



**Universidad Nacional Autónoma de México**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**TEORIA DE CONTROL EN  
TRANSFERENCIA DE CALOR**

**T E S I S**  
Que Para Obtener el Título de.  
**I N G E N I E R O Q U I M I C O**  
**P R E S E N T A N**

**NOEMI ROSARIO GONZALEZ BADILLO**  
**ESTHER MENDOZA LOPEZ**

**México, D. F.**

**1978**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

At. ~~1900~~ 198



**JURADO**

PRESIDENTE:           PROFR. ALFONSO MONDRAGON MEDINA  
VOCAL:                 PROFR. CLAUDIO A. AGUILAR MARTINEZ  
SECRETARIO:          PROFR. ENRIQUE BRAVO MEDINA  
1er. SUPLENTE:       PROFR. CARITINO MORENO PADILLA  
2°. SUPLENTE:        PROFR. JOSE ANTONIO ORTIZ RAMIREZ

Esta tesis se llevó a cabo en las bibliotecas de la Facultad de Química, Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos.

SUSTENTANTES:

NOEMI ROSARIO GONZALEZ BADILLO \_\_\_\_\_

ESTHER MENDOZA LOPEZ \_\_\_\_\_

ASESOR DEL TEMA:

ING. QUIMICO ENRIQUE BRAVO MEDINA \_\_\_\_\_

A NUESTROS PADRES, HERMANOS Y

MAESTROS

A MIGUEL Y ROGELIO

## CONTENIDO

### INTRODUCCION.

CAPITULO I. Modos de Control . . . . .	2
Modos de control combinados . . . . .	7
CAPITULO II. Notaciones, Simbología y Medidores . . . . .	11
Símbolos básicos de instrumentación . . . . .	16
Medidores de nivel . . . . .	18
Símbolos de instrumentación típica para nivel . . . . .	23
Medidores de flujo . . . . .	25
Símbolos de instrumentación típica para flujo . . . . .	30
Medidores de presión . . . . .	31
Símbolos de instrumentación típica para presión . . . . .	35
Medidores de temperatura . . . . .	37
Símbolos de instrumentación típica para temperatura . . . . .	39
CAPITULO III. Elementos de control . . . . .	42
Elementos finales de control . . . . .	44
CAPITULO IV. Fundamentos de control automático . . . . .	46
CAPITULO V. Arreglos típicos de control en cambiadores de calor . . . . .	51
Cambiadores de calor líquido-líquido . . . . .	52
Cambiador de calor con vapor . . . . .	57
Condensadores . . . . .	64

Rehervidores y vaporizadores . . . . .	68
Control en cascada . . . . .	69
Control por retroalimentación positiva . . . . .	71

CAPITULO VI. Control en hornos.

Calentadores de arranque . . . . .	74
Rehervidores a fuego directo . . . . .	76
Calentadores y vaporizadores . . . . .	78
Hornos de reformado . . . . .	85
Hornos de Cracking . . . . .	90
Analizadores . . . . .	94
Controles superiores . . . . .	96
Nomenclatura . . . . .	97

CAPITULO VII. Arreglos de control en equipos de transferencia de calor en destilación . . . . .	100
--	-----

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.



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

El motivo que nos llevó a realizar el presente trabajo y el -- elegir como tema la instrumentación referida a su aplicación en la industria donde interviene la transferencia de calor, fue el de adquirir en este campo mayores conocimientos, ya que como estudiantes observamos la necesidad de tenerlos, y por lo tanto consideramos que es de suma -- importancia a nivel profesional, por ser necesaria su aplicación en todas las ramas de la industria que permite mantener en todo caso los proce-- sos de producción dentro de ciertos límites establecidos para que los -- productos que se obtengan cumplan con las normas de calidad, y para lograrlo, es necesario instrumentar los procesos en los puntos que se requiera.

Es prudente acotar que el instalar un circuito de control resulta costoso en principio, pero si se instrumentan adecuadamente los equipos industriales puede alcanzarse una considerable economía, si se tie-- ne en cuenta que el sistema de control ayuda a mantener la calidad desea da del producto, y por lo tanto, la probabilidad de pérdidas, se reduce -- a mínimos tolerables.

En la primera parte de este trabajo, se presentan generalidades de la instrumentación y el control, eligiéndose las cuatro variables -- más comunes a controlar que son: flujo, nivel, presión y temperatura, por ser estas las más importantes en casi todos los procesos de carácter industrial.

Se continúa con la descripción de los sistemas de control, -- como parte integrante de un equipo de transferencia de calor, por considerar que son de importante desempeño. Así los cambiadores de calor siempre están presentes, de alguna forma, en cualquier industria y los hornos forman parte principalmente de las refinerías.

Al revisar la literatura, encontramos que está tomando fuerza el uso de sistemas de control por medio de computadoras digitales y analógicas, esto da muy buenos resultados, pero su práctica resulta sumamente costosa; y en este trabajo no se tratará con estos sistemas, -- pero por su importancia dejamos constancia de su existencia.

## CAPITULO I

### MODOS DE CONTROL

El modo de control es la parte esencial de cualquier sistema de control automático ya que es el tipo de acción que toma el -- estimador en respuesta a la señal de error, o sea, la desviación que sufre la variable controlada respecto al punto fijo.

La forma de la curva medición contra tiempo se determina por:

- a) El intervalo de tiempo antes de que la medición alcance la máxima velocidad de cambio.
- b) La velocidad máxima de cambio de la medición.

En la figura 1 se muestran cuatro curvas de respuesta -- típicas en diferentes procesos.

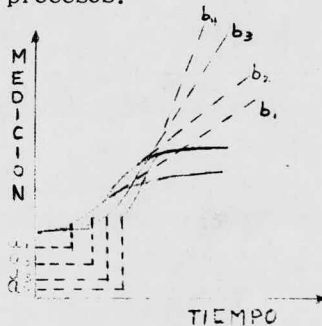


FIGURA 1

Para elegir el modo de control adecuado se deben considerar algunos factores como:

- a) Economía
- b) Precisión de control requerido
- c) Tiempo de respuesta del proceso
- d) Seguridad del personal de operación
- e) Seguridad del equipo de proceso

Algunos procesos son más difíciles de mantener estabilizados o dentro de los límites deseados que otros, razón por la cual se dispone de controladores de diferentes capacidades. Una estabilización satisfactoria de cualquier proceso se puede lograr con uno de éstos tipos o modos de acción de control:

1.- Acción de control On-Off. Un controlador de este tipo opera la válvula de control sólo cuando la medición cruza el punto de control. - La válvula tiene dos posiciones, abierta o cerrada totalmente. Una se usa cuando la medición está arriba del punto fijo y la otra se usa cuando la medición está abajo. Para que un control on-off de resultados satisfactorios se necesita que:

- a) No sea necesario un control preciso.
- b) El proceso debe tener capacidad suficiente para permitir al elemento final de control mantenerse dentro del ciclo de medición.
- c) La energía del efluente sea pequeña en relación a la energía que existe en los alrededores del proceso.

En la fig. 2 se muestra una gráfica de acción de la válvula -  
contra tiempo en relación a la señal de salida, con ayuda de esta se pue-  
de entender mejor este concepto.

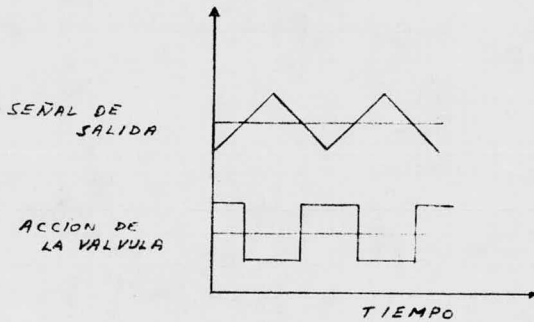


FIGURA 2

Como ejemplo podemos citar la temperatura en una bañera -  
que es una variable muy fácil de controlar. El intervalo de tiempo es  
muy pequeño antes de que la medición alcance una velocidad máxima de  
elevación siguiendo un cambio en la posición de la válvula debido a que  
el único retraso de tiempo es en la transferencia de calor a través de la  
pared del bulbo del termómetro. También, la velocidad máxima de ele-  
vación es muy lenta debido a que el volumen por unidad de tiempo de su  
ministro de agua es pequeño comparado con el volumen de agua en la ti-  
na.

2.- Acción de control proporcional. Un controlador proporcional es--  
trangula continuamente a la válvula de control tal que la entrada de  
calor al proceso está balanceada con la demanda de calor del proce-  
so. A este tipo de controlador se le llama a menudo de "modo sim-  
ple". El control proporcional va a reaccionar proporcionalmente  
y en sentido opuesto en relación a la desviación de la variable res-  
pecto a su punto de ajuste. Matemáticamente se puede expresar --  
como:

$$M = 1/b \cdot E + M_o$$

M = Salida del controlador

E = Señal de error

M<sub>o</sub> = Señal de cero error del controlador

b = Banda proporcional

Banda proporcional es el cambio expresado en porciento que debe tener lugar en la variable para causar que la válvula se mueva de completamente abierta a completamente cerrada. La fig. 3 ilustra graficamente el concepto anterior.

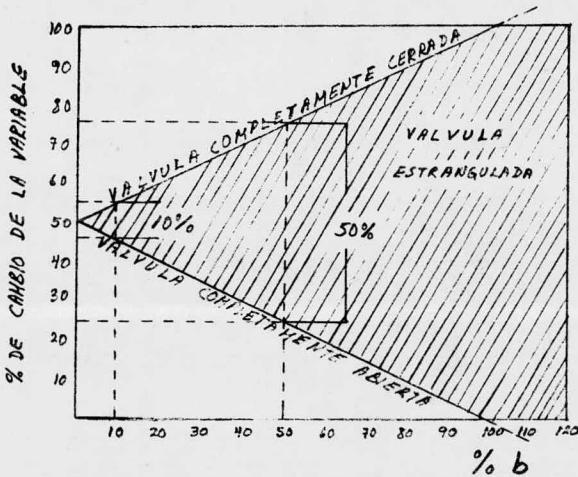


FIGURA 3

La banda proporcional es ajustable con el fin de tener control estable bajo diferentes condiciones de proceso.

La ganancia proporcional o sensibilidad en un sistema es el inverso de la banda proporcional.

$$K_c = 1/b = G$$

Los aspectos principales de un control proporcional son:

1. La posición de la válvula varía con la medición.
2. La válvula viaja completamente de acuerdo con el valor de la banda proporcional.

3. La acción proporcional crea desviación estable (offset) la cual varía con la carga y el valor de la banda proporcional.
4. Se aplica a procesos que tengan capacidad pequeña, flujo grande y - constante de tiempo corto.

Como ejemplo tenemos que la temperatura en una regadera es una variable relativamente fácil de controlar. El intervalo de tiempo es pequeño antes de que la medición alcance la velocidad máxima de elevación debido a que el calor sólo necesita ser transferido a través del enchufe y las paredes del bulbo. Sin embargo, la velocidad máxima de elevación es -- mucho más rápida que en la bañera debido a que la velocidad volumétrica de flujo del suministro de agua caliente es grande comparada al volumen de agua en la tubería. En la fig. 4 se muestra la relación de señal de -- salida y posición de la válvula.

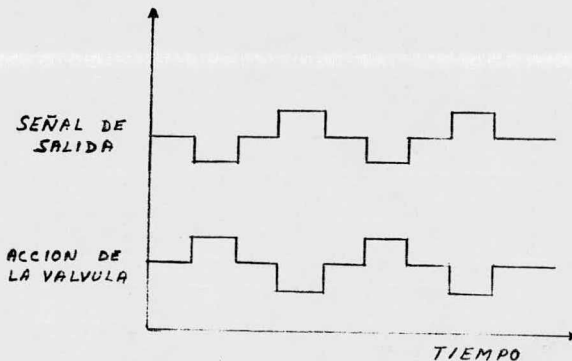


FIGURA 4

3. Acción de control integral. La función de reajuste automático permite al controlador mantener la variable a un valor preciso en vez de -- tenerla dentro de una zona prescindiendo de cambios en la demanda de calor, dicho de otra manera, la acción de reajuste o integral es el número de veces que se repite la acción proporcional sobre el elemento final de control para limitar o evitar la desviación de la variable. Se expresa matemáticamente como:

$$M = f \cdot E \, dt + M_0$$

Donde  $f$  es la velocidad de reajuste en repeticiones por minuto.

La acción de reajuste dura mientras persiste la desviación, esto es, corrige por magnitud de cambio. Tiende a anular la acción inestable del control proporcional el cual siempre se desvía de su punto de control cuando se sujeta a cambios de carga. (fig. 5).

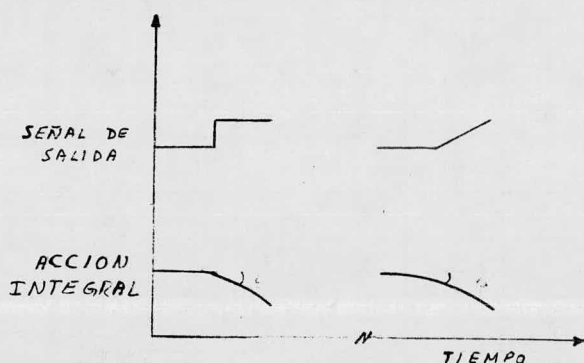


FIGURA 5

4.- Acción de control derivativa. La acción de control derivativo es proporcional a la velocidad de cambio de la medición y causa que la válvula de control alcance una posición correctiva más rápido -- que una acción de control de dos modos. Debido a su velocidad -- sensible permite el uso de una banda proporcional estrecha, reduciendo así la cantidad de desviación de temperatura posible. El valor de la variable depende de su velocidad de desviación con respecto al punto de ajuste y no de cuanto se desvía, es una función escalón que cesa cuando no hay desviación. Es anticipatoria porque en el momento de la desviación empieza su acción, corrige por velocidad de cambio. La salida es proporcional a la derivada de la señal de error de entrada. Su expresión matemática es:



$$M = T_d \cdot dE/dt + M_o$$

Donde  $T_d$  es la constante de tiempo de velocidad.

La acción derivativa es el intervalo de tiempo en el que se adelanta la acción proporcional sobre el elemento final de control ver fig. 6.

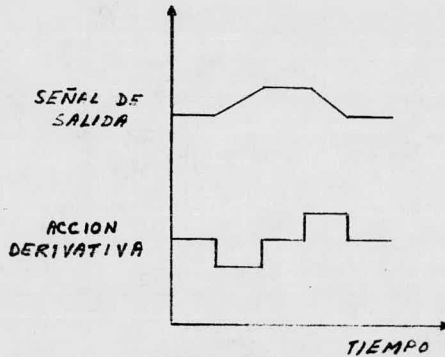


FIGURA 6

### MODOS DE CONTROL COMBINADOS

En los procesos donde se desea tener un buen control de calidad bajo condiciones de cambio de carga significativos o grandes retrasos de tiempo, se usan combinaciones de los tres modos básicos de control tomando ventaja de las características de cada uno de ellos. Normalmente se encuentran tres combinaciones:

- a) Proporcional más integral
- b) Proporcional más derivativo
- c) Proporcional más integral más derivativo.

Proporcional más integral. El modo proporcional tiene buena respuesta a muchos cambios y se puede usar donde hay retrasos de tiempo moderados. El modo integral se compensa para grandes cambios de carga eliminando el offset. Se ajusta automáticamente al punto fijo del modo proporcional. La respuesta total es la suma de las respuestas individuales.

Un cambiador convencional es un ejemplo de un proceso más difícil de controlar. El intervalo de tiempo es largo antes de que la medición alcance la velocidad máxima de elevación siguiendo un cambio en la posición de la válvula debido a que el calor debe ser transferido a través de los tubos del cambiador y las paredes del bulbo y el enchufe. Además, la velocidad máxima de elevación es muy rápida debido a que la entrada de calor por minuto es grande en relación a la capacidad calorífica del líquido en los tubos. En la figura 7 se da una gráfica de señal de salida y de posición de la válvula contra tiempo mostrando la acción separada de cada modo de control y después la suma de éstos para dar idea de este modo de control combinado.

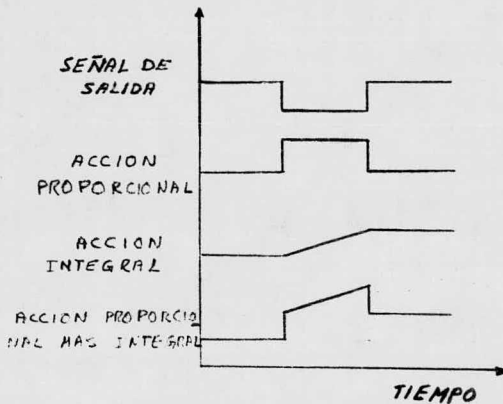


FIGURA 7

Proporcional más derivativo. La adición del modo derivativo con sus características de respuesta rápida y una salida que atrasa su entrada hace posible el control de procesos que tienen cambios de carga

rápidos, disturbios y grandes tiempos de retraso. Tiende a oponerse a todos los cambios ayudando a aumentar la estabilidad en el control proporcional pero a menudo permanece el offset lo cual es indeseable. En la fig. 8 se observa la acción de este control.

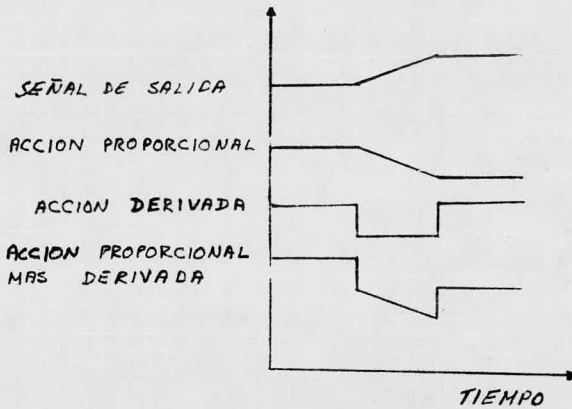


FIGURA 8

Proporcional más integral más derivativo. La combinación de los tres modos básicos proporciona el mejor control posible. Se mantienen las ventajas de cada uno; la corrección proporcional se suplementa por la eliminación del offset o la naturaleza del ajuste del modo integral y la estabilización por la rápida actuación natural del modo derivativo el cual vence todas las formas de retraso.

La temperatura del aceite de salida de un horno de calentamiento quemando gas es muy difícil de controlar. El intervalo de tiempo es muy largo antes de que la medición alcance la velocidad máxima de elevación siguiendo un cambio en la posición de la válvula, debido a que las paredes del horno deben calentarse. Entonces, el calor debe ser transferido a través de los tubos y paredes del bulbo y el enchufe. También, la máxima velocidad de elevación es muy rápida debido a la capacidad de calor de las paredes del horno y el suministro de gas es muy -

grande en relación a la capacidad calorífica del aceite de los tubos del horno. En la fig. 9 se muestra la relación de la señal de la salida y la posición de la válvula.

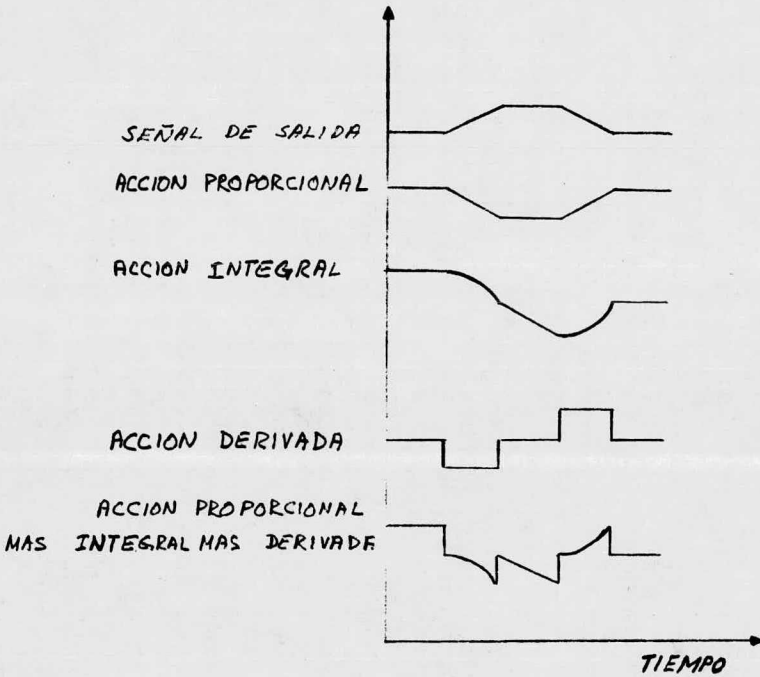


FIGURA 9

## CAPITULO II

### NOTACIONES, SIMBOLOGIA Y MEDIDORES

Para que exista entendimiento y uniformidad de interpretación y aplicación entre los profesionales académicos responsables del diseño, selección, operación o mantenimiento de los sistemas de control se ha estandarizado un sistema de símbolos por la Instruments Society of America. Aquí se presenta en forma sucinta.

Los instrumentos y la estructuración se representan e identifican por medio de un sistema de letras y números junto a los símbolos básicos en los planos y dibujos.

Por medio de una combinación de letras se establece la identidad general de cada partida con su propósito y funciones, si va seguido de un número se establece la identidad específica de la partida.

Las letras usuales de identificación se muestran en la tabla I:

Por otra parte, cada que se requiera puede usarse como primera letra para otras variables de proceso lo siguiente:

1. A se puede usar para cubrir todos los tipos de instrumentos de análisis.
2. Los símbolos autodefinidos como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , etc. pueden usarse para los instrumentos de análisis específicos.
3. El símbolo pH puede usarse para concentración del ión hidrógeno.

TABLA 1  
LETRAS USUALES DE IDENTIFICACION

Letra mayúscula	Definición y posiciones permisibles en cualquier combina- ción		
	Primera letra variable de pro ceso o acción	Segunda letra tipo de lectura u otra función	Tercera letra fun ción adicional
A		alarma	alarma
C	conductividad	control	control
D	densidad		
E		elemento	
F	flujo		
G		vidrio	
H	manual		
I		indicación	
L	nivel		
M	mezcla		
P	presión		
R		registrador	
S	velocidad	seguridad	
T	temperatura		
V	viscosidad		válvula
W	peso	pozo	

Aunque no es un procedimiento preferencial, se puede usar opcionalmente r después de F para distinguir la relación de flujo, d después de T ó P para diferencia de temperatura o de presión.

En el uso de letras o sus combinaciones se aplican las siguientes reglas:

- a) Todas las letras de identificación serán mayúsculas, a excepción del uso opcional de: d, r, p, pH.
- b) El máximo número de letras de identificación en cualquier combinación será de tres, La única excepción es en el uso de símbolos químicos o de pH.
- c) Una letra tendrá sólo una definición o significado al usarla como una primera letra en cualquier combinación, para definir la variable del proceso.
- d) Una letra tendrá sólo una definición o significado al usarla como segunda o tercera letra en una combinación, para definir el tipo de elemento.

Es particularmente importante seguir la secuencia del arreglo - mostrado en la tabla II al escribir las combinaciones de letras.

No se deben usar guiones entre letras o combinaciones de éstas.

Para precisar, es necesario establecer un sistema numérico para dar una identificación específica, consistente con los requerimientos - del usuario. Los números deben colocarse después de las letras separadas por un guión, pueden pertenecer a la misma clase de partida dentro - de una unidad de proceso, o puede ser un sistema completo de series de - números para una planta o una organización.

Para las identificaciones se debe usar una instrumentación completa, con todos sus componentes. Este uso se rige por las siguientes - reglas e instrucciones:

1. Para combinación de instrumentos que miden más de una variable, o que proporcionan más de una función, cada porción deberá tener su propia identificación.
2. Instrumentos de puntero o pluma múltiple con todos los puntos del mismo servicio general, y todos proporcionando las mismas funciones, tendrán una identificación. Los elementos separados y sus componentes serán identificados por sufijos añadidos al número de la partida.
3. Para instrumentos de transmisión remota, el receptor y el transmisor tendrán las mismas identificaciones, de acuerdo con el servicio total y la función de la partida.
4. Cada válvula de control deberá tener la misma identificación que el instrumento de control por el cual es accionada. Donde más de una válvula sea accionada por el mismo controlador, serán identificadas por sufijos de letras adicionales al número de la partida.
5. Donde se requiera identificación para accesorios, se les asignará la misma identificación del instrumento al cual están conectados o con el cual se están usando.
6. A los instrumentos de medición primarios se les asignará la misma identificación que a los instrumentos a los que están conectados. Donde un elemento no conecta con ningún instrumento, tal partida aislada deberá asignar identificación separada al elemento primario. Donde más de un elemento se conecta al mismo instrumento, será identificado por números sufijos después del número de la partida.



TABLA II. IDENTIFICACION GENERAL CON EL USO DE COMBINACIONES DE LETRAS

	PRI- MERA LE-- TRA VA-- RIA- BLE DE PRO- CESO O AC CION	SEGUNDA Y TERCERA LETRAS - TIPO DE ELEMENTO													
		ELEMENTOS DE CONTROL					ELEMENTOS DE MEDICION				ELEMENTOS DE ALARMA			ELE- MEN- TO PRI- MA-- RIO	POZOS
		CONTROLADORES SEPARADOS		VALVU- LAS RE- GULADO	VAL- VU-- LAS -- DE -- AUTO-- OPERA- DAS	RE- GIS TRŌ	INDI- CA--- CION	TOS DE VI-- DRIO PARA OB-- SER- VA-- CION	RE- GIS TRŌ	INDI- CA-- CION	CIE- GO	-E			
		-RC	-IC	-C	-CV	-SV	-R	-I	-G	-RA	-IA	-A	-E	-W	
TEMPERATURA	T-	TRC	TIC	TC	TCV	TSV	TR	TI	//	TRA	TIA	TA	TE	TW	
FLUJO	F-	FRC	FIC				FR	FI	FG	FRA	FIA		FE	//	
NIVEL	L-	LRC	LIC	LC	LCV		LR	LI	LG	LRA	LIA	LA		//	
PRESION	P-	PRC	PIC	PC	PCV	PSV	PR	PI	//	PRA	PIA	PA	PE	//	
DENSIDAD	D-	DRC	DIC	DC			DR	DI	//	DRA	DIA			//	
MANUAL	H-		HIC	HC	HCV		//	//	//	//	//	//	//	//	
HUMEDAD	M-	MRC	MIC	MC			MR	MI	//	MRA	MIA	MA	ME	//	
CONDUCTIVIDAD	C-	CRC	CIC				CR	CI	//	CRA	CIA	CA	CE	//	
VELOCIDAD	S-	SRC	SIC	SC	SCV	SSV	SR	SI		SRA	SIA	SA		//	
VISCOSIDAD	V-	VRC	VIC				VR	VI	VG	VRA	VIA			//	
PESO	W-	WRC	WIC				WR	WI		WRA	WIA		WE	//	

ESPACIOS EN BLANCO INDICAN COMBINACIONES IMPROBABLES

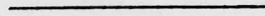
////////

INDICAN COMBINACIONES IMPOSIBLES

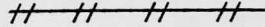
SIMBOLOS BASICOS DE INSTRUMENTACION

Los símbolos que se usan para mostrar la instrumentación en -  
planos de flujo y otros dibujos se ilustran a continuación:

Tubería del proceso de instrumentos



Líneas de aire de instrumentos



Cargas eléctricas a instrumentos



Símbolos básicos para instrumentación con un sólo servicio y -  
función.



Montado localmente

Montado en tablero

Símbolos básicos para combinación de instrumentos o elementos  
con dos servicios o funciones.



Montado localmente

Montado en tablero

Símbolos básicos para transmisor,



Montado localmente

Montado en tablero

Símbolo básico para válvula de motor con diafragma.



Símbolo básico para válvula operada eléctricamente.



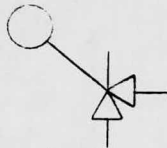
Símbolo básico para válvula operada con pistón.



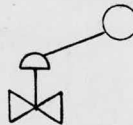
Cuerpo de tres direcciones para cualquier válvula.



Símbolo básico para cualquier válvula de seguridad.



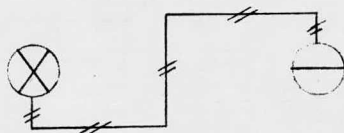
Símbolo básico para válvula reguladora auto-operada.



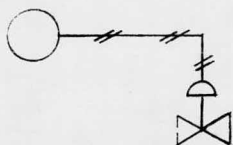
Símbolo básico para válvula de control operada manualmente.



Símbolo básico mostrando transmisor neumático con instrumento montado en tablero, la transmisión eléctrica es igual excepto por el tipo de conexión.



Símbolo básico mostrando conexión neumática desde el instrumento a la válvula de motor con diafragma.



### MEDIDORES DE NIVEL

La selección adecuada de los medidores de nivel requiere el conocimiento de las condiciones de proceso tales como:

- Rango de nivel
- Características del fluido
- Efectos corrosivos
- Si el fluido tiene tendencia a cubrir las paredes del recipiente o al elemento de medición
- Si el fluido es turbulento alrededor del área de medición

Existen dos métodos para medir el nivel:

- El método directo en el cual los medidores son simples y se han empleado durante mucho tiempo, se usan para indicación local.
- El método inferencial en el cual en función de una presión se determina el nivel considerando que:  $P = h \cdot \rho$   
Se usan en indicación, registro o control remoto.

Los métodos directos se clasifican como sigue:

- a) Escala sumergida en el recipiente
- b) Método de la mirilla
- c) Método de la polea
- d) Contacto de un electrodo con una superficie líquida
- e) Interrupción de un rayo de luz
- f) Sistema sónico

Los medidores usados en los métodos inferenciales son:

1. Medidores por desplazamiento o flotación. Su operación se basa en el principio de Arquímedes que establece que un cuerpo sumergido en un líquido flota debido a una fuerza igual al peso del agua desplazada. Los hay de varios tipos, sólo se diferencian en método de transmisión de esa fuerza a un elemento de lectura o a un mecanismo transmisor.
  - a) Medidores de tubo de torsión
  - b) Medidores de disco flexible
  - c) Medidores de resorte balanceado
  - d) Medidores de balance de fuerza
  - e) Medidores de interfase.
2. Medidores de presión diferencial o de presión hidrostática. Se usan para servicios de altas presiones, para líquidos corrosivos, pastosos o viscosos. Los elementos diferenciales pueden ser burbujeadores de aire, diafragma, repetidores de diafragma, bulbos de presión, etc. se dividen en dos grupos: 1) medidores no sellados, éstos pueden usarse en contacto directo con el fluido o purgados con gas o líquidos estables. 2) Sistemas sellados, se usan para medir líquidos pastosos y altamente viscosos.
3. Medidores de capacitancia. Se clasifican en medidores continuos y puntuales. Se usan cuando hay dificultad para medir el nivel. Antes de usarlos debe considerarse:
  - a) Las constantes dieléctricas cambian con la temperatura al 0.1% por grado centígrado.

- b) Los cambios químicos del material medido afectan la constante dieléctrica.
  - c) El tamaño de la partícula de los sólidos afectan la constante dieléctrica.
  - d) Si el electrodo se cubre de producto, el punto de control se puede afectar.
4. Medidores ultrasónicos. Se usan para mediciones de nivel continuas o puntuales. Se usan como interruptores de alarma y en acciones de control on-off.
5. Medidores de radiación nuclear. No entra en contacto con el material a medir. Se usan radioisótopos los cuales emiten energía que sigue una trayectoria caótica a velocidad constante, se pueden calibrar usando un valor promedio. Se clasifican en medidores puntuales y continuos.

Las partes principales de un medidor de radiación nuclear son:

- a) Fuente constituida de material radiactivo y soporte.
- b) Detector que tiene un tubo Geiger Mueller, un amplificador transistorizado y una fuente de alto voltaje.

En los medidores puntuales un cambio en el nivel de material produce un cambio en la cantidad de radiación detectada, causando un cambio en la salida eléctrica del detector.

Los medidores continuos se basan en el mismo principio aunque para aumentar la exactitud usan una celda electrónica para convertir la radiactividad en corriente eléctrica.

6. Interruptores de nivel. Los tipos más comunes se usan como medidores puntuales, interruptores para activar alarmas o para funciones de on-off.
- a) Tipo flotador, usa un flotador que sube o baja según lo haga el nivel del líquido. Acciona a un interruptor cuando llega a un cierto nivel. No se recomienda para servicios que usan fluidos que tienden a formar capas ni para fluidos viscosos.

- b) Tipo de aspa rotatoria. Se usa para detectar nivel de materiales sólidos.
- c) Tipo conductividad. Se usa para mediciones de nivel de líquidos suficientemente conductores al flujo de la corriente.
- d) Tipo vibración. Se usa para líquidos, materiales pastosos y polvos finos.

En la tabla III podrá encontrarse una breve lista de las características de los medidores de nivel.

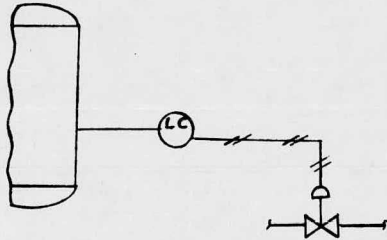
TABLA III. MEDIDORES DE NIVEL.

Características	Medidores - por desplazamiento	Medidores de presión diferencial		Medidores de de capacitancia	Medidores Ultrasónicos	Medidores - de radiación nuclear
		Medidores no sellados	Medidores sellados			
Exactitud	alta	buena	media	media	alta	buena
Costo	moderado	moderado	moderado	moderado	alto	alto
Rango	limitado	amplio	amplio			limitado
Instalación			fácil	fácil	fácil	costosa
Calibración		sin quitar	quitándolo	especial		difícil
Uso con líquidos viscosos, pastosos o corrosivos.	sí	purgándolo	útil	sí	sí	sí
Causa de -- error	diferencia de temperatura	Variación de densidad	Variación de densidad	Variación de densidad		Variación de densidad
Montaje	Interior o - exterior		Afecta la <u>ca</u> libración			exterior

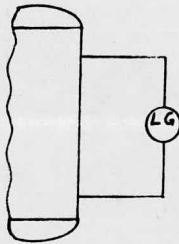


SIMBOLOS DE INSTRUMENTACION TIPICA PARA NIVEL

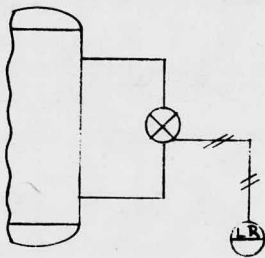
Controlador de nivel ciego, tipo interno.



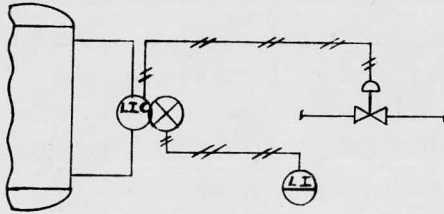
Vidrio de nivel.



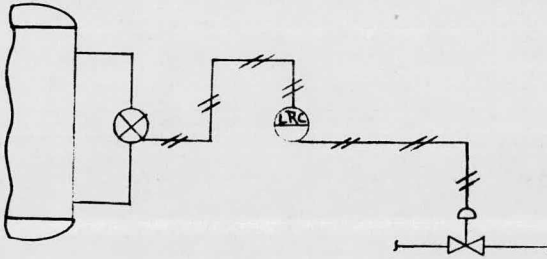
Registrador de nivel, transmisión neumática, con receptor montado en -  
tablero. Transmisor tipo externo.



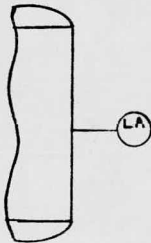
Controlador e indicador de nivel y transmisor combinados con receptor indicador de nivel montado en tablero.



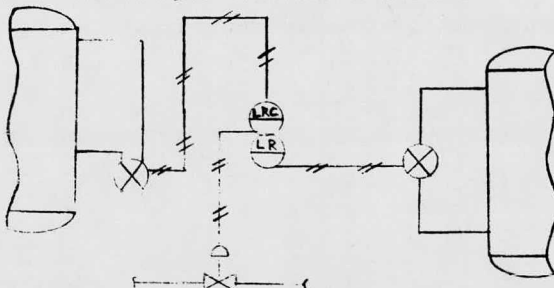
Controlador registrador de nivel, tipo externo, transmisión neumática.



Alarma de nivel, tipo interno.



Controlador registrador de nivel y registrador de nivel, transmisión neumática, combinado con receptor montado en tablero.



## MEDIDORES DE FLUJO

Existe gran variedad de condiciones y requerimientos en los procesos por lo cual se debe conocer los métodos de medición de flujo disponibles y su aplicación.

Hay dos métodos de medición que son: 1) directos en los cuales el valor de la variable se mide directamente. 2) Inferenciales en los que mediante una caída de presión se puede inferir el valor de la variable a medir.

La señal es cuadrática ya que se mide la caída de presión y la señal sale en función de la raíz cuadrada de  $h$  ( $h$  es relativo a la altura de una columna con líquido).

El flujo se lee en gráficas cuadráticas o se puede incluir un extractor de raíz cuadrada o usar gráficas de  $0 - \sqrt{10}$ .

Los elementos primarios de los medidores de flujo son:

- a) Placas de orificios. Se usan para medir flujo de gases y se encuentran en tres tipos: concéntrico, exéntrico y segmentado.
- b) Tobera o boquilla. Se usa para líquidos condensables, líquidos con sólidos en suspensión, para vapor.
- c) Tubo Venturi. Se usa para medir gases o flúidos a bajas presiones así como flúidos viscosos. Los hay de cono largo y cono corto.
- d) Tubo Pitot. Se usa para medir gases basándose en la presión dinámica. El tubo annubar es una modificación de éste.
- e) Codos. Actualmente están obsoletos.

Secuencia de pérdida de presión de los elementos primarios:

Placas > Tobera > Venturi corto > Venturi largo > Tubo pitot.

En la tabla IV se dan algunas características de estos elementos.

TABLA IV. ELEMENTOS PRIMARIOS

Característica	Placa de Orificio	Tobera o boquilla	Tubo venturi	Tubo Pitot
Costo	bajo	alto	alto	bajo
Espacio -- ocupado	poco	poco	grande	poco
Instalación	fácil	fácil	fácil	fácil
Mantenimiento	bajo	alto	alto	bajo
Exactitud	buena	regular	buena	mala
Caída de presión	alta	baja	baja	baja
Uso liq. -- c/sol. en suspensión	no	sí	sí	no
Uso c/liq. - viscosos	no	no	sí	sí
Cálculo y manufactura	sencilla	elaborado	elaborado	

Las tomas de presión diferencial en los elementos primarios pueden ser:

- a) Toma en la brida: soldada a cuello, roscada, deslizable.
- b) Toma de placas o de esquina
- c) Toma de vena contracta
- d) Toma en la tubería
- e) Toma radial.

Vena contracta es el punto donde la presión es mínima pero la velocidad es máxima.

Para seleccionar los elementos primarios deben considerarse:

- a) Características físicas y químicas del fluido.
- b) Flujo mínimo, flujo normal y flujo máximo
- c) Dimensión de la tubería.
- d) Pérdidas de presión permitidas en el proceso.

Los elementos secundarios de los medidores de flujo se clasifican en dos tipos:

- a) Tipo húmedo. Estos usan las cargas hidrostáticas de líquidos principalmente mercurio como una medida de la presión diferencial a través del elemento primario.
- b) Tipo seco. Se usan para eliminar los problemas que causa el mercurio tales como; costo, sobrefluctuaciones, contaminación del Hg.

Entre los elementos de tipo húmedo encontramos los manómetros en "U", flotador, sello líquido o campana invertida y anillo balanceado.

Los elementos de tipo seco son los de fuelle y diafragma o de balance de fuerza.

1. Medidores diferenciales. Su principio de operación se basa en que una restricción en la línea de un fluido produce una presión diferencial a través de la restricción que es proporcional a la velocidad de flujo.

2. **Rotámetros.** Son medidores de flujo de área variable, consisten de un tubo vertical cónico para que exista una relación lineal entre la velocidad de flujo y la posición del flotador dentro del tubo, el flotador tiene libre movimiento a través del tubo.
3. **Medidores magnéticos.** Usan el principio de la ley de Faraday de inducción la cual establece que se desarrolla un potencial eléctrico por un movimiento relativo en ángulos rectos entre un conductor y un campo magnético. En este caso el conductor es un líquido en movimiento que presenta conductividad eléctrica.
4. **Medidores de Turbina.** Consiste de un tubo de flujo dentro del cual una turbina o ventilador rota libremente sobre su eje que se encuentra fijo a la línea dentro del tubo. La velocidad de la corriente que fluye imparte una fuerza a las propelas de la turbina o rotor haciéndola girar a una velocidad proporcional a la de flujo. Consta de tres partes principales: coraza, rotor y parte magnética.
5. **Medidores de disco o rodela.** La medición de flujo se hace midiendo la fuerza ejercida por éste sobre un disco o rodela centrado en la tubería con el plano del disco en ángulo recto a la dirección del flujo.
6. **Medidores de Remolino.** Están diseñados para impartir un patrón de flujo en remolino a la corriente del fluido usando construcciones que producen pulsos proporcionales al flujo causando variaciones en la temperatura y resistencia de un transmisor colocado en el área.
7. **Medidores de Desplazamiento Positivo.** Estos separan la corriente que fluye en incrementos volumétricos individuales que se conocen exactamente por la disposición de los medidores, la suma de los incrementos da una medida muy exacta del volumen total que pasa a través del medidor. Están clasificados como medidores mecánicos cuyas partes móviles se dañan fácilmente y requieren de bastante mantenimiento. Se clasifican según el movimiento del elemento medidor en: disco nutante, pistón oscilante, pistón rotatorio y pistón recíprocante.

TABLA V. MEDIDORES DE FLUJO

Característica	Medidores diferenciales	Rotámetros	Medidor magnético	Medidores de turbina	Medidores de desplazamiento positivo	Medidores de remolino	Medidores de disco o rodela
Costo	bajo	bajo	alto	alto	alto	alto	buena
Exactitud	mala	mala	mala	buna	excelente	buna	
Caída de P.	alta	baja	baja	baja	alta	baja	rel. tubo 0.5 - 0.8
Adaptación a tubería	cualquier tamaño	tubería pequeña	tubería grande	relación $\emptyset$ 100:1	relación r 30:1	relación r 100:1	
Uso con liq. pastosos	difícil	sí	sí	limitado			
Montaje		en línea	en línea	en línea	en línea	en línea	en línea

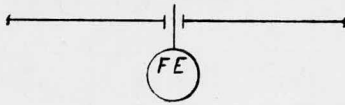
En la tabla V, se pueden encontrar los tipos de medidores y algunas de sus características

SIMBOLOS DE INSTRUMENTACION TIPICA PARA  
FLUJO

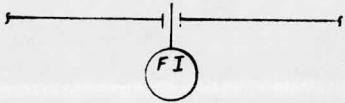
Medidor de flujo tipo desplazamiento



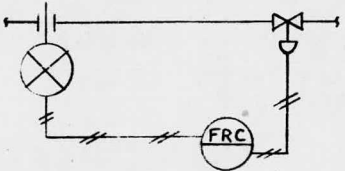
Elemento primario de flujo



Indicador de flujo, tipo diferencial, montado localmente.



Controlador y registrador de flujo, transmisión neumática con receptor montado en tablero y transmisor local.

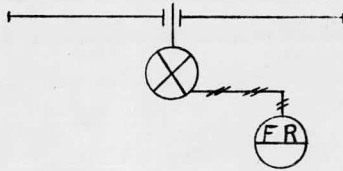


Registrador de flujo en la línea, tipo rotámetro u otro.





Registrador de flujo, transmisión neumática, transmisor local, receptor montado en el tablero.



### MEDIDORES DE PRESION

El control de la presión es importante en sistemas que contienen gases comprensibles. Puesto que los gases a través del sistema son comprensibles el cambio de presión en una parte del proceso afecta al sistema entero. Por lo tanto la capacidad total del sistema viene a ser importante. El control de la presión se caracteriza por una gran capacidad, pequeña transferencia de retrasos y pequeños tiempos muertos.

La presión se empezó a medir bajo el principio de Bourdon en el que al aplanar un tubo cilíndrico por medio de presión, se distorsiona de la forma recta con la propiedad de que al aplicar presión tiende a volver a la línea recta.

La presión se puede medir por medio de tres clases de elementos: La columna de líquido donde la densidad y la altura de un líquido se usan para medir la presión, el elemento metálico de presión con o sin fuerza opuesta, y los métodos eléctricos y electrónicos.

Para obtener una buena medición se debe considerar que: La exactitud para medir la presión depende del diseño del elemento primario, el grado de calibración debe ser máximo cuidando los rangos y sobrecargas, deben quitarse todas las adherencias que pudiera tener el elemento mecánico, se deben evitar vibraciones, condensados y hume-

dad, el aire de instrumentos debe estar limpio.

El soberrrango es una protección que se le da al elemento para que no se vaya a romper.

Los elementos sensores mecánicos contienen elementos elásticos tales como diafragmas, fuelles, tubo Bourdon, los cuales están diseñados para seguir la ley física de que dentro del límite elástico la elongación es proporcional a la tensión.

Los sellos se usan para prevenir que el fluido de proceso entre en contacto con el elemento medidor de presión por dos razones;

- 1) Prevenir errores en la indicación del elemento medidor debido a cambios en la cabeza estática.
- 2) Proteger al elemento medidor de fluidos corrosivos, congelantes o viscosos.

El sello mecánico es un diafragma conectado con el capilar lleno de un líquido que por medio de presión hidrostática se transmite. El sello químico es una composición química de líquidos inmiscibles.

1. Manómetros. Los hay de muchos tipos y se clasifican como elementos de presión por balance de gravedad. Se aplican como elementos de presión diferencial o de presión hidrostática.
2. Tubo Bourdon. Hay tres tipos: el de forma en "C", el espiral y el helicoidal. Al aplicar presión en el tipo "C" da una deflexión máxima de 5/16" por lo que se le tiene que adaptar un eslabón para amplificar el movimiento, es muy inexacto pero si se agrega otro en plano perpendicular se genera la helicoidal -- que nos dará un desplazamiento de 45°. Si al Bourdon "C" se le adapta otro colocándolo en plano paralelo se obtiene la espiral.
3. Diafragmas. Se usan para medir presiones muy bajas, se deflexionan hasta 45° y al aplicar presión cada diafragma se va -- elongando.

4. Fuelles. Son piezas expansivas flexibles que estan dentro de una unidad cerrada, el movimiento esta limitado por un resorte por lo que sólo se aprovecha una parte de la carrera del fuelle.

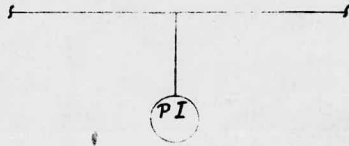
En la tabla VI se muestran algunas características de los medidores de presión.

TABLA VI. MEDIDORES DE PRESION

Característica	Manómetros				Bourdon	Diafragmas	Fuelles
	De líquido	Resorte balanceado	Peso balanceado	Presión diferencial			
Exactitud	0.01-0.1" de líquido	0.25-1 %	0.1-2 %	1-2 %	0.5 %	1-2 %	0.5 %
Rango	2" de cabeza	amplio	amplio	0.2-212" col. H <sub>2</sub> O	0-10000 psia	0-120" H <sub>2</sub> O	0.05-200 mm Hg.
Costo	moderado	moderado	moderado	moderado	bajo	bajo	bajo
Diseño	simple	simple	simple	simple	simple	simple	simple

SIMBOLOS DE INSTRUMENTACION TIPICA PARA  
PRESION

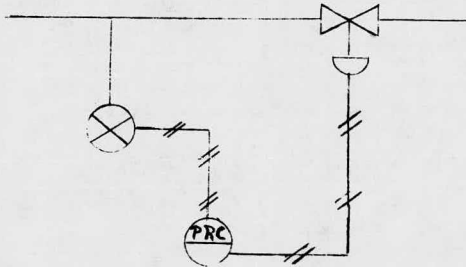
Indicador de presión, montado localmente.



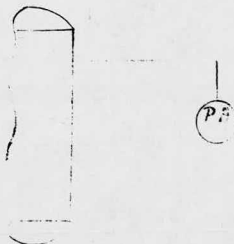
Registrador de presión, montado en tablero.



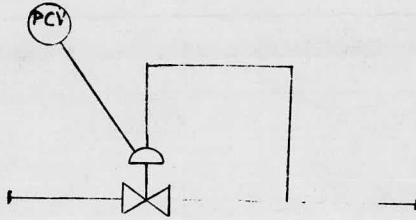
Controlador registrador de presión, transmisión neumática, con receptor montado en tablero.



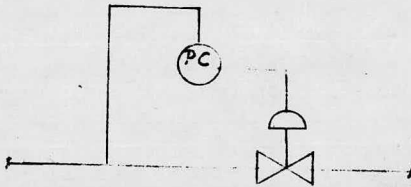
Alarma de presión local



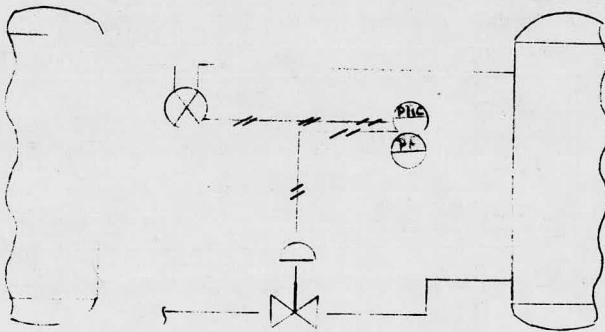
Válvula reguladora de presión auto-operada.



Controlador de presión del tipo ciego.



Controlador registrador de presión, transmisión neumática; con registrador de presión, instrumento combinado montado en tablero.



## MEDIDORES DE TEMPERATURA

La temperatura es una variable de proceso muy importante y se encuentra a través de la planta química. Se usa como una medición directa en la mayoría de los procesos, en otros se usa como una inferencia de la composición química particularmente en las operaciones de destilación.

1. Termopares. Se basa en el efecto de Seebeck. Cuando dos alambres de metales diferentes se unen en los extremos y las uniones se mantienen a temperaturas diferentes, fluye una corriente debido a la absorción de calor en la unión caliente.
2. Pirómetros de radiación. Se basan en el método de medir la temperatura de un objeto por medio de la cantidad y características de la energía que irradia. En este campo de la pirometría se han desarrollado varios elementos primarios los cuales podemos clasificar en dos grupos: 1) pirómetros ópticos son aquellos instrumentos en los cuales el brillo de un objeto caliente se compara al de una fuente de brillo estandar por medio del ojo del operador y; 2) pirómetros de radiación son aquellos instrumentos que miden la velocidad de emisión de la energía por unidad de área sobre un rango relativamente amplio de longitudes de onda.
3. Termómetros de resistencia. Es un instrumento para medir resistencia eléctrica calibrada en unidades de temperatura, dependen de las características inherentes de los metales al cambio en la resistencia eléctrica cuando están sujetos a cambios de temperatura.
4. Termómetros bimetalicos. Se pueden definir como un material compuesto, hecho de tiras de dos o más metales unidos los cuales debido a la diferencia de coeficiente de expansión tienden a cambiar su curvatura cuando hay cambio de temperatura. Los elementos más comunes son la espiral, la helicoidal simple y la helicoidal múltiple.

5. Sistemas termales. Estan diseñados para proporcionar indicación o registro de temperatura lejos del punto de medición, aunque hay casos en que la longitud del capilar se aproxima a cero y existen diseños donde el Bourdon es el mismo bulbo del sistema. Se componen de tres partes: 1) elemento sensible o bulbo, es el que está -- conectado directamente al proceso y siente los cambios de temperatura, contiene el gas o el líquido que servirá para hacer la medición. 2) Medio transmisor o capilar, está lleno del gas o líquido, es el -- que comunica al bulbo con el Bourdon. 3) Elemento detector, puede ser un helicoidal o un Bourdon es el que responde a la señal del bulbo y proporciona un movimiento para dar la indicación o el registro. Los tres elementos están sellados y llenos a muy alta presión para evitar que se afecte la presión manométrica en la medición de la temperatura.

Existe una clasificación de los sistemas termales dados por la SAMA y se presenta en la tabla VII.

TABLA VII. SISTEMAS TERMALES

División	Llenado	Principio de operación	Subdivisiones	Compensación	Longitud max. del capilar
Clase I	líquido	expansión volumétrica del líquido	IA	total	100 ft.
			IB	en la caja	20 ft.
Clase II	vapor y su líq. -- volátil	Presión de vapor Curva de vaporización	IIA	No	150 ft.
			IIB	No	150 ft.
			IIC	No	150 ft.
Clase III	Gas -- inerte	Presión de gas. -- Ley de gases ideales.	IIIA	total	100 ft.
			IIIB	en la caja	100 ft.
Clase V	mercurio	expansión volumétrica del mercurio			



En la tabla VIII se dan algunas características de estos sistemas -  
termales.

TABLA VIII. CARACTERISTICAS

Característica	Clase I	Clase II	Clase III	Clase V
Rango	-300 a 600 °F	-430 a 600 °F	-450 a 1400 °F	-300 a 600 °F
Diseño	simple	simple	simple	simple
Costo	alto	bajo	accesible	muy alto
Gráfica	lineal	especial	uniforme	lineal
Velocidad de respuesta	alta	alta	alta	alta
Punto de medición.	cuando T varía mucho	interfase	T promedio en bulbo	

Se usa el termopozo para mantener al bulbo sin afectar el proceso, para manejar líquidos abrasivos para dar mayor resistencia mecánica. -- Pero los problemas que se presentan es que la velocidad de respuesta es 3 a 10 veces menor, para evitar esto se puede llenar con aceite térmico, - grafito en polvo o en aceite, mercurio para proteger al bulbo sin tocar el cuello y otro problema es que aumentan las pérdidas por conducción de calor lo que puede evitarse aislando la cabeza del termopozo y la tubería.

SIMBOLOS DE INSTRUMENTACION TIPICA PARA  
TEMPERATURA

Indicador de temperatura o termómetro (local)



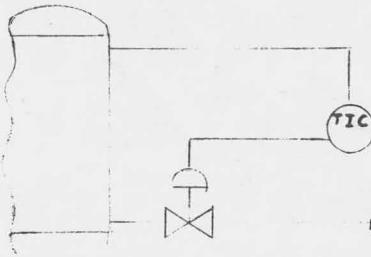
Elemento de temperatura sin conexión a instrumento.



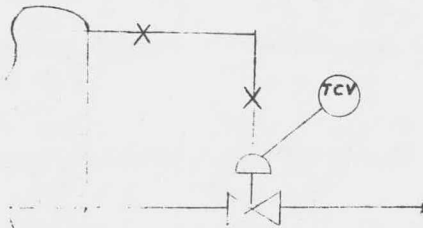
Termopozo.



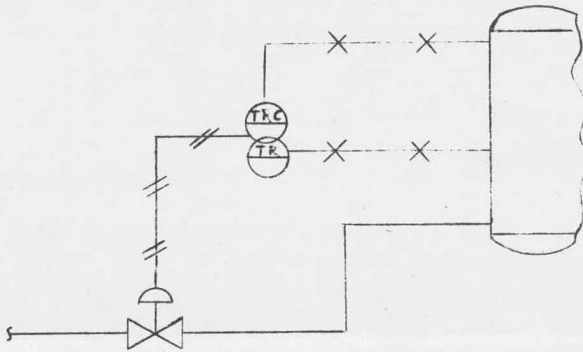
Controlador e indicador de temperatura, tipo sistema llenado, montado localmente.



Controlador de temperatura del tipo auto-operado.



Controlador y registrador de temperatura y registrador de temperatura, -  
instrumento combinado montado en tablero.



## CAPITULO III

### ELEMENTOS DE CONTROL

La función de los indicadores y registradores es presentar información al operador humano, por lo que la forma de la pantalla es un -- factor importante y debe considerarse al seleccionar los instrumentos.

La indicación y el registro pueden ser de forma analógica o digital. La analógica se caracteriza por ser una respuesta variable continuamente y se presenta en forma de puntero sobre una escala, una pluma sobre una carta o un registro fotográfico de un osciloscopio. El digital es de forma numérica tal como un contador, una hoja de registro impresa o un registro en código numérico sobre un papel o cinta magnética.

El analógico es simple, menos costoso, menos sujeto a desgaste y en muchos casos más útil. Para propósito de contabilidad y computación los datos deben ser en forma digital.

La señal de medición es aquella que esta aplicada directamente al instrumento registrador o indicador y puede no ser igual a la variable de proceso o se puede usar un transductor para convertir la variable de -- proceso en otra señal.

Los indicadores y registradores pueden ser: eléctricos cuando responden a una señal de medición eléctrica y mecánica cuando influye -- fuerza mecánica y movimiento, presiones neumáticas e hidráulicas, temperatura, humedad, cuando estas variables operan directamente. Se --

clasifican en:

1. Tipo de flexión. De potencia propia y con auxilio de potencia.
2. Tipo de balance nulo. Balanceado manualmente y servo-operado.

Span. Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior de la escala de la variable indicada o registrada.

Las indicaciones y registros deben combinarse con controles, - interruptores, alarmas y equipo auxiliar para presentar en una forma clara y visual la operación del proceso. Se han desarrollado en los centros de control el panel de gráfica total y paneles semigráficos para lograr este objetivo.

Controladores. Los controladores son de muchos tipos y la mayoría de ellos se clasifican de acuerdo al tipo de control que suministran. Hay dos métodos de controlar: 1) controladores auto-operados que usan energía tomada directa o indirectamente del sistema controlado para operar una válvula u otro aparato que regule el suministro del medio de control. 2) Controladores operados con piloto en los que el suministro de energía se controla en forma de un fluido a presión o de electricidad, éste hace el ajuste necesario al aparato controlador.

Los modos de control son: control de dos posiciones, control de posición proporcional, control de posición proporcional más integral - control de posición proporcional más derivado y control de posición proporcional más integral más derivado.

Controladores neumáticos. El propósito de estos es suministrar aire al diafragma de una válvula de control; la presión del aire da una señal de 3 - 15 psi lo cual se ha estandarizado.

Controladores hidráulicos. Presentan algunas ventajas como - trabajar con fluidos incomprensibles, la velocidad de respuesta es mayor, las unidades de potencia son más pequeñas, el circuito es simple pero más grande y debe proporcionarse una línea de regreso para el fluido de control.

Controladores eléctricos y electrónicos. La diferencia entre estos es que el circuito electrónico incorpora tubos de vacío (elementos de estado sólido) en vez de circuitos de alambres.

Las funciones de un controlador automático es mantener la salida del proceso a un valor deseado por medio del principio de operación de retroalimentación. Existen ciertos criterios de funcionamiento aceptable y el problema del control es vencer los retrasos de tiempo y las distorsiones para mantener la operación dentro de los límites prescritos. Para lograr esto el controlador debe tener las siguientes funciones primarias:

- a) Medición de algunas características a la salida del proceso.
- b) Comparación de esto con el valor deseado o punto fijo.
- c) Análisis de la señal de error y computación de la corrección adecuada.
- d) Corrección de la variable manipulada a la entrada del proceso.

### ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Los elementos finales de control pueden ser válvulas, resistencias eléctricas, bombas de velocidad variable, motores de velocidad variable y persianas. Aquí veremos sólo las válvulas de control por ser las más usadas en la industria de procesos.

El elemento final de control es parte del circuito que cambia directamente el valor de la variable manipulada. La válvula de control sirve como un orificio que varía continuamente para cambiar la velocidad de flujo del agente de control. Los componentes de las válvulas son:

1. Cuerpo. Es la parte que esta en contacto con el proceso que contiene el orificio variable y esta cerrado a presión.
2. Partes Internas. Tapón, asientos, vástagos, guías.
3. Bonete. Su función es la de sellar por medio de un juego de empaques.
4. Yugo. Sostiene al actuador y puede alojar al indicador de la carrera.
5. Actuador. Es el medio motriz del vástago que mueve la válvula.

Las válvulas se pueden clasificar por el tipo de cuerpo en: bola, globo, mariposa, saunders o diafragma. Otra clasificación es por el tipo de actuador: neumáticas, eléctricas, solenoide y pistón.

La condición de seguridad es la posición a la que va la válvula en caso de falla y depende del proceso. FO cuando se abre y FC cuando se cierra.

Las características de las válvulas son:

- a) Capacidad de la válvula. Es la cantidad de gasto de gasolina en GPM que pasa a través de la válvula a las condiciones  $P = 2 \text{ Kg/cm}^2$ ;  $T = 80^\circ\text{C}$ .  $\Delta P = 20 \text{ psi}$  a máxima abertura. No se trabaja con este concepto por ser muy particular.
- b) Coeficiente de flujo de la válvula. En ingeniería se trabaja con este ya que es para una sola condición.  $C_v$  para líquidos,  $C_g$  para gases y  $C_s$  para vapor. Es la  $Q \text{ max. (GPM)}$  de agua a  $60^\circ\text{F}$  la  $SG = 1$ ,  $\Delta P = 1$  a abertura máxima. Por lo que  $C_v = \text{No. de GPM de } H_2O \text{ a } 60^\circ\text{F}$  y que fluirán a través de una válvula a su máxima abertura y a  $\Delta P$  de una psi medidas directamente a la entrada y la salida de la válvula.
- c) Característica de la Válvula. Es la relación que existe entre % de abertura y % de flujo de la válvula. Cuando la relación es 1:1 es de característica lineal y sería característica de igual porcentaje cuando a cada incremento de % de abertura corresponda un incremento de un porcentaje de flujo instantáneo o real de la válvula.

Los posicionadores de las válvulas son en realidad controladores de circuito cerrado potencializados por un suministro auxiliar de aire con una señal al instrumento como entrada, la presión del diafragma como salida y la retroalimentación desde el vástago de la válvula. El propósito básico del posicionador es asegurar una posición sumergida de la válvula que es exactamente proporcional a la señal del instrumento.

## CAPITULO IV

### FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMATICO

Los componentes fundamentales en un circuito de control son el proceso y el control automático. Hay dos clases de procesos; aquellos de tendencia a la estabilidad o equilibrio, o sea, los procesos autorregulables de fácil control y aquellos cuya peculiaridad es inestable.

La autorregulación del proceso puede ser positiva cuando el valor de la demanda está determinada por la resistencia al flujo y puede ser neutra cuando la demanda del flujo de salida es constante.

Un circuito de control contiene básicamente los siguientes elementos: detector, medidor, controlador y elemento final de control, no obstante, a menudo se añade un elemento transmisor.

Las variables controlables más comunes que intervienen en los procesos son: temperatura, presión, flujo y nivel.

Para establecer un sistema de control se puede determinar desde varios puntos de vista como el mecánico, neumático, eléctrico, electrónico y técnicas analógicas y digitales.

Existen dos tipos básicos de control que se caracterizan por su capacidad de retroalimentar información desde el proceso al controlador para dar acción correctiva.



1. Control de Circuito Abierto. Involucra el hecho de hacer una estimación de la forma y cantidad de acción necesaria para alcanzar un objetivo, se basa en la predicción. No se hace un chequeo para determinar si se debe hacer acción correctiva para llegar al objetivo, es decir, el circuito abierto no es capaz de retroalimentar la información del proceso al controlador por sí mismo, y la acción correctiva se aplica mediante un control humano externo al proceso. (fig. 1)

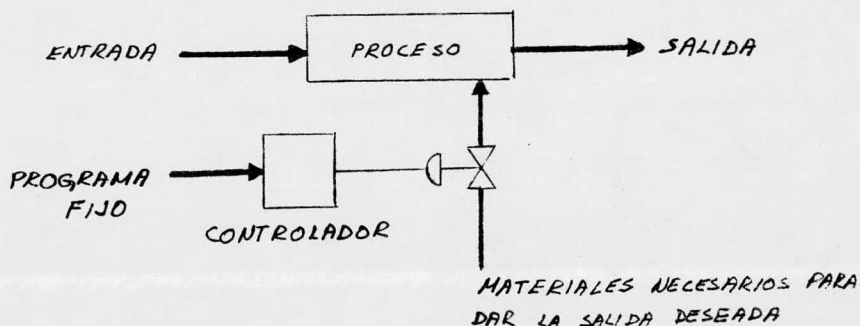


FIGURA 1

2. Control de Circuito Cerrado. Puede ser por retroalimentación (feedback) o por retroalimentación positiva (feedforward) y es capaz de enviar acción correctiva cuando se detecta un error, es decir, tiene capacidad de retroalimentar la información del proceso al controlador.

En el control de retroalimentación positiva se hace una medición en la corriente de alimentación, los cambios en la variable medida se detectan en el controlador y se hace una acción correctiva continua. (fig.2)

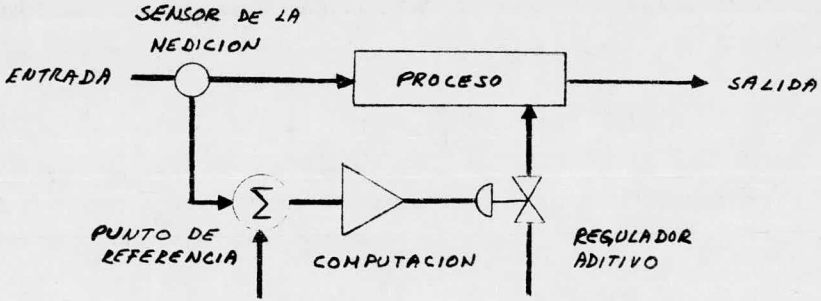


FIGURA 2

En el circuito de retroalimentación se hace una medida en la variable a controlar y se compara con el punto de referencia, si hay error, el controlador automático entra en acción para hacer la corrección necesaria. (fig. 3)

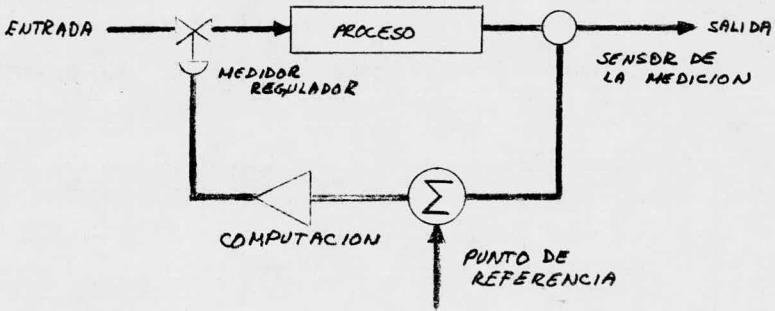


FIGURA 3

Para poder evaluar el tipo de controlador por retroalimentación para una acción particular, deben considerarse los factores tiempo y ganancia ya que éstos retardan el equilibrio del proceso.

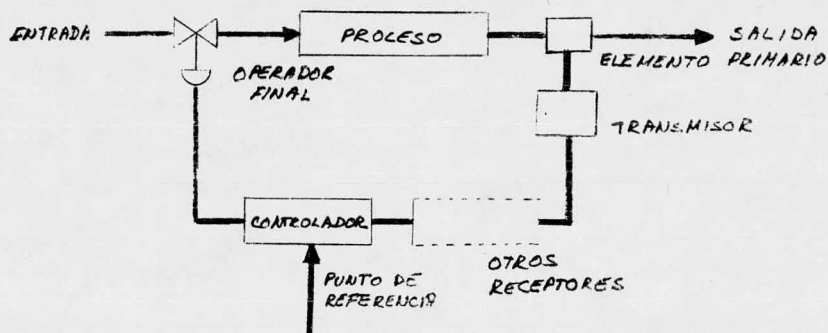


FIGURA 4

Factor tiempo. Cada parte de un circuito requiere de un --- tiempo para sentir un cambio en la entrada y transformarlo a la nueva -- condición en la salida. El tiempo de respuesta del circuito total, es la suma de las respuestas del elemento primario del transmisor, de todos los receptores en serie con el controlador, del controlador, del operador final, y del proceso mismo, para corregirlo se deben considerar otros - elementos de tiempo.

Tiempo muerto.- Es el tiempo que transcurre desde el mo<sup>o</sup>mento que hay un cambio en cualquier elemento del circuito y el momento que empieza a cambiar la señal de salida.

Capacitancia.- Está determinada por todas las partes del -- proceso capaces de almacenar energía y/o material.

Resistencia.- Son aquellas partes del proceso que se opo-  
nen al cambio de energía y/o material.

Como siempre la capacitancia y la resistencia se presentan juntas, se acostumbra trabajar con el par RC que es la suma de las dos. El hablar del par RC implica su relación con la constante de tiempo del sistema.

Tiempo de respuesta de los elementos detectantes.- Siempre existe un retraso entre un cambio en las condiciones de un proceso y la notificación de éste por un operador de proceso o por un controlador automático. Las causas de este retraso son tres: retraso inherente al proceso, retraso en la respuesta al elemento detector y retraso en la -- transmisión.

Las acciones correctivas para los problemas de retraso son: el uso de tuberías de transmisión de gran diámetro para reducir la resistencia del medio al flujo de la señal, relevadores en las líneas de transmisión largas para disminuir el tiempo de respuesta a la señal, ubicar el controlador cerca del regulador para reducir las distancias que de-- ban viajar las señales de transmisión y control.

Ganancia.- Es la relación entre el cambio de la presión de salida al cambio de la variable. Se considera como el inverso de la -- banda proporcional.

CAPITULO V

ARREGLOS TÍPICOS DE CONTROL EN  
CAMBIADORES DE CALOR

En las plantas químicas encontramos de alguna manera equipos de transferencia de calor y para instrumentarlos adecuadamente debe considerarse la naturaleza de la transferencia de calor y la calidad del control deseado, basándose en el control de una variable al manipularla. El número máximo permisible de controladores a usar se determina por la regla de las fases. Como ejemplo tomaremos la fig. 1 en la que se muestra un calentador con vapor con sus variables (temperaturas y flujos) y parámetros de definición (calores latentes y específicos).

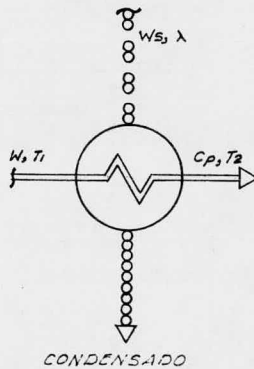


FIGURA 1

Variables y parámetros del sistema		Símbolos del medio fluido	
$T_1$	Temperatura de entrada del fluido de proceso.	===>	Líquido de proceso.
W	Flujo del fluido de proceso	—>	Líquido de enfriamiento.
$C_p$	Calor específico del fluido de proceso	●●●●●>	Líquido de calentamiento, o condensado.
$T_2$	Temperatura de salida del fluido de proceso.	===>	Vapor de proceso.
$W_s$	Velocidad del flujo de vapor.	- - ->	Vapor de enfriamiento.
$\lambda$	Calor latente de vaporización.	∞ ∞ ∞ ∞>	Vapores de calentamiento.

Este sistema se define por la ley de la conservación de energía que establece:

$$W C_p (T_2 - T_1) = \lambda W_s$$

y; G.L. = No. variables - No. ecuaciones = 4 - 1 = 3  
 lo cual indica que el número máximo permisible de controladores es tres, aunque en la mayoría de los casos se usan menos de los establecidos por esta regla, es importante hacer notar que es peligrosa una sobredefinición del sistema.

### CAMBIADOR DE CALOR LIQUIDO - LIQUIDO

Este sistema se define por la ecuación de energía establecida anteriormente y presenta 4 variables de temperatura y 2 de flujo, por lo que los grados de libertad son 5. En la figura 2 encontramos el control de retroalimentación por estrangulamiento a la entrada del enfriador.

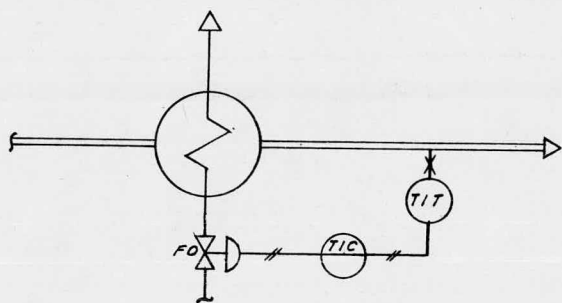


FIGURA 2

En la fig. 3 se ilustra el control de retroalimentación por estrangulamiento a la salida del medio de calentamiento.

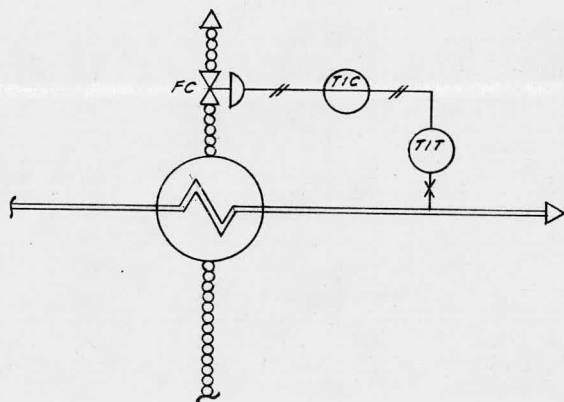


FIGURA 3

La colocación de la válvula de control se hará de acuerdo a la deseabilidad de operación del lado del medio de transferencia de calor.

Es deseable que las válvulas de control presenten bajos efectos de fricción y que la ganancia del sistema se mantenga constante en los cambios de carga por lo cual se recomienda el uso de posicionadores y vástagos de igual porcentaje.

El controlador adecuado es el de tres modos puesto que el derivativo es esencial en sistemas con grandes atrasos de tiempo y/o súbitos cambios de carga; el proporcional debe tener amplia banda para mantener la estabilidad; el integral sirve para corregir las desviaciones de la temperatura debidas a los cambios de carga.

El elemento térmico debe colocarse en donde el retraso de tiempo no aumente. El uso del termopozo hace el retraso mayor pero se usa por razones de seguridad y mantenimiento.

Las válvulas de tres vías se usan para esquivar las características dinámicas del intercambiador bypaseando parcialmente y mezclando líquido caliente con el fluido enfriado obteniéndose un aumento en la velocidad de respuesta y un ahorro en el costo. El retraso del bulbo es importante ya que cubre un alto porcentaje del retraso total. En la fig.- 4 se muestra el uso de una válvula de desvío.

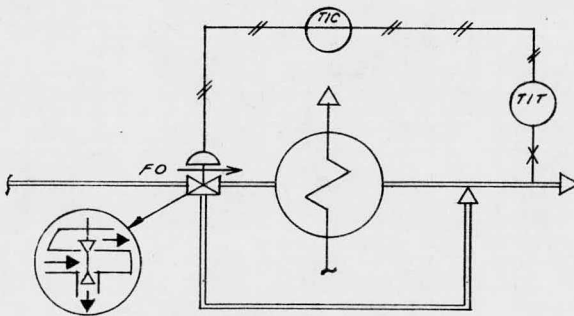


FIGURA 4



En la fig. 5 se ilustra una válvula mezcladora.

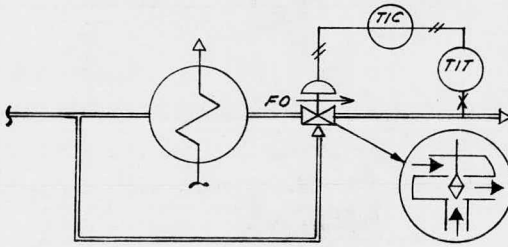


FIGURA 5

En ambos casos se logra operación estable por la tendencia -- del flujo para abrir los tapones, debiendo tener cuidado de que se use la - válvula adecuada al diseño original o de lo contrario la operación será - inestable.

La fig. 6 muestra las características de conservación del - - agua de enfriamiento en el que se tiende a maximizar su temperatura de - salida y minimizar la velocidad del agua usada. El agua debe contener pro- ductos químicos para prevenir el ensuciamiento de los tubos si la opera- ción va a ser a alta temperatura.

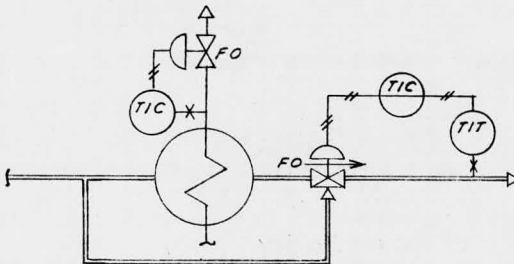


FIGURA 6

Cuando por razones de temperatura no sea posible el uso del bypass con válvulas de tres vías pueden usarse dos válvulas de dos vías las cuales deben tener características opuestas, cuando una está abierta, la otra está cerrada. En la fig. 7 se ilustra este sistema.

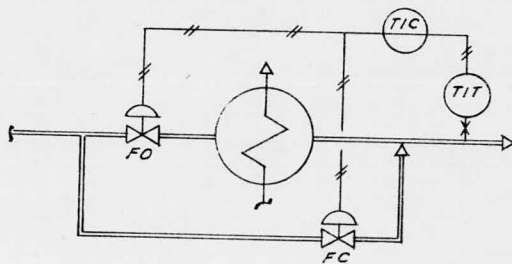


FIGURA 7

En la tabla I se muestran las ventajas de éstos dos tipos de válvulas.

TABLA I. VALVULAS

	Válvula de tres direcciones	Dos válvulas de dos direcciones de puerto simple	Dos válvulas de dos direcciones de puerto doble
Más económica	Sí	No	No
Cierre hermético	Sí	Sí	No
Aplicable a servicio de más de 500 °F	No	Sí	Sí
Aplicable a servicio de más de 300 °F	No	Sí	Sí
Aplicable a operaciones de alta P y ΔP.	No	Sí	Sí
Mayor capacidad para el mismo tamaño de válvula	No	No	Sí

## CAMBIADOR DE CALOR CON VAPOR

Como medio de calentamiento el vapor introduce algunas dificultades:

- 1) El condensado caliente es muy corrosivo, y se debe tener cuidado para evitar que el condensado se acumule dentro del cambiador donde - el contacto con las partes metálicas causan daños.
- 2) Las líneas de condensado deben colocarse con bastante cuidado para prevenir la acumulación del condensado y entonces hacer uso de las trampas.

Es conveniente conectar el vapor del lado de los tubos. Cuando se usa vapor sobrecalentado se acostumbra despreciar el rango de temperatura de sobrecalentamiento.

En éstos aplican las consideraciones de accesorios, componentes del circuito, colocación del sensor y retrasos de tiempo presentados para el equipo anterior. El igual porcentaje de vástagos es más necesario porque al variar la presión de condensación con cambios de carga en el proceso se requiere alta rangeabilidad la cual es la relación entre los coeficientes de válvula requeridos para las condiciones de alta y baja. - Para solucionar los problemas de alta rangeabilidad debe instalarse una válvula de control pequeña en paralelo con la grande ya que de otra manera el control se afectará porque a bajas cargas la válvula de control operará cerca del punto donde la curva de flujo contra elevación cambia repentinamente y la operación será inestable; además la ganancia del sistema no debe variar con cambios de carga, esto puede garantizarse si se usan válvulas de igual porcentaje y si la caída de presión no es una función de la carga. En la fig. 8 se ilustra este equipo.

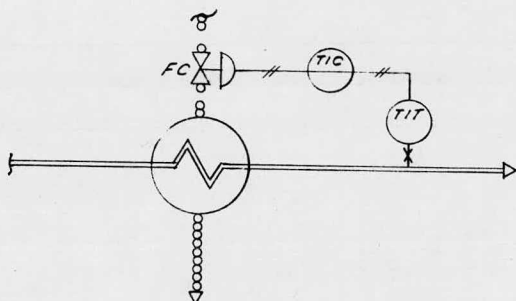


FIGURA 8

Cuando la temperatura del vapor se controla por estrangulamiento a la entrada, la presión del condensado es una función de la carga. A cargas y temperaturas de operación bajas la presión del condensado -- será menor que la atmosférica por lo que el condensado no puede descargarse por la trampa de vapor y se acumula en el calentador cubriendo el área de transferencia de calor y así la presión del condensado se eleva -- hasta que pueda descargarse por la trampa. Por estas razones el control de temperatura no es efectivo y debe usarse algunas técnicas para mejorarlo.

Una forma sería montar la válvula de control en la línea de condensado como se muestra en la fig. 9.

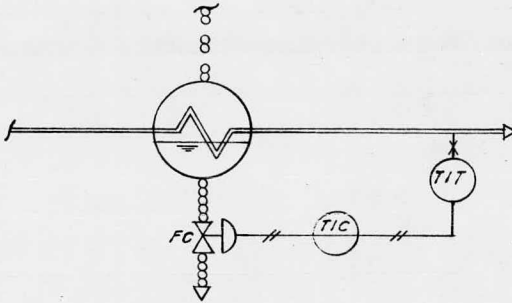


FIGURA 9

Esto es conveniente cuando es una sola unidad y el condensado es separable porque cuando hay varios calentadores en serie este arreglo no da un buen control debido a la dinámica del sistema, esto es, cuando la carga disminuye la válvula estará cerrada antes de que el condensado alcance un nivel alto para igualar la nueva carga baja con un área de transferencia reducida, este proceso es lento porque el vapor no tiene condensado antes de que se afecte el nivel. Cuando la carga aumenta el proceso es rápido ya que a una pequeña abertura de la válvula el condensado puede gotear y se expone una mayor área de transferencia. Con esta dinámica asimétrica el control tiende a ser pobre, por lo tanto esto no se recomienda en donde el control de temperatura es importante.

Otra técnica se muestra en la figura 10 donde se hace uso de trampas de levantamiento para prevenir la acumulación de condensados en calentadores que operen a bajas presiones de condensado. La fuente de energía es una presión externa.

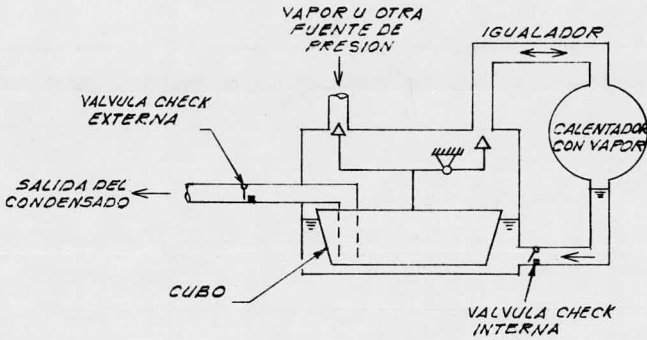


FIGURA 10

Al llenarse el calentador, la válvula check a la entrada de la trampa se abre llenando a ésta hasta que el cubo al apilarse cierra el igualador y queda abierta la entrada de la presión externa con lo que la válvula check de la entrada se cierra y la exterior se abre quedando así hasta que el cubo se vacía, entonces la fuerza bollante eleva el cubo cerrándose la entrada de presión y se abre el igualador.

La presión de la trampa baja y cierra la válvula check de la salida y empieza otro ciclo. Esto no resuelve los problemas de rangeabilidad y se deben usar dos válvulas en paralelo.

Cuando tenemos una gran área de transferencia porque la presión del condensado y la carga son bajas se usan controladores de nivel como en el arreglo que se muestra en la fig. 11.

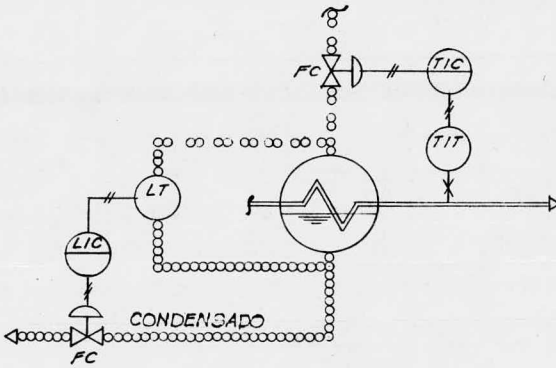


FIGURA 11

Esto da un buen control de temperatura si el ajuste de nivel es correcto y si no hay cambios bruscos de carga. La respuesta a variaciones de carga también es asimétrica. La desventaja de esto es su costo relativamente alto el cual puede reducirse con el uso de trampas de drenado continuo como se muestra en la fig. 12, pero esta limitada a un rango de variación de nivel cuyo punto de control se desvía por variaciones de carga. Por esta razón no se recomienda en calentadores verticales o rehervidores ya que en éstos el rango de ajuste de nivel es muy importante.

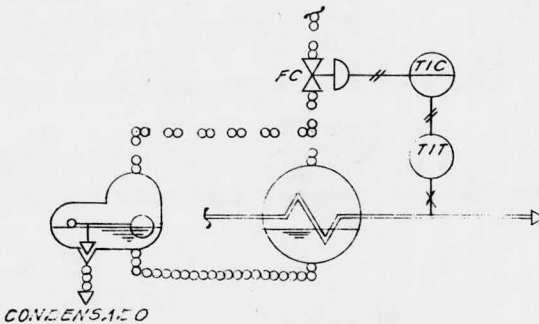


FIGURA 12

En los calentadores con vapor las ventajas y limitaciones del uso del bypass discutidas para los cambiadores líquido - líquido son las mismas, - pero tiene la ventaja de que da un grado de libertad adicional y el vapor puede estrangularse en función de otra propiedad, si se ajusta la alimentación del vapor para mantener constante la presión de condensación se eliminan los problemas de separación del condensado. En la fig. 13 se ilustra esta técnica.

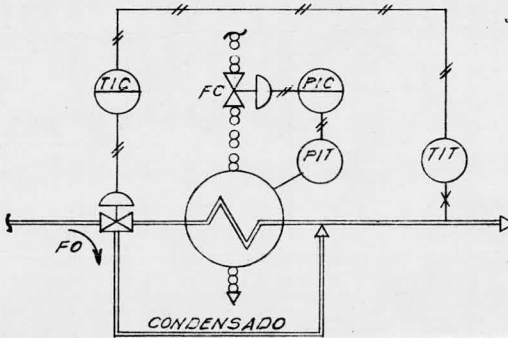


FIGURA 13

En la tabla II se resumen las características de las técnicas que se usan para combatir los problemas que causan las bajas presiones de condensación.



Tabla II. Características de los sistemas de control de calentadores.

	Costo del sistema	Condición para dar control de presión.		
		Variaciones de carga lentas.	Variaciones de carga rápidas.	Condiciones de presión bajas
Válvula en la línea de condensado estrangulamiento por temperatura	bajo	cuestionable	no	no
Dos válvulas en la línea de vapor estrangulamiento por temperatura	medio	sí	no	no
Válvula en la línea de vapor, estrangulamiento por temperatura y condensado removible por trampa de drenado.	medio	cuestionable	no	sí
Válvula en la línea de vapor estrangulamiento por temperatura.	medio	sí	no	no
Válvula en la línea de vapor, estrangulamiento por temperatura y condensado removido por trampa de bombeo	medio	cuestionable	no	no
Válvula con línea de vapor, estrangulamiento por temperatura y condensado removido por controlador de nivel.	alto	sí	no	Sí
Válvula de tres direcciones controla la temperatura por estrangulamiento bypass y entrada de vapor se controla para mantener la presión de condensación.	alto	sí	sí	sí

CONDENSADORES

Los condensadores son enfriadores cuyo propósito es eliminar calor latente en lugar de calor sensible, si interesa controlar la temperatura o la presión del condensador se puede hacer un estrangulamiento del flujo del agua de enfriamiento a través del condensador (figs. 14 y 15) causando un aumento en la temperatura que es aceptable sólo si el agua se trata químicamente contra el ensuciamiento. Para que el control sea eficiente y sensible, la velocidad del agua a través del condensador debe ser tal que su tiempo de residencia no exceda a un minuto.

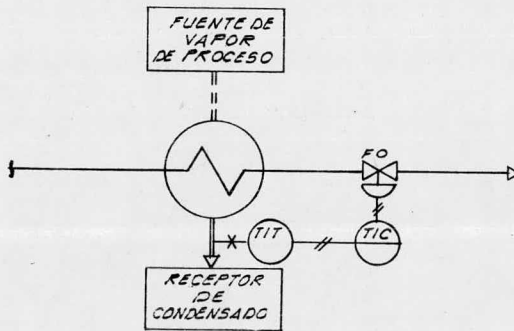


FIGURA 14

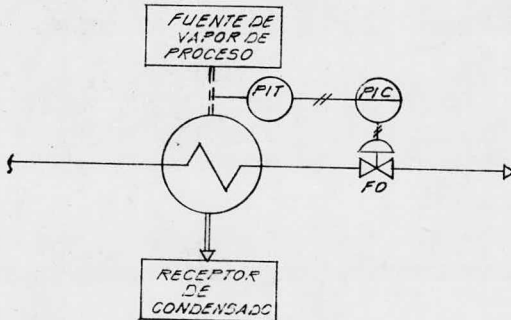


FIGURA 15

Si no se desea estrangular el agua de enfriamiento, se recurre al sistema de la fig. 16 en donde la superficie expuesta del condensador se varía para controlar la velocidad de condensación. Si no hay condensables puede usarse una purga constante para separar los inertes.

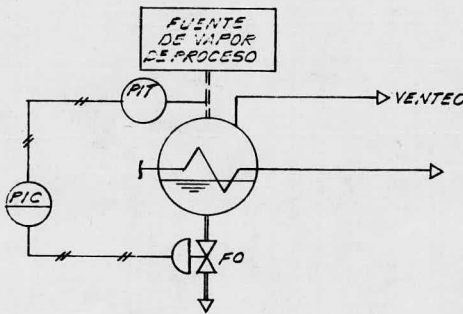


FIGURA 16

En las figs. 17 y 18 se muestran unos sistemas de "Bypass de gas caliente" para reducir los problemas de asimetría en la dinámica del proceso.

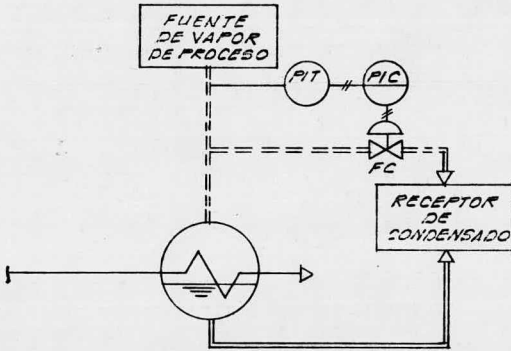


FIGURA 17

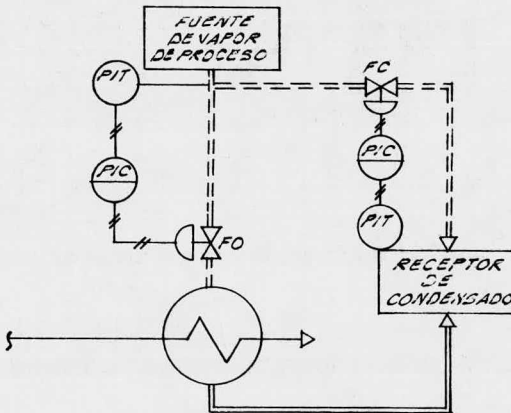


FIGURA 18

En la fig. 17 la abertura de la válvula del bypass causa que las presiones entre el condensador y el acumulador se igualen provocando una inundación parcial del condensador. Cuando se reduce la presión de condensación, la válvula se cierra ocasionando un aumento en el área superficial expuesta del condensador para lo cual el condensado se transfiere al acumulador sólo si la presión de vapor se ha bajado debido a la condensación. La velocidad de respuesta del sistema en esta dirección es función directa del subenfriamiento del condensado. Por lo tanto la unidad puede ser o no ser simétrica en su dinámica, si se desea alta velocidad se considera la fig. 18.

Para controlar un condensador con refrigerante en donde el medio de enfriamiento no es el agua debido a que la temperatura de condensación del fluido de proceso es muy baja, se ilustra en la fig. 19. El área de transferencia de calor se establece por el circuito cerrado de control de nivel y la temperatura de operación se mantiene por el controlador de presión. Si los cambios de carga del proceso afectan la velocidad de vaporización del refrigerante esto se compensa por medio del nivel controlado.

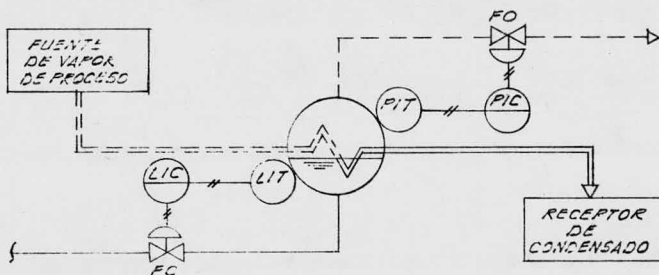


FIGURA 12

REHERVIDORES Y VAPORIZADORES

El propósito de los rehervidores es suplir los requerimientos de calor en los procesos de destilación como calor latente. Los vaporizadores son intercambiadores calentados indirectamente en el que un fluido es ta sujeto a vaporización y que no forma parte de un proceso de evapora---ción o destilación.

Un rehervidor calentado con vapor tiene un sólo grado de liber---tad, el controlador que se usa se aplica para ajustar la velocidad de adic---ción del vapor. En cuanto a las condiciones de presión mínima de con---densado, aplica lo que se ha discutido para los calentadores de líquido. - En las figs. 20 y 21 se muestran dos alternativas para controlar un reher---vidor ya sea para generar vapores sobrecalentados o para generar vapo---res saturados a una velocidad constante establecida por la velocidad de - entrada de calor.

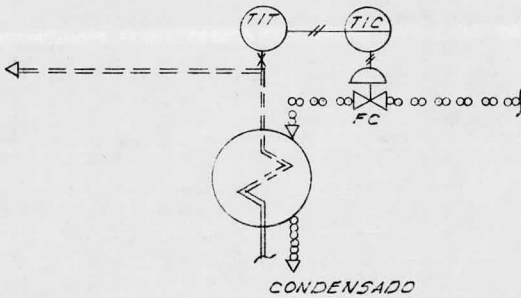


FIGURA 20

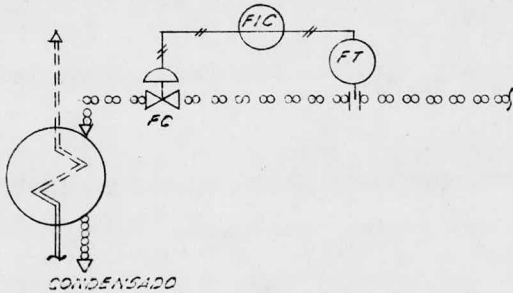


FIGURA 21

### CONTROL EN CASCADA

En las unidades de transferencia de calor, el uso de circuitos en cascada es probablemente el más usado. Estos sistemas consisten de dos controladores en serie. El maestro en caso de intercambiadores de calor detecta la temperatura de proceso y el esclavo se instala para la variable que puede causar fluctuaciones en la temperatura de proceso. El maestro ajusta el punto fijo del esclavo y éste estrangula la válvula para mantenerlo, esto es, el sistema no tiene dos puntos fijos independientes. - Estos circuitos se instalan para prevenir disturbios desde la entrada al proceso, por ejemplo, un sistema como el de la fig. 8 no puede responder a un cambio en la presión de vapor hasta que el sensor de temperatura del proceso sienta su efecto, es decir, un error en la detección de temperatura tiene que desarrollar una acción correctiva a priori. El circuito en cascada responde inmediatamente corrigiendo para el efecto de cambio de presión antes de que pueda influenciar la temperatura de proceso. En la fig. 22 se ilustra este sistema.

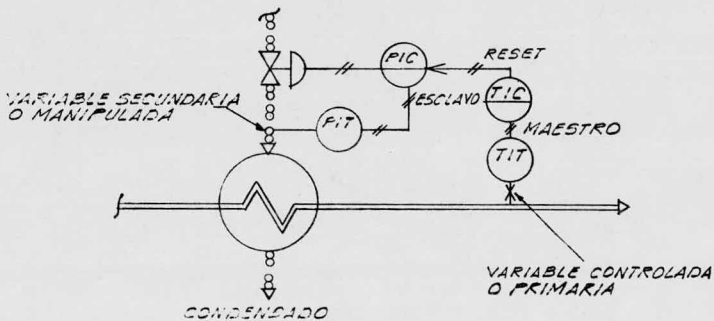


FIGURA 22

El control en cascada mejora la calidad en función de las velocidades relativas y retrasos de tiempo. La variable primaria o lenta es el maestro y la variable secundaria es el esclavo quien responde rápidamente a disturbios por lo que éstos no alcanzan a entrar al proceso no alterando así al maestro.

En las figs. 22 y 23 la variable controlada (lenta) es la temperatura y la manipulada es la presión o flujo de vapor la cual al sentir los disturbios responde rápidamente y se tomará acción correctiva por el controlador secundario tal que no se afectará la variable primaria (temperatura).

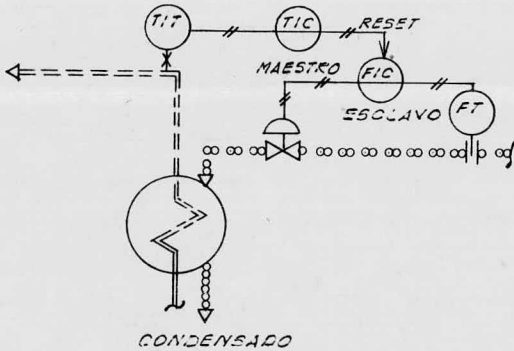


FIGURA 23



CONTROL POR RETROALIMENTACION  
POSITIVA

Este control involucra la detección de la variable controlada - y la contra-acción de cambios en su valor relativo al punto fijo por el ajuste de una variable manipulada. El término retroalimentación puede implicar una corrección atrasada en términos de tiempo pero al decir positiva se indica que el control responde a un disturbio compensando instantáneamente al error sin que se pueda afectar la variable controlada.

En la fig. 24 se ilustra este modo de control aplicado a un calentador con vapor. Se miden todas las variables que pueden afectar la relación de balance de calor y la variable manipulada (flujo de vapor) se ajusta cuando hay alteraciones.

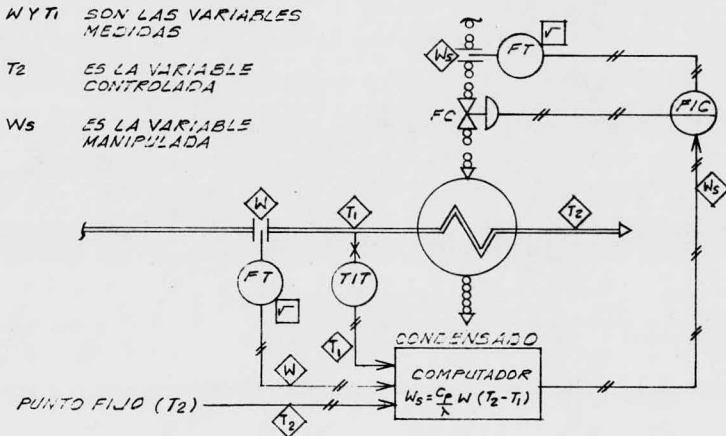


FIGURA 24

En este control el disturbio en el suministro se corrige antes de que la variable controlada sienta su efecto; contribuye a respuesta estable. El hecho de que este control no pueda estandarizarse a pesar de sus grandes ventajas se debe a que:

1. El costo elevado no siempre se justifica.
2. Las implicaciones de un control de alta precisión deben ser aceptadas consistentemente, es decir, para mantener  $T_2$  dentro de  $\pm \frac{1}{2} \%$  de escala total, el error acumulado en mediciones de flujo, sensibilidad de temperatura, transmisión, conversión y computación no deben exceder esta cantidad.

## CAPITULO VI

### CONTROL EN HORNOS

Los hornos y calentadores transfieren la energía calorífica de la alimentación de una manera controlada, su configuración es la de una estructura metálica recubierta de refractario para conservar el calor, sus funciones se pueden clasificar como:

- a) Para calentar y/o vaporizar la carga.
- b) Para proporcionar calor de reacción a los reactivos alimentados.
- c) Para proporcionar una temperatura elevada y controlada por el cambio físico de la carga de material.

Las funciones básicas de un sistema de control son:

1. Mantener la rapidez deseada de transferencia de energía a la carga ya que su temperatura es el índice que se usa en la medición del calor transferido. Cuando hay vaporización es importante el contenido de calor total final de la carga pero es más difícil de medir.
2. La combustión eficiente y controlada del combustible en la que se involucran factores como la regulación del aire de combustión, la preferencia de quemar un combustible sobre otros y el vapor de atomización cuando se está quemando combustóleo.
3. Condiciones de seguridad en todas las fases del horno ya que siempre existe posibilidad de que se forme una mezcla peligrosa, para este fin se han desarrollado varios códigos y prácticas.

Al usar válvulas de control operadas con aire se corre el riesgo de una falla en el aire de instrumentos por lo que tendrán sus posiciones de falla que son FC cuando la válvula se cierra totalmente y FO cuando se abre actuando en cualquier emergencia.

Para asegurar combustión completa se usa la relación de --- exceso de aire de combustión a combustión ideal reportada en porciento. - Cada combustible tiene un límite mínimo práctico de porciento de exceso de aire y la función del sistema de control es mantenerlo arriba del mínimo, esto se satisface con un buen tiro del horno, o sea, una presión baja útil en la chimenea para asegurar que en la cámara de combustión entra suficiente aire.

Para instalar un sistema de control se debe considerar el proceso, las variables más importantes para medirlas y controlarlas. Los sistemas de control se han desarrollado empíricamente por lo que muchos problemas se resuelven en campo.

### CALENTADORES DE ARRANQUE

Estas unidades se usan en el arranque de un proceso y son -- muy simples, su span de uso va desde unas cuantas horas a unas cuantas semanas. Normalmente son equipos cilíndricos verticales con los tubos de proceso a lo largo de las paredes interiores y con un quemador centrado en el piso, el tiro es por convección natural inducida por una chimenea montada en el techo del calentador. El proceso consiste en calentar una corriente intermedia tal como aire o gas natural la cual calienta a -- otro fluido sólido tal como un catalizador. Las variables importantes -- son la temperatura y el flujo del gas de síntesis.

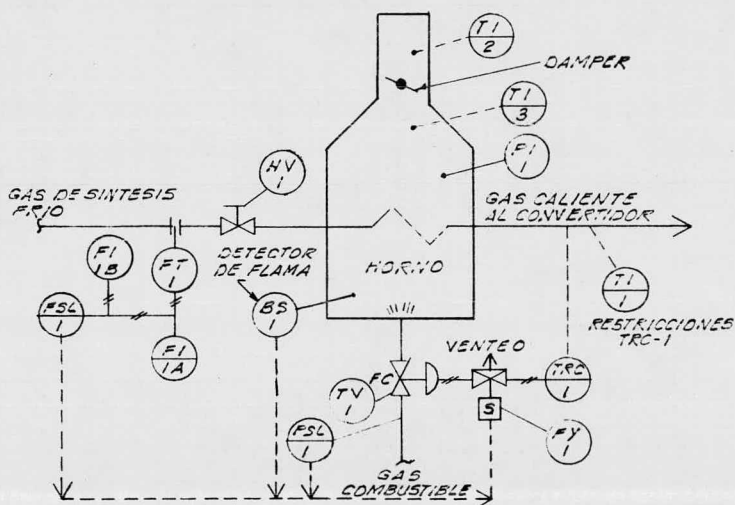


FIGURA 1

En la figura 1 se muestran los controles necesarios para la --  
operación de la unidad.

El FT-1 mide el gas de síntesis frío a la entrada del proceso --  
enviando la señal neumática al FI - 1A que está en el tablero. El gas de --  
síntesis pasa entonces a través de la HV - 1 y en el FI - 1B local se ajusta  
manualmente el flujo. El TRC - 1 mantiene la temperatura de salida del  
gas de síntesis haciéndose la medición por medio de un termopar. El con  
trol del aceite combustible quemado se efectúa con la TV - 1.

El TRC - 1 sirve también para controlar el fuego estableciendo  
la ignición del gas combustible. El tiro del horno o la presión negativa de

la celda de radiación se produce por medio de la chimenea y se establece en el PI - 1 que normalmente es un manómetro inclinado y ajustando manualmente la posición del damper.

Los mayores riesgos en estos hornos son:

1. La pérdida de flujo de gas de proceso puede ocasionar la ruptura de los tubos, pero esto se detecta por el FSL-1 enviando señal eléctrica a la FY-1 la cual ventea el diafragma de la TV-1, ésta corta el suministro de combustible y se apaga el fuego.
2. La falta de flama y generación de mezclas peligrosas en la celda de radiación, para esto se usa el BS-1 el cual se activa con pérdida de flama y el PSL-1 se activa con pérdida de presión del gas combustible.

### REHERVIDORES A FUEGO DIRECTO

Estos proporcionan el calor de entrada a la torre de destilación calentando los fondos y vaporizando una parte de éstos. Pueden ser del tipo vertical cilíndrico u horizontal grande. Mientras se calientan y vaporizan los fondos de la torre, el líquido circula por convección natural a través de los tubos del calentador los que deben diseñarse con holgura para asegurar que los fondos circulen adecuadamente. La temperatura del fluido que regresa al rehervidor es el medio de controlar la entrada de calor a la torre, se debe tener cuidado de un sobrecalentamiento porque los fondos se polimerizarían o coquizarían. En la fig. 2 se ilustra el fondo de una torre conectada con un rehervidor. No es práctico medir el flujo de los fondos de la torre hacia el calentador porque el líquido está cerca del equilibrio o punto de flasheo y por su naturaleza de ensuciamiento tiende a tapar muchos elementos de flujo. La variable importante es la temperatura de retorno al rehervidor la que se controla por el TRC-1 estrangulando el gas combustible con la TV-1. La TAH-1 previene al operador cuando se eleva súbitamente la temperatura del fluido indicando que se necesita hacer ajustes manuales para cortar el fuego.

Los controles del fuego son simples y similares a los de los calentadores de arranque. El TRC-1 acciona la TV-1 de combustible que puede ser gas o aceite para satisfacer los requerimientos del proceso.

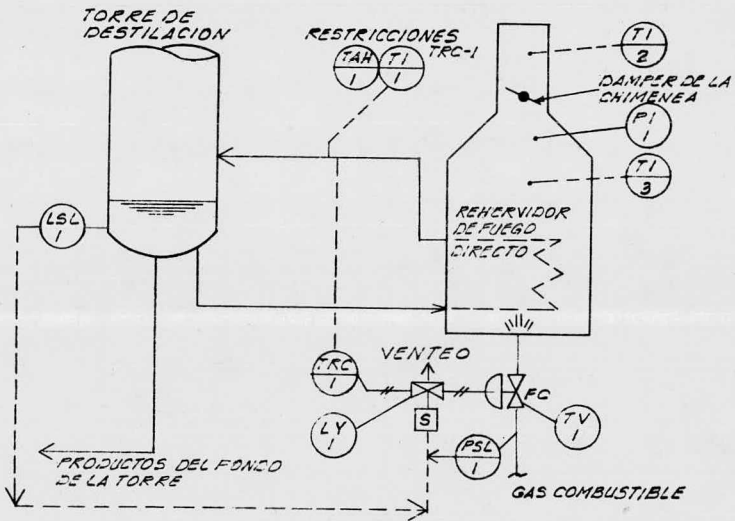


FIGURA 2

El tiro se establece por el damper de la chimenea observando el PI-1. Los TI-2 y TI-3 detectan la temperatura como una restricción de temperaturas excesivas que pueden desarrollarse.

Los peligros de este horno son:

1. La interrupción del flujo de proceso que puede suceder si se pierde ni vel en los fondos y provoca sobrecalentamiento de los tubos, para esto el LSL-1 se conecta a la LY-1 la cual ventea el diafragma de la -- TV-1 y la válvula de combustión cierra.
2. Cualquier pérdida momentánea de combustible hace que las flamas se extingan y se desarrolla una mezcla de aire combustible peligrosa en la celda de radiación, para esto se usa el PSL-1 conectado a la LY-1 y a una presión baja de combustible la TV-1 cierra. La LY-1 debe ser de ajuste manual y permanece venteadada por lo que la TV-1 estará cerrada hasta que regrese la presión del gas combustible.

### CALENTADORES Y VAPORIZADORES

Estas unidades se usan en las refinerías de aceite crudo el cual debe calentarse y vaporizarse antes de la destilación. Estos hornos consisten de una celda de radiación con serpentines de precalentamiento y de vapori zación. En la zona de convección se realiza el calentamiento mediante el flujo de gases calientes que van hacia la chimenea. La vaporización se efectúa al final de cada paso en la zona de radiación en donde los ser-- pentines están expuestos a la flama y a la radiación de las paredes del hor-- no. En la torre de crudo entra el efluente parcialmente vaporizado, ahí se flashea y se destila en los cortes deseados.

Los sistemas de control descritos antes aplican también a éstos hornos. Las variables principales son: el control de flujo de alimentación a la unidad, la división adecuada del flujo en trayectorias paralelas a tra vés del horno y la cantidad correcta de calor administrado a la torre de -- crudo. En la fig. 3 se muestran los controles típicos de este horno.





La velocidad de alimentación de crudo a la unidad la establece el FRC-2, el flujo se divide en trayectorias paralelas por ajuste manual remoto de las HV-1 a HV-4 por medio de las HIC-1 a HIC-4 estableciéndose el flujo adecuado igualando las indicaciones de FI-1 a FI-4. Los TI-1 a TI-12 sirven para ver si la temperatura sufre cambios en alguna de las fases. La entrada de calor deseada en la corriente de alimentación es difícil de controlar porque el efluente del horno está vaporizado parcialmente y la alimentación almacenada varía en composición dependiendo de su origen. Cuando hay calentamiento sin vaporización sólo se necesita que el control mantenga la temperatura del efluente; si la vaporización es completa y hay sobrecalentamiento se requiere un buen control de temperatura; para vaporización parcial con alimentación de composición variable no basta con controlar la temperatura del efluente ya que al variar la composición, la curva del punto de ebullición no es constante con el tiempo y el control de temperatura varía por sí mismo. La información adicional se obtiene de la destilación observando la distribución del producto determinándose el cambio en la entrada de calor, esto es lento e impreciso, para hacer un trabajo más exacto se necesitan analizadores especiales para medir la composición en la alimentación y una computadora para optimizar el modelo matemático y determinar así el calor de entrada. Lo común es llevar un control aproximado por un TRC-1 cuyo punto fijo cambia periódicamente el operador de la unidad basado en su experiencia y en los resultados de la fraccionación para establecer la temperatura adecuada.

En la fig. 4 se muestra este horno cuando usa gas como combustible, en este caso se controla manteniendo la presión del cabezal del quemador por medio de un PIC-1 local. Los cabezales sirven para muchos quemadores espaciados a distancias iguales a lo largo del piso de la celda de radiación. Para cambiar la entrada de calor al horno debe alterarse la presión del cabezal por medio del TRC-1 ajustando el punto fijo del efluente sobre el PIC-1 para mantener constante la temperatura del efluente. El controlar en cascada con el TRC-1 y el PIC-1 es bueno ya que es-

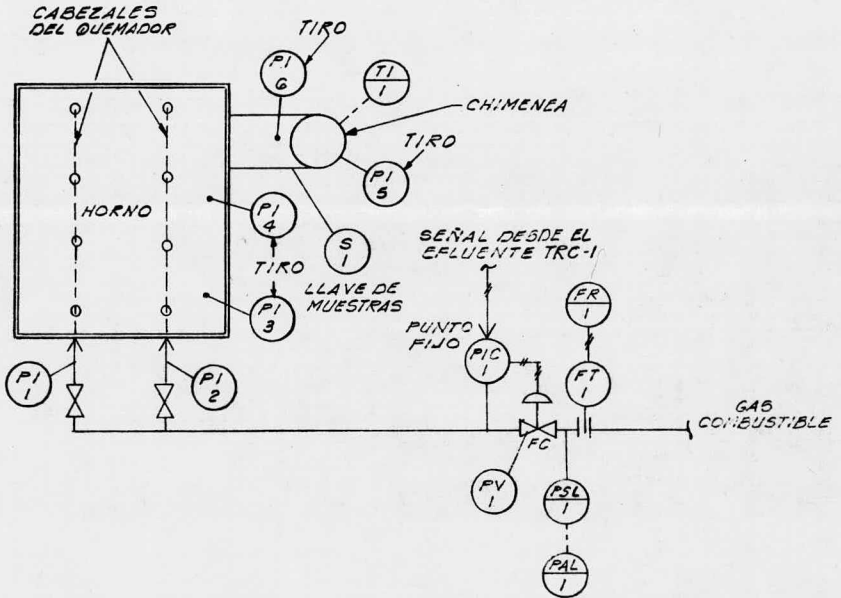


FIGURA 4

te último compensa disturbios locales rápidos evitando que suba la temperatura del efluente mientras el TRC-1 proporciona la corrección necesaria. Con el FR-1 se checa la eficiencia del horno y se determina la entrada de calor. Cuando se usa aceite combustible, el sistema se ilustra en la fig. 5.

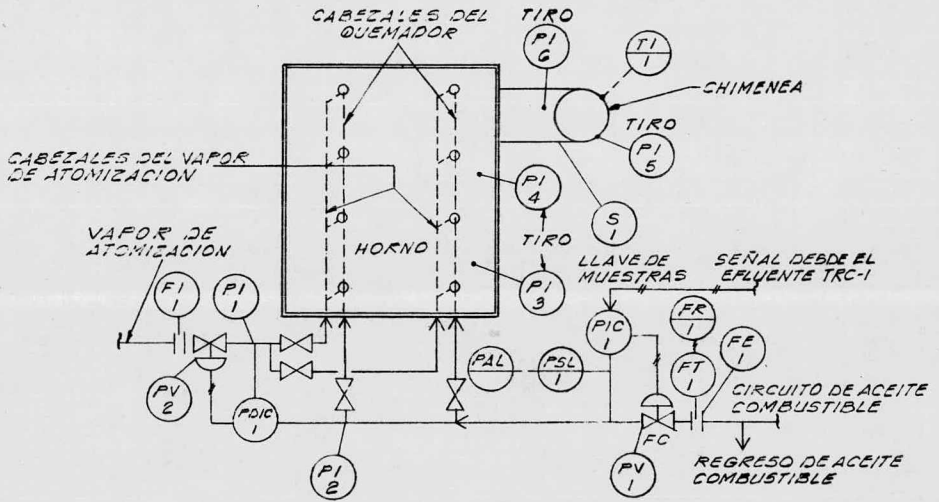


FIGURA 5

El PIC-1 conectado en cascada con el control de temperatura del efluente opera como se describió antes para el uso de gas combustible, la diferencia con el quemado de aceite es que se introduce vapor de atomización con el objeto de dispersar el aceite y tener un quemado eficiente. La presión del cabezal de atomización debe mantenerse arriba de la del cabezal del aceite combustible lo cual se hace con el PDIC-1 para asegurar que siempre habrá atomización.

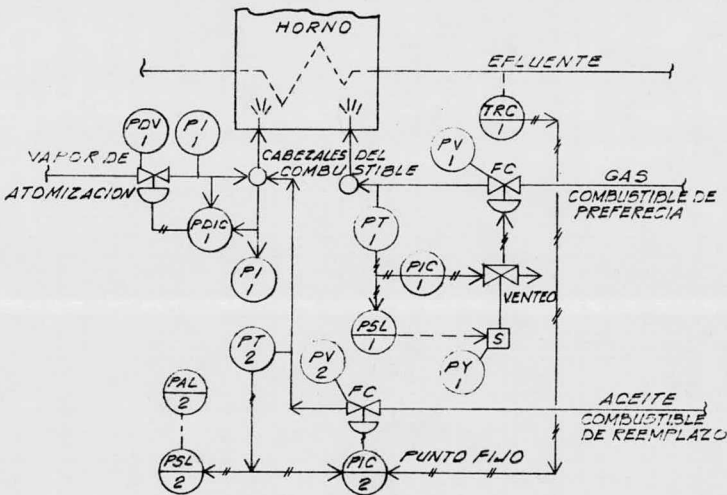


FIGURA 6

El PDIC-1 es necesario ya que la presión del cabezal del aceite combustible varía por el TRC-1. Para establecer inicialmente el PDIC-1 se requiere el PI-1 y el PI-2, y para checar su exactitud durante la operación.

Cuando se mezcla aceite y gas combustible quemando preferentemente gas, el arreglo más común se muestra en la fig. 6.

Mientras hay gas el PIC-1 mantiene constante la presión del -- cabezal del quemador y la presión del gas combustible se reduce, el punto fijo del PIC-1 se ajusta para cambiar la velocidad del gas. Si la presión del cabezal del gas cae abajo del límite mínimo funciona el PSL-1 accionando la PY-1 cerrando la PV-1 con lo que la carga se toma ahora del sistema del aceite combustible. El TRC-1 varía el punto fijo del -- PIC-2 para satisfacer los requerimientos con el aceite combustible. El turndown es una limitación de los quemadores y se conoce como la relación de la capacidad máxima a mínima de quemado siendo común la relación de 3:1. Si la presión del cabezal es baja indica que se acerca la condición de baja ignición y la PAL-2 se usa para prevenir al operador quien puede optar por cambiar el aceite combustible de los quemadores o reducir la velocidad de ignición del gas bajando el punto fijo del PIC-1.

El tiro del horno se mantiene por convección libre o sea, que la chimenea produce una presión negativa en la celda de radiación, esto se establece manualmente en los PI-3 a PI-6 montados en la pared exterior del horno. La S-1 se usa para muestrear el gas que fluye determinando su contenido de oxígeno y de combustibles, chequeando así la eficiencia y previniendo el desarrollo de mezclas peligrosas.

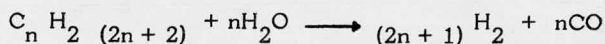
Los principales riesgos son:

1. La interrupción del flujo de la carga lo cual provocaría sobrecalentamiento y ruptura de los tubos con lo que la carga del hidrocarburo es caparí hacia la celda de radiación, esto se previene con la FAL-2 (fig. 3), las HV-1 a HV-4 se abrirían a una falla del aire de instrumentos manteniendo el flujo a través de los serpentines del horno.
2. La interrupción del flujo de combustible que puede provocar que la fla ma salga fuera del quemador y se forme mezcla explosiva dentro de la celda de radiación. Y la pérdida de flama que se puede detectar con sensores y automatizar el paro de combustible, esto no se usa en hornos de proceso por el alto costo y porque la operación es relativa-

mente estable. Generalmente la PAL-1 (fig. 4) previene al operador de la pérdida de combustible dejándole la decisión de parar o no. A una falla del aire de instrumentos se cierra la PV-1 parando la ignición en el horno.

### HORNOS DE REFORMADO

El propósito con estos hornos es producir hidrógeno por reformado del hidrocarburo alimentado (metano o nafta) usando vapor a alta presión, de acuerdo con la reacción:



La reacción tiene lugar en los tubos los cuales contienen un catalizador de níquel, éste debe cuidarse para que no se llene de coque ya que -- reemplazarlo resulta incosteable, esto se logra alimentando exceso de vapor en una relación de 3.5:1 en peso. Las variables principales son el -- flujo de gas alimentado, el flujo de vapor de reformado, la temperatura y la composición del efluente. El control de estos hornos se muestra en la figura 7.

El FRC-1 mantiene el flujo de alimentación de gas cuya presión se -- compensa con el PT-1 y la FY-1, esto corrige la medición para fluctuaciones en la presión del gas alimentado. El FRC-2 mantiene la velocidad -- del vapor y la FY-2 monitorea continuamente la relación de vapor a flujo de gas alimentado. Desde el FT-1 se envía una señal de flujo de gas y -- desde el FT-2 se manda una señal de flujo de vapor y sus salidas se escalan en la relación de vapor a carbón en FY-2.

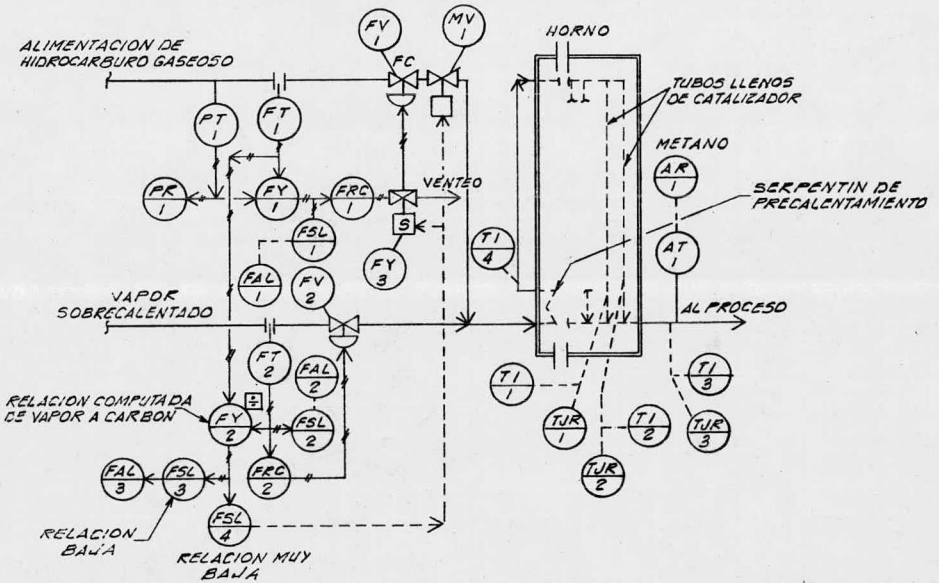


FIGURA 7



Si la relación cae abajo de 3:1 suena la FAL-3. Si la relación baja a 2.7:1 se detiene la alimentación del gas vía FSL-4 accionando la -- FY-3 y se ventea el aire del diafragma de la FV-1 la cual cierra rápidamente y se detiene el flujo de gas a una falla del vapor de reformado protegiendo así al catalizador. La MV-1 opera electricamente y es de cierre hermético, sirve para prevenir escapes, su operación es lenta. Este control de relación se ilustra en la fig. 8

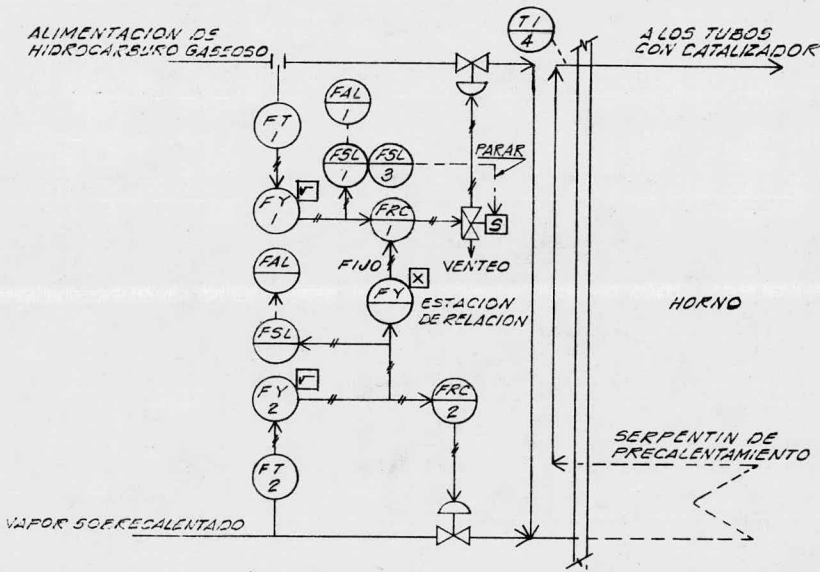


FIGURA 8

El FT-1 mide el flujo de gas alimentado y el FT-2 el vapor --  
manteniéndose constante la relación de vapor a gas.

El AT-1 del efluente (fig. 7) determina la extensión de la reac-  
ción midiendo el contenido de  $CH_4$ . El perfil de temperatura óptimo se  
logra manipulando las temperaturas del horno para llegar al grado de con-  
versión deseado. El analizador puede ser infrarrojo o cromatográfico.

El control de la ignición en este horno es manual debido a que  
su diseño es complicado y presenta gran inercia al calor. Se muestran  
estos controles en la fig. 9.

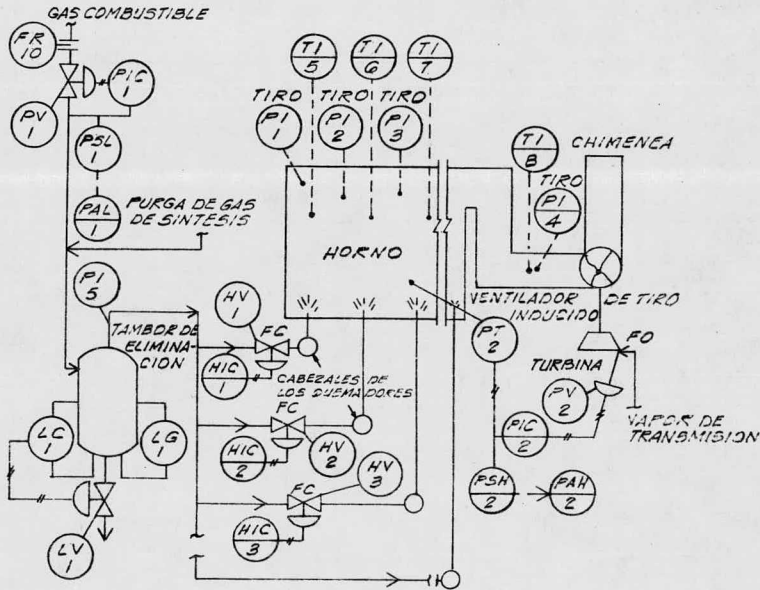


FIGURA 9

El horno tiene aproximadamente 12 cabezales de combustible con 20 quemadores individuales por cabezal. Los TI-1 y TI-2 (fig.7) a la salida de los tubos de reacción son monitoreados constantemente y se hace un ajuste periódico manipulando las HV-1, HV-2 y HV-3, como la presión está controlada se fija al pasar por la válvula y el flujo de combustible permanece constante.

Se usa gas natural como combustible controlado por el PIC-1 antes de entrar al tambor de eliminación el cual remueve el agua que lleva el gas. El LC-1 es un controlador on-off de acción rápida y expulsa el agua acumulada por medio de la LV-1. El FR-10 mide el consumo de combustible y así se puede checar la eficiencia y los balances de energía. El ventilador de tiro inducido mantiene el tiro del horno. La presión del horno la mide el PIC-2 vía PT-2 y controla la velocidad del ventilador. El operador ajusta la turbina para mantener la presión deseada. Los PI-1 a PI-4 manuales sirven para mantener la entrada de aire en el horno y para balancear el tiro en varios puntos.

Los aspectos de seguridad básicos son:

1. La pérdida de tiro en el horno que puede ser producto del mal funcionamiento del ventilador o de la pérdida de vapor conducido por la turbina al ventilador, esto causa relaciones peligrosas de aire-combustible y la presión en la celda de radiación sube sobre la atmosférica forzando a que las flamas salgan del armazón del horno. La PAH-2 de la fig. 9 señala al operador cuando esto sucede y el operador reduce el fuego por medio de las HIC-1, HIC-2 y HIC-3.
2. La interrupción del suministro de combustible puede ocasionar que la flama salga del quemador y se forme una mezcla peligrosa aire-combustible. El PAL-1 indica cuando la presión del combustible está abajo del mínimo lo que implica un flameado y el fuego debe apagarse usando las HIC-1, HIC-2 y HIC-3 manuales. Si falla el aire de instrumentos, se cierra la FV-1 para prevenir el coquizado en el catalizador, las PV-1, HV-1, HV-2 y HV-3 cierran para parar la ignición.

La FV-2 abre para mantener el flujo de vapor enfriado en los serpentes del horno.

### HORNOS DE CRACKING (PIROLISIS)

Esta unidad se usa en la pirólisis del etileno, la alimentación puede variar desde combustóleo hasta etano que se precalienta y vaporiza en el serpentín, se mezcla con vapor y se rompe. La relación de vapor/hidrocarburo se fija para reducir la presión parcial de éste último con lo que se maximiza la producción de olefinas y se minimiza la formación de coque en los serpentines. La distribución de los productos del horno depende del grado de ignición, del perfil de temperaturas y del tiempo de residencia en los serpentines. Las variables importantes son: -- flujo de hidrocarburo alimentado, flujo de vapor, temperatura del serpentín y temperatura de la celda de radiación. En la fig. 10 se muestra la instrumentación típica de estos hornos.

Los FRC-1 a FRC-3 fijan la carga a la unidad en cada paso y - el FR-4 ajusta el flujo total el cual debe ser constante a través de los serpentines ya que el coquizado causa caída de presión gradual en los serpentines con lo que hay sobrecalentamiento porque se reduce el flujo y el serpentín se rompe pero las válvulas de control de flujo individual introducen una caída de presión variable con lo que los serpentines se coquizan igual. La cantidad de vapor adecuada la mantienen los FIC-5 a FIC-7 para igualar el flujo de hidrocarburo alimentado. El TRC-1 establece la entrada de calor al proceso controlando así la temperatura del efluente. Los TI-1 a -- TI-11 son monitoreados por el operador del proceso para mantener el perfil de temperatura y por ende la distribución del producto en el efluente.- Ajustando manualmente los quemadores de la celda de radiación se perfeccionan las relaciones de temperatura. La calidad del producto se determina con el AT-1 a la salida del sistema de extinción. Normalmente es un cromatógrafo. El análisis presenta la dificultad de alto contenido de agua en la muestra la cual debe condensarse y removerse antes de entrar al analizador, lo mismo sucede con el coque y la brea.

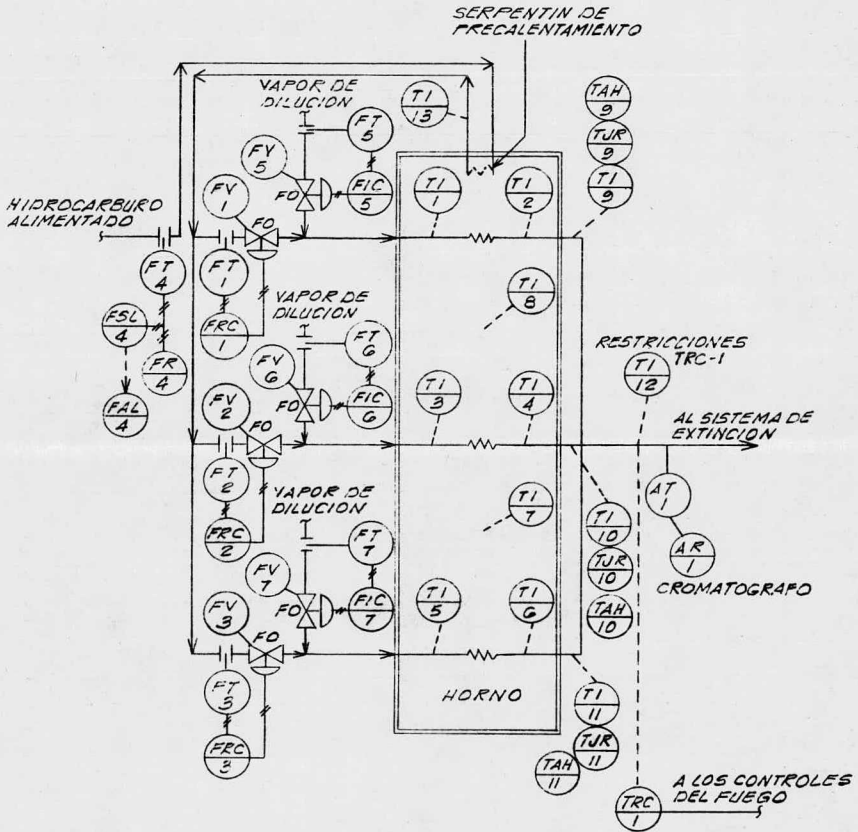


FIGURA 10

Si se usa gas como combustible, el arreglo de la fig. 11 puede considerarse .

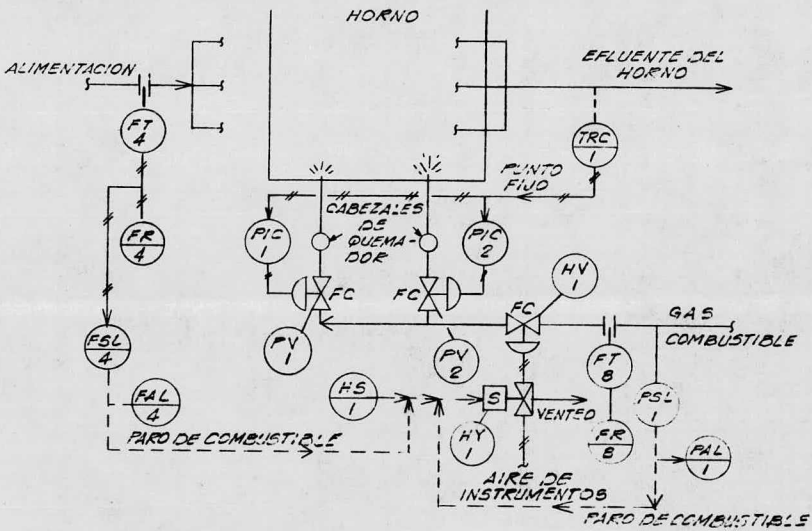


FIGURA 11

El TRC-1 mantiene la temperatura del efluente ajustando los puntos fijos de los PIC-1 y PIC-2 locales, éstos a su vez mantienen la presión del cabezal del quemador para satisfacer la liberación de calor requerida para resistir el grado de cracking obtenido. Los detalles de los controles son los mismos descritos para calentadores y vaporizadores y en caso de que se use aceite combustible o combustible múltiple se usa igual.

Los riegos principales son:

1. La interrupción del flujo de combustible es peligrosa ya que hay sobrecalentamiento de los tubos y tendencia a romperse. La FAL-4 (fig. 11) previene al operador de esto, quien al verificar el riesgo operará la HY-1 accionando el HS-1 así se ventea el diafragma de la válvula de emergencia y se detiene el suministro de gas combustible. Si se automatiza este proceso, al bajar más el flujo de alimentación el FSL-4 acciona al HY-1 y este detiene el flujo de combustible.
2. La interrupción del flujo de combustible causará un flameado en el quemador y se forma una mezcla peligrosa de aire-combustible para prevenir esto se instala el PSL-1 (fig. 11) que acciona la HV-1 de emergencia por medio de la HY-1 la cual es de ajuste manual.
3. Cuando se restringe el flujo a través de cada serpentín hay sobrecalentamiento y coquizado, las TAH-9 a TAH-11 (fig. 10) previene al operador de esto quien puede aumentar el flujo para que llegue al tubo caliente y esperar que la temperatura empiece a bajar, si esto no sucede puede apagar la ignición con la HS-1 (fig. 11).
4. La falla del aire de instrumentos causa que se abran las válvulas de alimentación y de vapor (fig. 10) para contener el flujo a través de los serpentines, prevenir sobrecalentamiento y ruptura de los tubos de los mismos. En la fig. 11 las válvulas de control de combustible cierran y se extingue el fuego, esta es la condición de seguridad en caso de emergencia.

## ANALIZADORES

En el control de hornos son importantes los medidores analíticos, tales como:

1. El analizador de oxígeno que se usa en los hornos que conserven grandes cantidades de combustible, su función principal es la de medir el contenido de oxígeno de los gases de combustión para checar el rendimiento del exceso de aire alimentado ya que manteniendo el exceso de aire abajo del número deseado hay conservación de calor. También se puede usar como una alarma de bajo oxígeno para prevenir al operador e impedir que se forme una atmósfera peligrosa en el horno.
2. Los analizadores de combustible miden el combustible no quemado en los gases de combustión, son elementos de seguridad ya que normalmente se conectan a una alarma para prevenir al operador de cualquier situación peligrosa.
3. Los analizadores calorimétricos son menos usados y miden el valor calorífico del combustible que se alimenta al horno cuando las corrientes de gas de valores caloríficos variables se mezclan habrá variaciones en el valor calorífico total, y para que la operación del horno sea estable este valor debe mantenerse constante. La forma de lograr esto es teniendo un combustible suplementario de valor calorífico alto y constante como corriente de control. Estos analizadores también se usan como elementos de seguridad dando alarma cuando el valor calorífico del combustible baja en la fig. 12 se muestra la automatización de esto.



El FRC-1 controla el combustible suplementario que es propano líquido reajustando el ARC-1, El LC-1 del vaporizador añade la cantidad requerida de vapor al propano. En el tambor de eliminación se queda el propano que no se ha vaporizado antes de llegar a los quemadores ya que estos están diseñados para quemar solamente gas. Si el analizador detecta un bajo valor calorífico, el suministro de combustible se para por medio de la ASL-1 accionando la AV-1.

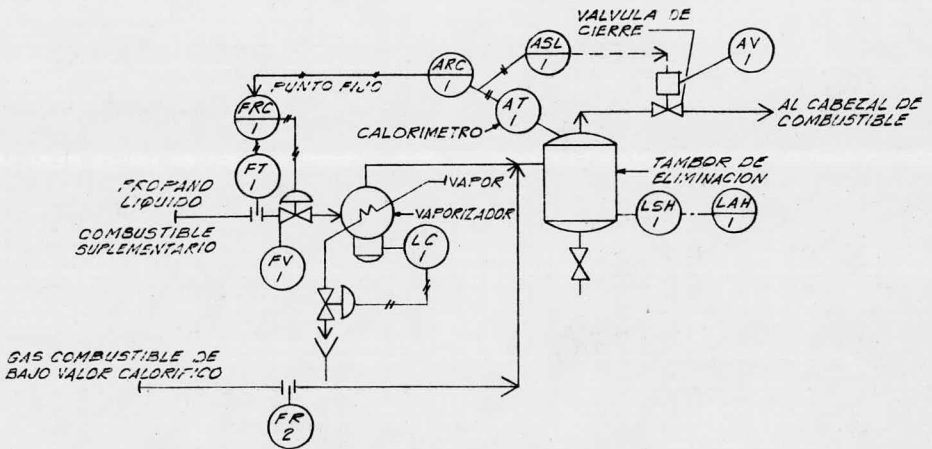


FIGURA 12

CONTROLES SUPERIORES

Los controles superiores de hornos incluyen el control por retroalimentación positiva, el control con computadoras analógicas y digitales - que pueden usarse solos o formando un conjunto para obtener los datos de - entrada. Aquí discutiremos únicamente el primero, en el cual las relaciones entre variables se usan para apistar los disturbios antes de que entren al proceso, esto es contrario al control por retroalimentación en el que primero se detecta un error en la variable de proceso antes de iniciar la acción correctiva. En la fig. 13 se da un ejemplo de este control.

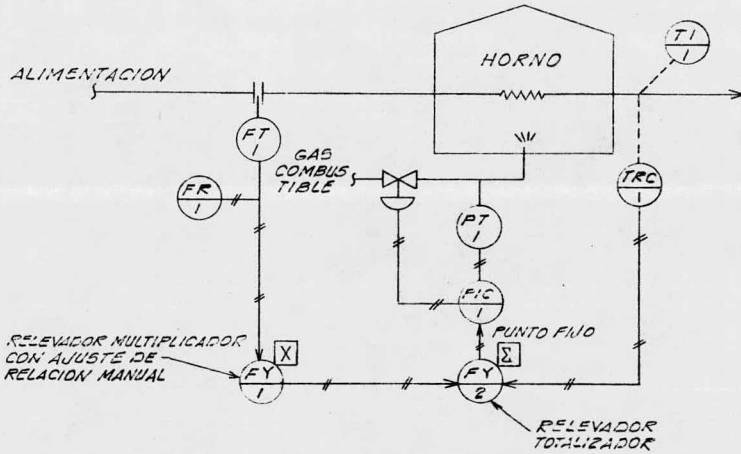


FIGURA 13

El control normal es por retroalimentación con el TRC-1 se proporciona el punto fijo del PIC-1 del combustible. El FT-1 detecta los cambios en el flujo de alimentación y manda una señal alterada al FY-1 el cual establece la relación entre un cambio en el flujo de alimentación y el cambio requerido en la presión del cabezal. La señal modificada entra al FY-2 el cual añade la señal a la salida del TRC-1 y se establece una nueva presión del cabezal de gas combustible vía PIC-1. De hecho, la información adelantada se retroalimenta positivamente al PIC-1 indicando que tiene lugar un cambio en la carga del proceso y que las condiciones de ignición deben cambiar. Sin el ramal en la retroalimentación positiva del circuito FY-1 y FY-2, el cambio requerido en las condiciones de ignición tendrá lugar mucho después de que el TRC-1 detectó un cambio en la variable controlada o sea la temperatura del afluente del horno. Si existiera una relación constante entre el flujo de alimentación y la presión del cabezal, el TRC-1 no sería necesario pero en la práctica, en cambios en las condiciones ambientales y de proceso, esta relación cambia con el tiempo. El TRC-1 actúa entonces como un controlador compensador, manteniendo la variable controlada en el valor deseado.

### NOMENCLATURA

En esta sección de hornos se utilizó para descripción de los sistemas de control la siguiente nomenclatura:

AR	Analizador puede ser cromatográfico o infrarrojo
ARC	Controlador de reajuste y analizador de BTU
ASL	Interruptor de baja alarma
AT	Analizador del efluente
AV	Válvula de cierre
BS	Interruptor detector de flama
FAL	Alarma de bajo flujo
FE	Elemento de flujo
FI	Indicador de flujo

FIC	Controlador e indicador de flujo
FR	Registrador de flujo
FRC	Controlador y registrador de flujo
FSL	Interruptor de bajo flujo
FT	Transmisor de flujo
FV	Válvula de control de flujo
FY	Válvula solenoide de flujo
HIC	Estaciones manuales
HS	Botón de mando
HV	Válvula manual
HY	Válvula solenoide de venteo
LAH	Alarma de alto nivel
LC	Controlador de nivel
LG	Vidrio de nivel
LSH	Interruptor de alto nivel
LSL	Interruptor de bajo nivel
LV	Válvula de control de nivel
LY	Válvula solenoide de nivel
MV	Válvula de interrupción
PAH	Alarma de alta presión
PAL	Alarma de baja presión
PDIC	Controlador e indicador de presión diferencial
PI	Indicador de presión
PIC	Controlador e indicador de presión
PDV	Válvula de control de presión diferencial
PR	Registrador de presión
PSH	Interruptor de alta presión
PSL	Interruptor de baja presión
PT	Transmisor de presión
PV	Válvula de control de presión
PY	Válvula solenoide de presión

S	Llave de muestras
TAH	Alarma de alta temperatura
TI	Indicador de temperatura
TIC	Indicador y controlador de temperatura
TRC	Controlador y registrador de temperatura
TT	Transmisor de temperatura
TV	Válvula de control de temperatura

## CAPITULO VII

### ARREGLOS DE CONTROL EN EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN DESTILACION

La destilación es la operación en la que se separan mezclas basándose en la diferencia de composición entre un líquido y el vapor formado del líquido, se usa para separar y purificar materiales volátiles, por lo que es muy importante la selección de los instrumentos adecuados, los que casi siempre están asociados con otro equipo de la torre.

La columna tiene dos propósitos:

1. Separar la alimentación en una porción de vapor que asciende y un líquido que desciende.
2. Lograr un mezclado íntimo entre las dos fases a contracorriente para que haya una transferencia efectiva entre los componentes más volátiles del vapor y los menos volátiles del líquido.

Sí la alimentación es líquida, la temperatura a la que empieza a ebulir se llama punto de burbuja, y si es vapor la temperatura a la cual empieza a condensar se llama punto de rocío. Es necesario que las dos fases existan en la columna para una separación efectiva en la alimentación. La separación de las fases se logra por la gravedad con el vapor ligero que llega a la parte superior de la columna mientras el líquido pesado se va al fondo. Para lograr un mezclado íntimo hay varios métodos, uno consiste en empacar la columna para aumentar la superficie de contacto entre el vapor y el líquido, la forma más efectiva es con el uso de los

platos horizontales con lo que se logra que el vapor sea burbujeado en el líquido.

En la fig. 1 se muestra el equipo y las variables independientes que se tienen que controlar para fijar la operación de la destilación.

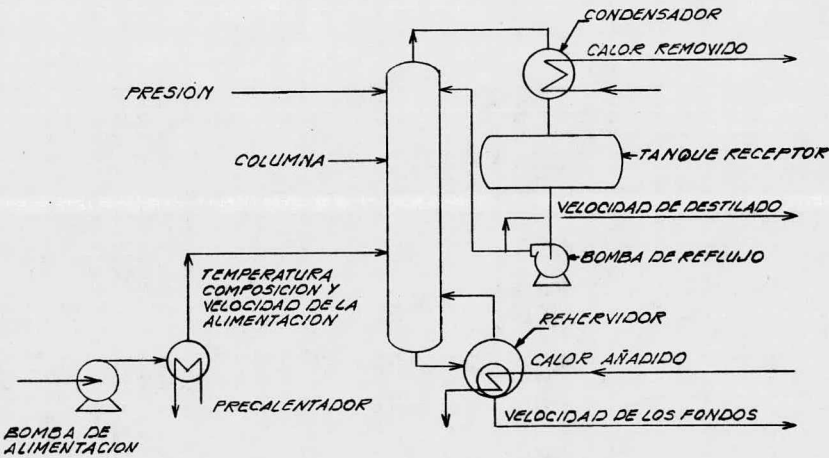


FIGURA 1

El vapor que sale por la parte superior de la columna se envía a un condensador o enfriador y se recolecta como líquido en un tanque receptor, una parte del líquido se regresa a la columna como reflujo y lo demás se separa como producto destilado.

El líquido que sale por la parte inferior de la columna se envía a un rehervidor y se inyecta a la columna, el líquido que sobra se separa como residuo.

En algunos casos, el vapor o el líquido adicionados se separan de la columna en puntos arriba o abajo de la alimentación como productos intermedios. En este sistema hay un número fijo de variables independientes, se supondrá que ya existe la columna y que es un rehervidor con un punto fijo de alimentación produciéndose sólo destilado y fondos. En el diseño de la columna se fijarán muchas variables, las condiciones térmicas de los dos productos las dictaminará la economía de la recuperación de calor. Algunas variables que pueden manipularse en el control de columnas son:

1. Presión de la columna.
2. Velocidad del flujo de alimentación.
3. Composición de la alimentación.
4. Temperatura de la alimentación.
5. Calor adicionado.
6. Velocidad de flujo de los fondos.
7. Calor removido.
8. Rapidez de flujo del producto destilado.

Sólo seis de estas variables pueden variarse independientemente -- al mismo tiempo, las otras tomarán valores dependientes de éstas. En la lista se omitieron las composiciones de los productos destilado y de los fondos, aunque estas dos variables dictaminan la operación de la columna, no se controlan directamente porque son variables dependientes.

En muchos sistemas de control se busca mantener la presión de la columna en algún valor constante para no alterar las condiciones de equilibrio del material. La presión debe ser suficientemente alta para causar



condensación del vapor por intercambio de calor con el medio de enfriamiento. Por otra parte, la presión debe ser suficientemente baja para permitir vaporización del líquido por intercambio de calor con el medio de calentamiento. La presión óptima se determina en base al costo del equipo de transferencia de calor y la construcción de la columna para resistir esa presión, normalmente se selecciona una presión baja que permita condensación del destilado a temperaturas normales del agua de enfriamiento. - La forma de mantener la columna a una presión depende de la cantidad de no condensables que entran con la alimentación por lo que los sistemas de control se discuten para:

1. Separación del líquido destilado en presencia de no condensables - que se tienen que separar o se acumularán cubriendo la superficie de condensación causando la pérdida de control de la presión. La forma de resolver esto es sangrar una cantidad fija de gases y vapores hacia una unidad como una torre de absorción. Un condensador con venteo se recomienda siempre que haya una purga constante. Este sistema se ilustra en la fig. 2.

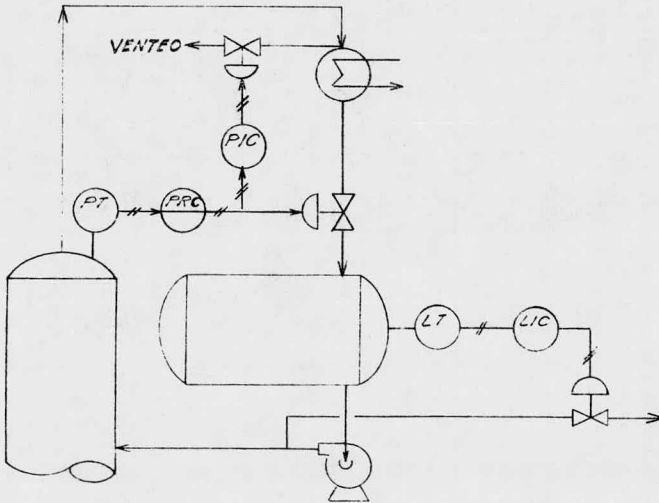


FIGURA 2

Mientras en el condensador existan no condensables, el controlador de presión tenderá a abrir la válvula de control para mantener la velocidad de condensación.

2. Separación del vapor destilado en presencia de no condensables. Para modular este flujo puede usarse un controlador de presión como se muestra en la fig. 3. El sistema de presión responderá rápidamente a cambios en este flujo.

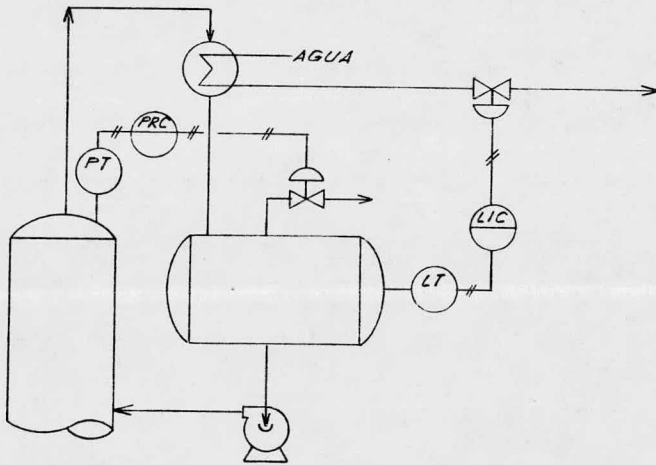


FIGURA 3

Se instala un controlador de nivel en el tanque receptor para controlar el agua de enfriamiento del condensador en donde se producirá suficiente condensado para enviar reflujo a la columna. Este sistema de control depende del diseño adecuado del condensador el cual requerirá un tiempo de residencia corto del agua para minimizar el retraso de tiempo del control de nivel. Si el condensador no está bien diseñado para el control de

agua de enfriamiento se recomienda que el flujo de agua se mantenga cons tante y que el controlador de nivel controle una corriente de condensado a través de un pequeño vaporizador y mezclarlo con el vapor desde la válv la de control de presión. Si el agua de enfriamiento presenta tendencia - al ensuciamiento sería posible usar el sistema de la fig. 4 donde el control de nivel se usa para controlar un bypass del vapor alrededor del condensa dor.

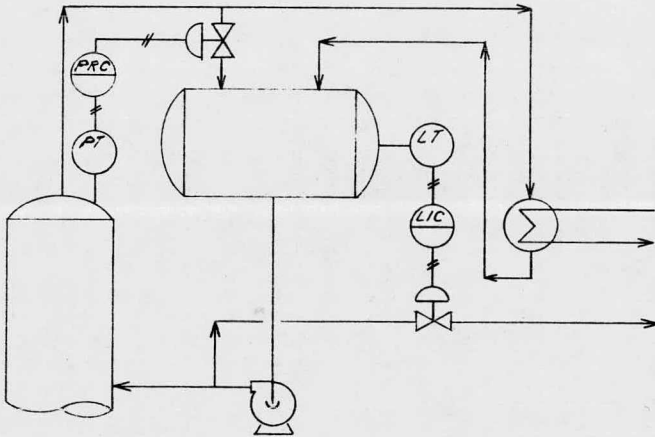


FIGURA 4

3. Separación del líquido condensado despreciando los no condensables. Esto es muy común y se controla ajustando la velocidad de condensa ción en el condensador, esto depende de la construcción mecánica - de este último.

Un método de controlar es colocar la válvula de control en la línea de agua de enfriamiento del condensador como se ilustra en la figura 5.

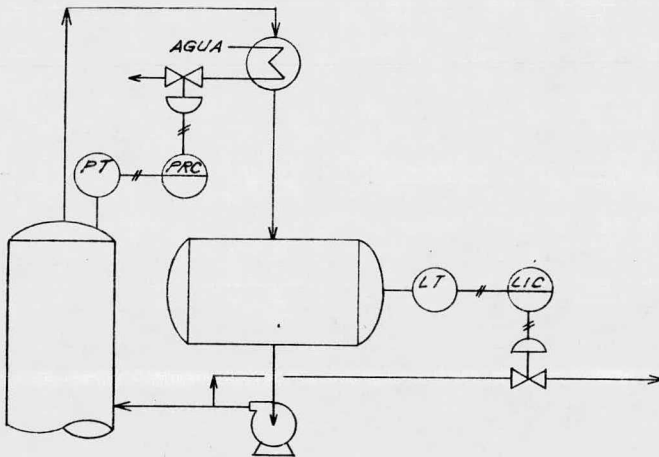


FIGURA 5

Esto se recomienda sólo si el agua contiene agentes químicos para prevenir el ensuciamiento de los tubos, si se eleva la temperatura, los costos de mantenimiento son bajos y da buen servicio.

El mejor condensador para este tipo de servicio es el de tipo encaquetado en donde el agua de enfriamiento fluye por los tubos a una velocidad mayor de  $4\frac{1}{2}$  ft./seg. y con un tiempo de residencia mejor de 45 seg. el cual es un buen control ya que disminuye el tiempo muerto o retrasos en el sistema. Si el condensador está bien diseñado, es suficiente con un controlador proporcional para el control de presión porque el rango de estrangulamiento es estrecho. Sin embargo, si el tiempo de residencia del agua aumenta, el retraso de tiempo del sistema es mayor, se necesi-----

tará un rango de estrangulamiento muy amplio y por lo tanto reset automático para compensar los cambios de carga. Este sistema sería imposible de usar en un condensador de caja con el sistema de tubos sumergidos porque habría un gran retraso de tiempo por el gran volumen de agua en la caja por lo que se necesitará un sistema de control que permita que la velocidad del agua permanezca constante y controle la velocidad de condensación controlando la superficie expuesta a los vapores. Esto se logra colocando una válvula de control en la línea de condensados, cuando la presión cae la válvula corta el flujo de condensado inundando la superficie de los tubos y reduciendo así la superficie expuesta a los vapores. La velocidad de condensación se reduce y la presión tiende a elevarse, lo cual sugiere la instalación de una válvula de control para purgar los inertes.

Frecuentemente se coloca el condensador abajo del tanque receptor para que aquél quede disponible al servicio. La válvula de control se coloca en un bypass entre la línea de vapor y el tanque (fig.4) cuando se abre se iguala la presión y la superficie de condensación se inunda con condensados causando que se forme una presión porque disminuye la velocidad de condensación. En la fig. 6 se ilustra una modificación de este sistema en donde se controla la presión estrangulando el flujo de vapor en el bypass.

En algunas mezclas de líquidos sería necesario una alta temperatura para vaporizar la alimentación dando por resultado su descomposición. Para evitar este problema se debe operar la columna a presiones inferiores de la atmosférica para lo cual se usan eyectores de chorro de vapor diseñados para una capacidad, a veces esta capacidad disminuye debido al sofocamiento de la garganta difusora por un exceso de vapor, si la presión de vapor disminuye la operación del eyector será inestable por lo cual se recomienda instalar un controlador de presión en la línea de vapor.

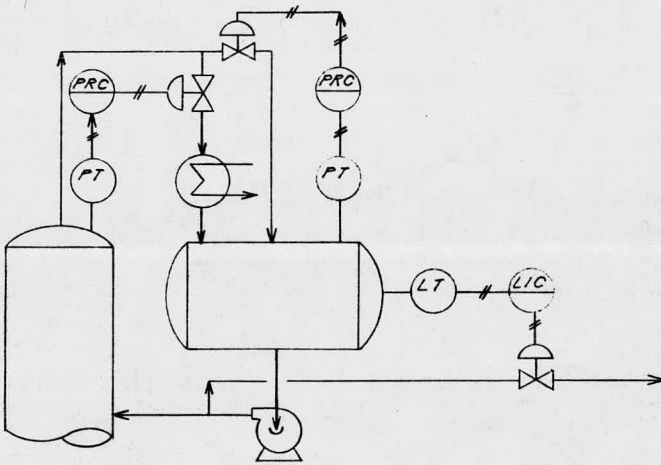


FIGURA 6

En la fig. 7 se muestra el sistema de control recomendado para operación a vacío.

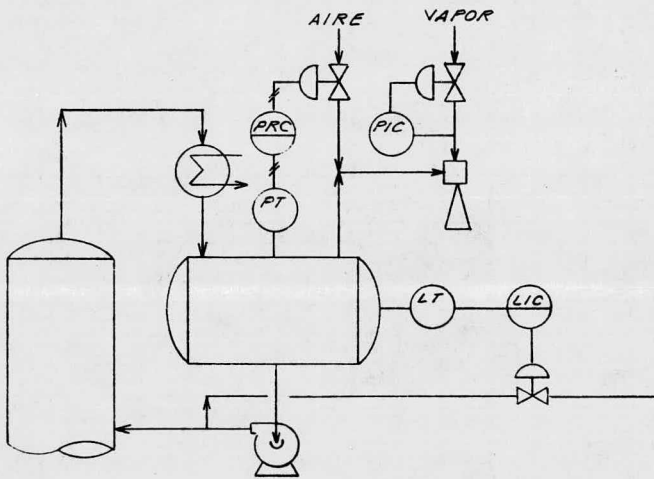


FIGURA 7

El aire o gas se sangra en la línea de vacío justo frente al eyector para hacer disponible su capacidad máxima y soportar cualquier alteración, la cantidad de aire sangrado lo regula una válvula de control para mantener la presión del flujo en el tanque, esta presión involucra menos retrasos de tiempo que si se usara como variable de control la presión de la columna.

La primera de las seis variables controladas es la presión, si se suponen condiciones de alimentación fijas se necesita determinar la velocidad, composición y temperatura de la alimentación. Para obtener estabilidad de la operación de flujo continuo debe mantenerse la velocidad de flujo constante usando un controlador de banda proporcional estrecha con lo que la válvula de control tomará una acción correctiva para pequeños cambios en la velocidad de flujo y la velocidad de alimentación se mantendrá constante por la alta ganancia del controlador.

La cantidad de calor que debe añadirse por medio del rehevridor está determinada por la condición térmica de la alimentación, para una separación eficiente es deseable que la alimentación entre a la columna en su punto de burbuja. Si viene de un paso de destilación anterior se requiere de una fuente de calor externa, puede usarse vapor para calentar y el elemento sensor puede ser un termopar dentro de un termopozo colocado en la línea de alimentación. Para mantener la temperatura de alimentación se usa un controlador de tres modos.

Para un mejor control de temperatura puede usarse el control en cascada de la fig. 8.

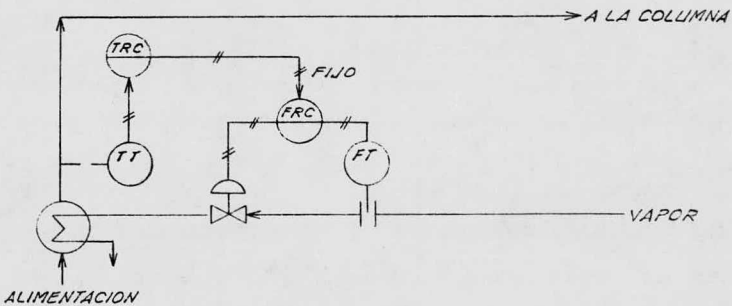


FIGURA 8



La alimentación a temperatura constante no significa necesariamente calidad constante en la alimentación, si la composición varía el punto de burbuja también por lo que comunmente se controla la temperatura en un punto equivalente al de burbuja de la alimentación más densa cuando empieza a aligerarse, algo se evaporará pero esto se maneja con controles subsecuentes.

El controlador de temperatura regula el movimiento del combustible al horno cuando éste añade calor a la unidad de destilación. Se puede usar un controlador de flujo en la línea de combustible para mayor estabilidad y el controlador de temperatura establece su control de una manera análoga al circuito de control de la fig. 8.

El problema en el control del horno es mantener la combustión eficiente porque la insuficiencia de aire ocasiona que se consuma sólo una porción del combustible, con flujo de aire fijo el sistema de control aumentará el flujo de combustible al horno pero no aumentaría necesariamente la transferencia de calor. Entonces fue necesario hacer hornos de proceso que usen grandes cantidades de exceso de aire para evitar sobrecalentamiento de los tubos de la sección de radiación y ajustando a la velocidad del combustible hay cambios inmediatos en el calor suministrado a la corriente de proceso. El exceso de aire contribuye a pérdida de calor porque reduce la temperatura total del horno absorbiendo algo de calor y llevándolo lejos en el flujo de gas. El control de aire se mantiene con el tiro del horno, y para asegurar que sea constante se usa el damper al final de la chimenea. El retraso de tiempo normal en los hornos va de 3 a 12 min., esto se reduce usando un control en cascada en donde el controlador maestro siente la temperatura de la corriente de alimentación del proceso y el controlador esclavo siente la temperatura del horno.

Una vez que se han definido las condiciones de alimentación y la presión de la columna quedan dos variables por ser controladas, frecuentemente una de estas es la velocidad de ebullición lo que se controla estableciendo el flujo de calor al rehervidor colocando un controlador de flujo en la línea del medio de calentamiento del rehervidor como se ilustra en la

figura 9.

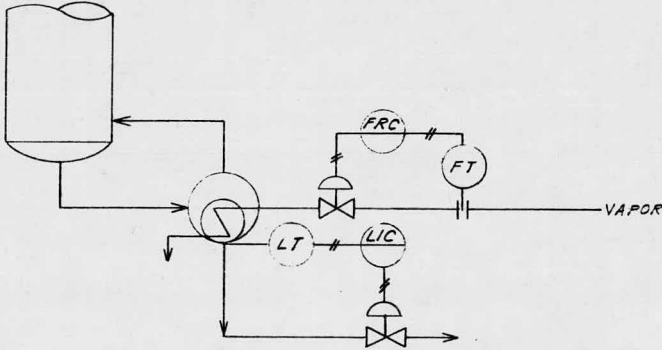


FIGURA 9

La cantidad de material ligero en ebullición de los fondos la determina el punto fijo del controlador de la velocidad de vapor y al establecerse esto habrá mucho vapor en el rehervidor con lo que mayor cantidad de material ligero llegará a la columna como vapor.

El producto de los fondos que se separa, se controla por el nivel en el rehervidor, esto refleja la diferencia entre lo que fluye del rehervidor a la columna y lo que regresa a la columna como vapor. En las figs. 9 y 10 se ilustra un rehervidor tipo kettle y un termosifón respectivamente.

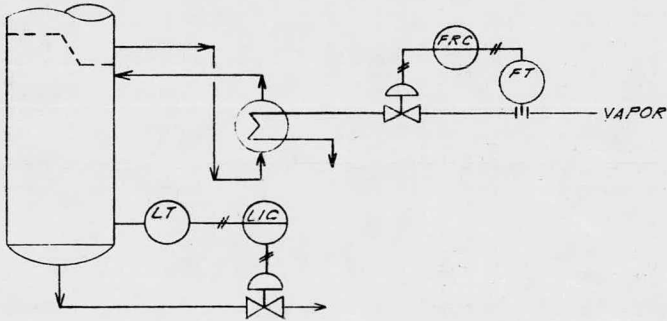


FIGURA 10

Otra forma de controlar los fondos es tener vapor del rehervidor manipulado por el nivel del líquido en éste. En este caso el producto de los fondos separado puede establecerse por un controlador de flujo por lo que los ajustes se establecen desde las condiciones medidas o computadas. Con este arreglo hay respuesta rápida a los disturbios en la calidad de vapor o presión y previene estos disturbios desde que entran a la columna y afecta la separación.

La última variable a controlar es la velocidad de reflujo que es el suministro continuo del líquido a la parte superior de la columna, entonces la velocidad de reflujo y la ebullición determinan la cantidad y composición del producto. La velocidad de reflujo se regula por un controlador de flujo sobre la línea de reflujo como se ve en la fig. 11. Y se controla por el nivel del líquido en el tanque receptor, la velocidad de separación hace la diferencia entre lo que viene sobrecalentado desde la columna y lo que regresa como reflujo.

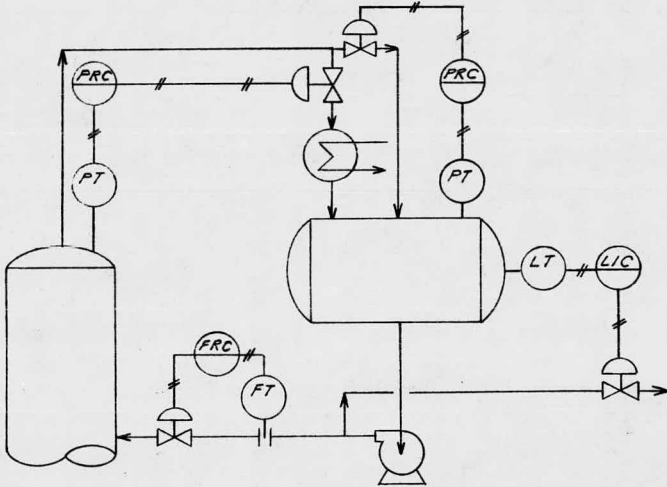


FIGURA 11

Al tener condiciones de alimentación constante la operación estable requiere control relativamente simple, sin embargo, si se supone que el destilado pasa a otra columna, cualquier desviación se refleja en la cantidad y composición de la alimentación a ésta pudiéndose evitar si se colocan controladores de flujo en las líneas de producto de la primera. Con estas condiciones variables el control en cascada de la fig. 12 se justifica.

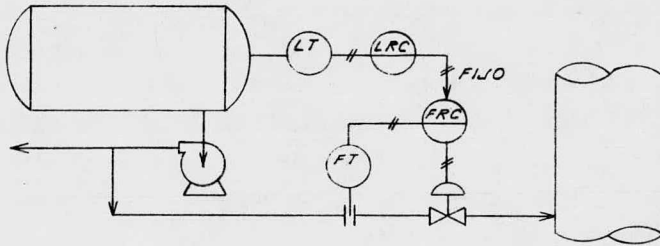


FIGURA 12

La meta de la destilación es lograr la pureza especificada de los productos sin causar desecho, para esto es necesario medir la composición del producto para modular los elementos de control.

Como en destilación se separan materiales basándose en la diferencia de sus presiones y ésta es una función de la temperatura la que puede usarse para detectar cambios en la composición ya que se supone que la presión de la columna permanece constante. Se ha sugerido que la temperatura se controle en el plato en donde la curva temperatura vs. localización del plato presente pendiente máxima, pero los cálculos basados en las concentraciones en el equilibrio para cada plato no justifican este método. Por lo que se ha visto que el punto óptimo para colocar el sensor de temperatura no se puede generalizar, sólo hay que basarse en medir la temperatura en el plato en donde se presenten más cambios en composición.

Cuando es importante la composición del producto de los fondos debe mantenerse constante la temperatura en la sección más baja estableciendo el punto de control del suministro de vapor del rehervidor, esto se ilustra en la fig. 13.

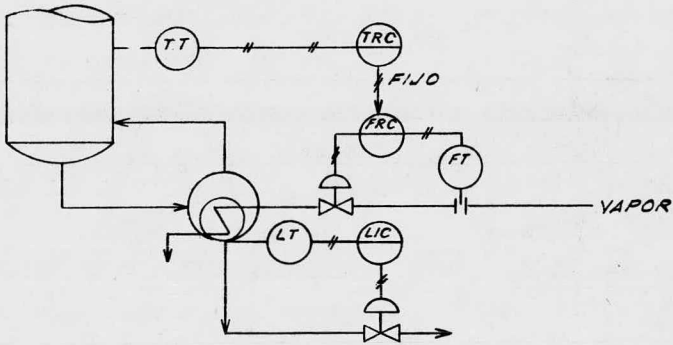


FIGURA 13

Si interesa la composición del producto destilado se debe mantener constante la temperatura en la sección superior como en la fig. 14.

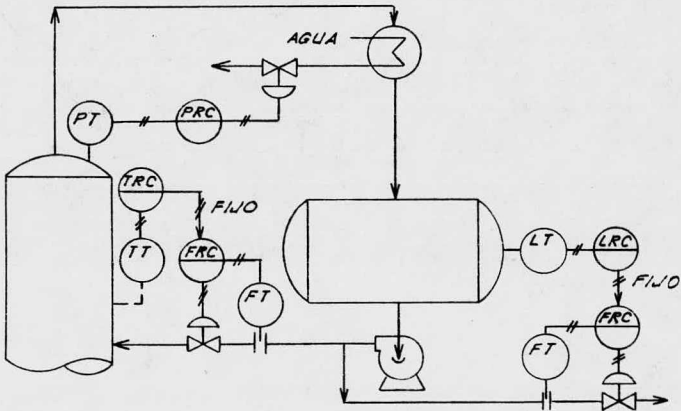


FIGURA 14

El punto de control de la presión de la columna esta cerca del punto de control de temperatura, esto ayuda a fijar la relación temperatura-composición en este punto.

Para medir la temperatura, el elemento sensor estará en el fluido líquido sobre el plato ya que así la transferencia de calor es mayor que si estuviera en medio gaseoso. El error en el sistema termal lo causa la - transferencia de calor a lo largo del cuello del bulbo a los alrededores, - esto puede minimizarse aumentando la velocidad del bulbo con mayor longitud del cuello y construyéndolo con materiales de baja conductividad térmica.

Cuando se requiere separar dos compuestos con presiones de vapor muy cercanas, no se puede medir la temperatura para indicar la composición. Los cambios en la velocidad de alimentación y la presión de la columna causan cambios en la temperatura y su relación con la composición es poca.

Si fijamos dos temperaturas es equivalente a fijar una temperatura y la presión, controlando la temperatura o una diferencia de ésta se nulifica las variaciones de presión. Aquí se sugiere que las curvas de presión para los componentes tienen productos constantes.

Controlar dos temperaturas no es equivalente a controlar una di--ferencia de temperatura. La gráfica de diferencia de temperatura con--tra composición del producto de los fondos presenta un máximo. Así para algunas diferencias de temperatura se ilustra en la fig. 15.

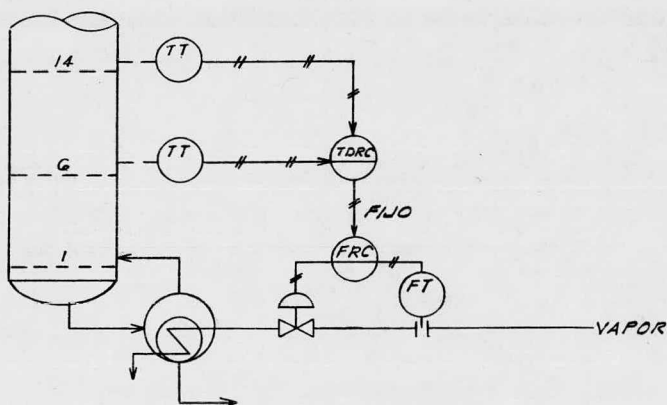


FIGURA 15

El control con analizadores tales como el cromatógrafo presentaba antes el obstáculo de que el análisis tardaba aproximadamente 15 min., actualmente se tiene un análisis en menos de 5 min., esta rapidez de -- muestreo permite un control de circuito cerrado. En la fig. 16 se muestra la separación en destilación controlada por un cromatógrafo, el cual analiza continuamente una muestra de vapor de uno de los platos intermedios. La salida del cromatógrafo modula la válvula de decantación del - producto, esto varía la presión de la columna ajustando el nivel del líquido en el condensador superior inundado.



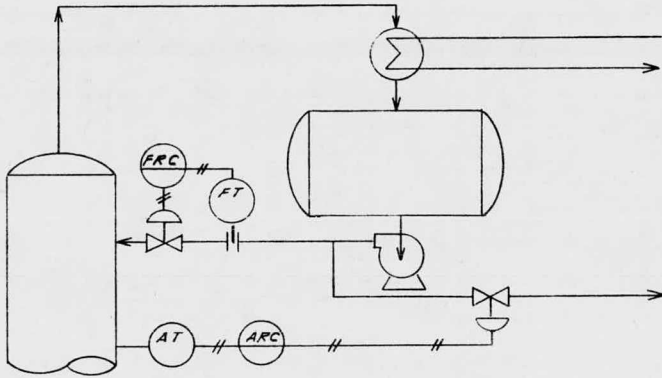


FIGURA 16

La elección del tipo de analizador depende de la disponibilidad de éstos y del tipo de separación porque hay un compromiso entre la controlabilidad y el retraso de tiempo del sistema de control.

En los casos en que el costo del sistema analizador no se justifica por la mejora de la operación de la columna, los analizadores sobre la corriente crean información que ayuda al operador a decidir sobre los cambios requeridos en el punto fijo.

El muestreo favorece la operación por lo que se debe tener cuidado en este punto. El muestreo en las terminales de la columna favorece:

1. La libre correlación entre la composición de la muestra y la composición final.
2. Mejor funcionamiento del circuito de control porque se reducen los retrasos de tiempo describiendo los puntos de muestreo en el funcionamiento composicional.

Los factores que se ven favorecidos por el muestreo a la entrada de la alimentación son:

1. Composición final mejorada debido al reconocimiento rápido de las composiciones procesadas desde la entrada de la alimentación hacia las terminales de la columna.
2. Requerimientos analíticos menos rigurosos debido a :
  - a) Análisis del componente de control a una concentración alta y - sobre un amplio rango.
  - b) Simplificación de la mezcla multicomponente tal que los componentes no clave tienden a exhibir zonas de composición constante en la columna.

## C O N C L U S I O N E S

Dentro del área industrial el campo de la instrumentación es muy amplio y no es posible cubrirlo totalmente en un trabajo de esta naturaleza, pero consideramos que los aspectos aquí tratados pueden ser suficientes para despertar el interés del estudiante para introducirse poco a poco y profundizar en su conocimiento, ya que por su propio carácter resulta importante la instrumentación apropiada de equipos.

La diversidad de especificaciones en uso por las diferentes empresas dedicadas a este ramo de la industria fue uno de los problemas con que nos encontramos, pero pudimos comprobar que los fundamentos y principios básicos que se aplican son los mismos.

Consideramos de utilidad hacer resaltar el hecho de que no es suficiente tener los conocimientos básicos para instrumentar, sino que se hace necesario analizar paso a paso las características del proceso, para optar por el sistema de control adecuado para analizar los resultados deseados.

## BIBLIOGRAFIA

1. DOUGLAS M. CONSIDINE  
PROCESS INSTRUMENTS AND CONTROL HANDBOOK  
MC. GRAW HILL BOOK COMPANY  
LONDON. NEW YORK. TORONTO.
2. JOHN H. PERRY  
CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK  
MC. GRAW HILL KOGAKUSHA COMPANY  
FOURTH AND FIVETH EDITIONS  
LONDON. NEW YORK. TORONTO. TOKYO.
3. BELA G. LIPTAK  
INSTRUMENTATION IN THE PROCESSING INDUSTRIES  
CHILTON BOOK COMPANY  
PHILADELPHIA. NEW YORK. LONDON.
4. L. M. SOULE  
BASIC CONCEPTS OF INDUSTRIAL PROCESS CONTROL  
CHEMICAL ENGINEERING  
SEPTEMBER 22, 1969.
5. L. M. SOULE  
BASIC CONTROL MODES  
CHEMICAL ENGINEERING  
OCTOBER 20, 1969.
6. L. M. SOULE  
TUNING PROCESS CONTROLLERS  
CHEMICAL ENGINEERING  
DECEMBER 1, 1969.

7. L.M. SOULE  
SINGLE LOOP CIRCUITS MAY NEED NEW CONTROL FUNCTIONS  
CHEMICAL ENGINEERING  
JANUARY 12, 1970.
8. L.M. SOULE  
MULTIPLE VARIABLES REQUIERE SPECIAL CONTROL  
TECHNIQUES  
CHEMICAL ENGINEERING  
JANUARY 26, 1970.
9. L.M. SOULE  
FEEDFORWARD CONTROL IMPROVES SYSTEM RESPONSE  
CHEMICAL ENGINEERING  
FEBRUARY 23, 1970.
10. PROCESS CONTROL INSTRUMENTATION  
PUBLICACION DE FOX BORO COMPANY
11. PROCESS CONTROL  
CHEMICAL ENGINEERING  
JUNE 12, 1961.
12. DONALD Q. KERN  
PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR  
COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A.  
MEXICO. ESPAÑA. ARGENTINA. CHILE  
7°. IMPRESION. JULIO DE 1973.
13. ERNEST E. LUDWIG  
APPLIED PROCESS DESIGN FOR CHEMICAL  
AND PETROCHEMICAL PLANTS  
GULF PUBLISHING COMPANY  
HOUSTON, TEXAS.

14. PETER HARRIOTT  
PROCESS CONTROL  
TATA Mc. GRAW HILL PUBLISHING COMPANY, LTD.  
NEW DELHI, 1974.
15. H. S. WILSON  
THE AUTOMATIC CONTROLLER  
CHEMICAL ENGINEERING PROCESS  
AUGUST 1964, VOL. 60, No. 8
16. B. G. LIPTAK  
HOW TO SET PROCESS CONTROLLERS  
CHEMICAL ENGINEERING  
NOVEMBER 23, 1964.
17. E. ROSS FORMAN  
CONTROL SYSTEMS FOR DISTILLATION  
CHEMICAL ENGINEERING  
NOVEMBER 8, 1965.
18. HAROLD L. HOFFMAN  
AUTOMATIC CONTROL FOR DISTILLATION  
HYDROCARBON PRECESSING & PETROLEUM REFINER  
FEBRUARY 1963, VOL. 42, No. 2
19. E. ROSS FORMAN  
CONTROL DYNAMICS IN HEAT TRANSFER  
CHEMICAL ENGINEERING  
JANUARY 3, 1966.
20. E. ROSS FORMAN  
FEEDBACK AND FEED FORWARD CONTROL  
CHEMICAL ENGINEERING  
OCTOBER 11, 1965.