabemos que para el análisis de la estabilidad debemos plantear la ecuación característica de la unidad en consideración.

#### Ecuación característica:

De los diagramas de bloques de las figuras 6.7.2 o de la tabla 6.8.1, se plantea la siguiente ecuación característica:

$$1 + H(s) G_c(s) G_v(s) G_{Qc}(s) = 0 \quad 6.8.1$$

$$1 + [K_h / (\tau_i s + 1)] [K_c (1 + r_i / s + \tau_{DS})] [K_v / (\tau_v s + 1)] [K_{Qc} / (\tau_{Qc} s + 1)] = 0 \quad 6.8.2$$

Donde las constantes de tiempo citadas a continuación son dadas en minutos:

$\tau_t$ , es la constante de tiempo del transmisor

$\tau_D$ , es el tiempo derivativo

$\tau_v$ , es la constante de tiempo de la válvula

$\tau_{Qc} = \tau$ , la constante de tiempo del proceso influenciada por el flujo de agua caliente

$r_i$  = son las repeticiones por minuto de la acción integral

Y las ganancias de estado estacionario citadas a continuación, en sus respectivas unidades:

$K_h$  = Ganancia del transmisor en  $\text{psi}/^\circ\text{C}$

$K_c$  = Ganancia del control proporcional en  $(\text{psi}/\text{psi})$  o  $(\% / \%)$

$K_v$  = Ganancia de la válvula en  $(\text{Kg}/\text{seg})/\text{psi}$

$K_{Qc}$  = Ganancia del proceso para un cambio en el flujo de agua caliente en  $^\circ\text{C}/(\text{Kg}/\text{seg})$

Presentamos la tabla 6.8.6, para determinar el valor de  $K_c$  en control proporcional, que calcula el valor de  $K_c$  último ( $K_{cu}$ ) para el cuál el circuito de control se mantiene estable, bajo las condiciones de trabajo establecidas y bajo otras condiciones de



trabajo introducidas en el programa. Todo esto, guardando las limitaciones que tiene nuestra unidad.

Haciendo  $r_i = 0$  y  $\tau_D = 0$  para el análisis del control proporcional, reordenando y resolviendo la ecuación característica resulta:

$$\tau_t \tau_v \tau s^3 + (\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau) s^2 + (\tau_t + \tau_v + \tau) s + (1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{c_{x,y}}} K_c) = 0 \quad 6.8.3$$

Donde  $K_{v_{x,y}}$  y  $K_{Q_{c_{x,y}}}$ , son los valores de las ganancias de la válvula y de alimentación de agua caliente al proceso para condiciones de trabajo de entrada.

#### ARREGLO DE ROUTH.-

<u>FILA1</u>	$(\tau_t \tau_v \tau)$	$(\tau_t + \tau_v + \tau)$	0
<u>FILA2</u>	$(\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau)$	$(1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{c_{x,y}}} K_c)$	0
<u>FILA3</u>	$b_1$	0	0
<u>FILA4</u>	$(1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{c_{x,y}}} K_c)$	0	0

De esta manera se obtiene el valor de  $b_1$ :

$$b_1 = [(\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau)(\tau_t + \tau_v + \tau) - (\tau_t \tau_v \tau)(1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{c_{x,y}}} K_c)]$$



$$/[\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau]$$

6.8.4

Para que el circuito de control sea estable todos los términos de la columna izquierda deben tener el mismo signo, en este caso positivo (+), y para esto:

a)  $b_1 \geq 0$  ó

$$[(\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau)(\tau_t + \tau_v + \tau) - \tau_t \tau_v \tau] (1 + KhKv_{x,y}K_{Qcx,y}Kc) / [\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau] \geq 0$$

b)  $(1 + KhKv_{x,y}K_{Qcx,y}Kc) \geq 0$

En la segunda condición obtenemos resultados de ganancias del controlador negativos puesto que :

$$Kc \geq -1/(KhKv_{x,y}K_{Qcx,y})$$

Lo cuál no puede ser ya que la acción del controlador debe ser directa. De aquí que la única condición que nos queda para el examen de la estabilidad es la primera condición, entonces resolviendo para  $Kc$ :

$$Kc \leq [(\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau)(\tau_t + \tau_v + \tau) - (\tau_t \tau_v \tau)] / [\tau_t \tau_v \tau KhKv_{x,y} K_{Qcx,y}]$$



Inicializando estos valores en la tabla 6.8.6, obtendremos el valor de ganancia última ( $K_{cu}$ ) a partir de la ecuación 6.8.5.

$$K_{cu} = \frac{[(\tau_f \tau_v + \tau_f \tau + \tau_v \tau)(\tau_f + \tau_v + \tau) - (\tau_f \tau_v \tau)]}{[\tau_f \tau_v \tau K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{cx,y}}]} \quad 6.8.5$$

**Método de sustitución directa para determinar la ganancia última y frecuencia última del circuito de control.**

Regresando a la ecuación característica, ecuación 6.8.3 para control proporcional, y haciendo  $s=iW_u$ ,  $K_c=K_{cu}$  con  $i^2 = -1$ , e  $i^3 = -i$ .

$$\tau_f \tau_v \tau s^3 + (\tau_f \tau_v + \tau_f \tau + \tau_v \tau) s^2 + (\tau_f + \tau_v + \tau) s + (1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{cx,y}} K_c) = 0 \quad 6.8.3$$

Reemplazando y reordenando, resulta:

$$\begin{aligned} & [(1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{cx,y}} K_{cu}) - (\tau_f \tau_v + \tau_f \tau + \tau_v \tau) W_u^2] + \\ & + [(\tau_f + \tau_v + \tau) W_u - \tau_f \tau_v \tau W_u^3] i = 0 \end{aligned} \quad 6.8.6$$

De la cuál resultan el siguiente par de ecuaciones:

$$[(1 + K_h K_{v_{x,y}} K_{Q_{cx,y}} K_{cu}) - (\tau_f \tau_v + \tau_f \tau + \tau_v \tau) W_u^2] = 0 \quad 6.8.6a$$



$$[(\tau_t + \tau_v + \tau) W_u - \tau_t \tau_v \tau W_u^3] i = 0$$

De la ecuación 6.8.6b, tenemos el siguiente despeje de la frecuencia última y el período último:

$$W_u = [(\tau_t + \tau_v + \tau) / (\tau_t \tau_v \tau)]^{1/2} ; T_u = 2\pi / [(\tau_t + \tau_v + \tau) / (\tau_t \tau_v \tau)]^{1/2} \quad 6.8.7$$

Reemplazando el resultado obtenido de  $W_u$  en la ecuación 6.8.6a, y despejando  $K_{cu}$ , tenemos:

$$K_{cu} = [(\tau_t \tau_v + \tau_t \tau + \tau_v \tau) (\tau_t + \tau_v + \tau) / (\tau_t \tau_v \tau) - 1] / [K_h K_{v,x,y} K_{q,c,x,y}] \quad 6.8.8$$

Inicializando condiciones de trabajo establecidas y otras condiciones de la Unidad de temperatura, se pueden obtener resultados de  $K_{cu}$  y  $T_u$  en el programa de la tabla 6.8.6 y 6.8.7

La tabla 6.8.7 (consecuencia de la tabla 6.8.6), calcula los valores de la ganancia, ajuste integral, y tiempo derivativo utilizando las fórmulas para el ajuste óptimo de un controlador PID, en base al criterio de **razón de asentamiento de un cuarto (Ziegler y Nichols)**.

### 3. Equipos y materiales.

Los equipos y materiales a utilizar en esta prueba son los mismos que se utilizaron en la prueba 6.7, más el programa de computadora de las tablas 6.8.3 a 6.8.7.

### 4. Procedimiento.

- Alistar la unidad de temperatura para las condiciones de trabajo requeridas.
- Arreglar el controlador PID en control proporcional directo, es decir que el controlador debe estar balanceado y su salida debe aumentar con el aumento de la temperatura del proceso. Eliminar acción integral y la acción derivativa a cero ( $r_i = 0$  y  $\tau_D = 0$ ).
- Poner el valor mínimo de la ganancia en el controlador, por ejemplo  $K_c = 0.5$ .
- Empezar fijando la temperatura deseada  $T_{1/2}^{\text{fijo}}$  para cualquiera de los dos puntos de control o salida  $T_{1/2}$ .

- Esperar unos cuantos minutos para observar la salida graficada en el disco de registro. Seguramente la salida con respecto a la temperatura fija tendrá un error considerable en el tiempo.
- Aumentar la ganancia por un factor de dos, es decir ajustar la perilla de la ganancia al valor de 1 ( $K_c = 1$ ). Mover la perilla de la aguja del set-point, provocando una pequeña excitación (por ejemplo un escalón de 5 °C hacia arriba o hacia abajo de la escala de registro), para observar la respuesta debido al cambio de la ganancia. Para esto es necesario esperar unos minutos.
- Repetir el paso anterior hasta que la respuesta se vuelva bien oscilatoria. La ganancia a la que esto ocurre es la ganancia última ( $K_{cu}$ ).
- Poner la ganancia en  $K_c = K_{cu}/2$ .
- A continuación, introducir la acción integral, aumentando las repeticiones por minuto por factores de 2, desde el valor mínimo y luego hacer un disturbio como la variación del set-point en 5 °C, para observar la respuesta.



- Encontrar el valor de  $r_i$ , que hace oscilar bastante al sistema, y a continuación poner  $r_i$ , a la mitad de este valor.
- Introducimos la acción derivativa desde su valor mínimo, aumentándolo hasta que el ruido existente en la señal del proceso, empiece a notarse en la salida del controlador. En algunos casos hay que hacer cambios de carga para ver el efecto de la acción derivada.
- Situar  $\tau_D$ , a la mitad de este valor máximo.
- Iterativamente, aumentar nuevamente la ganancia en pasos de 10% hasta cumplir con las especificaciones dadas sobre máxima oscilación y rapidez de amortiguamiento.

Se puede aplicar el método de tanteo, que puede ser utilizado si es que se alcanza la habilidad necesaria, habilidad que es adquirida luego de conocer muy bien el comportamiento de la Unidad.

## 5. Análisis de Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en las tablas 6.8, a mayor flujo de suministro hacia el sistema, menor es el valor de la constante de tiempo (resultados solo en los serpentines), observando las respectivas limitaciones que tiene el lazo de control, como el flujo de suministro hacia el proceso igual al flujo de salida desde este.

Las ganancias de estado estacionario de un cambio en la temperatura de salida, debido a un cambio o perturbación de la temperatura de agua caliente, no se ven alteradas con el cambio de flujo de suministro, igual que la ganancia de un cambio de temperatura de salida debido a un cambio en la temperatura de agua fría. Las ganancias de estado estacionario que si se ven modificadas por la variación del flujo de suministro son el cambio de la temperatura de salida o respuesta esperada debido a un cambio en el flujo de agua caliente y el cambio de la respuesta esperada frente a un cambio en el flujo de agua fría.

Es importante que el flujo de suministro de agua hacia el tanque de proceso no debe exceder de 8 lit/min, puesto que el flujo de

salida desde el mismo, no puede ser mayor que este valor. Esta limitante no se aplica para el control de temperatura en los serpentines, cuyo flujo de suministro hacia aquellos, puede tranquilamente alcanzar el caudal máximo de la bomba, teniendo cuidado de no rebosar el tanque.

Mientras el volumen de control o sistema a controlar es mayor, la constante de tiempo también se hace mayor, debido a que el proceso del tanque reacciona más lentamente, razón por la cuál se necesita mayor ganancia para estabilizar un proceso lento. Este hecho es demostrado a partir del modelo matemático resumido en los programas tabulados y los resultados experimentales registrados.

Resulta entonces que para estabilizar un proceso más lento como el volumen de control en el tanque de proceso necesitamos ganancias en el margen de los 36 a 60 psi/psi o más. Y para estabilizar procesos más rápidos como el caso del volumen de control en los serpentines el margen de ganancias se encuentran desde 2 a 18 psi/psi, dependiendo también de otros factores como la variación de las condiciones de trabajo.

De acuerdo a los resultados registrados y a los valores obtenidos en la tabla 6.8.6 y 6.8.7, los cuales se asemejan con un margen de error aceptable, se demuestra el funcionamiento de la Unidad de control de temperatura.

La transferencia de calor no influye tanto en la respuesta de los procesos y los tiempos muertos son muy pequeños. De manera que se puede aproximar los procesos, sin pérdida de calor y sin tiempo muerto.

Balancear la salida del controlador a 9 psi, cuando el registro de la variable de proceso y la aguja del set-point se encuentran en el 50% de la escala. No olvidar elevar las repeticiones por minuto a su valor máximo y luego hacer una excitación variando el punto de control deseado, para que cualquier corrección del modo integral existente, termine de realizarse antes de anular la acción integral.

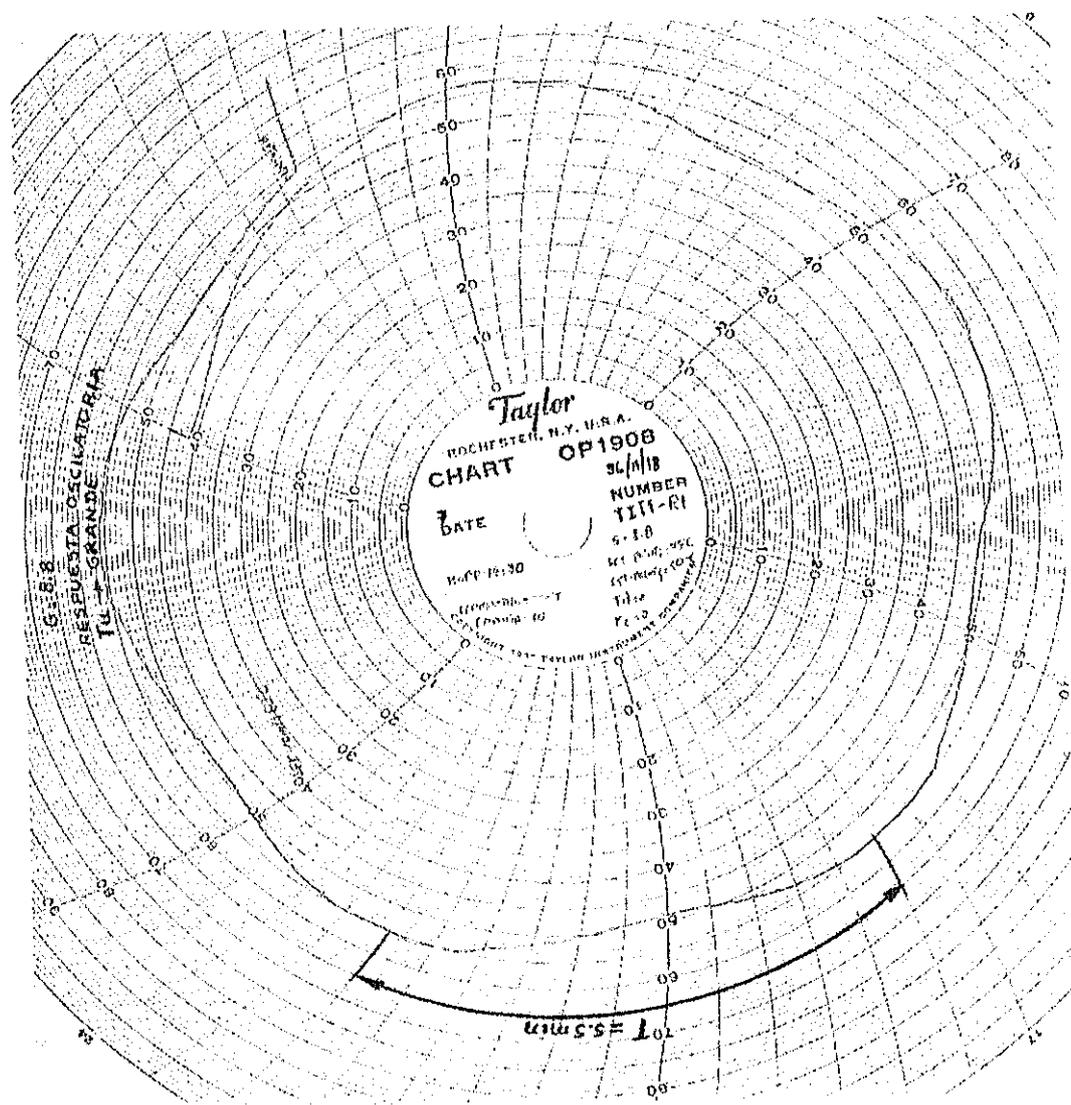
Para obtener los valores teóricos a partir del modelo matemático y poderlos comparar con los experimentales, en el programa de las tablas 6.8, hacer lo que sigue:



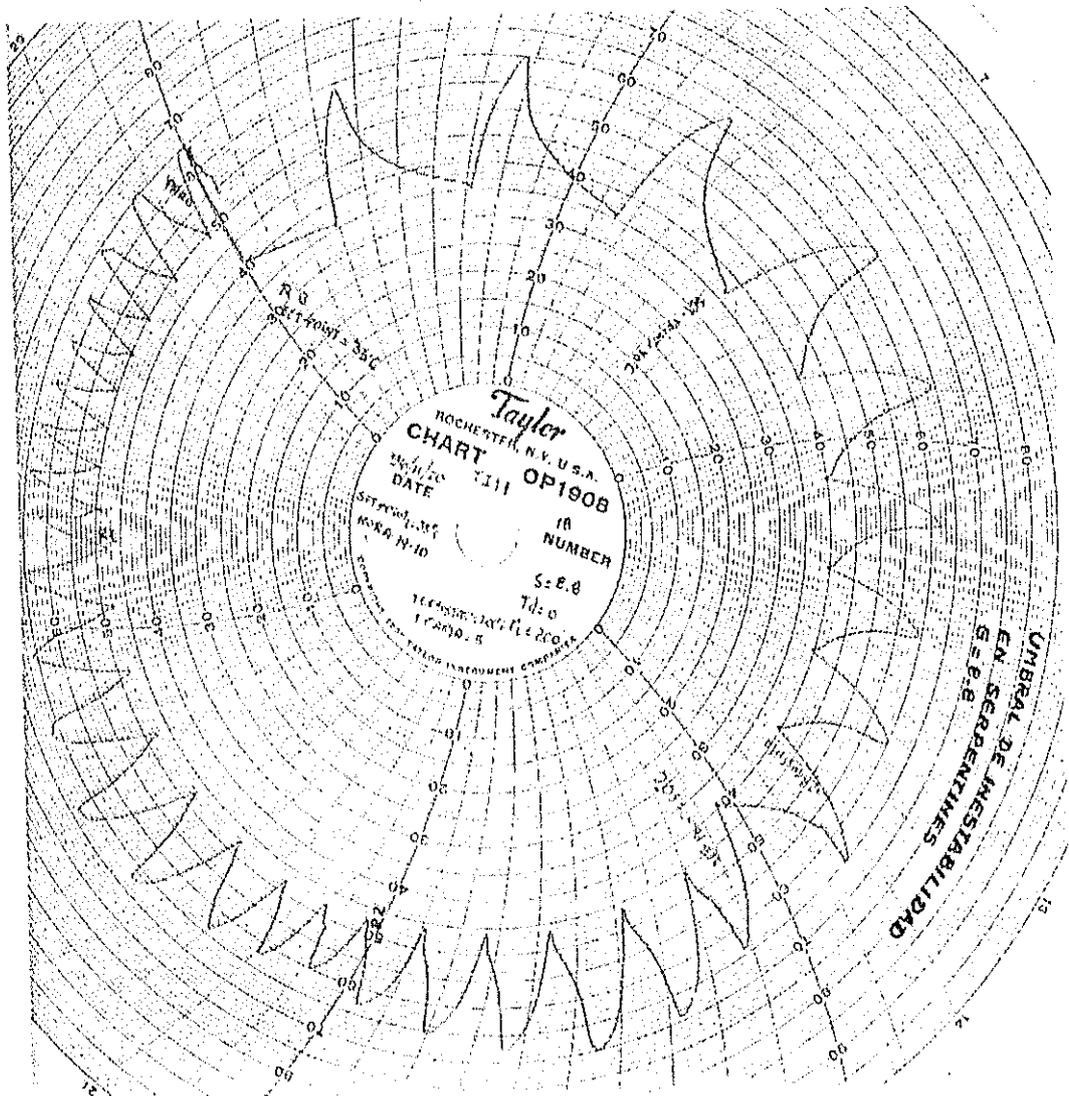
- Inicializar la tabla 6.8.3 en las celdas F2 y F3, con cualquier valor de la respuesta deseada de temperatura de salida  $(T_{1/2})_x$  y flujo de suministro de agua  $(F+Q_c)_y$ , para obtener resultados de los valores físicos. Dichos valores son necesarios para el cálculo de ganancias en estado estacionario, flujos de agua caliente, constantes de tiempo que serán obtenidos en la tabla 6.8.4.
- Introducir otros valores de  $K_c$  en las celdas AD correspondientes de la tabla 6.8.5, con el objeto de obtener el margen de la ganancia del controlador que acerca o tiende a igualar la temperatura del proceso al valor fijado o deseado, observado cuando esta razón se acerca a uno.
- Inicializar los valores de la tabla 6.8.6 y en las celdas correspondientes, para otras condiciones de trabajo:
  - $\tau_t$ , en segundos, para un transmisor dado en la celda AP4
  - $\tau_v$ , en segundos para cualquier válvula en la celda AQ4
  - $K_h$ , en  $\text{psi}^\circ\text{C}$ , para un determinado transmisor en la celda AS4
  - $X$ , en % de apertura de la válvula de nuestra Unidad para la ganancia  $K_v$  (cualquier otra condición de apertura) en la celda AT4.

Introducidos estos valores, el programa de la tabla 6.8.6, nos entrega resultados de la ganancia última para sincronizar la estabilidad, valores de la ganancia del proceso y ganancia de la válvula de esta unidad para las condiciones de trabajo deseadas.

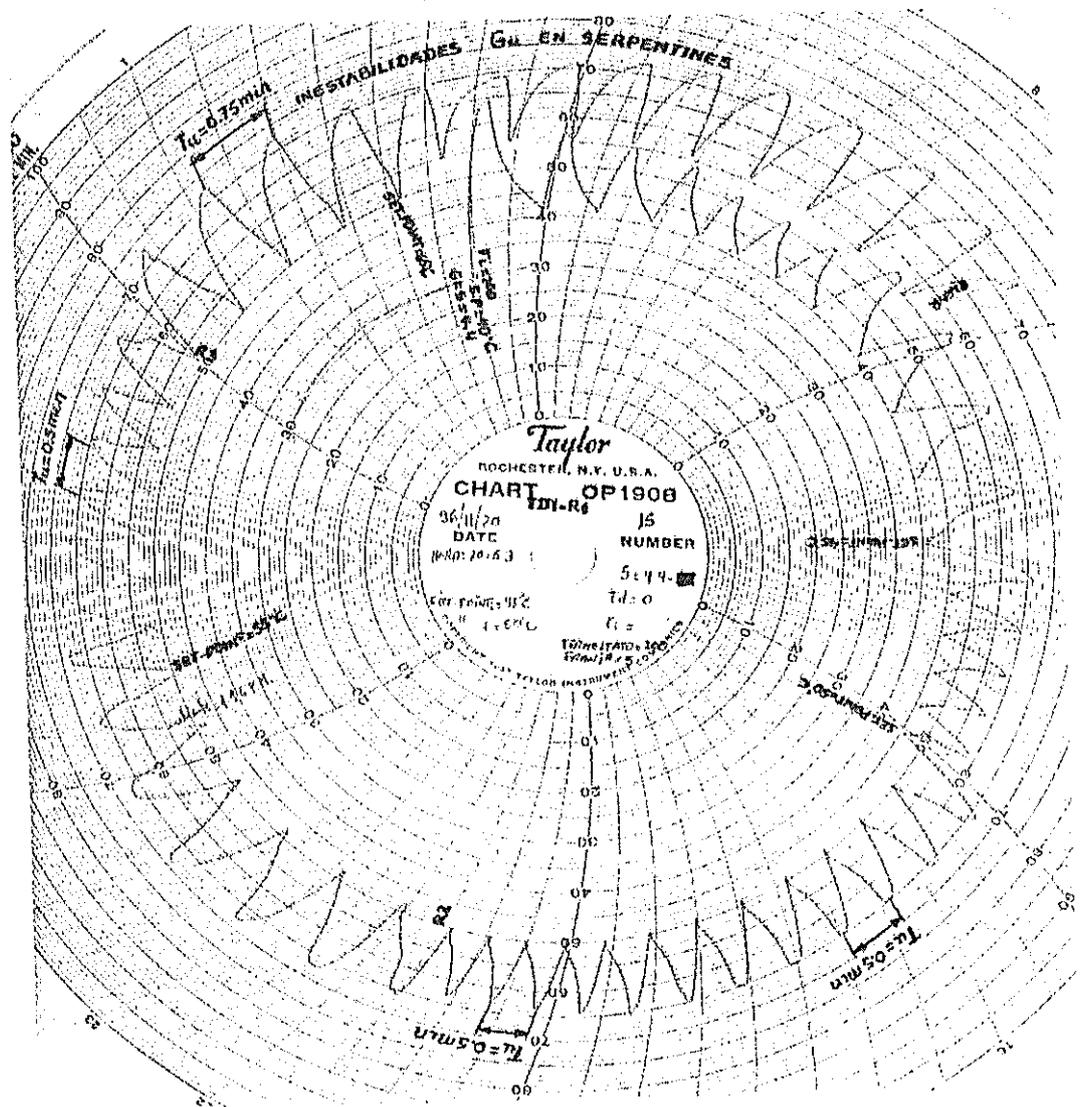
Finalmente, la tabla 6.8.7, nos entrega el ajuste necesario del controlador que se apega a la personalidad del sistema de control para un comportamiento estable.



Graf. 6.8.1a RESPUESTA EN LOS SERPENTINES

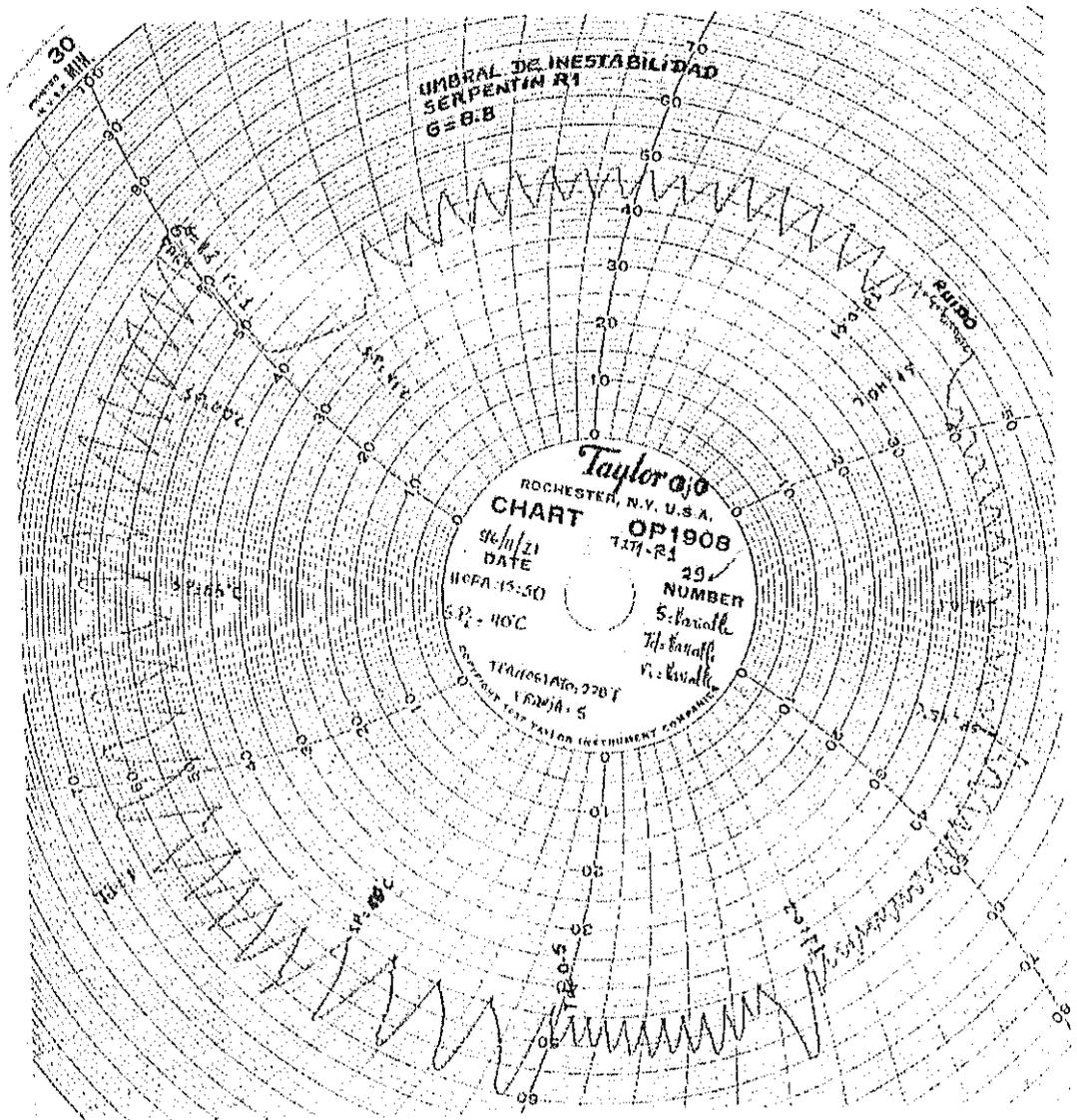


Graf. 6.8.1b RESPUESTA EN LOS SERPENTINES



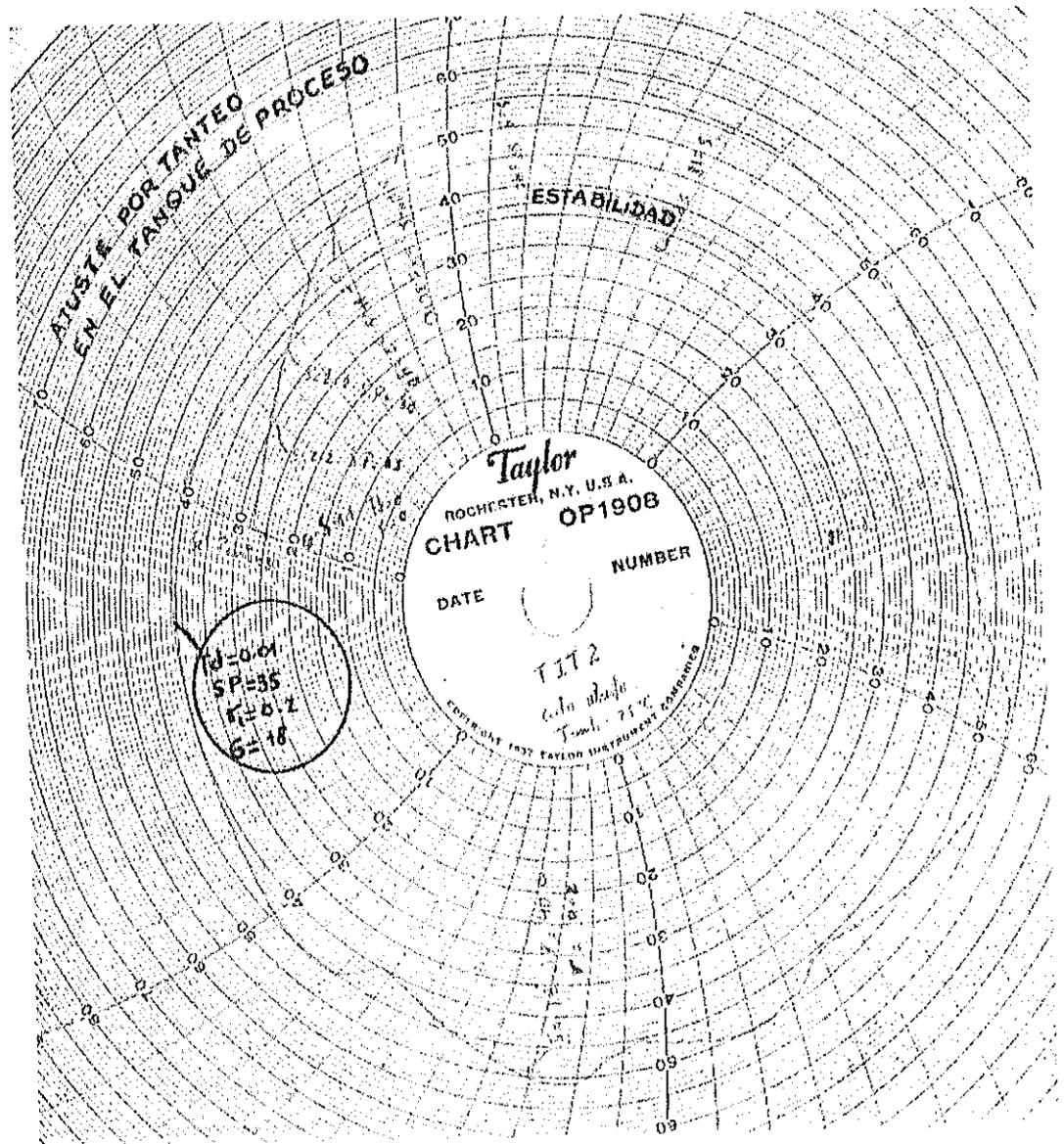
Graf. 6.8.1c RESPUESTA EN LOS SERPENTINES



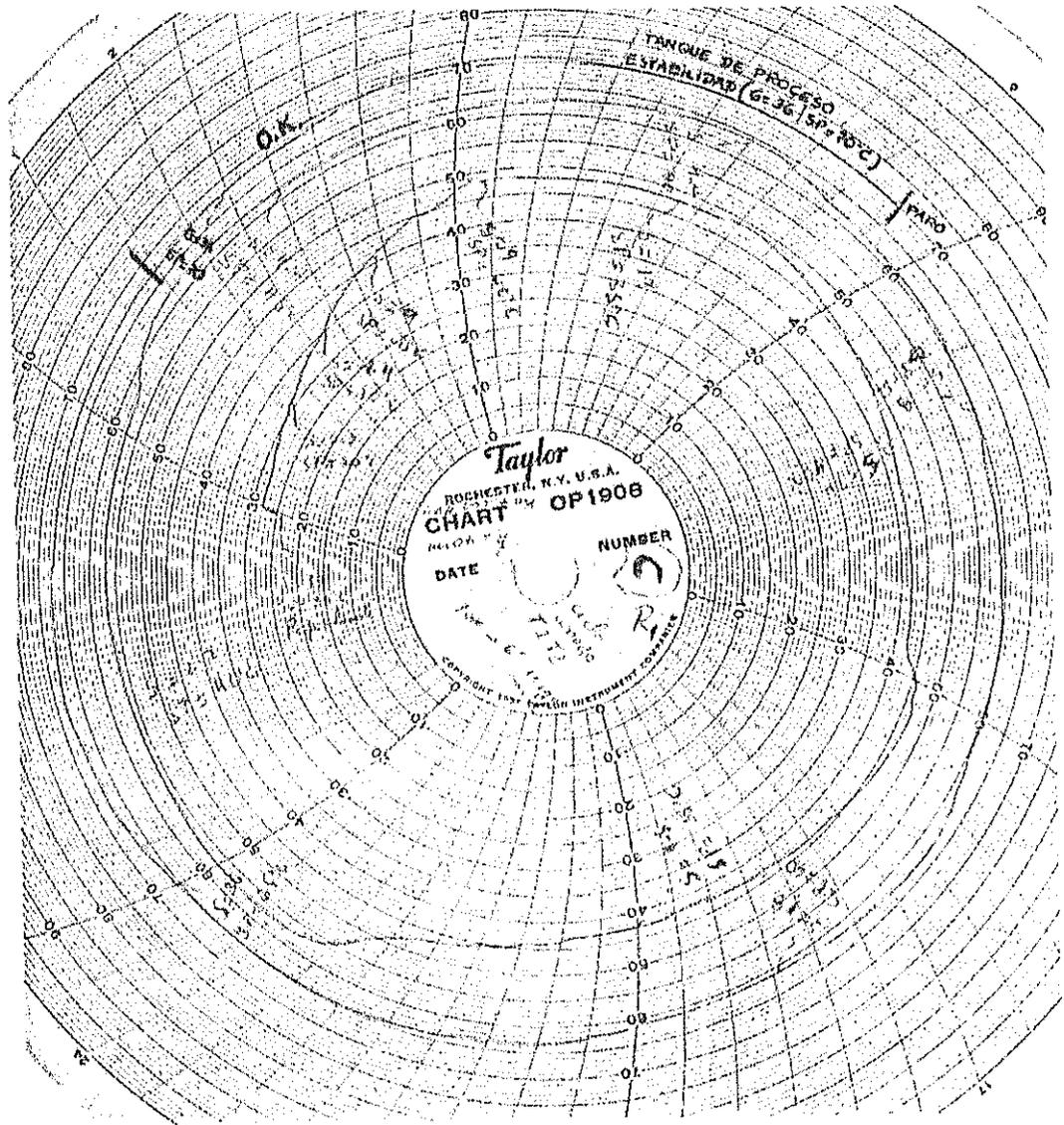


Graf. 6.8.1e RESPUESTA EN LOS SERPENTINES





Graf. 6.8.1g RESPUESTA EN EL TANQUE DE PROCESO



Graf. 6.8.1h RESPUESTA EN EL TANQUE DE PROCESO



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

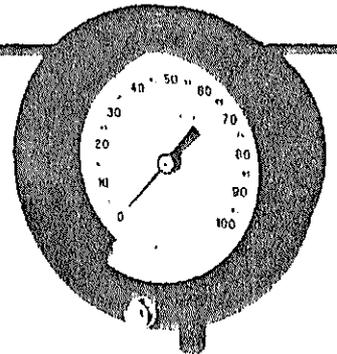
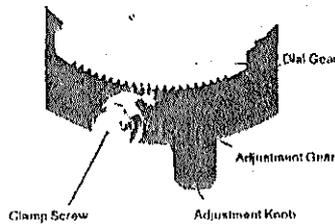
1. Se justifica la inversión realizada por la Espol en el diseño, fabricación y pruebas del simulador de control para el lazo de temperatura, puesto que en base a los resultados obtenidos, se demuestra que es un soporte en el estudio analítico del comportamiento de procesos industriales.
2. Se diseñó y construyó el simulador para pruebas neumáticas y electro-neumáticas. En esta obra, aunque se realizaron pruebas neumáticas y electro-neumáticas de los equipos, se abordó solo las pruebas neumáticas del simulador, pero que servirán de sustento para futuras pruebas más complejas en las que involucre el control con computadora o algún otro control electrónico.
3. Se demuestra que los elementos que constituyen un sistema de control automático, una vez que se encuentran operando en forma estable, dan un mayor grado de fiabilidad que una operación puramente manual del sistema. Consecuentemente, resulta un mejor desempeño del proceso industrial, obteniéndose así productos de una mejor calidad.
4. Se puede mejorar el desempeño del simulador usando software moderno de adquisición de datos y control, tal como Labview™, por ejemplo. Con esto se logrará un sistema más flexible y didáctico.

APENDICE



APÉNDICE A

Standard Case Style Type 1082(\*)S



FRONT VIEW

SPECIFICATIONS	TYPE 1082(*)S
Accuracy %/Grade	±0.25/ASME B 40.1, Grade 3A
Dial Size	4 1/2", 6", 8 1/2"
Tube and Socket Material	(A) Phosphor Bronze Tube, Brass Socket (S) AISI 316 St. St. Tube and Socket (P) Monel Tube and Socket
Case Material	Aluminum, Solid Front, Black Epoxy Coated
Movement	400 Series Stainless Steel Rotary Design Teflon™ S Coated Bearings Micro-Span Adjustment - Bi-Metallic Temp. Compensator (.005%/per degree F Max. Temp. Error)
Mounting and NPT Connection Location	Stem or Flush Mounting <sup>(1)</sup> 1/4" NPT Lower or Back <sup>(2)</sup>
Range and Bourdon Tube Selection	Vac/600 psi - (A) Phosphor Bronze Vac/3000 psi - (S) AISI 316 St. St. Vac/10000 psi - (P) K Monel
Ring	Hinged Steel - Deck Winkle Finish
Window	Glass
Pointer	Aluminum - Black Red Painted Grits Edge Tip
Dial	Externally Adjustable, Mylar <sup>(3)</sup> / Aluminum Composite, Black Numerals With Polished Mirror Band
Weatherproof	Yes
Options	See Page 7

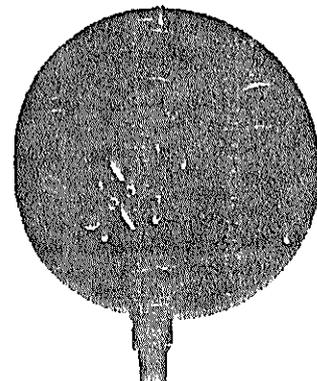
- Consistent case style in 4 1/2", 6" and 8 1/2" sizes
- Includes all Ashcroft test gauge features
- Competitive pricing
- Available from stock

The standard Ashcroft® test gauge case style features a solid front aluminum case that is black epoxy coated. The ring is hinged steel with black winkle enamel finish and is retained by a combination clamp screw and geared dial adjustment knob at the bottom. Externally adjustable dial facilitates compensation for tare or zero adjustment.

The same standard case design is now offered in 4 1/2", 6" and 8 1/2" dial sizes in both lower and back connection. All are equipped with temperature compensation and micro-span adjustment and all other Ashcroft® product enhancements that ensure superior product quality and performance. The standard test gauge is competitively priced and available from stock for most ranges, tube materials and case sizes.

This standard case style is ideal for stem mounting or IC panel board applications. Its stability, accuracy and durability make it ideal for process applications where high accuracy and dependability are required.

BACK VIEW  
(pressure relief back - removed)



\* Bourdon Tube Designation  
(1) (4) Registered TM of DuPont Co.  
(2) Cases Supplied with Studs for Flush Mounting  
(3) Optional Connection 1/4" NPT



## APÉNDICE B

IB 1A200  
Issue 2

INSTRUCTIONS FOR  
*Taylor*  
FULSCOPE CONTROLLER  
WITH  
FIXED HIGH CONTROL RESPONSE

APÉNDICE C



TAYLOR  
**TRANSCOPE® TRANSMITTER**  
 210T\_1, 211T\_0

*Instructions*

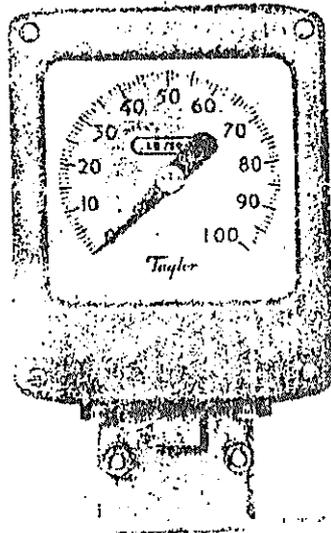


Fig. 1 - Indicating Transmitter,  
210T\_1

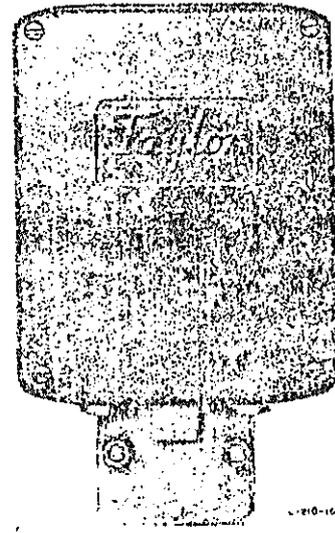


Fig. 2 - Blind Transmitter,  
211T\_0

## APÉNDICE D

TAYLOR  
D-C CURRENT-TO-PRESSURE  
TRANSDUCER  
1h00T, 1h01T Model A

IB-2E103  
Issue 1

---

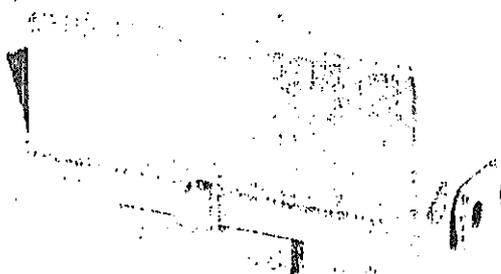
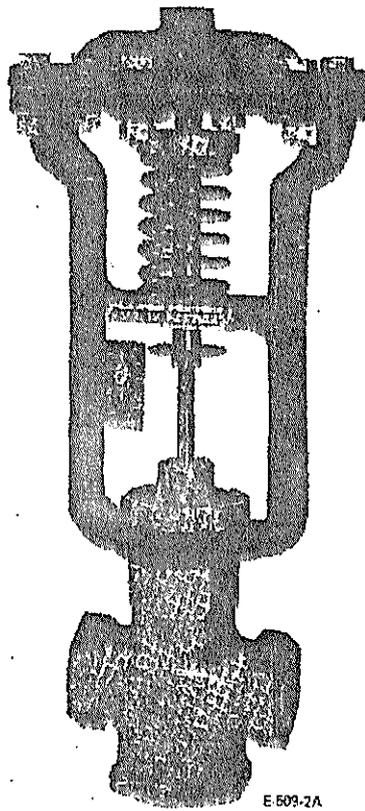
**Instructions**

Figure 1 - 1h00T Series Current-to-Pressure Transducer

APÉNDICE E

VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO TAYLOR



E 509-2A

APÉNDICE F

Tabla 2. Propiedades físicas del tubo\*  
(Grinnell Co., Inc.)

Tamaño nominal del tubo y D.E. en pulg.	Número de celdas			Espesor de la pared, pulg.	D.T., pulg.	Área interior, pulg <sup>2</sup>	Área del metal, pulg <sup>2</sup>	Superficie exterior, pie <sup>2</sup> /pie	Superficie interior, pie <sup>2</sup> /pie	Peso, lb/pie	Peso de agua, lb/pie	Momento de inercia, pulg <sup>4</sup>	Módulo de sección, pulg <sup>3</sup>	Radio de giro, pulg.
	a	b	c											
3/8 0.375	40	114	183	0.047	0.307	0.0749	0.0518	0.106	0.0804	0.106	0.0321	0.00088	0.00437	0.1271
	88	218	483	0.049	0.289	0.0588	0.0720	0.106	0.0765	0.245	0.0146	0.00196	0.00523	0.1213
1/2 0.500	40	114	183	0.045	0.410	0.1328	0.0379	0.141	0.1073	0.330	0.0572	0.00229	0.01032	0.1694
	88	218	483	0.048	0.364	0.1041	0.1258	0.141	0.0955	0.435	0.0451	0.00331	0.01230	0.1628
3/4 0.750	40	114	183	0.055	0.565	0.2332	0.1246	0.177	0.1427	0.423	0.1011	0.00536	0.01937	0.2169
	88	218	483	0.091	0.493	0.1810	0.1410	0.177	0.1285	0.540	0.0922	0.00730	0.02160	0.2070
1 1.000	40	114	183	0.126	0.432	0.1485	0.2173	0.177	0.1106	0.739	0.0609	0.00852	0.02554	0.1991
	88	218	483	0.083	0.674	0.337	0.1974	0.210	0.1785	0.671	0.1547	0.01451	0.0341	0.2692
	160	312	893	0.109	0.622	0.364	0.2503	0.220	0.1678	0.851	0.1916	0.02110	0.0427	0.2613
	240	416	1393	0.147	0.546	0.330	0.220	0.220	0.1493	1.051	0.1015	0.02616	0.0498	0.2505
1 1/2 1.500	40	114	183	0.187	0.466	0.1906	0.383	0.210	0.1228	1.304	0.0740	0.02213	0.0527	0.2402
	88	218	483	0.294	0.352	0.0499	0.584	0.220	0.0640	1.714	0.0216	0.02423	0.0577	0.2192
	160	312	893	0.065	0.920	0.665	0.2011	0.275	0.2409	0.684	0.2082	0.02451	0.0467	0.349
	240	416	1393	0.083	0.851	0.614	0.2321	0.275	0.2310	0.837	0.2461	0.02720	0.0366	0.349
2 2.000	40	114	183	0.113	0.814	0.533	0.333	0.275	0.2357	1.131	0.1301	0.0370	0.0706	0.334
	88	218	483	0.151	0.742	0.432	0.435	0.275	0.1948	1.474	0.1075	0.0448	0.0853	0.321
	160	312	893	0.218	0.644	0.3961	0.570	0.275	0.1687	1.937	0.1284	0.0527	0.1004	0.306
	240	416	1393	0.308	0.438	0.1479	0.718	0.275	0.1137	2.441	0.0447	0.0529	0.1104	0.294
2 1/2 2.500	40	114	183	0.065	1.105	1.103	0.2553	0.344	0.318	0.868	0.478	0.0190	0.0708	0.443
	88	218	483	0.109	1.077	0.945	0.419	0.344	0.2872	1.404	0.409	0.0157	0.1151	0.426
	160	312	893	0.133	1.049	0.884	0.494	0.344	0.2746	1.479	0.374	0.01874	0.1339	0.421
	240	416	1393	0.179	0.937	0.739	0.639	0.344	0.2520	2.172	0.311	0.1956	0.1606	0.407
3 3.000	40	114	183	0.250	0.815	0.523	0.896	0.344	0.2154	2.844	0.2363	0.1252	0.1903	0.387
	88	218	483	0.335	0.399	0.2910	1.076	0.344	0.1570	3.659	0.1221	0.1405	0.2137	0.361
	160	312	893	0.065	1.530	1.839	0.326	0.434	0.401	1.187	0.797	0.1038	0.1258	0.354
	240	416	1393	0.109	1.442	1.633	0.531	0.434	0.378	1.895	0.707	0.1663	0.1934	0.350
3 1/2 3.500	40	114	183	0.140	1.380	1.496	0.649	0.434	0.365	2.223	0.648	0.1948	0.2346	0.340
	88	218	483	0.191	1.278	1.283	0.882	0.434	0.335	2.997	0.555	0.2418	0.2973	0.324

## APÉNDICE G

Tuberías estándar API, roscadas  
(Todos los pesos y dimensiones son nominales. United States Steel Corporation)

Tamaño, pulg	Peso por pie, lb		Espesor, pulg	Diámetro, pulg		Hilos por pulg	Manguitos o coples			Presión de prueba,* lb/pulg <sup>2</sup>		
	Con roscas y cople o manguito	Con extremos sin roscas		D.E.	D.I.		Longitud, pulg	D.E., pulg	Peso, lb	Soldado o traslape o sin costura, de grado A	Sin costura, de grado B	Sin costura, de grado C
3/8	0.25	0.24	0.068	0.405	0.269	27	1 1/4	0.563	0.04	700	700	700
3/8	0.43	0.42	0.088	0.540	0.364	18	1 1/2	0.719	0.09	700	700	700
3/8	0.57	0.57	0.091	0.675	0.493	18	1 3/4	0.875	0.13	700	700	700
3/8	0.86	0.85	0.109	0.840	0.622	14	2 1/4	1.063	0.24	700	700	700
3/8	1.14	1.13	0.113	1.050	0.824	14	2 3/4	1.313	0.34	700	700	700
1	1.70	1.68	0.133	1.315	1.049	11 1/2	2 3/4	1.576	0.54	700	700	700
1 1/4	2.30	2.27	0.140	1.660	1.380	11 1/2	2 3/4	2.054	1.03	1 000	1 100	1 300
1 1/2	2.75	2.72	0.145	1.900	1.610	11 1/2	2 3/4	2.200	1.17	1 000	1 100	1 300
2	3.75	3.65	0.154	2.375	2.067	11 1/2	3 1/4	2.875	2.13	1 000	1 100	1 300
2 1/2	5.90	5.79	0.203	2.875	2.469	8	4 1/4	3.375	3.27	1 000	1 100	1 300
3	7.70	7.58	0.216	3.500	3.068	8	4 1/4	4.000	4.09	1 000	1 100	1 300
3 1/2	9.25	9.11	0.226	4.000	3.548	8	4 3/4	4.625	5.92	1 200	1 300	1 600
4	11.00	10.79	0.237	4.500	4.026	8	4 3/4	5.200	7.59	1 200	1 300	1 600
5	15.00	14.62	0.258	5.563	5.047	8	4 3/4	6.296	9.98	1 200	1 300	1 600
6	19.45	18.97	0.280	6.625	6.065	8	4 3/4	7.390	12.92	1 200	1 300	1 600
8	25.55	24.70	0.277	8.625	8.071	8	5 1/4	9.625	23.18	1 200	1 300	1 600
8	29.35	28.55	0.322	8.625	7.981	8	5 1/4	9.625	23.18	1 200	1 300	1 600
10	32.75	31.20	0.279	10.750	10.192	8	5 3/4	11.750	31.55	1 000	1 200	1 400
10	35.75	34.24	0.307	10.750	10.136	8	5 3/4	11.750	31.55	1 000	1 200	1 400
10	41.85	40.48	0.365	10.750	10.020	8	5 3/4	11.750	31.55	1 000	1 200	1 400
12	45.45	43.77	0.330	12.750	12.090	8	6 1/4	14.000	49.27	1 000	1 200	1 400
12	51.15	49.56	0.375	12.750	12.000	8	6 1/4	14.000	49.27	1 000	1 200	1 400
14 D.E.	57.00	54.57	0.375	14.000	13.250	8	6 3/4	15.000	45.83	950	1 100	1 400
15 D.E.	61.15	58.57	0.375	15.000	14.250	8	6 3/4	16.000	51.26	900	1 000	1 400
16 D.E.	65.30	62.58	0.375	16.000	15.250	8	6 3/4	17.000	55.83	850	1 000	1 300
17 D.E.	73.20	69.70	0.393	17.000	16.214	8	7	18.000	61.67	850	950	1 200
18 D.E.	81.20	76.84	0.409	18.000	17.182	8	7 1/4	19.000	66.53	800	950	1 200
20 D.E.	90.80	85.56	0.409	20.000	19.182	8	7 3/4	21.000	79.37	750	850	1 100

La variación admisible, en peso, para cualquier longitud de tubo es de 10 por ciento más y de 3 1/2 por ciento menos; pero el peso de la carga de un vagón o carro no debe ser menor que el peso calculado en más de 1 1/4 por ciento.  
Se suministra con roscas y manguitos o coples y en longitudes al azar, a no ser que se especifique otra cosa en el pedido.  
El peso por pie de tubería con roscas y manguitos está basado en una longitud de 20 pies, incluyendo el manguito.  
\*Presión de prueba de la tubería soldada o tope de 1/4 a 1 pulg = 700 lb/pulg<sup>2</sup> de 1 1/4 a 3 pulg = 800 lb/pulg<sup>2</sup>.

## APÉNDICE H

Tamaños y pesos de tubo de cobre y de latón rojo 85 S.P.S.\*  
(American Brass Co.)

Tamaño del tubo (S.P.S.), pulg	D.E., pulg	D.I., pulg	Espesor de pared, pulg	Peso, lb/pie	
				Latón rojo 85,	Cobre
$\frac{1}{8}$	0.405	0.281	0.0620	0.2533	0.2599
$\frac{1}{4}$	0.540	0.375	0.0825	0.4496	0.4596
$\frac{3}{8}$	0.675	0.494	0.0905	0.6302	0.6441
$\frac{1}{2}$	0.840	0.625	0.1075	0.9301	0.9588
$\frac{5}{8}$	1.050	0.822	0.1140	1.271	1.299
1	1.315	1.062	0.1265	1.791	1.831
$1\frac{1}{8}$	1.660	1.368	0.1460	2.633	2.692
$1\frac{3}{8}$	1.900	1.600	0.1500	3.127	3.196
2	2.375	2.062	0.1565	4.136	4.229
$2\frac{1}{2}$	2.875	2.500	0.1675	6.003	6.136
3	3.500	3.062	0.2190	8.560	8.750
$3\frac{1}{2}$	4.000	3.500	0.2509	11.17	11.42
4	4.500	4.000	0.2500	12.66	12.94
5	5.563	5.062	0.2505	15.85	16.20
6	6.625	6.125	0.2500	18.99	19.41
8	8.625	8.000	0.3125	30.95	31.63
10	10.750	10.019	0.3659	45.22	46.22
11	11.750	11.000	0.3750	50.82	51.94
12	12.750	12.000	0.3750	55.28	56.51

\*85% Cobre, 15% Zinc.

## APÉNDICE I

Densidad de líquidos a presión atmosférica

Líquido	Temp:					
	0 °C 32 °F	20 68	40 104	60 140	80 176	100 212
	ρ, slugs/ft <sup>3</sup> (515.4 kg/m <sup>3</sup> )					
Alcohol etílico <sup>f</sup>	1.564	1.532	1.498	1.463		
Benceno <sup>a,b</sup>	1.746	1.705	1.663	1.621	1.579	
Tetracloruro de carbono <sup>a,b</sup>	3.168	3.093	3.017	2.940	2.857	
Gasolina, <sup>c</sup> p.e. 0.68	1.345	1.310	1.275	1.239		
Glicerina <sup>a,b</sup>	2.472	2.447	2.423	2.398	2.372	2.346
Keroseno, <sup>c</sup> p.e. 0.81	1.630	1.564	1.536	1.508	1.480	
Mercurio <sup>b</sup>	26.379	26.283	26.188	26.094	26.000	25.906
Aceite para máquina, <sup>c</sup> p.e. 0.907	1.778	1.752	1.727	1.702	1.677	1.651
Agua fresca (dulce) <sup>d</sup>	1.940	1.937	1.925	1.908	1.885	1.859
Agua salada <sup>e</sup>	1.995	1.988	1.975			

Calculados a partir de datos proporcionados por:

<sup>a</sup>"Handbook of Chemistry and Physics," 52d ed., Chemical Rubber Company, 1971-1972.

<sup>b</sup>"Smithsonian Physical Tables," 9th rev. ed., 1934.

<sup>c</sup>ASTM-IP, "Petroleum Measurement Tables."

<sup>d</sup>"Steam Tables," ASME, 1967.

<sup>e</sup>"American Institute of Physics Handbook," 3d ed., McGraw-Hill, 1972.

<sup>f</sup>"International Critical Tables," McGraw-Hill.

## APÉNDICE J

Calor específico del  
agua líquida

Temp. °F	$C_p$ Btu/(lb·°F)
32	1.007
50	1.003
100	0.998
150	1.000
200	1.006
212	1.008
250	1.015
300	1.029
350	1.060
400	1.085
450	1.116
500	1.180

FUENTE: ASHRAE, *Handbook of Fundamentals*, Nueva York, 1972. Las tablas completas, para 43 temperaturas, se encuentran en un reporte ASHRAE, *Thermophysical Properties of Refrigerants*, Pág. 227, proporcionado por la Universidad de Purdue a ASHRAE en 1972.

## APÉNDICE K

## Conductividades térmicas de los metales\*

$$k = Dtu/h/\text{pie}^2/^\circ\text{F}/\text{pie}$$

$$kt = kt_0 - a(t-t_0)$$

Sustancia	Intervalo de temperatura, °F	$k_{t_0}$	$a$	Sustancia	Intervalo de temperatura, °F	$k_{t_0}$	$a$
<b>Metales:</b>				Uranio .....	70-770	14	-0.007
Aluminio .....	70-700	130	0.03	Vanadio .....	70	20	---
Antimonio .....	70-212	10.6	0.006	Zinc .....	60-212	65	0.007
Berilio .....	70-700	80	0.027	Zirconio .....	32	11	---
Cadmio .....	60-212	53.7	0.01	<b>Aleaciones:</b>			
Cobalto .....	70	28	---	Metal del Almirantazgo	68-460	58.1	-0.054
Cobre .....	70-700	232	0.032	Latón .....	-265-360	61.0	-0.066
Germanio .....	70	34	---	(70% Cu, 30% Zn) .....	360-810	84.6	0
Oro .....	60-212	196	---	Bronce, 7.5% Sn .....	130-460	34.4	-0.042
Hierro, puro .....	70-700	41.5	0.025	7.7% Al .....	68-392	39.1	-0.038
Hierro, forjado .....	60-212	34.9	0.002	Constantan .....	-350-212	12.7	-0.0076
Acero (1% C) .....	60-212	26.2	0.002	(60% Cu, 40% Ni) .....	212-950	10.1	-0.019
Plomo .....	32-500	20.3	0.006	Dural 24S (93.6% Al, 4.4% Cu, 1.5% Mg, 0.5% Mn) .....	-321-550	63.0	-0.083
Magnesio .....	32-370	99	0.015	Inconel X (73% Ni, 15% Cr, 7% Fe, 2.5% Ti) .....	27-1070	7.62	-0.0068
Mercurio .....	32	4.0	---	Manganin (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) .....	1070-1650	3.35	-0.0111
Molibdeno .....	32-800	79	0.016	Monel (67.1% Ni, 29.2% Cu, 1.7% Fe, 1.0% Mn) .....	-256-212	11.5	-0.015
Níquel .....	70-560	36	0.0175	Plata de níquel (64% Cu, 17% Zn, 18% Ni) .....	-415-1470	12.0	-0.008
Paladio .....	70	39	---		60-390	18.1	-0.0156
Platino .....	70-800	41	0.0014				
Plutonio .....	70	5	---				
Rodio .....	70	88	---				
Plata .....	70-600	242	0.058				
Tántalo .....	212	32	---				
Talio .....	32	29	---				
Torio .....	70-570	17	-0.0045				
Estañio .....	60-212	36	0.0135				
Titanio .....	70-570	9	0.001				
Volframio .....	70-570	92	0.02				

\*Para refractarios véase la Sección 6; para aislantes de tuberías, la Sección 8; para materiales de construcción, la Sección 4. Los factores de conversión para diversas unidades aparecen en la Sección 1. Las Tablas 3-7 fueron revisadas por G.B. Wilkes.

## APÉNDICE L

Conductividades térmicas de diversas sustancias\*  
Los valores de  $k$  deben considerarse como un promedio burdo para el intervalo de temperatura indicado

Material	Densidad, lb por pie <sup>3</sup>	Temperatura, °F	$k$	Material	Densidad, lb por pie <sup>3</sup>	Temperatura, °F	$k$
Asbestos en lámina, asbestos comprimidos y cemento	123.	86.	0.225	Cuarzo (cristal, paralelo al eje C)	...	-300.	25.0
Asbestos	60.5	86.	0.070			0.	8.3
Asbesto (lana)	25.	212.	0.058	Hule (duro)	74.3	300.	4.2
Ceniza de madera	12.5	65.	0.018	Hule (suave, vulcanizado)	68.6	100.	0.092
Ceniza volcánica	51.	300.	0.123	Arena (seca)	94.8	86.	0.08
Carbón	12.	133.	0.012	Aserrín (seco)	13.4	68.	0.188
Carbón corrugado	87.3	86.	0.037	Silica (fundida)	...	200.	0.042
Celuloide	3.4	82.	0.033	Silica-gel (polvo)	32.5	131.	0.083
Concreto, arena y grava	142.	75.	1.05	Tierra (seca)	...	68.	0.049
Concreto (polvo)	97.	75.	0.41	Tierra (seca, incluyendo piedra)	127.	68.	0.075
Carbón de leña, polvo	11.5	63.	0.029	Nieve	7-31	32.	0.34-1.3
Corcho granulado	5.4	23.	0.028	Óxido de titanio (finamente dividido)	52.	1000.	0.041
Algodón	5.0	100.	0.035	Lana (pura)	5.6	86.	0.021
Diamante	151.	70.	320.	Zirconio	113.	600.	0.11
Tierra más 42% de agua	108.	0.	0.62	Maderas (transversalmente a las fibras, secas) †:			
Fibra roja con aglutinado (U. S. Rubber Co.)	80.5	68.	0.27	Alamo	26.	85.	0.069
Vidrio, pyrex	139	200.	0.59	Ciprés	24.	85.	0.063
Vidrio	...	200.	0.59	Balsa	10.	85.	0.034
Grafito	93.5	122.	87.	Tilo	24.	85.	0.058
Grava	116.	68.	0.22	Abeto	29.	85.	0.063
Yeso	51.	99.	0.062	Olmo (roca)	48.	85.	0.097
Hielo	57.5	...	1.26	Abeto (blanco)	26.	85.	0.069
Kaolin	10.6	860.	0.059	Abeto (americano)	29.	85.	0.066
Cuero	62.4	...	0.092	Pino (oeste)	36.	85.	0.078
Mica	122.	...	0.25	Maple	43.	85.	0.094
Perlita de Arizona, (capa esférica de material silíceo)	9.1	112.	0.035	Roble	42.	85.	0.099
Poliestireno expandido	1.7	...	0.021	Pino (amarillo del sur)	35.	85.	0.078
Piedra pómez (pulverizada)	49.	300.	0.11	Pino (blanco)	25.	85.	0.060
Cuarzo (cristal, perpendicular al eje C)	...	-300.	12.5	Cedro rojo (del oeste)	21.	85.	0.053
		0.	4.3	Secoya	25.	85.	0.062
		300.	2.3	Pino de Prusia	21.	85.	0.052

\*La conductividad térmica de los materiales varía mucho. Para metales y aleaciones  $k$  es muy elevada, mientras que para ciertos materiales aislantes, como fibra de vidrio, corcho, etc., es muy baja. En general  $k$  varía con la temperatura, pero en el caso de los metales la variación es relativamente pequeña. Con la mayoría de las demás sustancias  $k$  se incrementa al elevarse la temperatura pero en el caso de muchos materiales cristalinos sucede lo contrario.

† Con el flujo paralelo a las fibras,  $k$  debe ser dos o tres veces más grande; los valores para la lana se toman principalmente de J. D. MacLean, *Trans. ASHRAE*, 41, 1941, pág. 323.

## APÉNDICE M

**Coefficientes de transmisión de calor ( $h_s$ ) para depósitos de incrustaciones procedentes del agua<sup>a</sup>**  
 Para usarse en la ecuación (4)

Temperatura del medio de calentamiento .....	Hasta 240°F		240 a 400°F	
	125°F, o menos		Por encima de 125°F	
Temperatura del agua .....				
Velocidad del agua, pies por seg. ....	3 o menos	más de 3	3 o menos	más de 3
Agua destilada .....	2 000	2 000	2 000	2 000
Agua de mar .....	2 000	2 000	1 000	1 000
Agua tratada para la alimentación de calderas .....	1 000	2 000	500	1 000
Agua tratada para torre de enfriamiento .....	1 000	1 000	500	500
De ciudad, de pozo, de los Grandes Lagos .....	1 000 <sup>b</sup>	1 000	500	500
Salobre, agua limpia de río .....	500	1 000	330	500
Agua de río, lodosa, con cieno <sup>b</sup> .....	330	500	250	330
Dura (más de 0.25 gramos por litro) .....	330	330	200	200
Del canal sanitario de Chicago .....	130	170	100	130

Casos diversos: líquidos refrigerantes, salmuera, destilados limpios del petróleo, vapores orgánicos, 4 882; vapor refrigerante, 2 441; aceites vegetales, 1 611; aceite combustible (el más crudo), 976.

<sup>a</sup>Tomada de los estándares de la Tubular Exchanger Manufacturers Assoc., 1952.

<sup>b</sup>Delaware, East River (N. Y.), Mississippi, Schuylkill y la bahía de Nueva York.

## APÉNDICE N

### PROPIEDADES GENERALES DE LOS MATERIALES

**Densidad relativa y densidad del agua a la presión atmosférica  
(Peso en vacío)**

Temp °C	Densidad relativa	Densidad,		Temp °C	Densidad relativa	Densidad,	
		lb/pie <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>			lb/pie <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
0	0.99987	62.4183	999.845	40	0.99224	61.9428	992.228
2	0.99997	62.4246	999.946	42	0.99147	61.894	991.447
4	1.00000	62.4266	999.955	44	0.99066	61.844	990.647
6	0.99997	62.4246	999.946	46	0.98982	61.791	989.797
8	0.99988	62.4189	999.854	48	0.98896	61.737	988.911
10	0.99971	62.4096	999.706	50	0.98807	61.682	988.050
12	0.99952	62.3969	999.502	52	0.98715	61.624	987.121
14	0.99927	62.3811	999.272	54	0.98621	61.566	986.192
16	0.99897	62.3623	998.948	56	0.98524	61.505	985.215
18	0.99862	62.3407	998.602	58	0.98425	61.443	984.222
20	0.99823	62.3164	998.213	60	0.98324	61.380	983.213
22	0.99780	62.2894	997.780	62	0.98220	61.315	982.172
24	0.99732	62.2598	997.304	64	0.98113	61.249	981.113
26	0.99681	62.2278	996.791	66	0.98005	61.181	980.025
28	0.99626	62.1934	996.242	68	0.97894	61.112	978.920
30	0.99567	62.1568	995.656	70	0.97781	61.041	977.783
32	0.99505	62.1179	995.033	72	0.97666	60.970	976.645
34	0.99440	62.0770	994.378	74	0.97548	60.896	975.460
36	0.99371	62.0341	993.691	76	0.97428	60.821	974.259
38	0.99299	61.9891	992.973	78	0.97307	60.745	973.041

## BIBLIOGRAFIA

1. A. CREUS, Instrumentos industriales. Instrumentación Industrial. Su ajuste y calibración, Marcombo de Boixareu Editores.
2. E. CARNICER ROYO, GG., Aire comprimido. Teoría y cálculo de las instalaciones, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona – España
3. Espol, FIM. Folletos de Transferencia de calor, 1989.
4. HIDALGO SUAREZ JORGE XAVIER. Análisis teórico y experimental del sistema de control de nivel de una caldera (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1983).
5. MARKS. Manual del Ingeniero Mecánico. Octava edición en inglés (segunda edición en español), Tomo I, II, III. McGRAW – HILL de México. Impresor Carvajal S.A., Cali, Colombia 1990.
6. MURRAY R. SPIEGEL, PH. D. Transformadas de Laplace. Teoría y problemas. Serie de compendios Schaum. McGRAW – HILL de México. Impresor Poligráfica S.A., México D.F., 1983.

7. PLINT Y PARTNERS Ltd, ENGINEERS. Instructional Equipment for control and Instrumentation Engineering. Process control training plant. Control systems and instrumentation training plant., England.
8. SMITH CARLOS A. & ARMANDO B. CORRIPIO, Control Automático de procesos. Teoría y práctica, Editorial NORIEGA – LIMUSA, Impreso en México, 1991.
9. TANDAZO OJEDA OSCAR FERNANDO. Análisis teórico y experimental del control de temperatura de una caldera (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1986).
10. TAYLOR INSTRUMENT COMPANY, INSTRUCCIONES Y PARTES. Impreso en U.S.A., 1982.
11. THE FOXBORO COMPANY, Technical Information, Foxboro, Massachusetts, U.S.A., 1969.