

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

137

**DISEÑO DEL CONTROL AUTOMATICO E
INSTRUMENTACION DE UN PROCESO
INDUSTRIAL.**

T E S I S
PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A

BENJAMIN FUENTES Y CORONA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres y hermanos .

Profr. Benjamín Fuentes González

Sra. Elvira Corona de Fuentes

Manuel

Catalina y

Elvira

que me brindaron su cariño y apoyo en todo momento.

A mis abuelos

Profr. Enrique Corona Morfín

Sra. Clara Vega de Corona

con toda mi admiración y cariño.

A mis maestros, con todo respeto
y gratificación.

CLAS Tesis
AÑO 1973
FECHA
PROC No 6-108

e



QUINICA

Jurado asignado
originalmente
según el tema

PRESIDENTE Eduardo Rojo y de Regil
VOCAL Pablo Barroeta González
SECRETARIO Alejandro Lozada Cañibe
1er.SUPLENTE Enrique Jiménez Ruiz
2do.SUPLENTE Luis Romero Cervantes

Sitio donde se
desarrolló el
tema:

Enterprise, S.A.

Nombre completo
del sustentante

Benjamín Fuentes y Corona

Nombre completo
del asesor del
tema

Alejandro Lozada Cañibe

I N D I C E

	Introducción	4
Capítulo II	Características básicas de un proceso	7
Capítulo III	Interrrelación de las principales variables y su influencia en el proceso	19
Capítulo IV	Modos de control automático	29
Capítulo V	Técnicas utilizadas en la calibración de los controles	55
Capítulo VI	Elementos primarios de medición y elementos finales	67
Capítulo VII	Equipo y selección de los instrumentos de control. Diagrama del proceso y diagrama eléctrico	91
Capítulo VIII	Costos del equipo	104
	Conclusiones	114
	Bibliografía	116

"Introducción"

Objetivo: ESTA TESIS TIENE COMO FINALIDAD HACER UN ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DEL PROCESO Y EL EFECTO QUE TIENEN LOS RETRASOS, PARA QUE DE ESTA MANERA SEA POSIBLE LA SELECCION DEL SISTEMA DE CONTROL.

Generalidades: En los procesos industriales siempre se ha tenido la necesidad de mantener bajo control -ciertas variables- que son de importancia vital para la operación de una planta; ya que de ellas depende que se obtenga un producto con la pureza y especificaciones requeridas. El "control" de estas variables está en relación en gran parte con la baja o alta eficiencia del proceso, lo que repercute directamente en los costos de producción haciendo que un producto sea más caro o más barato y se encuentre de esta manera en posibilidades de competir.

La tesis se divide básicamente en dos partes:

1a) Un estudio teórico del control automático en el que se incluye: a) Las características del proceso, b) los diferentes modos de control y c) calibración de los controles automáticos.

2a) Selección de la instrumentación para un secador "tipo Dry Sys" (Aspecto práctico).

En la primera parte se hace un análisis general de "las variables más importantes que afectan al proceso y su interrelación con el mismo". Se efectúa un estudio de las principales formas de control desde el punto de vista teórico⁽⁵⁾ y se proponen algunos "métodos de calibración"⁽³⁸⁾ con los cuales pueda lograrse -- que el proceso trabaje dentro de las condiciones establecidas. -- Las técnicas empleadas en esta tesis son muy valiosas, pues permiten encontrar los parámetros necesarios para lograr la estabilidad del sistema. De acuerdo con el estudio hecho por Ziegler y Nichols⁽¹⁷⁾, por Harriot⁽²⁾ y por Cohen y Coon⁽¹⁸⁾, puede decirse que el estudio del régimen transitorio desde el punto de vista matemático, resulta sumamente difícil; por lo que se prefiere con fines prácticos utilizar métodos empírico-experimentales⁽²¹⁾.

También existen métodos gráficos⁽¹⁸⁾ con los cuales se pueden determinar los parámetros necesarios que hagan que el sistema trabaje en condiciones estables⁽²⁾ o bien que se llegue a ellas más rápidamente.

La segunda parte de la tesis, consiste en la selección del equipo necesario para el control automático del secador así como su protección. Para cada uno de los instrumentos se hace un análisis de la forma en que trabajan y los principios en que se basan.

Dentro de la selección del equipo se incluye el costo del mismo. Existe equipo de importación para el cual se toman en cuenta los "impuestos" de acuerdo con la "fracción arancelaria" que le corresponde. El costo total del equipo se determina considerando los instrumentos de compra local, los de importación y los fletes.

Actualmente es más grande la necesidad de aumentar la producción utilizando una tecnología más avanzada; consecuentemente la complejidad de los procesos aumenta y la forma de controlarlos se hace más difícil.

El estudio del "control automático" es importante para la ingeniería de procesos, pues nos ayuda a maximizar las utilidades de un producto, con una calidad óptima dentro de un buen nivel de rendimiento en la producción.

Las razones por las cuales el control automático es aplicado en procesos, son las siguientes:

- Crear condiciones de operación en donde el equipo de proceso y las reacciones (en caso de que las haya) se realicen con la más alta eficiencia.
- Establecer condiciones de operación, lo más cercanas al diseño del equipo y dentro de los rangos que brinden seguridad.
- Compensar las perturbaciones del proceso, así como los cambios de las condiciones de operación.
- Nos ayuda a que exista una programación ordenada entre una fase de operación y la siguiente.

- por medio del control se puede mantener la pureza del producto dentro de las especificaciones.

"Por medio del control automático y la instrumentación aplicada a un proceso es posible mejorar notablemente el funcionamiento de una planta".

Selección; Para la selección de los sistemas de control se requiere de un profundo análisis de las diferentes variables que influyen en el proceso, con el objeto de determinar el modo de control. Un sistema de control puede ser considerado como una combinación de:

- Elementos de medición
- Controlador
- Elemento final de control

El proceso es considerado por algunos autores⁽⁵⁾ como fuera del sistema de control.

Capítulo II.- "Características básicas de un proceso".

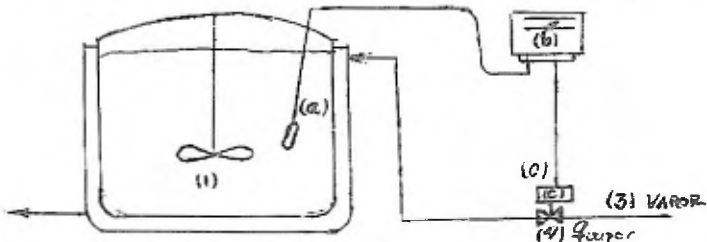
En el estudio del control automático deberá tomarse en cuenta:

- a) El proceso
- b) Su instrumentación

- El proceso está formado por una serie de funciones que se van a efectuar en el(los) equipo(s), con el objeto de obtener un producto. En el proceso se tendrán variables críticas que deberán ser "controladas" con el objeto de mantener al proceso dentro de los rangos de operación.

- La instrumentación es el conjunto de elementos y aparatos que se van utilizar con la finalidad de obtener el control automático.

Como ejemplo, de las principales características, que tiene un sistema de control automático, puede ser un reactor batch.



De la figura podemos hacer la siguiente clasificación:

<u>Proceso</u>	<u>Instrumentación</u>
(1) Medio controlado (Solución que se tiene en el reactor)	(a) Elemento primario de medición (Elemento terminal)
(2) Variable controlada (Temperatura)	(b) Controlador-registrador (Instrumento de control)
(3) Agente de control (Vapor)	(c) Elemento final de control (válvula)
(4) Variable manipulada (Costo de vapor)	

En un proceso se va a tener lo siguiente;

Características del proceso	}	1) Retraso en el proceso	}	a) Capacitancia
				b) Resistencia
				c) tiempo muerto
		2) Cambios de carga	}	a) En masa o volumen
				b) Térmica

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de las características básicas con sus unidades fundamentales.

	Símbolo	Presión	Nivel	Termal	Eléctrico
Capacidad	V	(ft ³)(m ³)	(ft ³)(m ³)	(BTU)(Cal)	coulomb
Potencial	P	(psi)(Kg/cm ²)	(ft)(cm)	(°F)(°C)	Volt
Tiempo	T	(min)	(min)	(min)	(seg)
Flujo	W/T = Q	(ft ³ /min)(m ³ /min)	(ft ³ /min)(m ³ /min)	(BTU/min)(Cal/min)	(coulomb/seg) Ampere
Capacitancia	C	(ft ³ /psi)(m ³ /min)	(ft ³ /psi)(m ³ /min)	(BTU/°F)(Cal/°C)	coulomb/Faradio Volt
Resistencia	R	(psi)(Kg/cm ²) (ft ³ /min)(m ³ /min)	(ft)(cm) (ft ³ /min)(m ³ /min)	(°F)(°C) (BTU/min)(Cal/min)	Volt = Ohm Ampere
Tiempo muerto	T _m	(min)	(min)	(min)	(seg)

A) Definiciones Generales

1) Capacidad

Esta es una propiedad íntima del proceso que no se debe confundir con "capacitancia" de un sistema.

"Capacidad" es la habilidad que se tiene en un proceso para contener energía o materia dentro de un equipo; las unidades en que es medida son siempre de cantidad. Las diferentes formas - en que puede ser almacenada son las siguientes:

- La cantidad de calor que es absorbido por un metal. (BTU) o (cal)
- El volumen de un líquido o un gas almacenados en un tanque. (ft³) o (m³)
- La acumulación de cargas eléctricas sobre las placas de un capacitor. (Cbs)

2) Potencial o Gradiente

Las variables básicas en el proceso de una industria, son presión, nivel y temperatura. Dentro del control automático se les conoce con el nombre de "variables de referencia". El estudio de estas variables es de suma importancia ya que por medio de ellas nos va a permitir la óptima operación de nuestro sistema.

A la diferencial de estas variables es lo que se conoce con el nombre de gradiente o potencial, y es la diferencia entre dos puntos que tienen un nivel de energía diferente, por medio del cual se puede realizar un trabajo.

3) Flujo

Es la variación de la cantidad de materia o energía que se esté transfiriendo por unidad de tiempo. Este flujo de energía o materia que se tiene en el proceso es otra de las variables básicas; por medio de la cual se puede anticipar de una manera muy elemental el tipo de control requerido.

Los flujos que se pueden tener son: flujo de fluidos, flujo de calor o flujo eléctrico. Estos van a efectuarse siempre y cuando exista un gradiente de presión, de temperatura, o de tensión respectivamente.

B) Retrasos en el proceso

Tres características del sistema, se encuentran siempre presentes en mayor o menor grado, afectando a todas las variables. Estas son:

- 1) Capacitancia
- 2) Resistencia
- 3) Tiempo muerto

Estas características deben ser tomadas muy en cuenta, para la selección del sistema de control. Ya veremos más adelan-

ta en que forma contribuyen en los retrasos del proceso y como afectan en la estabilidad del sistema. Si estas características no existieran, no habría pérdidas de tiempo entre la medición-transmisión de la señal y acción correctiva al sistema; de tal manera que los problemas del control serían nulos y por ende su solución sería muy sencilla. A continuación haremos un análisis de la forma en que contribuye cada una de ellas.

1) Capacitancia

"Es la cantidad de energía o materia almacenada por unidad de la variable de referencia".

Las diferentes clases de capacitancias que pueden existir son:

a) Capacitancia Térmica: Es la energía absorbida (en BTU o cal) por grado de temperatura.

b) Capacitancia en Volumen: Es el volumen de sólidos o líquidos (en ft^3 o m^3) que pueden ser almacenados en un recipiente por unidad de cambio en la altura del nivel (en ft o m).

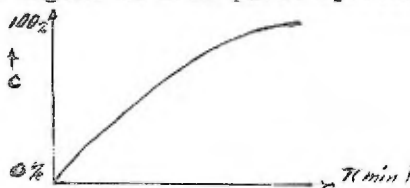
c) Capacitancia Eléctrica: Es el cambio de carga eléctrica en el capacitor (en microfaradio, μF) por diferencia de potencial en los bornes o terminales.

Efecto que tiene la capacitancia en el proceso.

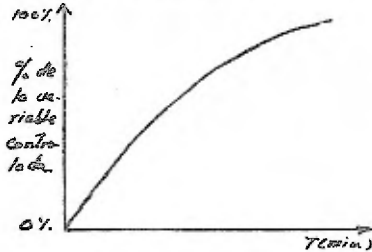
Lo más característico de la capacitancia es probablemente el efecto de inercia o Momentum que tiene sobre el sistema de control. Esta actúa como directriz, reduciendo la rapidez al cambio de una respuesta, teniendo como resultado un retraso en la estabilización de la variable controlada.

Un proceso que tiene una gran capacitancia es aquel que contiene una considerable cantidad de materia o energía almacenada.

Como resultado del aumento de esta propiedad, se tiene una gran inercia en el sistema, con sus consecuentes retrasos en la velocidad de respuesta y tendencias a la inestabilidad del proceso. En la figura II-1 se puede apreciar, la variación de



la variable controlada con respecto al tiempo; la curva que resulta sigue a la ecuación básica de Newton de la inercia.



Como ejemplo, de un fenómeno que siga esta ley es el siguiente: Un recipiente que contiene una pequeña cantidad de agua, la cual es calentada por medio de vapor. Repentinamente aumentamos la cantidad del agente de control (vapor), el resultado que tendremos, es que la temperatura del agua se elevará siguiendo

la curva de la figura II-1.

Un caso que se puede presentar, es el de un sistema con su capacitancia y una resistencia al paso del flujo. Esto se puede apreciar en la figura II-2.

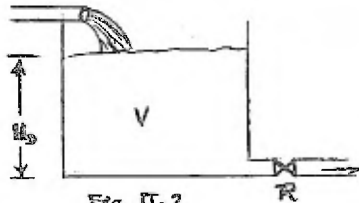


Fig. II-2

Donde:

- H_D = cabeza o diferencia de niveles (ft o m)
- R = Resistencia que presenta la válvula o caída de presión ($\text{psi}/\text{ft}^3/\text{min}$; $\frac{\text{kg}/\text{cm}^2}{\text{m}^3/\text{min}}$)
- V = Volumen de líquido (ft^3 o m^3)
- C = Capacitancia hidráulica (ft^3/ft ó m^3/m)

- El volumen va a estar variando, por lo tanto, tendremos un diferencial de volumen (dv)
- También habrá un cambio en el potencial: Una diferencial de nivel (dh).

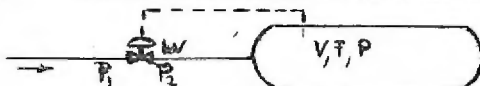
La capacitancia es igual a :

$$C = \frac{dv}{dh} = A (\text{ft}^2) \text{ ó } (\text{m}^2)$$

"La capacitancia del tanque es igual a la sección del tanque". Si el tanque tiene un área constante entonces la capacitancia será la misma, independientemente de que varíe la cabeza (H_0).

Para cuando se trate de gases, la capacitancia puede ser calculada de la siguiente manera:

$$C = \frac{dw}{dp} = \frac{\text{variación del gasto del gas (lb ó kg)}}{\text{caída de presión en la válvula (psi ó kg/m}^2\text{)}}$$



Los retrasos que produce una capacitancia, pueden ser expresados en función de la constante de tiempo o coeficiente de retraso. Este concepto será explicado más adelante con mayor amplitud. Sin embargo aquí podremos saber, que el coeficiente de retraso puede ser calculado, conociendo la "Resistencia" y la "Capacitancia" del proceso.

$$T_c = R \left(\frac{\text{ft caída presión}}{\text{ft}^3/\text{min}} \right) \cdot C \left(\frac{\text{ft}^3 \text{ capacidad}}{\text{ft de cabeza}} \right)$$

$$T_c = \text{constante de tiempo (min)}$$

Se sabe, que mientras mayor sea la capacitancia, menor será la velocidad de reacción. Por lo tanto cuando se trate de seleccionar un control se deberá tomar en cuenta las siguientes medidas:

- Si se tiene un sistema que presenta una gran estabilidad, entonces conviene tener una gran capacitancia ya que la respuesta de la variable controlada va a ser lenta. Si por el contrario el sistema presenta una gran inestabilidad entonces convendrá tener una pequeña capacitancia.

Debe hacerse notar que para la mayoría de los casos, los recipientes y equipos son diseñados de acuerdo a las características íntimas del proceso y que una vez que se tiene el equipo se procede a hacer la instrumentación del mismo. Sin embargo es importante tomar en cuenta la consideración, de que en caso de que se trate de un sistema cuyas condiciones de control automático van a ser muy críticas en cuanto a la estabilidad-inestabilidad del proceso:

entonces el diseño del equipo, deberá hacerse en forma conjunta con su instrumentación. Bajo estas condiciones, convendrá seleccionar un recipiente, con las dimensiones necesarias para que se tenga una "pequeña capacitancia" y lograr una rápida respuesta en la variable que se quiera controlar.

2) Estabilidad de un sistema

La estabilidad de un control es el resultado de una combinación de efectos entre el sistema de control y el proceso, en el cual la variable controlada es mantenida dentro de ciertos límites sin que se presenten grandes oscilaciones.

El control automático va a tener como función la de regresar a la variable controlada, a su punto de ajuste una vez que se haya producido una perturbación en el proceso.

A continuación presentamos la respuesta que puede tener la variable controlada para cuando se presenta un cambio repentino en el punto de ajuste del controlador. Los casos que se pueden presentar son tres:

- (a) Estabilidad excesiva
- (b) Respuesta aceptable
- (c) Inestabilidad excesiva

Para el primer caso, se obtiene un cambio de la variable controlada en la cual su respuesta resulta ser muy lenta. El tiempo que se lleva en llegar a la estabilización es muy grande.



Fig. II-3

(b) Para este caso, la respuesta que se produce es muy rápida y después se va estabilizando hasta alcanzar el equilibrio.

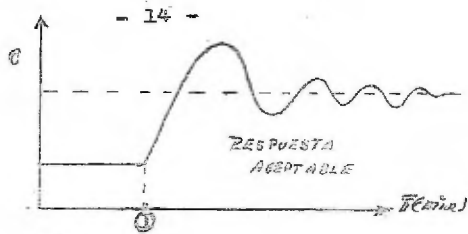


Fig. II-4

① Punto en el que se produce un cambio de carga originando un cambio en la variable de referencia.

(c) Para cuando se tiene inestabilidad excesiva, la respuesta de la variable controlada resulta ser muy rápida y el sistema nunca logra encontrar su punto de equilibrio y por lo tanto su estabilidad.

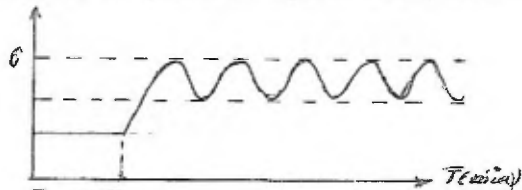


Fig. II-5

En algunos casos, estas oscilaciones pueden tolerarse dentro de ciertos límites. Esto dependerá, por supuesto, de las características del proceso.

3) Resistencia

Es una característica más en los retrasos de un proceso y se define como la oposición al paso del flujo. La resistencia es la relación que existe entre el cambio de potencial por unidad de cambio unitario del flujo.

Al igual que la capacitancia, las diferentes clases de resistencia que se pueden tener en un proceso son las siguientes:

a) "Resistencia Térmica" es la diferencial de temperatura requerida para producir un flujo de calor. Ese gradiente de temperatura deberá ser lo suficientemente grande para permitir el flujo de calor a través de la resistencia que se tenga. Por ejemplo, se puede tener un horno o cámara de combustión, en el cual la pared va a estar formada por varios tipos de ladrillos refractarios. Estos se van a encontrar en serie y cada uno de ellos va a tener su propia resistencia, como se muestra en la fig II-6.

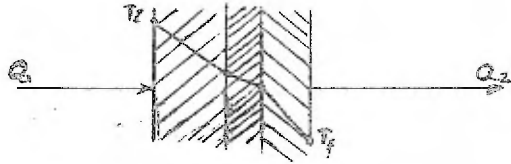


Fig. B-6

Por estar en serie, el flujo de entrada es igual al de salida.

$$Q = Q_1 = Q_2 \quad (\text{BTU/min ó cal/min})$$

El potencial es igual al gradiente de temperatura.

$$\text{Potencial} = T_2 - T_1 \quad (^\circ\text{F ó } ^\circ\text{C})$$

El flujo de calor deberá pasar a través de cada uno de los ladrillos, venciendo a las resistencias R_a , R_b y R_c . La caída de potencial varía en función de cada una de las resistencias y el flujo de calor es constante, por estar en serie las resistencias.

$$R_a = \frac{\Delta t_a}{Q} ; \quad R_b = \frac{\Delta t_b}{Q} ; \quad R_c = \frac{\Delta t_c}{Q}$$

La resistencia total es igual a la suma de cada una de ellas.

$$R_{\text{total}} = R_a + R_b + R_c$$

La resistencia ("R") se va a presentar en cualquier tipo de control y es particularmente evidente en los procesos de transferencia de calor.

Quando se quiere determinar la temperatura a la que es té un proceso se utilizará un elemento termal, con el objeto de efectuar su medición. En este caso, se tendrá una resistencia debido a las características en la transferencia de calor entre el proceso y la temperatura a la que está el bulbo. Además, existirá otra resistencia al flujo de calor debido a la película de gas o líquido que se forma alrededor del elemento sensor. El criterio de selección del tipo de control se hace tomando en cuenta esta característica. Mientras mayor sea la resistencia que presente el proceso, mayor será también el agente de control que pueda cambiar la variable de referencia.

b) "Resistencia en fluidos": Es la diferencial de pre---

sión requerida para producir el flujo de un fluido a través de una tubería, válvula, bomba, etc. En la fig II-7 se puede apreciar una resistencia hidráulica.

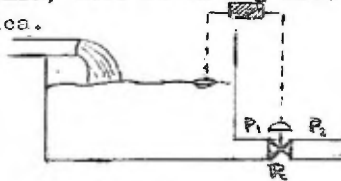


Fig. II-7

La resistencia se encuentra representada por medio de una válvula de control de flujo. La caída de presión que se tiene a través de la válvula es proporcional al flujo que pasa por ella.

$$R = \frac{\Delta P}{Q} = \frac{\text{caída de presión a través de la válvula}}{\text{gasto controlado por la válvula para mantener una cabeza hidráulica requerida en el tanque}}$$

c) "Resistencia eléctrica": "La resistencia eléctrica es el voltaje necesario para producir una corriente de un ampere a través de un conductor".

Como ya se vió en los dos incisos anteriores, cualquier fenómeno puede ser analizado, haciendo una analogía en la "LEY DE OHM".

Como un ejemplo de esto se tiene en la fig II-8 una analogía entre un circuito eléctrico y un sistema hidráulico.

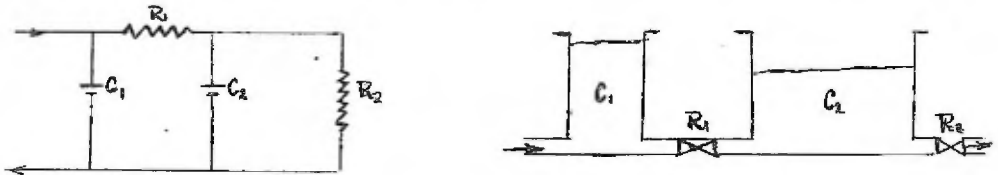


Fig. II-8

En la fig II-8 se puede ver un proceso con sus dos capacitancias y sus dos resistencias. Las resistencias en el circuito eléctrico pueden ser calculadas; conociendo la "caída de voltaje" que hay en cada una de ellas y sabiendo el "flujo (cbs/seg)" que está pasando a través de ella.

$$R_1 = \frac{E_1}{I_1} ; \quad R_2 = \frac{E_2}{I_2} \quad (\text{Ohms})$$

4) Tiempo muerto.

Se encuentra presente en ciertos procesos, particularmente en los continuos. Es un retraso que se produce en una "acción-reacción" de un proceso y las unidades en que se miden son de tiempo.

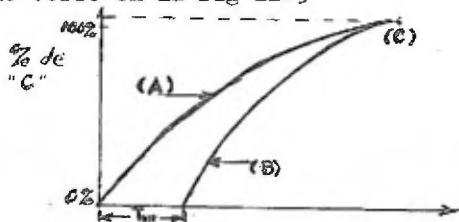
El tiempo muerto puede aparecer en cualquiera de las variables del proceso (presión temperatura, flujo, etc.). Muy frecuentemente, es responsable de muchos problemas que se presentan en el control de procesos químicos.

El tiempo muerto puede presentarse dentro o fuera del proceso, varios ejemplos pueden ilustrarlo: Se puede tener el flujo de una determinada corriente del proceso a través de una gran distancia; en esta caso habrá un tiempo muerto. Por ejemplo en un intercambiador de calor a contracorriente, la temperatura va cambiando a lo largo del tubo en forma casi constante; el tiempo que tarda en recorrerlo constituye un retraso en el cual el control automático no tiene efecto alguno.

Un ejemplo de tiempo muerto fuera del proceso es el siguiente: es muy frecuente encontrar retrasos en la transmisión de la señal entre el elemento final de control y el instrumento controlador. El tiempo perdido es una función de la distancia que los separa. Los retrasos no son considerados de importancia para distancias menores a 200 ft (654 m).

Un proceso en el cual se tiene una reacción química que se está llevando a cabo durante un cierto tiempo, depende de la cinética de la reacción. Pues bien, el tiempo que tarda en llevarse a cabo constituye un tiempo muerto.

En el control de la variable controlada durante un cierto período de tiempo va a producir un retraso en la acción. Esto puede verse en la fig II-9



- (A) Curva de reacción sin que exista tiempo muerto.
- (B) Curva de reacción con tiempo muerto.
- (C) Valor final que tiene la variable controlada.

Fig. II - 9

Conclusión: El tiempo muerto no interviene en el cambio de las características del proceso pero si afecta a la "velocidad de respuesta" de la variable controlada produciendo un retraso. Puede considerarse que uno de los atrasos más serios en el control automático lo constituye el tiempo muerto.

Capítulo III.- "Interrelación de las principales variables y su influencia en el proceso".

1) Estudio de los cambios de carga en el proceso.

Es una de las características más importantes en el estudio de la instrumentación de un proceso; se encuentra formando parte de éste, en forma de energía o materia. Dentro de la ingeniería química, se localiza en el estudio del balance de materiales y energía. Esto ayuda a especificar las condiciones que requiere el proceso, con el objeto de obtener el producto o productos con un máximo de eficiencia y la mejor calidad. Uno de los factores más importantes que afectan la calidad de un producto son los cambios de carga. Estas variaciones de flujo se van a obtener, cuando se esté efectuando el control en la válvula (elemento final de control), con el objeto de mantener a la variable controlada dentro de los límites que requiere el proceso.

En el siguiente capítulo, se verá la influencia que tienen los cambios de carga sobre la selección de los modos de control. Dos características muy importantes serán consideradas: la frecuencia con que se producen y la magnitud de estos cambios de carga. Estos factores van a influir en la estabilidad del proceso; ya que mientras más frecuentes y grandes sean las variaciones de energía o materia, mayor será su dificultad para el control.

Los cambios de carga son fundamentalmente función de la energía que requiere un proceso "a cualquier cambio de las variables asociadas con el balance del proceso le corresponde una variación de carga". En el balance de energía debe de efectuarse de tal manera que la energía suministrada sea igual a la energía aprovechada más las pérdidas de energía (por radiación, por ejemplo).

En el cálculo de la energía suministrada, deberá tomarse en cuenta las pérdidas que se tengan de calor; con el objeto de compensarlo y hacer que la variable controlada sea mantenida dentro del punto de control.

Con el objeto de hacer la cuantificación de la energía que requiere un proceso, debe ser tomado en cuenta lo siguiente:

1) La energía que requiere el proceso. Conocida como "demanda". Esta depende de la "carga" que va a ser procesada. Por

ejemplo, la variación del flujo de una solución de dicromato de potasio que va a ser secada a una determinada temperatura. Un aumento en el flujo de la solución requerirá una mayor demanda de combustible en los quemadores, para mantener a la temperatura en el punto deseado.

2) Las condiciones del proceso deberán ser calculadas para las situaciones más drásticas. Por ejemplo, si se decide cambiar el punto de control a una temperatura más elevada; entonces la cantidad de calor que requerirá el proceso deberá ser aumentada con el objeto de mantener el balance del proceso.

3) Cualquier forma en que se pierda calor, deberá ser considerado: Por ejemplo:

- Al abrir la puerta del horno.

- Las pérdidas por radiación de todo el equipo. (Esta deberá tomar en cuenta el área de transferencia de calor y la temperatura a la que se va a operar).

2) Constante de tiempo.

También conocida con el nombre de "coeficiente de retraso". Es el resultado de la combinación de resistencias y capacitancias de un proceso (R_c). Se mide en unidades de tiempo; y las diferentes formas en que se puede tener son:

a) En un circuito eléctrico:

$$R \frac{\text{volt}}{\text{ampere}} \cdot C \frac{\text{Cbs}}{\text{VOLT}} = T_c (\text{seg.})$$

b) En un sistema hidráulico:

$$R \frac{\text{psi}}{\text{ft}^3/\text{min}} \cdot C \frac{\text{ft}^3}{\text{psi}} = T_c (\text{min.})$$

c) En un proceso térmico:

$$R \frac{\text{° F}}{\text{BTU/min}} \cdot C \frac{\text{BTU}}{\text{° F}} = T_c (\text{min.});$$

El conocimiento del "coeficiente de retraso o constante de tiempo", resulta muy importante, porque revela algunas características del sistema. Cuando se tienen pequeñas resistencias y capacitancias en el proceso se obtienen también constantes de tiempo pequeñas y, por lo tanto una alta velocidad de respuesta. (Existe una relación inversa entre la constante de tiempo y la velocidad de respuesta). Un criterio general que puede ser de ayuda es que cuando se tiene una velocidad de respuesta muy lenta; el control de la variable es muy difícil.

El rango de oscilación de la variable controlada es de 0% a 100%. Para cuando se tiene ésta en 100% representará un cambio total de la variable. Pues bien, el tiempo que la variable controlada necesita para llegar al 62.3% del cambio total, es lo que se llama "coeficiente de retraso o constante de tiempo". En la Fig. III-1 se muestran diferentes curvas.

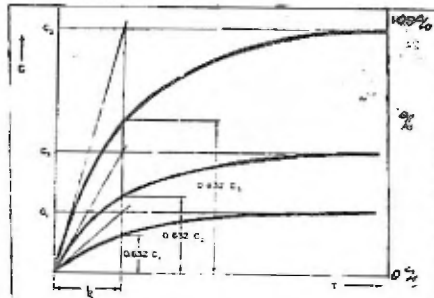


Fig. III-1

3) Ganancia.

En el proceso existe una íntima relación entre la variable controlada y el por ciento de abertura que tiene la válvula. A la relación que existe entre el cambio total o incremento de la variable controlada (AC) por unidad de acción correctiva del elemento final de control se le llama GANANCIA. La expresión algebraíca es:

$$K = \frac{AC}{AX}$$

Donde:

K = ganancia

AC = incremento de la variable controlada

ΔT = unidad de longitud de abertura de la válvula

De la figura III-1 se pueden ver las pendientes de cada una de las curvas. Representan el cambio de la variable controlada con respecto al tiempo para un punto dado. A esta relación se le llama "VELOCIDAD de respuesta" del PROCESO. Su expresión algebraica es :

$$N = \frac{AC}{\Delta T} \left[\frac{\text{unids}}{\text{min}} \right]$$

Donde:

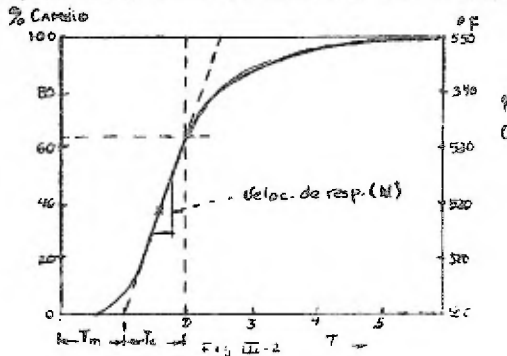
N = velocidad de respuesta

ΔT = incremento de tiempo

4) Respuesta dinámica del proceso.

Este estudio tiene como finalidad el hacer un análisis del proceso con el objeto de predecir la operación y estabilidad del sistema. En él se van a tener Capacitancias, resistencias, tiempos muertos y sus diversas combinaciones.

Calculemos las siguientes relaciones; para un cambio de temperatura; como se muestra en la Fig. III-2



Calcular:

a) El incremento total de la variable controlada:

$$K^{\circ} = C_f - C_i = 550 = 50^{\circ} \text{ (cambio total)}$$

b) Si el por ciento de abertura de la válvula es del 2% ;
ésto es equivalente a 0.1 in ; entonces podremos calcular la

GANANCIA:

$$K = \frac{50^{\circ}\text{F}}{0.1 \text{ in}} = 500 \frac{\text{oF}}{\text{in}}$$

c) De la Fig. III-2 podremos calcular la "velocidad de
respuesta del proceso". (En el punto de inflexión)

$$N = \frac{525 - 515}{1.72 - 1.40} = \frac{10^{\circ}\text{F}}{0.32 \text{ min}} = 31 \frac{\text{oF}}{\text{min}}$$

d) Conocida la velocidad de respuestas y la abertura de
la válvula; podemos calcular la "velocidad de respuesta" por
unidad de cambio del elemento final de control.

$$V_r = \frac{31^{\circ}\text{F/min}}{0.1 \text{ in}} = 310 \frac{\text{oF}}{\text{min in}}$$

e) El tiempo muerto, hace que la curva de reacción no -
empiece en el origen; ver la Fig. II-2

$$T_m = 1 \text{ min}$$

f) El coeficiente de retraso o constante de tiempo es
igual a:

De la figura, podemos obtener que para cuando el por
ciento de cambio es igual a 68.2% ; la constante de tiempo es
igual a 1 min .

∴ $T_c = 1 \text{ min}$ (Sin incluir al tiempo muerto)

g) El por ciento de retraso es igual a:

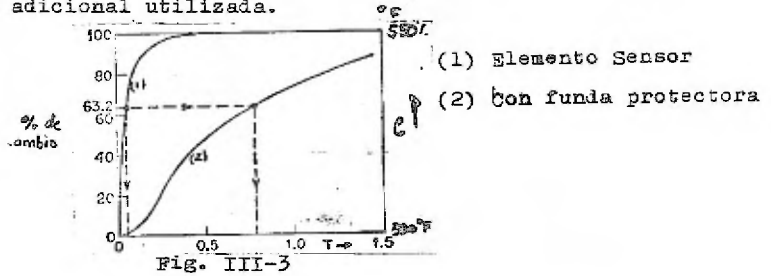
$$\% R = \frac{N.T.D}{AC_{total}} = \frac{(31^\circ\text{F}/\text{min})(1 \text{ min})}{(50^\circ\text{F})} = 0.62$$

Un ejemplo que ilustra el efecto que tiene la constante de tiempo sobre la velocidad de respuesta es el siguiente:

La temperatura es una de las variables más importantes que pueden ser encontradas en una planta química. Esta es utilizada para hacer mediciones en la mayoría de los procesos. El principal problema que se presenta es la regulación del flujo de calor. Para este caso, el tiempo muerto es muy grande y la velocidad de respuesta pequeña. Esto puede verse claramente, en procesos de calentamiento de fluido en columnas de destilación.

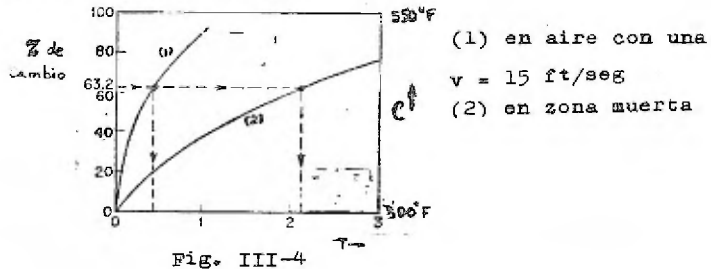
En la medición de temperatura se utilizan elementos sensores que generalmente van protegidos por fundas, con el objeto de aumentar la vida media del elemento. Sin embargo, - al utilizar la funda, se va a producir un "retraso adicional" en la detección de la variable controlada, debido a que entre la funda y el elemento termal va a quedar atrapada una determinada cantidad de aire, en el cual se va a formar una película delgada que va a oponer resistencia. Esta va a introducir un tiempo muerto que va hacer que la "variable controlada" reaccione más lentamente. En aquellos procesos en los cuales se -- tiene una respuesta muy rápida se tendrá que hacer un análisis del efecto que producirá el utilizar un termopozo; más adelante se verá el criterio para seleccionarlo.

La figura III-3, muestra una típica "respuesta". En ella se puede ver el aumento de la "constante de tiempo" debido a la funda adicional utilizada.



Cuando el fluido que se está midiendo no es muy corrosivo y se requiere una "rápida respuesta" de la variable controlada, entonces podrá utilizarse el elemento sin funda protectora. En caso de que no pueda hacerse ésto, porque el fluido presenta características muy corrosivas, entonces deberá tomarse en cuenta "la colocación" del elemento sensor. Efecto que tiene la "colocación del elemento" sobre la "velocidad de respuesta" es el siguiente:

Comparando "la respuesta" que se tiene cuando un bulbo se encuentra localizado en una zona muerta y otro que se encuentra ubicado en donde haya una gran turbulencia es notable: En la Fig. III-4 puede apreciarse este efecto:



5) Procesos con autoregulación y sin autoregulación:

a) Con autoregulación: (μ)

"Es la tendencia del sistema a regular su propio nivel de energía potencial". (es una característica íntima del proceso).

Se llama autoregulación de un proceso a la capacidad de regular el flujo por medio de una resistencia (una válvula, por ejemplo); la cual controla el gradiente de la variable controlada (Por ejemplo: un gradiente hidráulico, en el cual el flujo de salida depende de la cabeza). Ver figura III-5 (a)

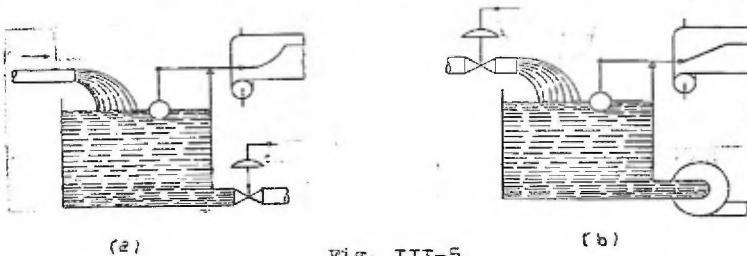
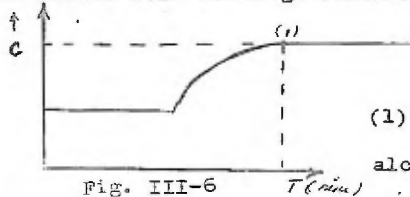


Fig. III-5

El líquido entra al tanque con un flujo constante. La velocidad a la cual el líquido va a salir depende del nivel que tenga el líquido. En la figura III-6 se puede ver que a cada cambio de posición de la válvula le corresponde una variación de la variable controlada. "A la habilidad para alcanzar el balance entre la cabeza hidráulica y la variación de flujo, es lo que se conoce como autoregulación".



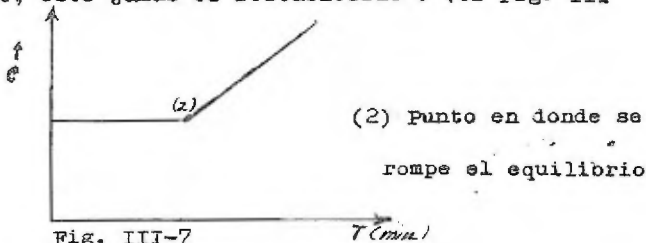
(1) punto en donde se alcanza el equilibrio.

Fig. III-6

b) Proceso sin autoregulación:

Para este proceso no habrá control de la energía potencial almacenada. El flujo de materia sale en forma constante, como se muestra en la Fig. III-5(b), sin que se tenga control sobre el mismo. La "velocidad de respuesta" del sistema - queda determinada por la relación de cambio de la variable controlada ($C_2 - C_1 = K^v$) y el intervalo de tiempo en el cual se - produjo ese cambio.

"En un proceso sin autoregulación, una vez que se - rompe el equilibrio, éste jamás es restablecido". Ver Fig. III 5(6)



6) Relación entre las variables y el proceso.

Muchos procesos tienen un alto grado de autoregulación. Pero en procesos en los cuales se tiene poca autoregulación y además una combinación de retrasos, los problemas para obtener un buen control automático resultan demasiado complejos. De una manera general, tanto en los procesos de muy rápida respuesta como en los de lenta velocidad, es donde se tiene el mayor grado de dificultad. Lo anterior puede ser ilustrado de la siguiente manera:

a) Los que tienen una rápida respuesta:

- Control de presión para variación de flujo en líquidos.

- Control en la presión de descarga en bombas de desplazamiento positivo, en la cual se tiene un ajuste en la velocidad de la bomba, donde no puede haber acumulación.

b) Procesos en los cuales hay grandes retrasos:

- Control en destilación.- cualquier variación en la alimentación a la columna de destilación no será detectada en forma inmediata en la cabeza del producto.

- Reacción química en recipientes, en los cuales se toma cierto tiempo en llevarse a cabo la reacción.

Capítulo IV.- "Modos del control automático".

Principio básico: "Detectar a la variable controlada del proceso, después compararla con el valor deseado (un valor previamente fijado) y finalmente corregir cualquier variación que exista entre las dos. Esta acción correctiva va a mantener el balance con el proceso".

Los modos de control son:

- 1) Dos posiciones
- 2) Flotante de velocidad simple
- 3) Proporcional
- 4) Proporcional con reajuste. (De dos modos)
- 5) Proporcional con reajuste y derivativa. (De tres modos)

Las formas en que puede ser logrado el "control automático" son muy variados; se pueden incluir medios mecánicos, neumáticos, eléctricos, electrónicos, técnicas de computadoras analógicas y digitales.

Los métodos empleados son experimentales y /o teóricos, por medio de los cuales nos ayudan a entender como trabajan y bajo qué condiciones los aparatos de control pueden funcionar con un máximo de eficiencia. Desafortunadamente, no es muy fácil de terminar, cuando un controlador está trabajando con un máximo de eficiencia.

Existen una gran cantidad de modelos matemáticos que pueden ser empleados para predecir el "funcionamiento ideal de un controlador. Sin embargo, el cálculo de la respuesta del sistema controlado, es generalmente difícil debido a la gran complejidad de resolver ecuaciones diferenciales de orden "n". Además, una solución de esta ecuación es en la mayoría de los casos insuficiente debido a que se tienen que analizar diferentes parámetros del sistema. Ante esta situación una de las maneras de resolverlo es haciendo uso de las máquinas computadoras.

Otra forma en que puede lograrse el ajuste en el control es por medio del "método de "prueba y error" y /o con la -

ayuda de una persona instrumentista que tenga una gran experiencia.

Un criterio muy importante que le sirve al ingeniero para resolver los problemas de control es haciendo un análisis de los "retrasos" (lags) en las diferentes partes del proceso.

1) Control de dos posiciones.

En este modo de control existen dos tipos:

- { a) Control de encendido y apagado (on-off)
- { b) Control con banda diferencial.

a) Control encendido-apagado: Es muy utilizado; tiene un punto de control (punto de ajuste), por medio del cual la variable es controlada (temperatura, presión, nivel, etc.). En la figura IV-1, se ve que tan pronto como la "variable controlada" excede del "punto de control", la válvula es cerrada y permanece en esa posición hasta que la variable vuelve a caer debajo del punto de control; entonces la válvula se abrirá totalmente. La variable controlada permanecerá oscilando con respecto al punto de control con una amplitud y una frecuencia que dependerá de la capacidad y el tiempo de respuesta del proceso. Si los retrasos en el proceso son muy pequeños entonces la curva tenderá a ser una línea recta; en este caso la frecuencia de cerrar-abrir será muy alta. Para este tipo de control se utiliza un termostato.

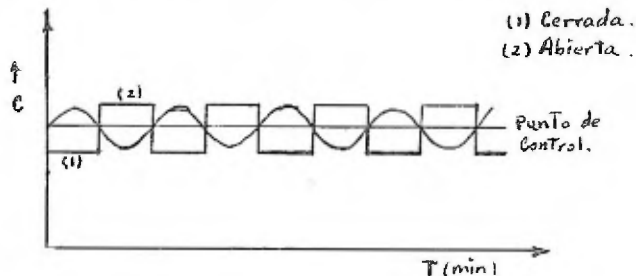
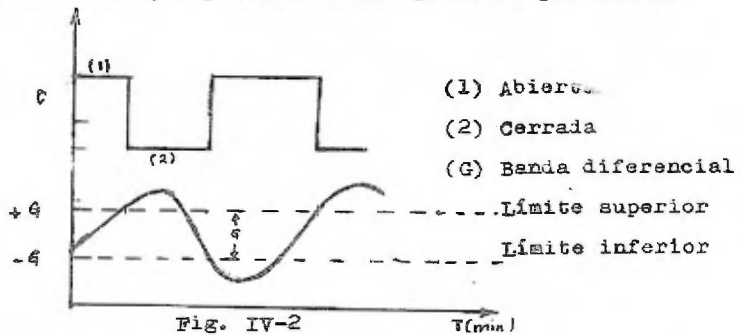


Fig. IV-1

B) Control con banda diferencial; Utilizado en procesos en los cuales se tiene una "frecuencia Alta" en el cerrado-abertura de la válvula ocasionando que el horno, por ejemplo, se apague y se prenda con demasiada frecuencia. Para este control se tiene un límite alto y un límite bajo; Fig. IV-2, en el cual la variable va a oscilar, de tal manera, que cuando ésta exceda el límite superior, la válvula se cerrará y permanecerá en esa posición hasta que la variable rebese el límite inferior, entonces la válvula se abre, repitiéndose la operación por ciclos.



α) Efecto que tiene la velocidad de respuesta; En la fig. IV-3 pueden apreciarse las pendientes "A" y "B" correspondientes a dos curvas de reacción.

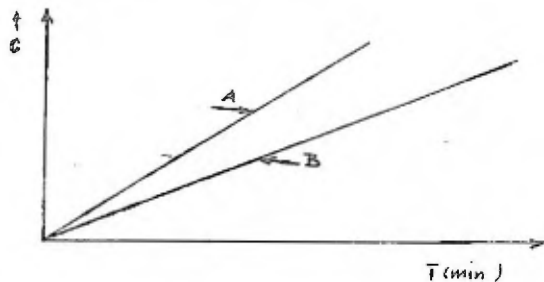


Fig. IV-3

De la figura vemos que la curva "A" tiene una velocidad de respuesta más rápida que la curva "B". Por lo tanto, su reacción es más rápida (curva A), el efecto que producirá es - que la válvula se va a estar abriendo y cerrando con mayor frecuencia. Esto puede verse en la Fig. IV-4

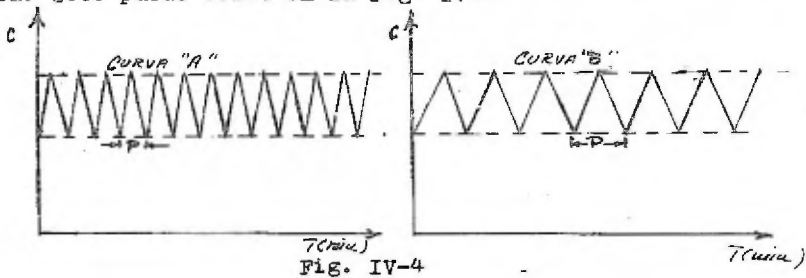


Fig. IV-4

B) Efecto que tiene el tiempo muerto:

Debido al retraso que se tiene en aplicar una acción correctiva sobre la variable controlada (por existir tiempo muerto); ésta se saldrá de la banda diferencial. En la Fig. IV-5; se observa este efecto en el cual la amplitud y el período son aumentados.

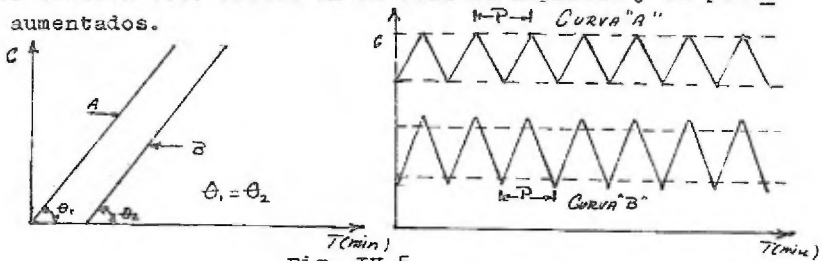


Fig. IV-5

De donde: Las rectas "A" y "B" representan las pendientes de las curvas "A" y "B"; la recta "A" parte del origen porque no tiene tiempo muerto.

f) Cambios de carga; es recomendable tener pequeños cambios de carga y además éstos no deben ser muy frecuentes.

Diagrama de bloques y su representación de un Proceso.-

Estudio de un proceso, en el cual se utiliza control de dos posiciones con banda diferencial. En la figura IV-6 se puede ver un tanque, con su válvula de control y una bomba a la descarga con un gasto a la salida constante.

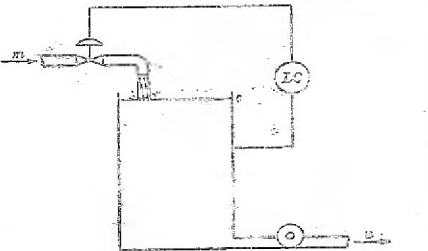
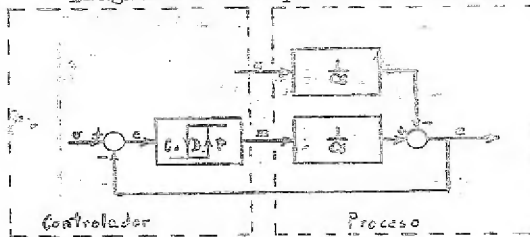


Fig. IV-6.

El control de nivel hace que la válvula se abra cuando se tenga una altura baja (límite bajo) y se cierre cuando el nivel llegue al límite superior. El proceso no es autoregurable por tener una descarga constante, independiente de la cabeza hidráulica.

Diagrama de bloques del sistema:



Donde :

C.D.P. = Control dos posiciones

S = Representa un operador diferencial $\frac{d}{dt}$

$$\therefore Gs = -\frac{dG}{dt}$$

Del diagrama de bloques obtenemos:

1) Ecuación del proceso.-

$$C = \frac{1}{Cs} m - \frac{1}{Cs} u \quad \text{----- (IV - 1)}$$

Donde:

c = variable controlada (cabeza líquido)

u = variable a la salida (flujo de la bomba)

C = capacitación tanque (Area)

La desviación (e error) del control está dada por:

$$e = c + v \quad \text{----- (IV - 2)}$$

Donde:

v = punto de control (punto de ajuste)

Estas desviaciones (e) son provocadas por los retrasos que tiene el sistema; principalmente por el tiempo muerto.

En la figura IV - 5, se observa este efecto, en el cual la amplitud es aumentada haciendo que la variable controlada se salga de la banda diferencial ($\pm G$). Su ecuación matemática es la siguiente(1) :

$$A = G + \frac{M \tau \omega}{2 C} \quad \text{----- (IV-3)}$$

Donde:

A = amplitud de oscilación

M = capacitancia del tanque

De la ecuación (IV-3) se ve que la amplitud de oscilación va a estar afectada por el valor que tenga la variable manipulada, la capacitancia y por supuesto el tiempo muerto.

El período de oscilación⁽¹⁾ de este proceso puede ser calculada conociendo la amplitud, la velocidad de cambio de la variable controlada y los cambios de carga.

$$P = G + \frac{M T_m}{C} \frac{2HC}{U(M-U)} \text{ ----- IV- 4}$$

P = Período de oscilación

U = Cambios de carga

Conclusión: Es deseable tener amplitudes pequeñas y períodos largos de oscilación; ya que esto va a permitir un mejor control de la variable controlada ("c") y además que la válvula de control no va a estar cerrándose-abriéndose con demasiada frecuencia.

2) Control flotante.

Característica fundamental; el elemento final de control se encuentra siempre ocupando posiciones intermedias, dependiendo de la "desviación" que tenga la variable controlada con respecto al punto de control y en el cual el elemento final cambia su posición en el sentido que contrarreste esa desviación. Al igual que el control de dos posiciones, el control flotante es de naturaleza cíclica, como se aprecia en la Fig. IV-7

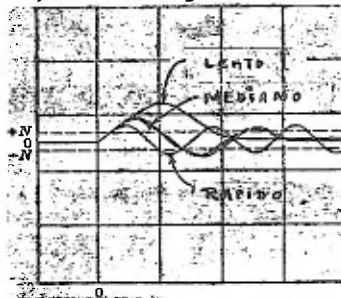


Fig. IV-7

El control tiene una "zona neutra", (si no la tuviera entonces funcionaría como si fuera "contros 2 posiciones"). Esta zona permite reducir las oscilaciones de la variable controlada, haciendo que la válvula de control no cambie de posición continuamente.

Criterio de selección para el control flotante:

- 1) El proceso deberá ser autoregulable.
- 2) La velocidad de respuesta del proceso deberá ser tan alta como sea posible. De esta manera el control de la variable controlada será más efectivo.
- 3) Los tiempos muertos y retrasos deberán ser pequeños. De esta manera la velocidad de respuestas será alta. El tener retrasos en un proceso ocasiona grandes períodos de oscilación con aumento constante en la amplitud.
- 4) Se podrán tener "cambios de carga" siempre y cuando sean lentos. Esto va a depender de la velocidad con que se mueva la válvula de control; si ésta se mueve muy rápido los "cambios de carga" también lo serán ocasionando grandes oscilaciones. (Esto equivale a la pérdida de control de la variable controlada). Por lo tanto, la abertura de la válvula deberá hacerse en forma gradual.

Un ejemplo de un proceso en el cual la capacitancia es nula, (el almacenamiento de energía es igual a cero), es el flujo de líquido a través de una tubería. Esto se muestra en la Fig. IV-8 .

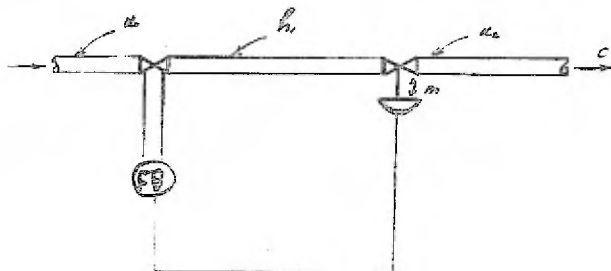
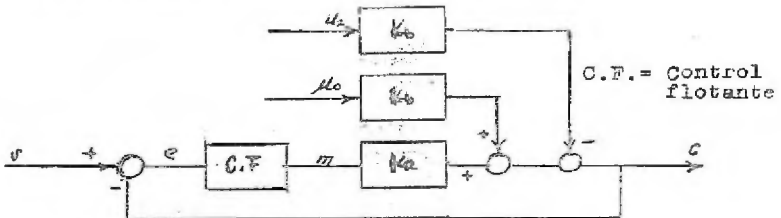


Fig. IV-8

El control de flujo (FC) ajusta a la válvula de control en serie con el medidor de flujo, de tal manera que se tenga una diferencial de presión ($U_0 - U_1$) a través del medidor. Como se observa en la Fig. IV-7, si la variable controlada se mueve fuera de la "zona neutra" entonces la válvula de control empezará a cerrarse a velocidad constante y la variable controlada regresará a la zona neutra.

El "diagrama de bloques" que representa al proceso de la Fig. IV-8, queda:



Del diagrama de bloques obtenemos:

La ecuación del proceso.-

$$c = K_a m + K_b (U_0 - U_2) \quad \text{----- (IV-5)}$$

donde:

U_0, U_2 = Constituyen los cambios de carga

K_a, K_b = ganancias del proceso

Cualquier cambio de U_0 ó U_2 provoca una variación de la variable controlada (c) haciendo que ésta se salga de la zona neutra, provocando una desviación igual a:

$$e = r - c \quad \text{----- (IV-6)}$$

3) Control proporcional

También conocido como control modulante. Se llama proporcional por la relación que existe entre la variable controlada y la abertura que debe tener la válvula de control. A un valor de la variable controlada le corresponde una posición (%)

(% de abertura) de la válvula. En la Fig. IV-9, se puede ver un control proporcional cuya gama de acción va de 0 a 200°C y cuyo "punto de ajuste" (set point) está colocado en 150°C

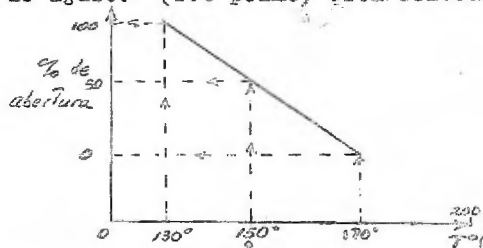


Fig. IV-9

Se puede apreciar que cuando la variable controlada está en 170°C la válvula está completamente cerrada y cuando es está en 130°C la válvula está completamente abierta.

Temperatura	% abertura	Posición válvula
170°C	0.0	(cerrada)
150°C	50	
130°C	100	(abierta)

Los parámetros más importantes en este tipo de control son:

- a) Banda proporcional (BP)
- b) Ganancia del controlador (Kc)

a) La banda proporcional se mide como un porcentaje de la gama o amplitud del controlador. Dependiendo del ajuste de la bancia proporcional, se tendrá una mayor o menor estabilidad del sistema. Cuando la banda proporcional es demasiado angosta se producen demasiadas oscilaciones con aumento de amplitud y frecuencia. Cuando la banda es muy ancha se produce una desviación excesiva debido a que el movimiento de la válvula es demasiado lento.

- b) La ganancia del controlador, también conocido como -

"sensibilidad", es una constante que depende del tiempo muerto y los retrasos del proceso.

La banda proporcional se calcula como una función de la "ganancia del controlador", de acuerdo con la siguiente relación:

$$\% S = \frac{(\text{Rango de trabajo}^{(*)}) (100)}{(\text{ganancia controlador}) (\text{Gama del controlador})} \quad \text{--- (IV-7)}$$

De acuerdo con el ejemplo anterior; la gama del controlador es igual a: $200 - 0 = 200^{\circ}\text{C}$ y el rango de trabajo :
(Span) = $170 - 130 = 40^{\circ}\text{C}$

Span^(*) = Rango de operación en el cual el instrumento va a trabajar.

De la ecuación (IV-7), puede verse que la "Banda proporcional" es inversamente proporcional a la "ganancia del controlador". Por lo tanto, si aumentamos la ganancia (K_c) disminuimos la banda proporcional aumentando así la inestabilidad del sistema.

La ecuación del control proporcional está dado por:

$$c = K_c e \quad \text{----- (IV-8)}$$

Donde:

c = variable controlada (v.c.)

e = desviación de la v.c. con respecto al punto de ajuste

K_c = ganancia del controlador

Efecto que producen las principales características del proceso sobre el control proporcional. (Criterio de Selección).

1) Cuando se tenga un proceso con una "velocidad de respuesta "muy alta"; entonces el ajuste de la banda proporcional ($S\%$) deberá ser ancho y la ganancia del controlador tan pequeña como sea posible. Para este tipo de control no es recomendable una velocidad de respuesta muy grande ya que al aumentar a la banda proporcional disminuye la velocidad a la que se va a mover la válvula de control haciéndose menos efectivo su control sobre la variable controlada.

2) Los tiempos muertos y retrasos en el proceso no deberán ser muy grandes.

3) Cambios de carga; es la característica más importante ya que afecta al control proporcional en forma definitiva. Cualquier variación de la carga produce una desviación permanente de la variable controlada sobre su punto de ajuste (o sea que la variable controlada no regresa a su punto de control). Esto puede verse en la Fig. IV-10).

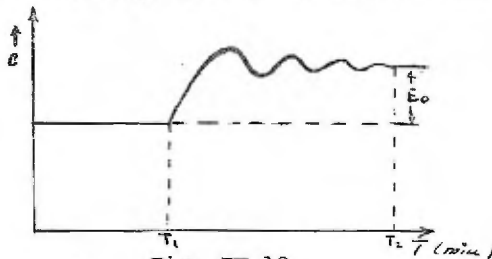


Fig. IV-10

Donde:

En el tiempo " T_1 " se produce un cambio de carga, afectando a la variable controlada "e" originándose una desviación permanente igual a " E_o ".

Por lo tanto, para este tipo de control se recomiendan "pequeñas" variaciones de carga, de esta manera la desviación (offset) " E_o " es minimizada. Esta "desviación" es proporcional a la "banda proporcional" (S) (mientras mayor sea la banda proporcional mayor será la desviación producida).

En el estudio que Eckman⁽¹⁾ hizo del control proporcional, establece una ecuación de la desviación (E_o) como una función de los cambios de carga, la resistencia del proceso y la ganancia del controlador.

$$E_o = \frac{-U}{RK_c + 1} \quad \text{---- (IV-9)}$$

Donde:

- E_o = Desviación permanente
- U = Cambios de carga
- R = Resistencia
- K_c = ganancia proporcional

La ecuación (IV-9) fue obtenida para el proceso representado en la Fig. IV-11. El sistema tiene su control de nivel como variable del proceso, su válvula de control a la entrada y una válvula con una resistencia "R" a la salida del tanque.

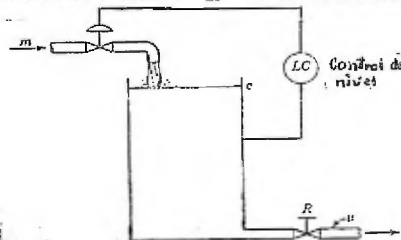
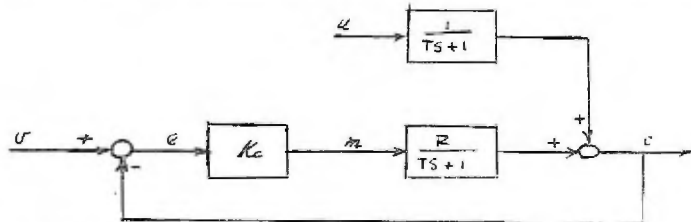


Fig. IV-11

El "diagrama de bloques" del proceso es el siguiente:



La ecuación del proceso puede ser obtenida:

$$c = \frac{R}{T_c S + 1} m + \frac{1}{T_c S + 1} u \quad \text{---- (IV-10)}$$

Donde:

- S = operador diferencial (d/dt)
- c = variable controlada (el nivel del tanque)
- m = variable manipulada (flujo de entrada)
- u = cambio de variable
- R = resistencia de la válvula
- T_c = constante de tiempo

La ecuación (IV-8) es obtenida del diagrama de bloques; (Ecuación de control proporcional).

$$m = K_c e \quad \text{---- (IV-8)}$$

En la Fig. IV-10, se observa que la variable controlada después de cierto tiempo (T₂), llega a "estabilizarse". Para este proceso, Eckman encontró la siguiente expresión:

$$T_2 = \frac{4RA}{RK_c + 1} = \frac{4T_c}{\frac{R}{K_c} + 1} \quad \text{---- (IV-11)}$$

Donde: T₂ = Tiempo de estabilización

De la ecuación IV-11, se observa que el tiempo en que la variable "c" alcanza la estabilidad es aproximadamente 4 veces la constante de tiempo.

4) Control proporcional con reajuste.

También conocido como control de dos modos. Es probablemente el más versátil de los controles y por ende uno de los más utilizados. Este control es una combinación del control flotante y proporcional; en el cual el elemento final de control ocupa posiciones intermedias. La variable que se agrega en este control es el tiempo de reajuste o tiempo integral. Este control se encuentra representado por medio de la ecuación:

$$m = \underbrace{K_c e + \left(\frac{K_c}{T_r}\right) \int e \, dt}_{\text{reajuste}} \quad \text{---- (IV-12)}$$

$$\therefore m = K_c \left[1 + \frac{1}{T_r} \int dt \right] e \quad \text{--- (IV-12')}$$

Donde:

m = variable manipulada

(Es una función de la abertura de la válvula)

K_c = ganancia del controlador

T_r = tiempo de reajuste o integral

e = desviación de la variable "c"
con respecto al punto de ajuste.

Función:

Se ha visto que cuando se tiene un "cambio de carga" en el proceso, éste origina una desviación (offset); la cual no puede ser modificada a menos que exista el tiempo de reajuste " T_r "

En este control se tienen dos parámetros:

- Ganancia del Controlador " K_c " o Banda proporcional "S"
- Tiempo de reajuste " T_r "

Dependiendo del valor que tengan cada uno de ellos se obtendrá una mayor o menor estabilidad en el sistema. Esto es, si varío la banda proporcional y mantengo constante el tiempo de reajuste; como sucede en la Fig.(IV-12); se tiene lo siguiente:

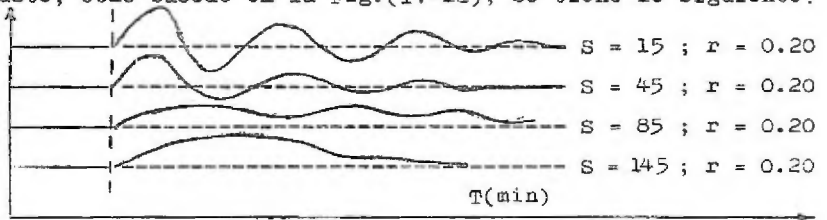


Fig. IV-12

- Al existir el reajuste la variable controlada es regresada a su punto de control.

- Al disminuir la banda proporcional se producen demasiadas oscilaciones. El tiempo de estabilización resulta ser muy grande.

- Cuando se tiene una banda proporcional muy ancha, la respuesta se hace muy lenta.

La banda proporcional óptima resulta cuando $S = 45$. En todos los casos la desviación (E_0) tiende a cero; ($r = 0.20$) gracias al tiempo de reajuste.

Ahora, si mantengo constante la banda proporcional y varío el tiempo de reajuste; como en la Fig. IV-13.

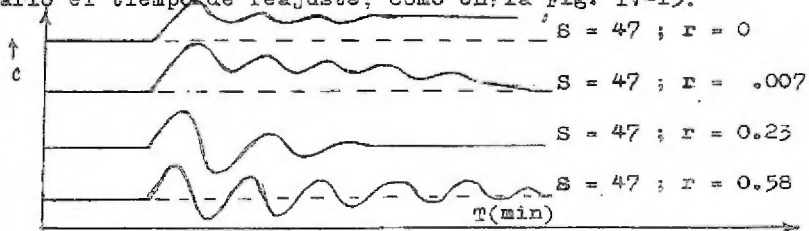


Fig. IV-13

- Cuando $S = 47$ y $r = 0$ equivale a control proporcional solamente

- Conforme el reajuste es aumentado las oscilaciones también son aumentadas; provocando inestabilidad en el sistema.

- Cuando $S = 47$ y $r = 0.23$; se observa un amortiguamiento; el cual hace que la variable controlada se acerque al "punto de ajuste" con mayor rapidez.

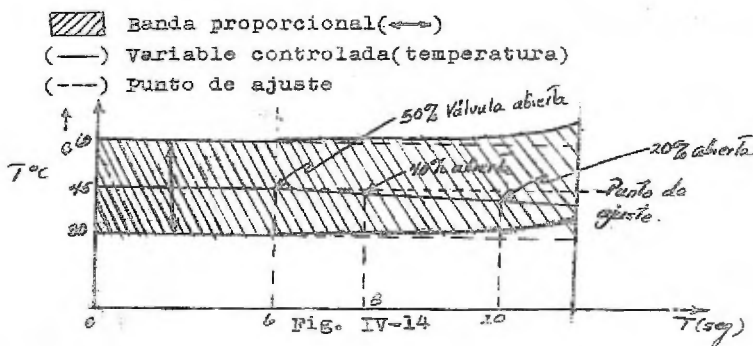
Efectos de las características de un proceso sobre el control de dos modos:

1) Velocidad de respuesta; puede trabajar bajo cualquier velocidad. No existe restricción alguna.

2) Los tiempos muertos y retrasos deben ser pequeños. (Así podrá tenerse una banda proporcional angosta y la respuesta con reajuste será más rápida).

3) Cambios de carga; se puede lograr su control bajo cualquier variación de carga, siempre y cuando sean lentos. La manera como se contrarrestan los cambios de carga es la siguiente:

"A cualquier variación de carga que se tenga, la banda proporcional se mueve en forma automática hacia arriba o hacia abajo de la escala del controlador hasta obtener la abertura de la válvula requerida, de tal manera que pueda regresar la variable (c) a su punto de control". En la Fig. IV-14, se puede ver cómo se efectúa este reajuste:



A los 6 segs. la temperatura comienza a desviarse de su punto de ajuste; entonces la banda proporcional se mueve en el sentido que contrarreste a la temperatura, disminuyendo la abertura de la válvula (disminuyendo el gasto del agente de control).

Tomando en cuenta al proceso representado en la Fig. IV-8, para efectuar el sistema de control en forma proporcional con reajuste, se tiene lo siguiente:

La parte del proceso permanece exactamente igual:

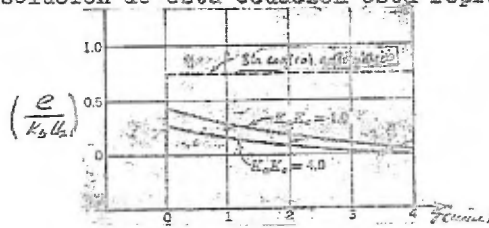
K_a, K_b = ganancias del proceso

U_0, U_2 = cambios de carga

Tomando un valor U_0 y U_2 para un cambio (step change) determinado y manteniendo constante el punto de ajuste; obtenemos la ecuación diferencial;

$$T \dot{e} + e = 0 \quad (\text{IV-17})$$

La solución de esta ecuación está representada en la Fig. IV-15)



Se ve pues, que debido al tiempo de reajuste, la desviación tiende a cero.

Conforme un proceso se va haciendo más complejo (con capacitancias; un determinado número de tanques, con resistencias y tiempos muertos); su estudio en forma matemática resulta muy difícil, apareciendo ecuaciones diferenciales complejas. En el siguiente capítulo veremos varios métodos que nos ayudan a analizar a los principales parámetros de los modos de control en forma más sencilla y con resultados muy satisfactorios.

5) Control proporcional con reajuste y/o derivativa.

Las formas en que puede existir este tipo de control son:

- Control proporcional con derivativa
- Control proporcional con reajuste y derivativa (Control de 3 modos)

Función:

La acción derivativa proporciona una relación continua entre la velocidad de cambio de la variable "c" y la válvula de control. Este modo de control produce una acción correctiva proporcional a la derivada de la desviación (e'). De esta manera la válvula de control se mueve más allá de lo que lo hacía con el "control de dos modos".

Por medio del tiempo con derivativa " T_d ", se logra que un sistema llegue a la estabilidad más rápidamente de como lo hacía con las anteriores formas de control.

La ecuación que representa esta(s) forma(s) de control es la siguiente:

$$m = K_c e + \left(\frac{K_c}{T_I} \right) \int e dt + K_c T_d \frac{de}{dt} \quad \text{----- (IV-18)}$$

Donde:

$\frac{de}{dt}$ es la variación de la desviación con respecto al tiempo; $\frac{de}{dt}$ la cual es proporcional a la acción correctiva que efectúa el control.

Los parámetros que se tienen son;

- a) Ganancia del controlador " K_c " o banda proporcional "S"
- b) Tiempo de reajuste " T_I "
- c) Tiempo con derivativa " T_d "

Las combinaciones que se pueden tener son muchas; para cada una de estas combinaciones se tienen diferentes soluciones que hacen que el sistema llegue a condiciones estables.

"Control proporcional con derivativa"

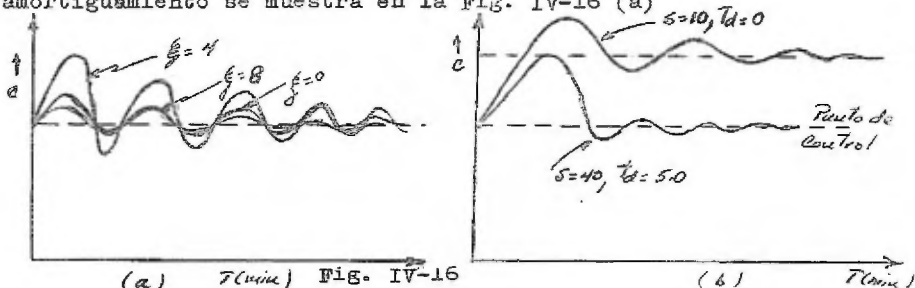
Si eliminamos el tiempo de reajuste, la ecuación (IV-18) se convierte en:

$$m = K_c (1 + T_d S) e \quad \text{----- (IV-19)}$$

Donde:

S = operador diferencial (d/dT)

Los parámetros que afectan a la variable manipulada son la ganancia del controlador " K_c " y el tiempo con derivativa. Si aumentamos la ganancia, aumentarán las oscilaciones y la inestabilidad del sistema. En este caso, conviene dar un valor al tiempo con derivativa. Cuando se introduce la acción derivativa la relación de amortiguamiento (damping ratio) es aumentada, haciendo que las oscilaciones disminuyan. El efecto de amortiguamiento se muestra en la Fig. IV-16 (a)



En la Fig. IV-16(b), se observa que cuando $T_d = 0$, se produce una desviación permanente (E_s). Cuando aparece el tiempo con derivativa $T_d = 5.0$ y la banda proporcional $S = 40$, la desviación (offset) es minimizada y el tiempo de estabilización reducido; obteniéndose un rápida respuesta.

Limitaciones: (Con respecto a las características del proceso).

- 1) Velocidad de respuesta; ésta deberá ser lenta o moderada.
- 2) Tiempos muertos y retrasos; debido principalmente a la acción derivativa, se puede decir que no existe restricción alguna en la cantidad y número de retrasos y tiempos muertos que se encuentren presentes en el proceso.

3) Cambios de carga; su control se puede efectuar más fácilmente si las variaciones de carga son pequeñas. En caso de que estos cambios sean muy rápidos entonces deberá hacerse un máximo ajuste al tiempo con derivativa, de tal manera que la acción correctiva empiece antes de que la desviación se haya hecho excesiva. Algunas veces, es posible - reducir a un valor pequeño la "desviación" que no es necesario utilizar el control con reajuste. Esto puede verse en la Fig. (IV-16-b).

"Control proporcional con reajuste y derivativa" (Tres modos).

Esta forma de control es la más compleja debido al gran número de combinaciones que se pueden tener de los parámetros: " K_C ", " T_I " y " T_D ". La expresión que relaciona este control es la ecuación IV-18

Quando un sistema o proceso presenta una gran inestabilidad, con grandes oscilaciones, teniendo como consecuencia una gran dificultad para obtener el control de la variable "c", es necesario utilizar este modo de control. Este va a contrarrestar el efecto que tienen los tiempos muertos y los retrasos, disminuyendo el período de oscilaciones y la amplitud aumentando la estabilidad.

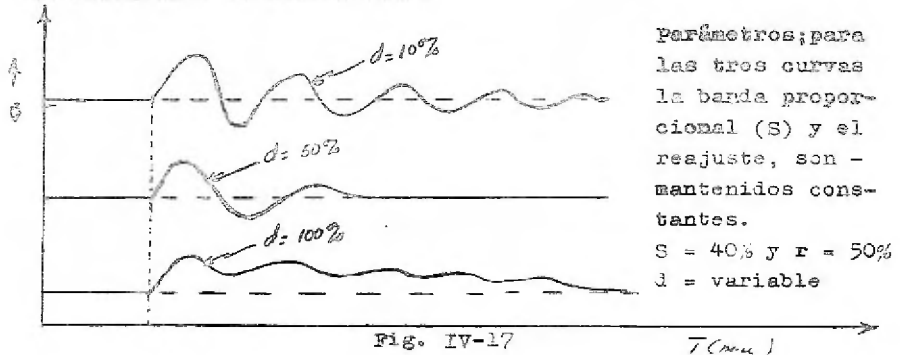


Fig. IV-17

T (min)

De la Fig. IV-17, se observa:

- Cuando la acción derivativa es muy pequeña se tienen grandes oscilaciones y un tiempo de estabilización largo. (d=10%)
- Cuando se hace la acción derivativa muy grande, se obtiene una desviación (offset) "temporal"; haciendo que el control de la variable "c" se dificulte.
- Si se tiene una acción derivativa d=50%, se observa que la frecuencia, la amplitud y el tiempo de estabilización es reducido notablemente. La variable controlada es amortiguada (Damping ratio).

A continuación presentamos un proceso, en el cual se hace su análisis matemático, tomando en cuenta a la relación de amortiguamiento (β).

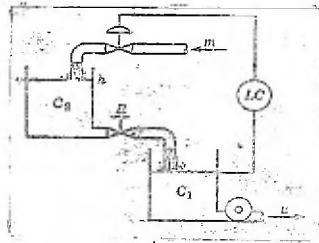


Fig. IV-18

El sistema es el que se muestra en la Fig. IV-18. Este se encuentra formado por dos tanques de almacenamiento, su control de nivel, una resistencia y una bomba a la descarga del segundo tanque (lo cual hace que el proceso no sea autoregurable). Eckman⁽¹⁾, encontró que la relación de amortiguamiento para este sistema está dada por la siguiente ecuación:

$$\beta = \sqrt{\frac{(T_1 + RK C_2 T_d)^2}{(4R T_1 T_2) K_c}} \quad \text{----- (IV-20)}$$

De donde: $\beta = \xi$

Donde:

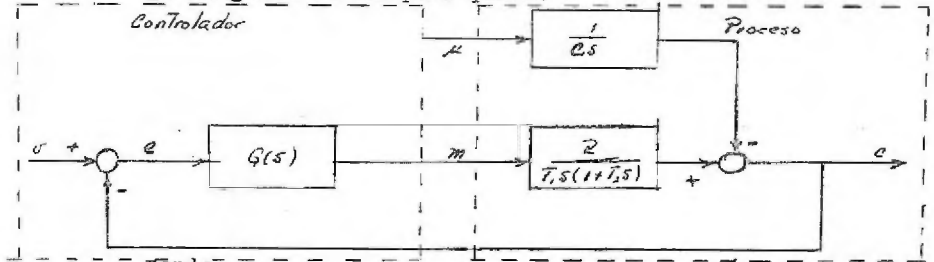
R = resistencia que presenta la válvula

T_1, T_2 = tiempos

K_C = ganancia del controlador

T_i = tiempo con derivativa

El diagrama de bloques queda:



Donde:

$G(S)$ = Función que depende del tipo de control

$$\begin{cases} - \text{Si } T_R = \infty \rightarrow G(S) = K_C (1 + T_d S) \\ - G(S) = K_C (1 + T_d S + \frac{1}{T_I S}) \end{cases}$$

La ecuación del proceso es igual a:

$$c = \frac{R}{T_1 S (1 + T_2 S)} \quad m = \frac{1}{G_1 S} \quad \text{--- (IV-21)}$$

Donde:

G_1 = Capacitancia del tanque número 1.

La ecuación de control en función de la desviación es:

$$m = G(S) e \quad \text{--- (IV-22)}$$

A su vez la desviación "e" es obtenida:

$$e = v - c \quad \text{--- (IV-23)}$$

Utilizando las ecuaciones IV-19 y IV-21, para eliminar a "m" y a "c"; obtenemos a "e" en función de "v" y "u".

$$e = \frac{T_1 S (T_2 S + 1)}{T_1 S (T_2 S + 1)} v + \frac{R (T_2 S + 1)}{T_1 S (T_2 S + 1) + R K_C (1 + T_d S)} u \quad \text{--- (IV-24)}$$

Empleando a la "función de amortiguamiento" (β) y sustituyéndola en la ecuación IV-24, obtenemos:

$$e = \frac{1}{K_c} \frac{T_1 S (T_2 S + 1)}{T_c^2 S^2 + 2\beta T_c S + 1} v + \left(\frac{1}{K_c} \right) \frac{(T_2 S + 1)}{T_1^2 S^2 + 2\beta T_c S + 1} u \quad (\text{IV-25})$$

Donde:

$$T_c = \sqrt{T_1 T_2}$$

La respuesta del sistema para un cambio de carga "u" está dado por la ecuación IV-25. La ecuación diferencial que resulta es:

$$T_c^2 e'' + 2 T_c e' + e = \frac{U}{K_c} \quad (\text{IV-26})$$

Donde:

U = cambio de carga de la variable "e".

Referencia.

- (1) Eckman D.P., "Automatic Process Control" John Wiley and Sons, Inc. N.Y., pp. 79-109 (1958)

RESUMEN

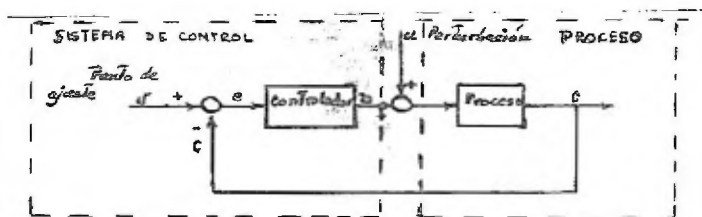
De los cinco tipos de controles se tiene la siguiente tabla que resume las principales características que pueden afectar a un sistema:

Modo de control	Velocidad de reacción	Tiempo muerto o transferencia de retrasos	Cambios de carga en el proceso	
1) Dos posiciones	Lenta o pequeña	ligero	pequeñas y lentas	
2) Flotante (*)	rápida	ligero	lentos	(*) Requiere autogulación
3) Proporcional	lento o moderado	pequeño o moderado	pequeños	
4) Proporcional con reajuste	En cualquier cantidad	pequeño o moderado	En cualquier cantidad pero lentos	
5) Proporcional mas o derivativa	lento o moderado	en cualquier cantidad	pequeños	
Proporcional mas reajuste mas molarativa	ilimitado	ilimitado	ilimitado	

Capítulo V.- "Técnicas utilizadas en la calibración de los controles".

Existen básicamente dos métodos que se utilizan para el ajuste del controlador:

- a) Método de Retroalimentación o trayectoria cerrada.
- b) Método de Alimentación simple o trayectoria abierta.



En el primero la calibración es hecha poniendo al controlador en automático. Con el método de trayectoria abierta^(b) el controlador no es utilizado durante las pruebas y, el ajuste se hace manualmente.

- Con el método de retroalimentación, se efectúa una medición de la variable controlada y ésta es comparada con el punto de ajuste. La diferencia que existe entre ellas es igual al error o desviación:

$$e = r - c \quad \text{--- (V-1)}$$

Esta desviación es comparada con cero:

$$e = 0 \quad \text{--- (V-2)}$$

Si es diferente de cero entonces el control automático efectuará la acción correctiva necesaria. Este método requiere de constantes cambios en el ajuste del control, haciendo uso del "método prueba-error".

- Método de trayectoria abierta o Alimentación simple.- Durante las pruebas de calibración, el control se encuentra en "manual"; por lo tanto las características del controlador para -

efectuar el ajuste dependerán exclusivamente del proceso. Con este método se impone solamente una perturbación al proceso y, se hace el estudio del efecto que causó a la variable controlada. No se hace acción correctiva alguna, como sucedió con el primer método. Este método tiene la ventaja de que no es necesario que el controlador esté instalado para que se efectúe calibración.

a) Método de retroalimentación o trayectoria cerrada.

Este método fue originalmente propuesto por Siegler y Nichols⁽¹⁾ en 1942. Consiste en determinar la "última ganancia o sensibilidad" y el "último período" para el cual el sistema es estable.- Para encontrar el valor de estas características se utiliza el siguiente procedimiento: La ganancia del controlador se ajusta hasta que el proceso oscile continuamente con amplitud constante. Teniendo desconectados a la acción derivativa y el reajuste.

Los pasos a seguir son:

- 1) Haga que el control funcione sin acción derivativa y sin reajuste, dejando sólo el control proporcional. Ajustar $T_d = 0$ y $T_r = \infty$
- 2) Fijarse que el control, se encuentre en "automático".
- 3) Dándole un valor arbitrario, imponga una perturbación en el proceso y observe la respuesta. Una forma de producir esa perturbación, es moviendo el punto de ajuste por algunos segundos y regresándolo a su valor original.
- 4) Si en la "curva de respuesta" del paso Nº 3, se produce un aumento en su amplitud (curva inestable, como se ve en la figura V-1), la ganancia del controlador es muy alta, (entonces la banda proporcional está ajustada a un valor muy bajo). Por lo tanto la banda proporcional deberá ser aumentada y el paso Nº 3 repetido.
- 5) Si en la curva de respuesta, del paso 3, se produce un amortiguamiento, curva estable, Fig. V-1, la ganancia será demasiado baja. Por lo tanto la banda proporcional deberá ser disminuída y el paso Nº 3 repetido.

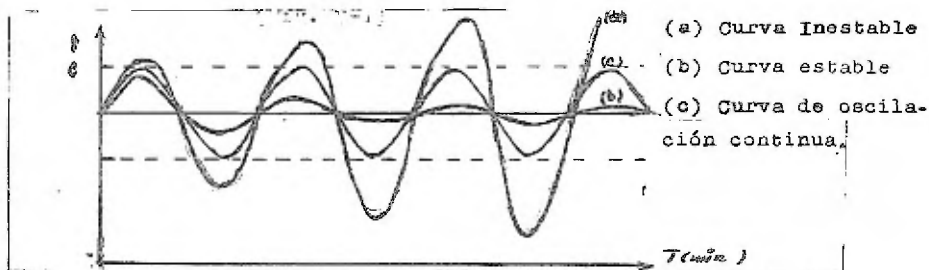
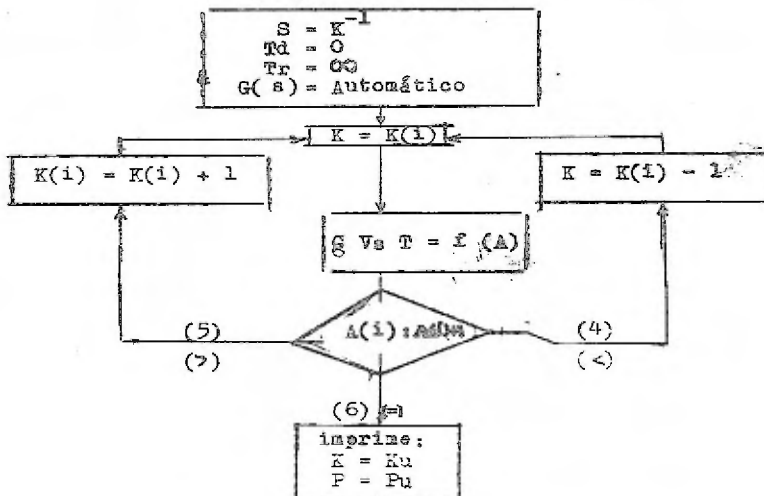


Fig. V-1

6) Cuando la respuesta que se obtiene, oscila con amplitud constante (curva "c") los valores de la ganancia proporcional y del período de la respuesta deberán ser anotados.

Diagrama de bloques:



A = Amplitud
Ku = última ganancia
Pu = último período

Donde:

S = % banda proporcional
Td = Tiempo con derivativa
Tr = Tiempo con reajuste
G(s) = Función del controlador automático
c = variable controlada

Es sabido que, un aumento de la banda proporcional propicia una mayor estabilidad en el proceso (curva b). Después de haber hecho pruebas para una serie de procesos, se encontró que para una relación de amplitudes de 1:4 (decay ratio) hace que el sistema tienda a condiciones estables. Realmente, no hay una justificación directa matemática por la cual se utiliza esta relación.

Existe un punto óptimo en el cual al disminuir la banda proporcional se disminuye la amplitud de la curva de respuesta, haciendo que el proceso tienda a condiciones estables, esto se muestra en la Fig. 7-2

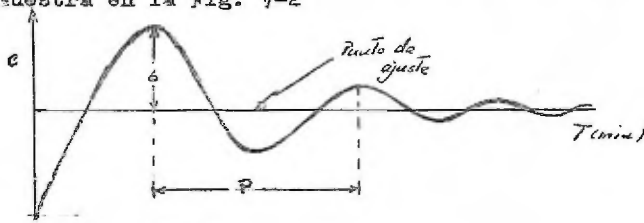


Fig. 7-2

De la figura, se ve que la respuesta entre el disparo del primer pico y el segundo es igual a la relación de amplitudes 1 : 4 .

Una vez obtenidos la "última ganancia" y el "último período", se pueden calcular la ganancia del controlador (Kc), el tiempo de reajuste (Tr) y tiempo de derivativa (Td) por medio de las siguientes ecuaciones empíricas(1). Estas fueron obtenidas por Ziegler y Nichols haciendo una correlación entre la ganancia del controlador y la última ganancia para cuando se

tiene una relación de amplitudes de 1 : 4 . Las ecuaciones que resultan para obtener la calibración de los modos de control son:

Proporcional:

$$K_c = 0.5 \quad S_u \quad \text{--- (V-3)}$$

Proporcional con reajuste:

$$K_c = 0.45 \quad S_u \quad \text{--- (V-4)}$$

$$T_r = P_u/1.2 \quad \text{--- (V-5)}$$

Proporcional con derivativa⁽²⁾:

$$K_c = 0.6 \quad S_u \quad \text{--- (V-6)}$$

$$T_d = P_u/8 \quad \text{--- (V-7)}$$

Proporcional con reajuste y derivativa
(tres modos)

$$K_c = 0.6 \quad S_u \quad \text{--- (V-8)}$$

$$T_r = 0.5 \quad P_u \quad \text{--- (V-9)}$$

$$T_d = \frac{P_u}{8} \quad \text{--- (V-10)}$$

Debe hacerse notar, que estas ecuaciones fueron obtenidas empíricamente para el ajuste de la mayoría de procesos; pero que habrá algunas excepciones, para los cuales no podrán ser aplicables.

En algunos casos la relación de amplitudes de 1 : 4 , no es suficiente para especificar una combinación única en el ajuste de los controles. Puede suceder que para esta relación se tengan una infinidad de ajustes. En este caso la desviación (offset) en el régimen permanente o el área bajo la curva (tiempo con reajuste menos el "punto de ajuste") deberán ser minimizados. También puede suceder que al disminuir la ganancia el sistema se haga inestable. En este caso no podrán ser aplicadas estas ecuaciones.

Para aquellos procesos, en los cuales no se usa el método anterior, debido a que no es posible hacer que el sistema oscile periódicamente (por ciclos) existe otro procedimiento⁽³⁾. El método empleado se llama "Amortiguamiento de las oscilaciones" (Damped oscillation method). Este consiste en que la ganancia -

es ajustada, utilizando control proporcional solamente; los pasos que se siguen son similares al método anterior. En este caso la curva es ajustada hasta obtener una relación de amplitudes de 1 : 4 .

Una vez que la curva obtenida, se podrá determinar el "período" de la "respuesta (P)". Con este valor, el tiempo de reajuste y el tiempo con derivativa podrán ser calculados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$T_r = P/6 \quad \text{--- (V-11)}$$

$$T_d = P/1.5 \quad \text{--- (V-12)}$$

Con estos valores, el es control ajustado. (En caso de que se utilice la acción derivativa y/O con reajuste).

Una vez obtenidos estos parámetros, la ganancia es nuevamente ajustada, hasta que se obtenga la relación 1 : 4 .

Comentarios de los dos métodos:

1) En ambos métodos se aplica el procedimiento de "prueba y error". (Se dan diferentes valores de ganancia para obtener la "última ganancia" o "la relación 1 : 4). Esto, en algunas ocasiones toma bastante tiempo; retardando las operaciones de calibración del equipo. (Desventaja N^o 1).

2) El estar haciendo continuos cambios de ganancia causan inestabilidad en otras partes del proceso provocando serios trastornos en el funcionamiento de la planta.

b) Método de Trayectoria abierta o de alimentación simple.

Este método está basado en una aproximación a la "dinámica del proceso".

El principio fundamental que rige a todos los "métodos de Trayectoria abierta" es: que sólo existe "tiempo muerto" y "constante de tiempo" simple; por lo tanto la curva de reacción está caracterizada por retrasos de primer orden. Esto resulta "ideal", cuando se tengan sistemas con ecuaciones diferenciales de un orden muy alto, es posible hacer una aproximación; de esta manera obtenemos una idea más o menos aceptable, para lograr la calibración del control.

La determinación del "tiempo muerto aparente" y de la "Constante de tiempo aparente" puede hacerse por medio de cálculos o en forma experimental. Sin embargo, si el sistema es complejo dinámicamente, entonces será difícil calcularlos. En este caso Ziegler-Nichols encuentran estas características por medio de pruebas. Los pasos a seguir para determinar "la curva de reacción" son los siguientes:

- 1) Dejar que el sistema se encuentre en régimen permanente.
- 2) Poner al controlador en "manual" (el controlador automático es desconectado).
- 3) Manualmente ajustar a la variable manipulada (m) en el valor que se encontraba cuando estaba en automático. (De tal manera que se tenga a todas las variables en su operación normal).
- 4) Dejar que el sistema se encuentre nuevamente en régimen permanente.
- 5) Teniendo todavía el control en "manual" provoque una "perturbación" (STEP CHANGE) de " m " en la salida del controlador.
- 6) Graficar la respuesta de la variable controlada. (Generalmente, el controlador tiene "Carta de control" en el cual se graba a la variable controlada. Sin embargo, se recomienda que ésta sea grabada en algún registrador adicional con el objeto de obtener una mayor precisión).
- 7) Regresar a la variable manipulada a su valor previsto (M) y ponga nuevamente al controlador en "automático".

La curva de reacción que resulta es casi siempre en forma de "S" como se puede ver en la Fig. V-3

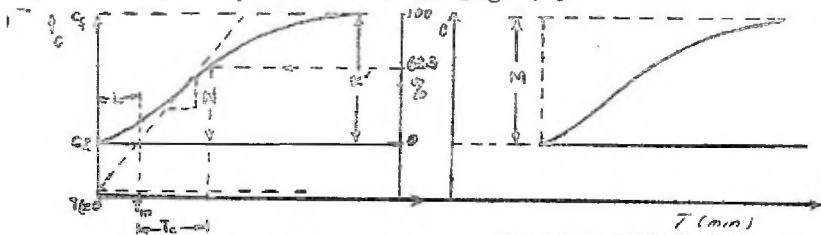


FIG. V-3

De la curva deberá hacerse lo siguiente:

19) Una línea recta es dibujada tangente al punto de inflexión de la curva. Ver Fig. V-3

29) Trace una línea horizontal tangente al "valor final de la respuesta".

En el instante en que se provoque la perturbación (step change), será cuando empiece a contar el tiempo (en consecuencia $T_i = 0$) (Condiciones iniciales).

(L) El tiempo muerto aparente se obtiene de la figura a partir del tiempo igual con cero hasta el punto de intersección formado por la pendiente de la curva y el punto de ajuste.

$$L = T_m - T_i \text{ (min)} \quad \text{--- (V-13)}$$

(N) La velocidad de respuesta es igual a la pendiente de la línea recta, tomando como referencia al punto de inflexión

$$N = \frac{C_2 - C_1}{T_2 - T_1} \frac{\text{unids}}{\text{min}} \quad \text{--- (V-14)}$$

(K') es el cambio total que tiene la variable controlada en magnitud.

$$K' = C_f - C_i \text{ (unids)} \quad \text{---- (V-15)}$$

(M) es el cambio en magnitud de la variable manipulada (unidad de "M").

(T_c) La constante de tiempo puede ser determinada como se muestra en la Fig. (V-3). También se le conoce como "coeficiente de retraso". Como se vió en el capítulo III, el tiempo que la variable necesita para llegar a un 62.3 % del cambio total es lo que se conoce como "constante de tiempo". Por lo tanto, si:

Los límites son: -"límite superior". -la línea horizontal tangente al valor final de la respuesta. Límite inferior: el punto de ajuste.

Donde:

$$\begin{array}{l} C_f - 100\% \\ C_i - 0\% \end{array} \Rightarrow 62.3\% \Rightarrow T_c$$

Existe una relación muy importante entre la variable manipulada y la velocidad de respuesta por lo que es necesario tomarla en cuenta. Esta es directamente proporcional al cambio de la variable manipulada. Por ejemplo; si se utiliza una señal de salida de 2 psi en lugar de 1 psi, de la variable manipulada del valor de "N" se va a duplicar. En estas condiciones es importante utilizar la siguiente relación:

$$R_r = \frac{N}{M} \frac{\text{unids/min}}{\text{psi}} \quad \text{--- (V-17)}$$

Donde: R_r = velocidad de reacción

Siempre que se utilice la "velocidad de reacción" con estas unidades, "la ganancia" K deberá estar en:

$$K = \frac{\text{Cambio total variable controlada}}{\text{Cambio de la variable de salida}} = \frac{AC}{M} \frac{\text{unids}}{\text{psi}} \quad \text{--- (V-18)}$$

en donde "K" es la ganancia del proceso

Para lograr la calibración del control, es necesario saber si el proceso es autoregulable o no lo es. Cohen y Coon⁽⁴⁾ hicieron este estudio y llegaron a establecer la siguiente relación:

$$\mu = \frac{R_r L}{K} \quad \text{--- (V-19)}$$

Donde:

μ = índice de autoregulación (adimensional)

Las ecuaciones de Ziegler-Nichols no consideran a este importante parámetro, por lo que $\mu = 0$

Sin embargo Cohen y Coon proponen las siguientes ecuaciones; tomando en cuenta al coeficiente de autoregulación (μ).

Control proporcional:

$$K_c = \left(\frac{1 + (\mu/3)}{R_r L} \right) \quad \text{--- (V-20)}$$

Control proporcional con reajuste:

$$K_c = \frac{0.9 (1 + (\mu/11))}{R_r L} \quad \text{--- (V-21)}$$

$$T_r = \frac{3.33 L (1 + \mu / 11)}{(1 + 11 \mu / 8)} \quad \text{--- (V-22)}$$

Proporcional con derivativa;

$$K_c = \frac{1.2 (1 + \mu / 8)}{R_n L} \quad \text{--- (V-23)}$$

$$T_d = \frac{0.27 L (1 - (\mu / 3))}{1 + (\mu / 8)} \quad \text{--- (V-24)}$$

Tres modos:

$$K_c = \frac{1.35 (1 + (\mu / 3))}{R_n L} \quad \text{--- (V-25)}$$

$$T_r = \frac{2.5 L (1 + (\mu / 5))}{(1 + (3\mu / 5))} \quad \text{--- (V-26)}$$

$$T_d = \frac{0.37 L}{(1 + (\mu / 5))} \quad \text{--- (V-27)}$$

- "Método gráfico"⁶⁷ para la calibración de los controles"

En el método de retroalimentación (Closed Loop); se vió que para una relación de amplitudes de 1 : 4 (Decay ratio), - se pueden tener "n" formas de ajustar un control. En este caso - las ecuaciones Ziegler-Nichols para el primer método (de "última ganancia y último período") no se podían aplicar. Cohen y Coon⁴, establecieron un método gráfico para solucionar el problema de calibración; cuando se presenta este problema.

Estas gráficas fueron construídas bajo las³ siguientes bases: "La relación de amplitudes (damping ratio) es calculada - para la respuesta actual en estado transitorio".

El método gráfico tiene dos principios fundamentales:

1) Las gráficas pueden ser utilizadas para calibrar - de una manera precisa un "controlador ideal". (Se llama "ideal" porque se supone al sistema de primer orden).

2) Es el principio fundamental en el cual están basados la mayoría de los métodos de trayectoria abierta (open Loop).

"Al proceso se supone que tiene únicamente retrasos de primer orden y tiempos muertos simples." Por lo tanto, cuando se

tengan sistemas de orden más alto se deberá hacer la "aproximación de la curva de reacción" a una de primer orden; como se muestra en Fig. V-4.

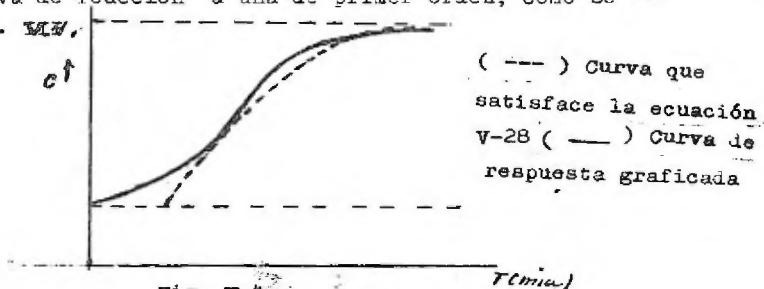


Fig. V-4

Dependiendo del cuidado con que se haga se cometerán pequeños o grandes errores.

Haciendo el estudio en el estado transitorio de la respuesta, deberá tomarse en cuenta a la relación que se tiene entre las señales de entrada y de salida.

La Transformada de Laplace nos da la expresión:

$$\frac{\text{salida}}{\text{entrada}} = \frac{K_c e^{-T_m S}}{T_m S + 1} \quad \text{--- (V-28)}$$

e = base exponencial

S = variable transformada de Laplace

Por medio de la ecuación V - 28, se hace la "aproximación de la curva de reacción; esto es, encontrando los valores de tiempo muerto, constante de tiempo y ganancia que satisfagan a la ecuación.

Una mejor aproximación de la curva se puede obtener - utilizando el "método de mínimos cuadrados".

En el desarrollo de las gráficas se utilizan 4 grupos adicionales, son:

$$(T_m/T_c), K_c K, \frac{K_c K T_c}{T_r}, \frac{K_c K T_d}{T_c}$$

Los parámetros por determinar son:

K_c, T_d, T_r

La ganancia, el tiempo muerto y la constante de tiempo pueden ser determinados por el proceso de la curva de reacción. - Los parámetros son determinados como una función de (T_m/T_c)

Ventajas que se obtienen al utilizar las gráficas.

Cuando los sistemas no son complejos; la determinación de las principales características del proceso pueden obtenerse sin cometer grandes errores. Dependiendo del trabajo con -- que se haga se podrá uno acercarse más a los valores que satisfagan una calibración adecuada.

El ahorro de tiempo que se tiene utilizando este método es notable, además que permite hacer una rápida estimación de la ganancia (K_c), del tiempo de ajuste (T_r) y lo del tiempo con derivativa (T_d). Es sabido que para una relación de amplitudes de 1:4 hay una multitud de soluciones. Estas pueden ser analizadas variando cada uno de los parámetros y viendo el efecto que se tiene en la respuesta. El criterio que se emplea para este caso es la reducción del área de control (Esto equivale a minimizar la desviación (Offset) y obtener una rápida respuesta que tienda a la estabilidad).

Referencias (Literatura citada)

- (1) Ziegler J.C. y N.B. Nichols "Optimum Setting for automatic controllers" Trans ASME, 64, pp. 759-765 (1942)
- (2) Callwell W.I., G.A. Coon and L.M. Zoss "Frequency Response for Process Control" Mc Graw Hill book Co. (1959)
- (3) Harriot P., "Process Control", Mc Graw Hill book Co. N.Y. (1964)
- (4) Cohen G.H. and G.A. Coon "Theoretical consideration of retarded Control". Taylor instruments Co. bulletin Nº TDS-10 A 102 pp. 5-11
- (5) "Process Instrumentation Manual" Hidrocarbon Processing, Gulf Publishing Co. pp. 55-60 (1968)

Capítulo VI - "Elementos primarios de medición.
"Elementos finales de medición".

- I) Elementos primarios:
 - A) Temperatura:
 - a) Termómetros de resistencia
 - b) Termopares
 - B) Presión:
 - a) Manómetro
- II) Elementos finales de control:
 - 1) Válvulas de control
 - 2) Válvulas de control o seguridad
 - 3) Válvula de seguridad

I) Elementos primarios de medición.

Por medio de estos elementos se va a efectuar la medición de las variables fundamentales del proceso. Las 4 variables más importantes son: Temperatura, presión, flujo y nivel. Esto se muestra en la Fig. VI-1. Para el desarrollo de la tesis únicamente se estudiarán las dos primeras.

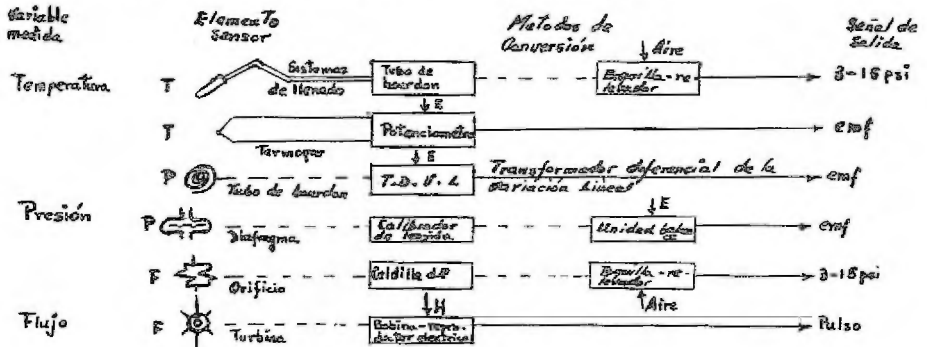


Fig. VI-1

En el estudio de los capítulos anteriores, ya se vió el efecto que tiene la instalación y mantenimiento del elemento primario y final de medición sobre la curva de respuesta del proceso así como la determinación de las características de las formas de control. En este capítulo se verá el principio de operación de estos elementos.

A) Temperatura.

Es una de las variables más importantes, empleada para medir y controlar procesos industriales. De las cuatro variables de control mencionadas al principio, temperatura es la que generalmente resulta más difícil de controlar. Las dificultades inherentes a su medición se deben principalmente a:

a) Errores estáticos, que se originan en la medición de temperatura por elemento primario de medición y b) Errores dinámicos ocasionados por retrasos térmicos, tales como resistencias térmicas y capacitancias en el elemento primario, la funda protectora, etc. (Este análisis fue hecho en el capítulo III)

El término temperatura es empleado para establecer una relación de qué tan caliente o qué tan frío se encuentra "un cuerpo" y su habilidad que tiene para transferir calor en función del gradiente de temperatura que exista entre el cuerpo y el medio que lo rodea. Es importante hacer notar, que temperatura no constituye una medida de la energía TOTAL en forma de calor que posee un cuerpo; ya que ésta, también depende de la masa del cuerpo y del material del que esté hecho (capacidad calorífica).

Escalas de temperatura:

La manera en que puede medirse esta variable y su exactitud es de gran importancia. Las escalas más utilizadas para efectuar su medición son: Escala Fahrenheit y la escala centígrada (celsius).

Las formas en que se puede medir la temperatura son las siguientes:

Span = Rango de operación en el cual el instrumento va a trabajar

TABLA VI-1

Elemento primario de medición	Rango(°C)	Exactitud	Ventajas	Desventajas	Principio de operación
Sistemas de llenado	-184 a 538	± 0.5 a 2% de la escala total	<ul style="list-style-type: none"> - No necesita fuente de poder - El más simple - Un tiempo de respuesta satisfactorio 	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño del bulbo más largo que los sistemas eléctricos. - La distancia máxima permitida es de 50 a 200 pies 	<ul style="list-style-type: none"> - Bulbo sellado conectado al bourion en espiral por medio de un tubo capilar. - El efecto de expansión del bulbo sobre el bourion es efectuado por medio de una aguja que se mueve sobre una escala de temperatura calibrada.
Termómetro de Resistencia	-257 a 982	0.1 (la mejor)	<ul style="list-style-type: none"> - Gran exactitud. - Bajos rangos de operación. (Span= 12°C) - De rápida respuesta y tamaño pequeño 	<ul style="list-style-type: none"> - autocalentamiento, puede ser un problema. - algo caro y difícil de instalar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Conforme la temperatura cambia la resistencia conductancia cambia proporcionalmente. Por medio de un convertidor de corriente se obtiene una señal de control.
Termopares	-262 a 2760	± 0.2 (la mejor)	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo y pequeño tamaño. - Alto rango amplio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Su lectura no es tan fácil como la de los termómetros. - Cuando se trabaja con alambres fríos pueden afectar la calibración. (Spanmin= 21°C) 	<ul style="list-style-type: none"> - Por una diferencia de temperaturas entre dos alambres disimilares se genera una pequeña fuerza electromotriz. (EMF) proporcional a la temperatura.
Pirómetros de Radiación	-17 a 3888	± 0.5 a 1% de la escala total	<ul style="list-style-type: none"> - No hay contacto físico - Rango amplio - Rapida respuesta 	<ul style="list-style-type: none"> - Más frágil que los instrumentos eléctricos - Escala no-lineal y span relativamente ancho. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sigue la ley de radiación de Stephan-Boltzmann, en el cual el calor transmitido por radiación es proporcional a la temperatura (T⁴) elevada a la cuarta potencia.

666

Continúa la Tabla VI-1

Elemento primero de medición	Rango (°C)	Exactitud	Ventajas	Desventajas	Principio de operación
Termistores	-101 a 315	0.1 (la mejor)	<ul style="list-style-type: none"> - De pequeño tamaño - Rápida respuesta - Bajo costo - No requiere de "junta fría" 	<ul style="list-style-type: none"> - Una respuesta "no lineal" - La "estabilidad" es difícil de lograr arriba de los 315°C - No se pueden lograr spans muy anchos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los termistores son mezclas puras de óxido de níquel, manganeso, cobre, hierro, magnesio, titanio. Funcionan igual que los termómetros de resistencia.

- Por cambio de volumen (Expansión del fluido; ejemplo: Termómetro con bulbo de mercurio conectado a un bourdon)
- Por cambio de resistencia eléctrica. (Por ejemplo un termómetro de resistencia).
- Por voltaje creado en la unión de dos alambres de similares. (ejemplos de medir temperatura por esta forma son los termopares o pirómetros termoelectricos)
- Intensidad emitida por radiación (Ejemplo: Pirómetros Radiamáticos)
- Intensidad luminosa (Ejemplo: Pirómetros ópticos)

En la tabla VI-1 se muestran los principales elementos primarios de medición de temperatura.

Para el estudio que se hará en el siguiente capítulo; los más importantes son:

- { a) Termómetros de resistencia
- { b) Termopares y alambres de extensión

a) Termómetros de resistencia.- (Rango de operación temperatura; de -250°C a 958°C)

Se basa en el siguientes principio: Los metales tienen la característica de que conforme varía la temperatura, la resistencia eléctrica de éstos también varía. Por medio de un convertidor de corriente esta propiedad es aprovechada mandándola al control. Los metales más utilizados son platino, cobre o níquel; aunque actualmente empiezan a utilizarse los semiconductores, conocidos con el nombre de termistores (RTD)

*) Termistores.-- La mayoría de ellos son óxidos metálicos y mezclas de ellos mismos. Se caracterizan por tener un coeficiente de temperatura-resistencia muy alto (diez veces mayor a los metales utilizados). El tratamiento consiste en fundirlos y recristalizados resultando un cuerpo cerámico denso.

Al cambio de resistencia provocado por un incremento de temperatura se le llama "coeficiente de temperatura resistencia". Las unidades de este coeficiente están en ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) y su expresión es igual a:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad \text{--- (VI-1)}$$

Donde:

ρ = Resistencia relativa (Resistividad, la cual es una característica del material.

$\frac{d\rho}{dT}$ = variación de la resistividad con respecto a la temperatura

$d\rho/\rho$ = Fracción de resistividad que cambia con la temperatura

La relación que hay entre la resistividad y la resistencia está dado por:

$$R = \alpha \frac{l}{A} \quad \text{--- (VI-2)}$$

Donde:

R = resistencia (ohms)

l = longitud (m)

A = área del conductor (m^2)

En la tabla VI-2, se muestra la resistividad a 20°C y el coeficiente de temperatura-resistencia de:

Tabla VI-2

	Resistividad	Coefficiente R-T	En la Fig. VI-2 se puede ver que el platino es el que tiene un mayor rango de operación y una mayor linealidad.
Cobre	1.8×10^{-8}	3.9×10^{-3}	
Niquel	7.8×10^{-8}	6×10^{-3}	
Plata	1.6×10^{-8}	3.8×10^{-3}	
Tungsteno	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}	

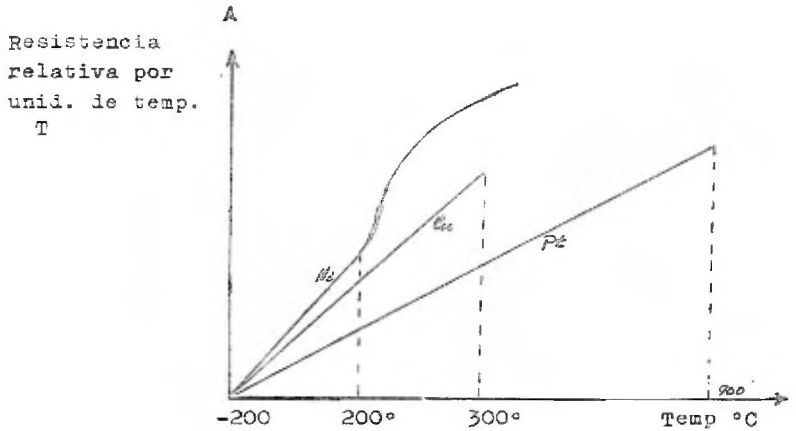


Fig. VI-2

En la transformación de corriente por medio de un convertidor; se utilizan circuitos-eléctricos. El más común es el "puente de wheatstone"; en el cual son utilizadas resistencias. Se considera que el Puente de Wheatstone está en equilibrio cuando se tiene el mismo potencial en los puntos "a" y "b" como se muestra en la Fig. VI-3

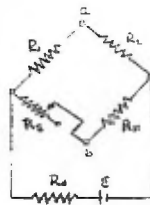


Fig. VI-3

Donde la relación queda establecida de la siguiente manera:

$$R_x = R_s \frac{R_2}{R_1} \quad \text{--- (VI-3)}$$

Donde:

R_v = resistencia variable (un reostato)

R_x = resistencia desconocida en función del aumento o disminución de " R_v ".

Este circuito puede tener sus variaciones, dependiendo de qué tan cerca se encuentre el elemento primario del controlador. Cualquier variación en la resistencia producirá un desequilibrio en el puente obteniéndose una "señal de salida". Esta "señal" será enviada al controlador y moverá electromecánicamente un indicador. (Estas "señales" generadas son del orden de milivoltas y de bajas corrientes (miliamperes)).

Los relevadores electromecánicos pueden ser operados sin que requieran de servicio por un período hasta de 10 años.

b) Pirómetros Termoelectrónicos o Termopares (Rango de operación Temperatura: (-262°C a 2760°C)).

Formado por dos alambres de diferente material, unidos en uno de los extremos. Cuando se tiene en la "unión" una diferencia de temperatura se genera una diferencia de potencial en el circuito y una corriente; la cual es transmitida al controlador en donde es registrado el cambio de temperatura. En el diagrama de la Fig. VI-4 se puede ver la representación de un termopar, con su alambre de extensión y el controlador.



Fig. VI-4

De la Fig. VI-4 se puede ver lo siguiente:

- (a) "Punta fría o pierna fría". Es el punto de referencia y se encuentra a una temperatura " T_1 " constante, (algunas veces es la temperatura ambiente cuando ésta no varía mucho) - y formado por un material " N_1 ".

- (b) "Punta caliente o pierna caliente". Es el punto en donde se hace la medición; se encuentra a una temperatura " T_2 " (Temperatura a la que está el proceso) y formado por un material " N_2 ".

A la diferencia de temperatura ($T_2 - T_1$) le corresponde una diferencia de potencial (Fuerza electromotriz) entre "dos alambres disimilares"; a este fenómeno se le conoce con el nombre de "EFECTO PELTSIER".

- (A) Es el elemento primario de medición (Termopar)

- (B) El alambre de extensión; utilizado como unión entre el Termopar y el instrumento. El material puede ser del mismo que el termopar, aunque esto resulta algunas veces muy caro. Cuando es así se busca un alambre que tenga las mismas características termoeléctricas.

- (C) El instrumento, el cual mide el voltaje producido. Su medición puede efectuarse por medio de un milivoltímetro o un potenciómetro que deberá ser calibrado en función de la temperatura de la punta caliente o en términos de la temperatura de referencia (punta fría). Cualquier variación de la temperatura de referencia deberá ser compensada por medio de un resistor; (r) (Este generalmente es un bimetalo o nickel).

El efecto Thomson; se genera cuando se tiene una diferencia de temperatura en una sección "del mismo material" originando una fuerza electromotriz. Por lo tanto, si cada una de las puntas se mantiene a la misma temperatura a lo largo de todo el alambre (incluyendo al alambre de extensión), el efecto Thomson será mínimo y la suma de los voltajes en todo el circuito será independiente de la materia intermedia (Ley de los metales intermedios).

Propiedades.- Los arreglos que se pueden hacer de los termopares; con el objeto de efectuar la medición pueden ser en serie o en paralelo; siguiendo a las leyes de la electricidad . Cuando se tengan procesos en los cuales las temperaturas sean muy bajas se recomienda un arreglo de termopares en serie:

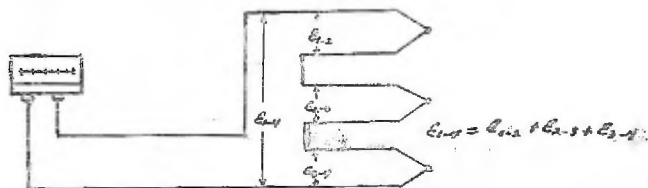


Fig. VI-5

$$E_{A,B} = E_{1,2} + E_{2,3} + E_{3,4} \quad \text{--- (VI-4)}$$

Quando se quieran efectuar mediciones de temperatura en el proceso en forma independiente, entonces convendrá tener un -- arreglo de termopares en paralelo.

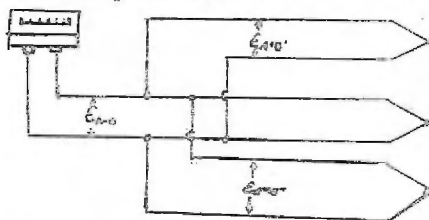


Fig. VI-6

$$E_{A,B} = E_{1,2}' = E_{2,3}' = E_{3,4}' \quad \text{--- (VI-5)}$$

"Selección del tipo de termopar y de su calibre".

1) Metales nobles.- Hechos de platino positivo (+) y platino-rhodio negativo (-). Las proporciones en que pueden estar PT-RH son:

Tipo		Temp. límite
R	PT - 87% y Rh - 13%	
S	PT - 90% y Rh - 10%	1482°C

- Recomendable solamente para altas temperaturas (no mayores a 1482°C)
- Siempre deberá llevar funda protectora; en cualquier tipo de atmósfera ya que es muy fácil de que se contamine.
- Se recomienda funda protectora de cerámica y que vaya herméticamente cerrada para protegerlo de la corrosión.

Desventajas:

- Su costo resulta muy elevado, ya que se vende en \$ - por unidad de longitud en lugar de \$ por unidad de peso, como se hace con los demás metales-termopares.
- El uso de la funda protectora, le resta sensibilidad afectando a la velocidad de respuesta del proceso.

2) Metales básicos: Los más utilizados son fierro-constantan, cobre-constantan y cromel-alumel.

Tipo	Positiva	Negativa	Temp. Límite(°C)
(Cu-Const.) T	Cu	Const.	204
(Fe-Const.) J	Fe	Const.	760
(Crom-Alum.) ^K	Cromel	alumel	1260

Condiciones de trabajo óptimo "tipo T".

Recomendable para trabajar en atmósferas reductoras o ligeramente oxidantes. Gran resistencia a la corrosión. Especial para -- trabajar a bajas temperaturas.

- "Tipo J" especial para temperaturas bajas (537°C).
No conviene trabajar a temperaturas elevadas ya que la oxidación de fierro ocurre rápidamente.

- Recomendable cuando se trabaja en atmósferas reductoras o neutras.

"Tipo K"

- Las temperaturas a las que puede ser utilizado son altas (no mayores de 1260°C).

- Puede ser utilizada en atmósferas oxidantes o neutras.

A continuación presentamos la tabla VI-3 con las temperaturas de trabajo y el tamaño del calibre.

Tabla VI-3

Tipo	Positivo	Negativo	Temp. Límite (°C)	milivolts/grado	Calibre	Rango Temp. (°C)	(I)
R y S	Pt	Pt-Rh(87%)	1482	0.0075	24	No mayores a 1482	
	Pt	Pt-Rh(90%)					
T	Ch	Constantan	204	0.0295	14, 20, 24	-184 a 371, -184 a 200, -184 a 204	
J	Fe	Constantan	760	0.0290	8, 14, 20, 24	-17 a 760, -17 a 815, -17 a 482, -17 a 371	
K	Cromel	Alumel	1260	0.0215	8, 14, 20, 24	-17 a 1260, -17 a 1093, -17 a 982, -17 a 871	

ALAMBRES DE EXTENSION (I)

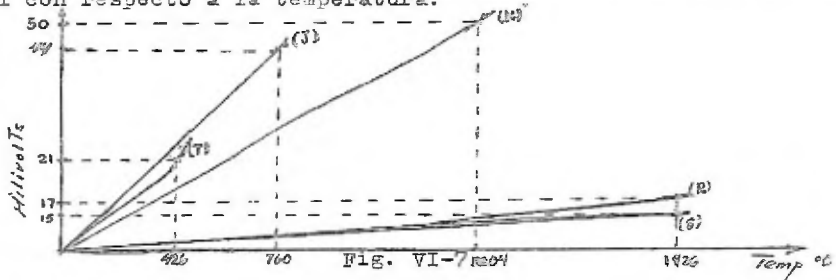
(I) Alambres de extensión recomendables:

Tipo	Metales
S y R	Cu - Ni

(CONTINUA

Tipo	Metales(I)
T	---- Cu-Const.
J	---- Fe-Const.
K	---- Cromel-Alumel

En la Fig. VI-7 se puede apreciar cómo varía el potencial con respecto a la temperatura.



En él se puede ver el milivoltaje generado para cada uno de los tipos de termopares.

Como criterio general, es recomendable utilizar un mayor calibre, cuando las condiciones del proceso son demasiado adversas. Calibres de menor número, conviene utilizarlos cuando se requiera una rápida respuesta; además de reducirse los costos. Conforme aumenta el tamaño del calibre aumenta el precio de los termopares.

Ventajas de los Termómetros de resistencia contra -- Termopares

- 1) producen un voltaje de salida
- 2) no requieren de punto de referencia
- 3) toleran más fricciones por sus mayores voltajes de salida
- 4) tienen mayor sensibilidad a incrementos pequeños de temperatura (del orden de 0.2 μ /grado a 10 μ /grado).
- 5) A rangos de temperatura moderada la calibración y estabilidad es del orden de 10 a 100 veces mayor.



B) Presión.

Sus unidades son de fuerza por unidad de superficie. Se considera como "presión absoluta" igual a cero, cuando se tiene un vacío perfecto. "Presión barométrica" es la fuerza ejercida por una atmósfera en un determinado lugar y tiempo. (Presión atmosférica). "Presión manométrica" es el valor leído de una escala, basado en la presión barométrica local; ésta varía de acuerdo con la altura y las condiciones atmosféricas. La presión manométrica puede ser convertida a presión absoluta agregándole una atmósfera o 14.7 psi.

$$P_{abs} = P_{man} + 14.7 \quad ; \quad (\text{psia}) \quad \text{---(VI-6)}$$

Donde:

P_{abs} = Presión absoluta (psia)

Los tipos de presión que pueden existir son:

- { - Presión estática
- { - Presión dinámica

La "presión estática" es una fuerza perpendicular por unidad de área que actúa sobre el elemento sensor cuando el fluido se encuentra en reposo. O también es la fuerza que ejerce el fluido en reposo sobre el recipiente que lo contiene.

La "presión dinámica", es la energía cinética que tiene el fluido cuando éste se encuentra en movimiento. También esta presión es conocida con el nombre de "presión velocidad". La expresión matemática es igual a:

$$P_v = \frac{\rho v^2}{2g} \quad \text{---- (VI-7)}$$

Donde:

P = Presión dinámica (lb-in²)

ρ = densidad de un fluido (lb/ft³)

v = velocidad del fluido (ft/seg)

g = Aceleración de la gravedad (ft/seg²)

La "presión total" es igual a la combinación de la

presión estática y la presión dinámica. Esta presión puede determinarse por medio de un tubo pitot.

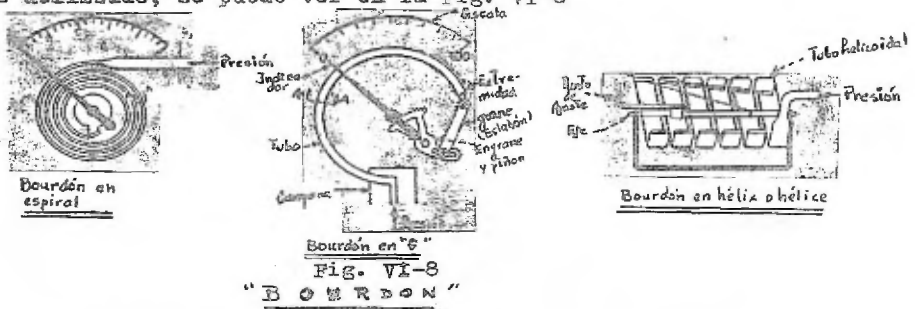
A la diferencia de presión estática en dos puntos diferentes se le conoce como "presión diferencial".

Las diferentes formas en que se pueden medir las presiones son por medio de elementos elásticos:

- De bourdon⁽¹⁾ (en espiral o en "c")
- De diafragma
- Manómetro en forma de "U"

(1) Es el que va a ser desarrollado en este capítulo.

Los de "bourdon", están hechos de una gran variedad de materiales y aleaciones; todos ellos deben ser resistentes a la corrosión. Este tipo de medición es el más común y también el más utilizado, se puede ver en la Fig. VI-8



La presión que ejerce el fluido ("P") produce un desequilibrio; el cual se manifiesta por el movimiento de la aguja en el manómetro. También puede traducirse este movimiento en una señal eléctrica de salida.

Limitaciones:

- Para presiones menores de 50 psi, se tiene un gradiente en el resorte muy bajo.

II) Elementos finales de control.

Función: "Variar el gasto del agente de control de acuerdo con la señal que reciba del controlador".

El elemento final más común y utilizado es la válvula; aunque puede ser empleado un motor o una bomba. Las válvulas -- pueden funcionar manual o automáticamente. Una válvula de control es utilizada cuando el proceso está trabajando con un sistema de control automático; con todas las características vistas en los capítulos anteriores. Para poder hacer la selección de la válvula de control se requiere entender perfectamente cada uno de estos conceptos. O sea tener un perfecto conocimiento del proceso, de los sistemas de control; de retroalimentación (closed-loop) o alimentación simple (open-loop) etc. En el diseño del sistema de control se deben tomar en cuenta, tanto para el régimen permanente como para el estado transitorio, los siguientes factores:

- El "régimen permanente" depende fundamentalmente del tamaño y la forma del tapón de la válvula; así como de la caída de presión a través de ella.
- El "régimen transitorio" de la válvula depende fundamentalmente del actuador y de la longitud de la línea de transmisión.

Una válvula, tiene como característica la de presentar una oposición al flujo del fluido, provocando una disminución de presión (pérdida de energía del proceso) equivalente a las fricciones. Esto, provoca una caída de presión en el sistema. Una válvula de control sigue generalmente la "ecuación de orificio" para "fluidos incompresibles".

$$q = K A \sqrt{\frac{AP}{S_{ge}}} \quad \text{---- (VI-8)}$$

Donde:

- q = Gasto del fluido
- AP = Area de puerto de la válvula
- K = Constante de proporcionalidad

El control es efectuado moviendo el vástago con el objeto de variar el área de flujo.

Característica de la válvula.

"La más importante es quizá. la relación que existe entre el flujo y la posición de la válvula cuando se tiene una caída de presión constante a través de la válvula".

De acuerdo con la ecuación VI-8 , si ΔP permanece constante, la relación entre el gasto del fluido y el área de puerto es "lineal"

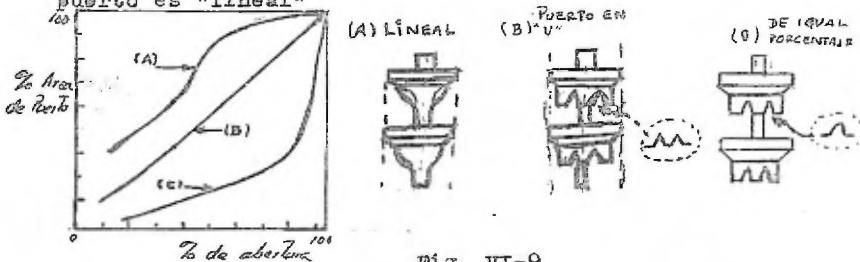


Fig. VI-9

Sin embargo, en un sistema siempre hay caídas de presión (en el cuerpo de la válvula y en la tubería). La representación gráfica puede verse en la Fig. VI-9

En general las características más comunes de la válvula son:

- Característica de linealidad
- Característica de igual porcentaje
- Característica parabólica

Linealidad:

Se dice que una válvula, tiene estas características, cuando la relación entre la abertura de la válvula y el flujo, a caída de presión constante es igual a una línea recta.

La ecuación que representa esto es igual a:

$$q = K_1 y \quad \text{----- (VI-9)}$$

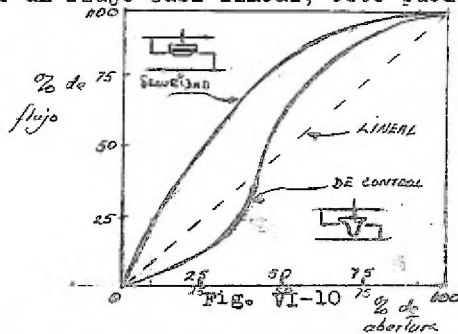
Donde:

K_1 = constante de proporcionalidad (Ganancia o sensibilidad)

y = abertura de la válvula

En la Fig. VI-9, se puede apreciar que la válvula con puerto en "v" presenta características lineales; obsérvese que la forma de los "dientes" están en ángulo recto.

Una "válvula de control o de regulación" está diseñada para dar un flujo casi lineal; ésto puede verse en la Fig. VI-10 .



En cambio, una "válvula de seguridad" está diseñada para efectuar una abertura rápida. En la Fig. VI-10, se aprecia que una gran cantidad de flujo es permitida con un mínimo de movimiento. Este tipo de válvulas pueden trabajar como: - válvula de apertura rápida.

De igual porcentaje:

En el cual el vástago se mueve produciendo igual porcentaje en el cambio de flujo teniendo una caída de presión constante. Esto hace que la "sensibilidad o ganancia" sea proporcional al flujo.

En la Fig. VI-11 se puede ver cómo aumenta el área de flujo más rápidamente conforme la válvula se va abriendo; ésto constituye una característica muy importante de "igual porcentaje". En la Fig. VI-9 se puede ver este efecto producido y la representación de una válvula con puerto en "v"; obsérvese que la forma que tienen los "dientes" no están en ángulo recto.

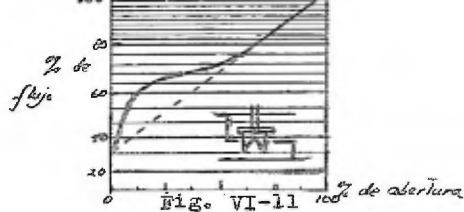


Fig. VI-11

- Característica parabólica:

Dependiendo del área de puerto que se tenga se podrá obtener un determinado flujo. Las curvas resultantes de flujo oscilan entre la característica lineal y la de igual porcentaje. La relación que existe entre la abertura de la válvula y el flujo, se encuentra representado por una ecuación parabólica:

$$q = K_2 y^2 \quad \text{--- (VI-10)}$$

Donde: q = gasto de fluido
 K_2 = ganancia o sensibilidad
 y = abertura de la válvula

Esta ecuación se encuentra representada en la Fig. VI-12

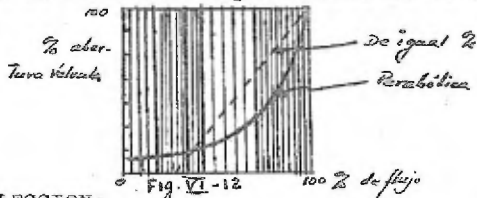


Fig. VI-12

SELECCION:

Para efectuar la selección de una válvula deberán ser tomados en cuenta los siguientes factores:

- 1) Ver tipo de agente de control de que se trate y determinar sus principales características (densidad específica, el grado de corrosión) y temperatura de operación.
- 2) La capacidad del agente de control.
- 3) El diámetro nominal (I).
- 4) La caída de presión permitida (II).

(I) Algunas veces la selección de la válvula se hace conociendo el coeficiente de la válvula Cv (Valve size coeficient).

(II) Se recomienda para las válvulas de control (mariposa o varitrol) una caída de la presión mayor o igual al 15% de la presión de entrada de la válvula.

La ecuación utilizada para calcular este coeficiente es:

$$C_v = q \sqrt{\frac{SG_1}{\Delta P}} \quad \text{---- (VI-11)}$$

Donde:

q = Gasto del agente de control en gal/min

SG₁ = Densidad específica

ΔP = Caída de presión permitida a través de la válvula (psi)

También existen métodos gráficos como se puede ver en la Fig. VI-13

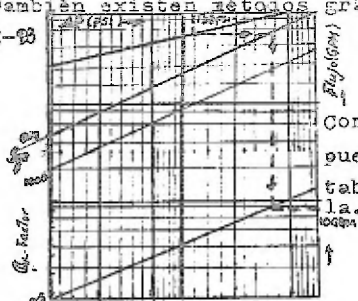


Fig. VI-13

Conocido que, q, ΔP y SG₁ puede ser leído de la tabla el Cv de la válvula.

De los 5 factores mencionados anteriormente, los más importantes son: La capacidad de agente de control y la caída de presión permitida.

CLASIFICACION:

De acuerdo con el tipo de servicio y las condiciones de operación se determinará la clase de válvula. Su clasificación es la siguiente:

- 1) Válvulas de control (throttling valve); son válvulas reguladoras. La más representativa de ellas es: a) De mariposa.
- 2) Válvulas de control o de seguridad:
 - a) De globo, b) De bola
- 3) Válvula de seguridad (Shutt-off):
 - a) De compuerta, b) Válvula check, c) De alivio.

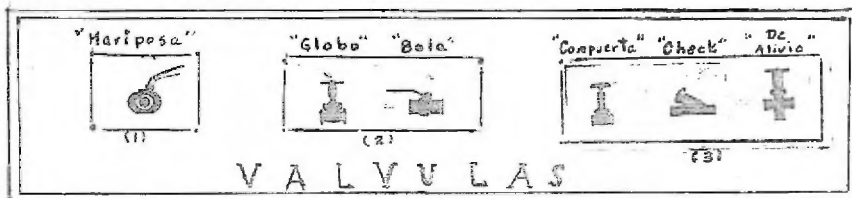


Fig. VI-14

Una válvula de control se encuentra formada por dos partes: El cuerpo y el actuador; "El cuerpo" forma parte de la tubería, como accesorio y tiene como función la de contener - el fluido y además provocar un cambio del flujo por medio de una restricción. El cuerpo, está sujeto a las mismas condiciones de presión, temperatura y corrosión; que del resto de la tubería. También deberá ser tomada en cuenta en el balance de energía de ésta. (Caídas de presión).

"El actuador", es el que responde a la señal mandada por el controlador y mueve a la válvula para producir la variación del flujo.

Existen básicamente tres clases de actuadores: neumáticos, eléctricos e hidráulicos.

- Neumáticos.- Pueden ser operados por aire o algún fluido gaseoso. Existen dos clases: a) de resorte y diafragma, b) de pistón con cilindro. El primero es más económico generalmente.

- Eléctrico.- Se utilizan solenoides, en el cual una barra de hierro se mueve a través de un campo eléctrico originado por un alambre enrollado. Lo que se utiliza para mover la válvula son motores eléctricos. Estos son diseñados normalmente para dar un servicio de 1800 a 3600 rpm. La velocidad de cerrado de las válvulas se encuentra entre 30 y 60 seg. Los motores utilizados para las válvulas Eclipse son Barber-Collman y Minneapolis-Honeywell con una carrera de 90%

- Hidráulico.- Son operados por agua o por un fluido; ejerciendo presión sobre un "pistón duplex" que se encuentra conectado a la válvula. La operación de apertura y cierre se efectúa con mayor rapidez con actuador hidráulico que con el eléctrico.

OPERACION:

1) Válvula de control:

a) Válvula de mariposa.- Es uno de los elementos más utilizados en el control; debido a su gran versatilidad en el manejo de fluidos (desde fluidos limpios hasta flujos con una gran cantidad de sólidos) y a la gran caída de presión que puede ocasionar regulando así el gasto del fluido. Esta válvula presenta las siguientes ventajas: Puede efectuar su autolimpieza y es capaz de manejar grandes volúmenes. Esencialmente, una válvula de mariposa está formada por un disco, un eje o aguja y el cuerpo.

El espesor del eje y el disco son determinados de acuerdo con la caída de presión que se tenga en la válvula y así como el Torque o momento que se requiere para operar la válvula.

Las presiones de trabajo, a la que pueden operar este tipo de válvulas son BAJAS. Para estas válvulas de control, se recomienda que la presión no sea mayor de 5 psi. Estas pueden ser de puerto abierto (BV) o de puerto reducido (BVR). En la tabla VI-4 se observa que para la misma capacidad y el mismo diámetro nominal se tiene una mayor caída de presión cuando se tiene puerto reducido.

De la tabla VI-4 obtenemos:

	Puerto Abierto	Puerto Reducido	Comentario
Cv	48	17	Manteniendo "q"
D _{tubería} (in)	1	1	y "D _{tub} " tubería aproxima -
q (CFH)	1500	1450%	damente
P (in C.A.)	0.5	6	Constantes; se puede ver una caída de presión de 6 C.A. para Puerto Reducido.

Así pues, si quiero tener un control más efectivo, se podrá utilizar la válvula de mariposa con "puerto reducido"; pero deberé cuidar que la caída de presión no sea muy alta.

2) válvula de control y seguridad.

a) Válvula de globo.- Presenta pobres características en la regulación de flujo; por lo que la mayoría de las veces se prefiere utilizar como válvula de seguridad. Sin embargo, se puede lograr un control más efectivo cuando se tiene el puerto en "V".

El tapón y el asiento están hechos generalmente de acero inoxidable.

La presión límite para este tipo de válvulas está entre 100-150 psig. Se recomienda su uso para fluidos limpios - que no contengan partículas.

b) Válvula de bola.- Como su nombre lo indica tiene un tapón en forma de bola esférica, que controla el paso del fluido. Esta válvula puede ser utilizada como control o bien como válvula de seguridad. No requiere de lubricación y puede operar con un torque mínimo. Debido a que el asiento de la válvula puede sufrir algún daño, por estar abriendo y cerrando la válvula; se recomienda que sea utilizada preferentemente como válvula de seguridad. De preferencia deberá usarse para fluidos limpios que no contengan partículas ya que pueden dañar el asiento de la válvula.

3) Válvula de seguridad.

a) Válvula de compuerta.- Generalmente es utilizada como "interruptor" suspendiendo o abriendo el flujo. Las características que tiene para regular el flujo son pobres^(I); ya que cuando se efectúa una gran caída de presión se producen inmediatamente vibraciones, dañando al asiento y al disco. Su uso está limitado para fluidos con muy pocos sólidos. Cuando sea utilizada en servicios que puedan ocasionar un taponamiento entonces deberá utilizarse un "lavador" que esté conectado a la válvula.

(I) Sin embargo la válvula de compuerta es utilizada por algunas compañías para sus quemadores; resulta muy barata y además es posible regular el aire o el diesel que es suministrado a los quemadores a cualquier presión baja.

b) Válvula check.- Se utiliza únicamente para preve-

nir el regreso del flujo. Funciona exclusivamente como "válvula de seguridad", permitiendo el paso de corriente en una sola dirección. Cuando el flujo no se encuentra en movimiento (velocidad = cero) el disco es mantenido por la presión que ejerce el mismo fluido sobre el asiento impidiendo el regreso del fluido.

c) Válvula de alivio.- Funciona como válvula de seguridad; controlando la presión del sistema. La válvula es diseñada de tal manera que cuando existe una presión mayor a la permitida por el sistema, ésta se abre inmediatamente. De esta manera el equipo se encuentra protegido de cualquier presión mayor a la que éste pueda trabajar. La rapidez con que la válvula se abre puede ser graduada y está en función directa de la presión estática.

Referencia.

- (1) Eclipse Fuel Engineering. Combustion Division. Bulletin M. 150

CAPITULO VII.- "Equipo y selección de los instrumentos de control.-
Diagrama del proceso y diagrama eléctrico".

La instrumentación y control se hizo para un secador por aspersión del "tipo Spray Dryer"; el cual está formado por:

- (1) Una cámara cónica de secado en posición vertical.
- (2) Horno.
- (3) Un ciclón primario.
- (4) Un ciclón secundario.
- (5) Una torre lavadora (scrubber).

El diseño e instalación de este equipo fue realizado por la compañía C.S.R. de México, S.A.

La instrumentación y la construcción del tablero de control fue efectuado por la compañía Enterprise, S.A. en el cual participé.

A continuación se muestran las partes en que se divide el equipo de acuerdo con sus funciones a realizar:

- a) Equipo de combustión.
- b) Control del proceso.
- c) Sistema de protección.
- d) Tablero de control.

- El "equipo de combustión", se encuentra integrado al horno. Este proporciona los gases calientes con los cuales la solución que entra a la cámara va a ser secada.

- Para "el control" del proceso de secado existen dos alternativas, como se verá más adelante. En cuanto al funcionamiento y el modo de control es básicamente el mismo. El criterio de selección de una alternativa sobre otra se basa en que a la primera opción no se le puede adaptar el tiempo de reajuste y/o derivativa; únicamente puede trabajar con control proporcional.

- El "sistema de protección", sirve como seguridad contra cualquier falla que pudiera tener el quemador.

- Tablero de control; en él está centralizado cualquier función del proceso. Los instrumentos que en él van, son: La unidad de transferencia de control tipo 96, el registrador potenció

métrico, los límites de temperatura, el control del proceso, el sistema de seguridad, la alarma, los contadores de tiempo, la estación de botones y el interruptor del circuito de combustión.

A continuación se describe el equipo que puede seleccionarse para el proceso de secado:

a) "Equipo de combustión".

A - 1) - Quemador para combustible pesado, con capacidad nominal de 1,900,000 BTU/hr. (1,700,000 BTU/hr efectivos a la altura de León, Gto), trabajando con aire a 38°C.A. En él van incluidos: Cabezal del quemador, caja de montaje, block de combustión, mirilla, válvula micrométrica para el combustible, válvulas de mariposa manuales para el aire principal y el de atomización, válvula de cierre manual para el diesel.

A - 2) - Ventilador para el aire de combustión y atomización con una capacidad de 28,100 CFM a 32 OSI de presión en condiciones S.T.D. Incluye además: motor abierto de 7½ HP, acoplado directamente. Para 220/440 V y 50/60 c/s.

A - 3) - Regulador de presión para el combustible con una capacidad de 60 G.P.H.

A - 4) - Filtro para el chapopote, con canastilla.

A - 5) - Límite de presión bajo para el aire de combustión.

A - 6) - Límite de presión bajo para el combustible.

A - 7) - Límite de temperatura para el combustible.

A - 8) - Switch de flujo de aire para detectar si hay presión en la cámara de combustión.

A - 9) - Bomba para el combustible pesado con capacidad de 25 gph a 1450 rpm, con motor de 1/3 HP directamente acoplado, base y manómetro.

b) "Sistema de control del proceso".- Para efectuar el control del proceso existen dos opciones:

OPCION N° 1

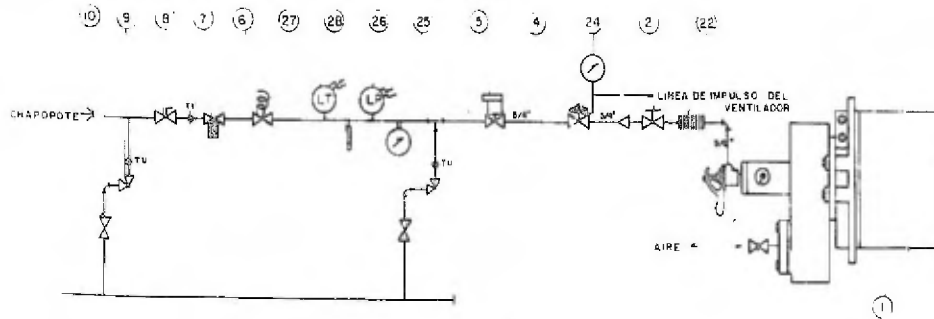
Modo de control: proporcional.

- Pirómetro controlador-indicador electrónico con escala de 0 - 400°C, calibración "J", exactitud escala: ± 1.5%. Para trabajar con motor-operador proporcional. Nota: Este instrumento no tiene tiempo de reajuste ni derivativa y no puede adaptarsele.

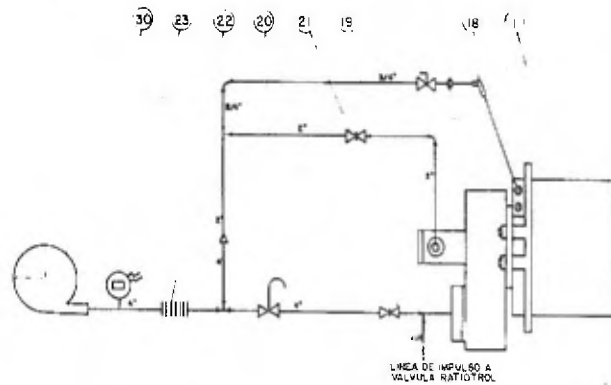
- Termopar, calibre # 3, tipo "J" con funda protectora de acero inoxidable 12" con cabeza de aluminio.

DIAGRAMA DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

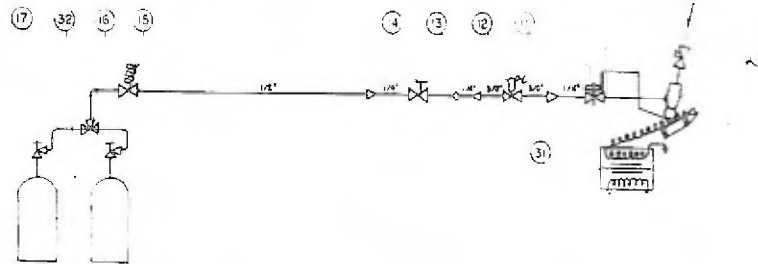
LINEA DE COMBUSTIBLE PESADO.



LINEA DE AIRE.



LINEA DEL PILOTO-GAS.



- 1 QUEMADOR 168 HCF-CGO
 - 2 VALVULA DE CIERRE VIENE CON EL QUEMADOR
 - 3
 - 4 VALVULA RADIOTROL 3/4" IN A. NORTH AMERICAN CAT 13-0
 - 5 VALVULA HIDRAMOTOR DE CIERRE AUTOMATICO Y ABERTURA LENTA DE 3/4" G. 207-401
 - 6 REGULADOR DE PRESION BAJA DE 5 Kg 32 Kg PRESION DEL COMBUSTIBLE
 - 7 FILTRO AUTOLIMPIABLE O CANASTA
 - 8 VALVULA DE PASO
 - 9 VALVULA DE ALIVIO PRIMARIO CALIBRADA A 5Kg/cm.
 - 10 VALVULA CHECK.
 - 11 VALVULA DE PASO, AIRE AL PILOTO (VIENE CON EL CODO)
 - 12 GOBERNADOR ACERO (VIENE CON EL PILOTO)
 - 13 VALVULA SOLENOIDE DEL PILOTO DE 3/8" B ASCO
 - 14 VALVULA HUSKY
 - 15 REGULADOR DE PRESION 922 FISHER
 - 16 VALVULA DE 8 VIAS MANUAL PARA CAMBIO DE TANQUE
 - 17 VALVULA DE CIERRE DE TANQUES DE GAS
 - 18 MEZCLADOR DEL PILOTO (EL PILOTO TIENE UNA CAPACIDAD DE 75000 BU/H).
 - 19 VALVULA MARIPOSA 16 BV (VIENE CON EL QUEMADOR) SIRVE PARA CONTROL MANUAL
 - 20 VALVULA DE COMPUERTA DE 4" CON MICRO SPOT, PARA ARRANQUE EN FUEGO BAJO
 - 21 VALVULA MARIPOSA 8 BV (VIENE CON EL QUEMADOR) PARA AJUSTE DEL AIRE DE ATOMIZACION
 - 22 TRAMO DE MANGUERA FLEXIBLE
 - 23 LIMITE DE PRESION BAJO DEL AIRE DE COMBUSTION MCA, HONEYWELL CAT C-637, B1002.
 - 24 MANOMETRO A 32 OSI
 - 25 MANOMETRO A 2 Kg/cm
 - 26 LIMITE DE PRESION BAJO DEL COMBUSTIBLE HONEYWELL, CAT L 404 Y 1029
 - 27 LIMITE DE TEMPERATURA HONEYWELL MOD. S404
 - 28 TERMOMETRO DE 0 A 20°C
 - 29 SWITCH DE FLUJO DE AIRE DRY-SYS MOD 955
 - 30 VENTILADOR SH4628-5 DIRECTAMENTE ACOPLADO
 - 31 TRANSFORMADOR DE IGNICION, CAISA "FO 0"
 - 32 TANQUES DE GAS DE 50 LTS C/U
- Proporcionado por el cliente

ENTERPRISE S.A

RODRIGUEZ SERO 424 MEXICO 12 de

DIAGRAMA DE CONEXION MECANICA DEL EQUIPO DE COMBUSTION PARA EL ANHYDRO DE QUIMICA CENTRAL

DIBUJO ESCALA

APROB ACOT

C-278 FECHA 29-X-70.

- Alambre de extensión, duplex, calibración "J", forrado de asbesto, conductores del número 16.

- Control límite indicador-registrador, con restablecimiento manual para dos zonas de control individual.

- Límite alto temperatura para el combustible; un elemento termal, para una gama de temperatura de 40-174°C, en acero inoxidable y 3' de longitud.

- Control indicador con elemento termal, para control remoto. Con una gama de temperatura de 40-425°C, bulbo y capilar de acero inoxidable.

- Traductor, para ser adaptado al control.

- Válvula de control dual de puerta ajustable para el combustible de 3/8", acoplado a una válvula de mariposa con actuador 120V/50C, 90° de giro, 220 psi de par, con un tiempo de --abertura igual a 60 seg.

OPCION N° 2.- Control proporcional.

B - 1) - Unidad de transferencia de control, para efectuar el control en forma automática o manual.

B - 2) - Control de temperatura, con entrada de termopar Fe-constantán; para trabajar junto con la unidad de transferencia, cuando ésta se encuentra en "automático". Suministro: 220V, 50/60 ciclos.

B - 3) - Termopar tipo termocax en Fe-constan, con un diámetro de 2mm. y una longitud de 10 cm., con funda protectora de acero inoxidable.

B - 4) - Alambre de extensión para termopar tipo termocox en Fe-constan con malla de blindaje y forro de plástico.

B - 5) - Límite de temperatura con banda proporcional interna; trabaja con una corriente de 0 a 20 mA, con un rango de 0-100% suministro: 220 V, 50/60 ciclos.

B - 6) - Registrador potenciómetro con gráfica de rollo y las plumas, con un rango 0-100%, trabaja con una corriente de 0-20 mA. Suministro: 120V/220, 60 ciclos.

B - 7) - Termómetro de resistencia para ductos con tubo protector de acero, con un rango de 0-150°C y una longitud de 250 mm.

B - 8) - Transmisor de temperatura, con un rango de temperatura de 0-400°C con entrada de termopar de Fe-constan, trabajando

con una corriente de 0-20 mA. Suministro: 120/240 V, 50/60 c/s

c) "Sistema de protección".

C - 1) - Sistema de protección contra falla de flama, suministro: 120V/50c/seg. Incluye: Base y fotocelda de ultravioleta.

C - 2) - Alarma con swícht silenciador de tipo continuo.

C - 3) - Estación de botones.

C - 4) - Piloto de encendido eléctrico. Incluye: mezcla - dor, boquilla, bujía de encendido, gobernador a cero, válvula macho para el gas y válvula para el aire.

C - 5) - Válvula de solenoide para la línea del piloto, - de 3/8" de diámetro, suministro: 120V/50 c/s.

C - 6) - Válvula hidromotor, de 3/4" de diámetro con asíst to fibra, suministro: 120V/50 c/s. Para trabajar a una temperatura no mayor de 120°C.

C - 7) - Válvula de alivio para el combustible de 1/2" de diámetro y para trabajar con una presión máxima de 300 psi.

C - 8) - Transformador de encendido para el piloto, elevando el voltaje de 120V a 6000V.

C - 9) - Contadores de tiempo (timers) con una gama de tiempo de 0.2 a 180 seg.; para emplearse en la purga y encendido del quemador, opera a 120V/50 c/seg.

C - 10) - Relevador de traslape a 120 volts y 50 c/seg.

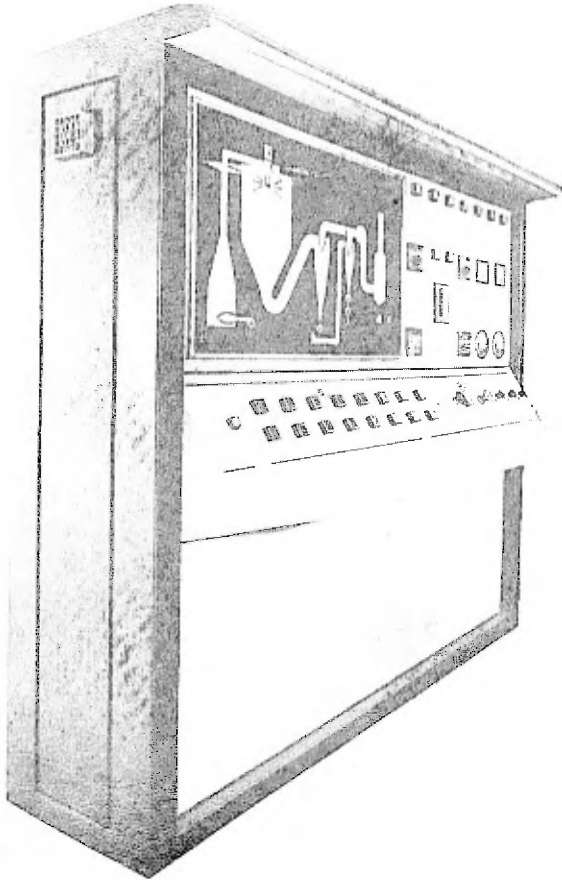
d) "Tablero de control".

D - 1) - Tablero de control, tamaño TV modular con consola tipo #C#; en él van los instrumentos del proceso: La unidad de transferencia de control, el registrador potenciométrico, - los límites de temperatura, el sistema de seguridad, la alarma, los contadores de tiempo, la estación de botones y el interruptor del circuito de combustión. Junto con la construcción del - tablero de control van incluidos el diagrama del proceso y el - diagrama eléctrico de la planta.

Características fundamentales del proceso de secado.

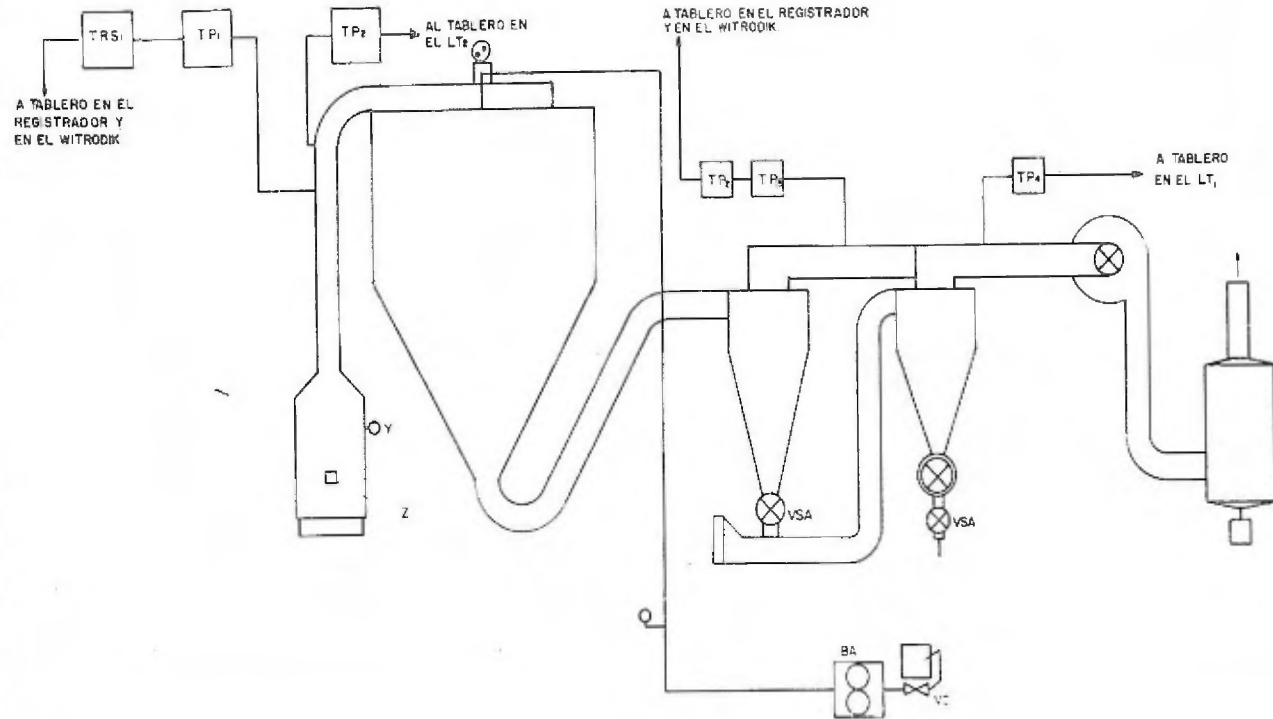
I) Descripción general: Al principio de este capítulo

T A B L E R O



D E C O N T R O L

DIAGRAMA DEL PROCESO.



clave	DESCRIPCION
TR ₁	TRANSMSOR PHILLIPS CAT 9404-278-10-1 DE 0 a 400°C PARA LA MEDICION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE DE ENTRADA AL SECADOR DEBE INSTALARSE EN EL CAMPO A UNA DISTANCIA MAXIMA DE 3m DEL LUGAR DONDE SE PONGA EL TERMOPAR
TR ₂	TRANSMSOR PHILLIPS CAT DE 0 a 150°C PARA LA MEDICION DE LA TEMPERATURA DEL AIRE DE ENTRADA AL SECADOR DEBE INSTALARSE EN EL CAMPO A UNA DISTANCIA MAXIMA DE 3m DEL LUGAR DONDE SE PONGA EL TERMOPAR
TP ₁	TERMOPAR PARA MEDICION DE TEMPERATURA DE LA ENTRADA DE AIRE AL PROCESO, MOD
TP ₂	TERMOPAR PARA LIMITE DE TEMPERATURA DE LA SALIDA DE AIRE DEL PROCESO, MOD TERMOCOAX TFA 20-10-2
TP ₃	TERMOPAR PARA MEDICION DE TEMPERATURA DE AIRE A LA SALIDA DEL PROCESO PHILLIPS MOD. 9404-125-800ST RANGO DE 0°C a 150°C
TP ₄	TERMOPAR PARA EL LIMITE DE TEMPERATURA A LA SALIDA DEL PROCESO PHILLIPS CAT TERMOCOAX TFA 20-10-2
LT ₁	LIMITE DE TEMPERATURA PARA EL AIRE DE ENTRADA AL PROCESO, PHILLIPS CAT. 9404-435 -80 25 RANGO 50 a 450°C
LT ₂	LIMITE DE TEMPERATURA PARA EL AIRE DE SALIDA DEL PROCESO, PHILLIPS CAT. 9404-435
BA	BOMBA DE ALIMENTACION
VSA	VALVULA DE SELLO DE AIRE
VC	SERVO MOTOR PHILLIPS, MOD.
Y	SWITCH DE FLUJO DE AIRE DRY-SYS MOD 955
Z	QUEMADOR 168 HCF-C60

ENTERPRISE S.A.
 RODRIGUEZ SERO 489 HENRIQUEZ
 DIAGRAMA DE COEXION MECANICA DEL EQUIPO
 DE COMBUSTION PARA EL AMBITO DE
 DE CURSOS CENTRAL
 C.A.M. DE BARRIOS
 DISEÑADO: TERCAL
 APROBADO: TERCAL
 C-224 FECHA 1971

se vieron las partes de que se compone un secador por aspersión (spray dryer); ahora veremos las funciones que tienen cada uno de ellos.

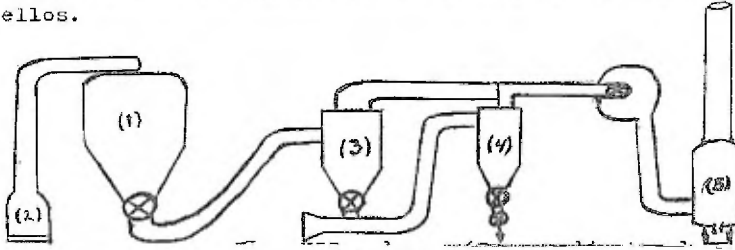


Fig. VII - 1

El "secado por aspersión" constituye una operación unitaria, en el cual los sólidos se encuentran diluidos en la fase líquida, de la cual éstos son separados por contacto sólido-gas. El material que se alimenta a la cámara de secado es una solución de dicromato de potasio, la cual es puesta en contacto con los gases calientes que provienen del horno con la finalidad de evaporar todo el líquido y separar así a los sólidos ($K_2Cr_2O_7$). En esta parte, se efectúa una transferencia de calor y de masa entre la partícula dispersada y los gases calientes.

La forma en que opera este secador es en paralelo; La alimentación de dicromato y la corriente de gases es en la misma dirección.

La operación de secado por aspersión es llevada a cabo por atomización del líquido. Esta es efectuada de dos diferentes maneras:

- 1) Atomización por medio de "toberas de alta presión".
- 2) Atomización por medio de un "disco de centrifugación".

Este tipo de atomizadores dispersan pequeñas partículas que pueden tener un tamaño de 2 hasta 500 micras. De acuerdo con el tamaño de las partículas que se quieren obtener, se utilizará la forma de atomizar.

- 1) Toberas de alta presión.

Con esta forma de atomización el fluido pasa a través del orificio bajo la acción de una gran presión. Las características de la aspersión dependen básicamente de la presión y del -

tamaño del orificio de la tobera. Por ejemplo: si aumentamos la presión manteniendo el mismo orificio obtendremos una mayor capacidad (a mayor presión mayor capacidad) y el tamaño de las partículas será muy pequeño (muy fino).- Ahora, si disminuimos la presión obtendremos una aspersión con partículas muy burdas. El material del que están hechas las boquillas es de acero inoxidable 316 ; con inserciones de joyas sintéticas en el orificio, para protegerlo contra la erosión.

2) Disco de centrifugación.

La atomización es efectuada por medio de un disco, el cual gira a 12000 rpm; bajo la acción de esta fuerza centrífuga el fluido es descargado con una gran velocidad hacia afuera. La característica más importante es que con este tipo de atomización se obtiene una distribución más uniforme en el tamaño de la partícula; además de que puede funcionar bajo diferentes rangos de alimentación sin producir grandes variaciones en el producto. El disco es movido por medio de un motor eléctrico directamente acoplado y su diámetro es de 12 pulg.(30cm).

Después de haber sido separadas las partículas de dicromato en la cámara de secado, son enviadas a un ciclón primario en el cual son separados los sólidos de los finos por medio de centrifugación. El aire entra al ciclón tangencialmente y viaja con una trayectoria en espiral, llevándose consigo a las partículas más pesadas. En el ciclón secundario los finos son recuperados bajo la misma operación. Del ciclón secundario es descargado el dicromato y puesto en costales listo para su venta. Los finos que salen del ciclón secundario son recuperados por medio de una torre lavadora (scrubber). Esta solución es concentrada y regresada a la alimentación en el secador.

La característica más importante que se obtiene con este secado es su forma esférica.

Propiedades físicas: Para efectuar el control de calidad de este material, es necesario checar: 1) la densidad de bulk (bulk density), 2) el tamaño de la partícula y 3) el grado de pulverización (dustiness). Estas propiedades van a depender de un gran número de factores, los más importantes son: La dirección que tenga el flujo de gases a la entrada del secador y su temperatura,

la forma de atomización, la concentración de sólidos en la alimentación y la temperatura de la alimentación principalmente.

El control del proceso se efectúa teniendo en cuenta a las características que se le quiera dar a las partículas, - atendiendo a las "propiedades físicas" del dicromato de potasio.

En la selección del equipo existen dos opciones; ambas con el mismo modo de control: PROPORCIONAL. Su diferencia - se basa exclusivamente en las marcas y tipos de las compañías - de donde pudo ser alquilado el equipo. La segunda opción se es cogió debido a que los costos y tiempos de entrega fueron más - bajos; además de que presenta la ventaja de que se le puede adaptar el tiempo de reajuste y el tiempo de derivativa.

Las variables que están relacionadas con el control son las siguientes:

- Flujo de alimentación de la solución de dicromato de potasio.
- Temperatura de la alimentación.
- Temperatura del aire a la entrada del secador.
- Temperatura del aire a la salida del secador.

La variable por controlar es la temperatura del aire y de ella depende su control automático. En el diagrama del proceso adjunto, pueden verse los termopares utilizados como elementos primarios de medición, colocados en los puntos más importantes para su control son: Los termopares TP_1 y TP_3 , efectúan la medición de la temperatura del aire a la entrada (en el horno) y a la salida (en el primer ciclón) respectivamente. Basado en el principio de los termopares, se genera una "señal" que entra al "transmisor PCS (TP). Este a su vez manda una señal de 0-20mA a un registrador potenciométrico (GR) en donde la temperatura es graficada. El transmisor debe estar tan cerca como sea posible del elemento primario, sin embargo deberá tenerse el cuidado de que el instrumento no quede expuesto al calor por radiación. De no tener en cuenta estas observaciones el aparato no trabajará satisfactoriamente. El termopar TP_3 , que se encuentra en el primer ciclón manda su señal al transmisor y, éste la envía simultáneamente al registrador y al controlador de temperatura (CT)

El controlador de temperatura funciona de la siguiente

manera; Se selecciona la temperatura a la cual se quiere controlar el proceso "w" (punto de ajuste). El valor medido por el termopar es enviado al circuito en donde se produce la señal de error; en donde es comparado con el punto de ajuste y genera una desviación (e). Esta es enviada a través del circuito interno hasta llegar al relevador de salida. En él se genera una señal que es retroalimentada (c) y agregada a la señal de entrada (v). Una vez que es minimizada la "desviación", se obtiene la señal correcta (y) de control. Este controlador puede trabajar con voltaje o corriente, que actúa sobre un motor el cual manda abrir o cerrar al elemento final de control.

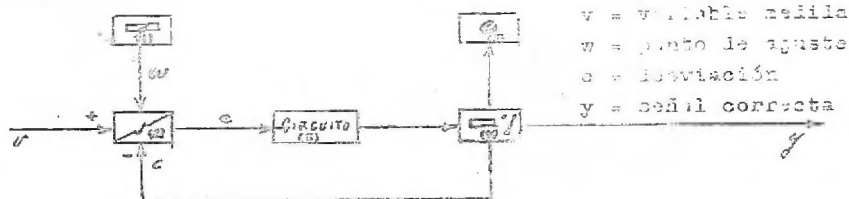


Fig. VII-2

Donde:

- (1) Selector del punto de ajuste
- (2) Circuito que produce la señal de error o desviación.
- (3) Circuito interno del aparato
- (4) Relevador de salida
- (5) GRAFICADOR

Una característica muy importante del controlador de temperatura (CT) es que el ajuste de la banda proporcional (%BP) puede ser efectuado en forma independiente, por medio de otro instrumento (un potenciómetro generalmente). Esto es en caso de que se le adicionara el "control de reajuste".

El control de temperatura está conectado (ver diagrama eléctrico de la planta) a la unidad de transferencia de control (UT). Este aparato es una estación que tiene como función la de efectuar los cambios en el modo de operación:

- a) Automática.
- b) Manual.

En el capítulo V, se vió que las formas en que pueden efectuarse el control son dos: a) Retroalimentación, b) De alimentación simple. En el primero se emplea control "automático", que es cuando se utiliza el controlador de temperatura (CT) y en el de alimentación simple se emplea el control "manual".

La unidad de transferencia de control funciona de la siguiente manera:—Cuando a la estación se oprime el botón "automático" inmediatamente entra a trabajar el "control de temperatura".

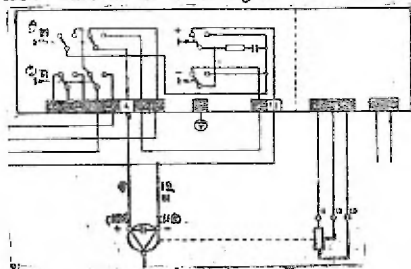


Fig. VII-3

—Cuando se oprime el botón manual, el control se efectúa moviendo directamente a la válvula de control. En el diagrama de la Fig. VII-3, se muestra el circuito del instrumento. Para el control manual, están las líneas que llegan en 4 y 12, las cuales conectan al instrumento con el motor de la válvula, por medio de las líneas 118 y 120 como se puede ver en el diagrama eléctrico de la planta. Cerrando el circuito con (+) o con (-), la válvula de control se moverá abriéndose o cerrándose.

Por último, los termopares TP_2 y TP_4 efectúan la medición de la temperatura del aire a la entrada del secador y a la salida del segundo ciclón respectivamente. La señal generada de cada uno de ellos es enviada a los límites de temperatura (LT). (En el tablero de control). "Los límites" funcionan de manera similar a como lo hace el control de temperatura. Su diagrama de bloque es idéntico a 1 de la Fig. VII-2.

Estos límites de temperatura trabajan como 2 posiciones (On-off).— En caso de que se sobrepase el "punto de ajuste" de los "límites de temperatura" la corriente inmediatamente es cortada y el proceso queda interrumpido. Estos límites tienen como función la de dar seguridad al proceso.

III.- SISTEMA DE COMBUSTION:

Forma parte del proceso de secado y es de gran importancia ya que proporciona el aire caliente junto con los gases de combustión necesario para efectuar el secado de la solución de dicromato de potasio. El sistema de combustión puede verse en el diagrama adjunto.

El sistema de combustión está constituido por el quemador y el ventilador.

El quemador seleccionado trabaja con chapopote y fue calculado tomando en cuenta:

- Cantidad de calor que requiere el aire de proceso.

Datos:

Cálculos

(aire)

$$T \text{ ambiente} = 20^{\circ}\text{C} = 68^{\circ}\text{F}$$

$$Q = m \text{ cp } \Delta T$$

$$T \text{ proceso} = 225^{\circ}\text{C} = 436^{\circ}\text{F}$$

$$Q = (18,500 \text{ lb}) (0.25) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}}$$

$$C_p \text{ aire} = 0.25 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}} \text{ ó } \frac{\text{cal}}{\text{g}^{\circ}\text{C}}$$

$$M_{\text{aire proceso}} = \frac{18,500 \text{ lb de aire} (*) (436-68)^{\circ}\text{F}}{\text{hr}} = \frac{18500 \times 368}{4} = 1.7 \times 10^6$$

$$Q = 1,700,000 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

(*) Esta masa de aire es la necesaria para secar la solución. Este dato fue proporcionado por la compañía que diseñó el secador. Las pérdidas por radiación ya fueron consideradas, por lo que en base al calor sensible, se hizo la selección del quemador.

Tomando en cuenta la eficiencia⁽¹⁾ por altura (En León, Gto.) del 90% ; la capacidad nominal del quemador es igual a:

$$Q \text{ nominal} = \frac{Q}{\phi}$$

$$Q = 1,700,000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

$$Q \text{ nominal} = \frac{1,700,000}{0.9}$$

$$\phi = 0.90$$

$$Q \text{ nominal} = 1,900,000 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

En consecuencia el quemador seleccionado tiene una capacidad nominal de 1,900,000 Btu/hr

b) Ventilador de combustión.-

Datos(1):

Cálculos:

1 galón de chapopote = 140,000 BTU'S

$$\frac{1 \text{ galón}}{\text{hr}} = 1710 \frac{\text{ft}^3 \text{aire}}{\text{hr}}$$

Capacidad del quemador en gph =

$$(1,900,000 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}) \frac{(1 \text{ galón chapopote})}{140,000 \text{ BTU}}$$

$$= 13.55 \text{ gph de chapopote}$$

.*. El aire de combustión es igual a :

$$\text{Capac.vent.} = 13.55 \text{ gph} \times \frac{1710 \text{ ft}^3 \text{aire/hr}}{1 \text{ gph chapopote}} = 23,200 \frac{\text{ft}^3 \text{aire}}{\text{hr}}$$

Por lo tanto, la selección del ventilador se hace en base a:

$$\text{Capac.vent.} = 23,200 \frac{\text{ft}^3 \text{aire}}{\text{hr}}$$

El ventilador de catálogo más cercano tiene una capacidad de 28,100 ft³/hr un una presión de descarga igual a 32 onzas(55.3 pulg. columna de agua).

Con el objeto de prevenir cualquier falla del quemador o del ventilador, se seleccionaron:(Ver diagrama sistema de combustión)

a) Para el quemador.

- Límite de temperatura para el combustible. La temperatura del chapopote deberá estar a 250°F (121°C).

- Límite de presión bajo para el combustible. Esta presión depende de la bomba de combustible cuya presión de descarga es - igual a 25 psi (2KG/cm²). En caso de que se tenga una presión - muy baja el quemador no funcionará correctamente. La presión mínima del quemador permisible es igual a 20 psig(9.1KG/cm²).

b) Para el ventilador.

- Límite de presión bajo del aire de combustión. El quemador requiere de una determinada presión del aire para atomización. (P_{atom} = 38" para aceite pesado) y una presión de combustión(P_{comb} = 28" aire combustión). De una manera general, mientras mayor sea la -- presión del combustible mayor será la capacidad del quemador.

En el diagrama eléctrico de la planta, puede verse, que los "límites" se encuentran conectados en cascada. Esto es, con el objeto de que en caso de que fallara la presión del chapopote o del aire o bien la temperatura; provocaría un mal funcionamiento del quemador que repercutiría en las características del aire que va al proceso. Además sirven como seguridad, ya que en caso de que llegara a apagarse el quemador, el circuito de corriente quedaría cortado e inmediatamente comenzaría a sonar la alarma.

Referencia.

- (1) Pocket Engineering Guide. "Eclipse"

Capítulo VIII.- "Costos del Equipo".

El desarrollo del tema se efectúa de la siguiente manera:

- 1) Costo del equipo:
 - a) Precios { - instrumentos importados
- instrumentos de compra local
 - b) Impuestos de importación { - cuota específica
- ad-valorem
- cuota adicional
 - c) Fletes
 - d) Costo total del equipo
- 2) Costo del equipo instalado:
 - e) Instalación { - costo mano de obra por ingeniería (Ingenieros, técnicos y obreros)
- costo material accesorios (tubería, alambre eléctrico, etc.)
- 3) Relación entre el costo del secador Dry-Sys y su instrumentación
- 4) Gasto del combustible pesado del quemador.

1) Costo del equipo:

En la compra de los instrumentos, algunos de ellos, fueron importados y otros fueron de compra local. En general el costo del equipo se eleva considerablemente por concepto de importación y fletes. En el estudio que se hace en este capítulo son tomados en cuenta estos factores.

a) Precios.

Los precios enlistados corresponden a la compañía Enterprise, S.A., casa especialista en controles de combustión. Los instrumentos que a continuación son presentados están ordenados por partida, cantidad y precio total. Con el objeto de no repetir los nombres de cada uno de los instrumentos que se encuentran identificados por los números indicados de acuerdo con el capítulo anterior. Los precios son en moneda nacional.

Nomenclatura:

A - Equipo de combustión B - Instrumentos de control C - Instrumentos de protección

Partida	Cantidad	Precio total (L.A.B.)
A - 1	1	8184.00
A - 2	1	15810.00
A - 3	1	850.00
A - 4	1	500.00
A - 5	1	650.00
A - 6	1	735.00
A - 7	1	540.00
A - 8	1	750.00

Nota: Este equipo fue comprado a la Compañía Philips Comercial S.A. de C.V. y los precios dados son libre a bordo (L.A.B.) en México, D.F.

B - 1	1	2320.00
B - 2	2	2850.00
B - 3	2	404.00
B - 4	1	188.00
B - 5	2	3050.00
B - 6	1	12282.00
B - 7	1	835.00
B - 8	1	3450.00
C - 2	1	520.00
C - 4	1	1028.00
C - 5	1	382.00
C - 7	1	650.00
C - 8	1	245.00
D - 1	1	30000.00
		<u>Total \$ 86223.00</u>

A las partidas de compra local habrá que agregarles las partidas de importación que a continuación son mencionadas. Los precios también son en moneda nacional y se incluyen los pesos netos y bruto que serán de utilidad para la determinación de los impuestos y fletes.

Partida	Cantidad	Precio total	Peso neto (Kg)	Peso bruto (Kg)
A - 8	1	750	4	6
A - 9	1	1782	19	25
C - 1	1	3582	14	20
C - 3	1	550	1	1.5
C - 6	1	3940	13	18
C - 9	2	3480	2	2.5
C - 10	1	450	0.113	0.250
		<u>\$ 14534</u>	<u>55.3444</u>	<u>73.25048</u>

Costo parcial del equipo (No están incluidos impuestos, gastos de importación ni fletes)

Precio partidas compra local: \$ 86223

Precio partidas de importación: \$ 14534

Total parcial: \$ 100757

Por concepto de equipo importado representa un 14.42%

A los instrumentos importados habrá que agregarles los impuestos de importación y los fletes.

b) Impuestos de importación.

De acuerdo con la clasificación hecha por el Código Internacional de Bruselas, los instrumentos de importación están clasificados con una fracción arancelaria. A continuación presentamos una tabla en la cual puede verse el número de partida, fracción arancelaria que le corresponde, unidad para la aplicación, cuota específica, ad-valorem y precio oficial.

- { (*) Requiere permiso previo de SIO para su importación
- { (1) Esta fracción causa una cuota adicional del 10% sobre el valor de la mercancía.

Partida	Fracción arancelaria	Unidad	CUOTAS		Precio oficial	(1) Cuota adicional
			(Kg) Específica	(%) Al-Valorem		
A - 8	9024-A999(*) (1)	KL	excenta	10%	100 \$/KL	75
A - 9	8410-D008(*)	KB	excenta	20%	5 \$/KB	--
C - 1						
C - 3	9106-A001	KL	1 \$/KL	20%	165 \$/KL	--
C - 9						
C - 6	8461-C999(*) (1)	KB	0.20 \$/KB	35%	32.95 \$/KB	394
C - 10	8519-A017(*) (1)	KL	excenta	20%	5 \$/KL	45
					<u>Total</u>	<u>\$ 514.00</u>

Tabla A

Fracción	Clasificación
8410	Bombas
8461	Válvulas
8519	Relevadores
9024	Los demás
9106	Contadores de tiempo

Para el cálculo de los impuestos se tiene que:

$$\text{Impuesto total} = \text{cuota específica} + \text{ad-valorem}$$

El "ad-valorem" es un porcentaje del precio oficial o del precio de factura; ésto depende de cual sea la cifra más grande. De una manera general siempre se toma el más alto de los dos.

A los impuestos de importación hay que agregarle - gastos por concepto de manejo de aduana, recepción, legalización de documentos, honorarios agente aduanal, etc. Estos son estimados en un 9% aproximadamente del impuesto total.

Gastos en la aduana = $3443(0.09) = 310$ (gastos de importación)

(1) Cuota adicional del 10% sobre el valor de la mercancía: \$514.00

Partida	Peso (Kg)	Precio oficial (\$ M N)	Precio factura (\$ M N)	Cuota especifica (\$ M N)	ad-valorem (%) (M N)	Impuesto (\$ M N)
B - 8	4 K.L	(100 \$/K.L)(4KL) = 400	750	excenta	(750)(0.10) = 75	75
A - 9	25 KB	(5 \$/KB)(25KB) = 125	1782	excenta	(1782)(0.20) = 356	356
C - 1						
C - 3	17 K.L	(165 \$/KL)(17KL) = 2805	7612	(1 \$/KL)(17) = 17	(7612)(0.20) = 1522	17 + 1522 = 1539
C - 9						
C - 6	18 KB	(32.95 \$/KB)(18) = 593	3940	(0.20 \$/KB) (18) = 3.6	(3940)(0.35) = 1379.4	3.6 + 1379.40 = 1383
C - 10	0.113 KL	(5 \$/KL)(0.113) = 0.565	450	excenta	(450)(0.20) = 90	90

Impuesto total : \$ 3443

c) Fletes.

Dado que los instrumentos provienen de diferentes partes de los Estados Unidos se obtuvo la siguiente relación de las tarifas de aviación:

Lugar	Costo/peso (Dólares/KB)	Peso bruto	Costo(\$) (Dólares)
Boston, Massachusetts	1.15 \$/KB	45 KB	51.75
Milwaukee, Wisconsin	0.99 \$/KB	28.25 KB	28
Minneapolis, Minnesota	0.99 \$/KB		
			\$ 79.75 (dólares)
			Total(\$ M.N.) = \$ 997.00

El costo total por concepto de fletes de Los Estados Unidos a México, D.F. es igual a :

Total fletes: \$ 997.00

d) Costo total del equipo:

El costo total del equipo se obtiene tomando en cuenta los costos calculados en los incisos anteriores.

- 1) Precio partidas de compra local: \$ 86,223
- 2) Precio partidas de importación : \$ 14,534
- 3) Impuesto total: \$ 3,443
- 4) Gastos de importación o aduana: \$ 310
- 5) Cuota adicional del 10% sobre : \$ 514
el valor de la mercancía
- 6) Fletes:

	\$ 997	
TOTAL	\$ 106,821	≈ 106,000

e) Instalación.

La instalación de los instrumentos se hizo en la planta "Química Central" León, Gto.

Para obtener el costo de la instalación deberá tomarse en cuenta; El número de personas que intervinieron, asignando la especialidad y fijando el costo por horas o por día (horas "hombre")

de cada uno de ellos. Después deberá estimarse el tiempo que tardarán en efectuar el trabajo; para que en estas condiciones pueda calcularse el "costo de la mano de obra".

Una vez hecho un estudio de las diferentes actividades a realizar será necesario fijar el material que será utilizado - con el objeto de estimar el "costo del material".

A continuación se muestra la siguiente tabla.-

Especialidad	Costo por día-hombre	Número de personas	\$/día
Supervisor	350	1	350
Obrero especializado	85	3	255
Peón	20	4	80
Total			<u>625</u> por día

El tiempo en que se realizó la obra fue igual a 24 días
 Por lo tanto el costo total de mano de obra = $(625 \text{ \$/día})(24 \text{ días})$
 = 15,000

<u>Materiales</u>	<u>Costo material</u>
Alambrado	
Constactos	
Interruptores	6104
Enchufes	
Tornillos, tuercas	
etc.	

En consecuencia, se obtiene:

Costo de instalación

- gasto en mano de obra:	15,000
- gasto en materiales :	<u>6,104</u>
Total	<u>21,104</u> (Instalación)

Gastos por hospedaje, pasajes y comida = ($\$300/114$)(24 días) = $\$7,200$

----- o -----

2) Costo del "equipo instalado" .

Costo total equipo	:	106,000	
Instalación	:	21,104	
Gastos por hospedaje, pasajes y comida		<u>7,200</u>	
Gran Total		<u><u>$\\$134,325$</u></u>	\approx <u><u>134,000</u></u>

De donde:

$$\% \text{ instalación} = \left(\frac{21,104}{106,000} \right) \times 100 = 19.9\%$$

Lo que representa un 20% del "costo total del equipo".

3) Relación entre el costo del secador Dry-sys y su instrumentación.-

El precio del secador incluyendo la instalación fue de $\$1,050,000$ (M.N.) ; según datos proporcionados por la compañía que se encargó de su construcción. De aquí podemos obtener:

($\$$ M.N.)

Costo del secador	1,053,000
Costo de instrumentación (equipo instalado)	134,000
Total	<u><u>$\\$1,192,000$</u></u>

Lo que representa:

a) $(\%)_a = \left(\frac{134,000}{1,192,000} \right) \times 100 = 11.2\%$ con respecto al "secador instalado con instrumentos".

b) $(\%)_b = \left(\frac{134,000}{1,057,000} \right) \times 100 = 12.7\%$ con respecto al precio

del secador sin instrumentos.

4) Gasto de combustible pesado del quemador.-

- El consumo de chipopote es igual a 13.55 gal/hr

- Su precio es de 0.20 $\$/$ litro.

Por lo tanto:

$$\text{Consumo diario} = 13.55 \frac{\text{gal}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{7.48 \text{ gal}} \times \frac{28.3 \text{ l}}{1 \text{ ft}^3} \times \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ día}} = 1230 \text{ l/día}$$

El gasto de chapopote es igual a:

$$1230 \frac{\text{l}}{\text{día}} \times 0.20 \frac{\$}{\text{l}} = 246 \frac{\$ \text{M.N.}}{\text{día}}$$

R E S U M E N

Costo del equipo:

	(\$, M.N.)		
- Precios partidas de compra local:	86,223	} (I)	} (II) } (III)
- Precios partidas de importación:	14,534		
- Impuesto total:	3.443		
- Gastos de importación o aduana:	310		
- Cuota adicional del 10% sobre el valor de la mercancía:	514		
- Fletes:	997		
	<u>106,000</u>		
- Instalación:	21,104		
- Gastos por hospedaje, pasajes y alimentación:	7,200		
	<u>134,000</u>		
- Secador Dry-Sys:	1,108,000		
	<u>1,192,000</u>		

De donde:

- (I) Costo total del equipo
- (II) Costo del equipo instalado
- (III) Costo del secador incluyendo su instrumentación

- Conclusiones -

1a) Se logró el control del proceso de una manera más exacta, por medio de la instrumentación.

2a) Se trabajó bajo rangos más estrictos de control, lo cual repercutió en un producto más uniforme.

3a) Se redujo a un mínimo el número de errores, obteniéndose un producto de muy buena calidad.

4a) Se minimizaron los tiempos muertos lo cual permitió trabajar a una mayor capacidad.

5a) El retraso más importante en el control automático lo constituye el tiempo muerto.

6a) La estabilidad o inestabilidad de un proceso depende de la capacitancia del equipo.

7a) El tiempo muerto, la resistencia y la capacitancia constituyen los retrasos de un proceso.

8a) Los "cambios de carga" afectan a la calidad del producto en la selección de los modos de control.

9a) Las variaciones de energía o de masa, con mayor frecuencia y magnitud, influyen en la dificultad del "control".

10a) Los modos de control dependen de la velocidad de respuesta, del tiempo muerto y de los cambios de carga.

11a) El control flotante se caracteriza por una alta velocidad de respuesta, proceso autoregulable, pequeños tiempos muertos y lentos cambios de carga.

12a) Los cambios de carga en el control proporcional ocasionan una desviación permanente en la variable controlada, rompiendo con ésto el equilibrio del sistema.

13a) El control "proporcional con reajuste" (control de dos modos) hace que la desviación (offset) tienda a cero.

14a) El control "proporcional con reajuste y derivativa" (control de tres modos) logra que el sistema llegue más rápidamente a la estabilidad que con otras formas de control.

15a) Mientras mayor sea el número de "modos de control", mayo-

res serán las "soluciones posibles" para que el sistema llegue a condiciones estables.

16a) Los métodos de "trayectoria abierta" suponen que el proceso tiene únicamente retrasos de primer orden y tiempos muertos simples.

17a) El método gráfico permite hacer una rápida estimación de la banda proporcional, el tiempo con reajuste y el tiempo con derivativa.

Capítulo IX - "Bibliografía"

a) Libros.-

- 1) Holzbock Werner G.: "Instruments for Measurement and Control" Reinhold, N.Y. (1955)
- 2) Harriott, P.: "Process Control" Mc. Graw Hill book, N.Y. (1964)
- 3) Considine, D.M.: "Process Instruments and Controls" Mc Graw Hill book, N.Y. (1957)
- 4) Considine, D.M.: "Handbook of applied Instrumentation" Mc Graw Hill book, N.Y. (1964)
- 5) Eckman, J.P.: "Principles of Industrial Process Control" John Wiley and sons Inc; N.Y. (1958)
- 6) Eckman, D.P.: "Principles of Industrial Process Control" John Wiley and sons Inc; N.Y. (1958)
- 7) Rhodes, T.J.: "Industrial Instruments and Control" Mc Graw Hill, N.Y. (1941)
- 8) Shilling G.D.: "Process Dynamics and Controls" Holt, Rinehart and Wiston, N.Y. (1963)
- 9) La Joy, M.H.: "Industrial Automatic Controls" Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1954)
- 10) Shinskey P.G. "Process Control Systems" Mc Graw Hill, N.Y. (1967)
- 11) Halliday and R. Resnick "Physics, Part 2" John Wiley and Sons, Inc., N.Y. (1960)
- 12) Perry J.H.: "Chemical Engineers Handbook" Mc Graw Hill book, N.Y. (1963)
- 13) Kern, D.P.: "Process Heat Transfer" Mc Graw Hill book, N.Y. (1950)

b) Revistas y Catálogos.-

- 14) Eclipse Fuel Engineering Catalog. Rockford, Illinois, p. M-150 (1972)
- 15) "Pocket Engineering Guide" Eclipse Rockford, Illinois, p. 14, 38, 46, (1971)
- 16) Taylor Instruments Co.,: "How to set three-term Controllers" Technical Data Nº 25 Nov. (1958)
- 17) "Process Instrumentation Manual". Hydrocarbon Processing Gulf Publishing Co., p. 4 (1968)
- 18) p. 50-68
- 19) p. 76-89

- 41) Soule, I.M.: "Multiple Variables Require Special Control Techniques" Chemical Engineering, p.130-134 Jan. 26 (1970)
- 42) Liptak, B.G.: "Cost of Instruments" Chemical Engineering, p. 60-76 Sept. 7 (1970)
- 43) Holmes, W.S.: "An Introduction to Electrical Control Circuits" Chemical Engineering, p.176-182 Nov. 15 (1971)
- 44) Arant, J.E.: "Special Control Valves Reduce Noise and Vibration" Chemical Engineering, p. 92-98 June 12 (1972)
- 45) Yen Chen Yen: "Estimating Plant Costs in the Developing Countries" . Chemical Engineering, p.89-94 July 10 (1972)
- 46) Friedmann P.C.: "For Process Control: Select the key Variable" Chemical Engineering, p. 85-90 June 12 (1972)
- 47) Chemical Engineering Deskbook; "Pump and Valve Selector" Mc Graw Hill Publication, p. 129-131 Oct. 11 (1971)
- 48) p. 141-149
- 49) Chemical Engineering Deskbook; "Instrumentation and Process Control" . Mc Graw Hill Publication, p. 19-21 Sept.11 (1972)
- 50) p. 49-53



BIBLIOTECA

163

fecha de devolución

El lector se obliga a devolver este libro antes del vencimiento de préstamo, señalado por el último sello

<p>6 MAYO 1996</p> <p>DEVOLUCIÓN</p>	<p>R</p>	
--------------------------------------	----------	--

- 20) Fix, A.H.: "Safety and Instrumentation Systems"
Chemical Engineering Progress, p. 43, 51 May (1972)
- 21) Spence, L.A.: "Methods of obtaining Stable Control"
Chemical Engineering Progress; p. 50-51 March (1972)
- 22) Andrew, W.G.: "Instrumentations"
Hydrocarbon Processing, p.87-89 Dec.(1971)
- 23) Liptak, B.G.: "How to Set Process Controllers"
Chemical Engineering, p. 129-133 Nov. 23 (1964)
- 24) Hornor, J.F.: "Instrument Development Whose Responsibility"
Chemical Engineering, p. 157-160 June 7 (1965)
- 25) Vannah, W.E.: "Process-Systems Engineering",
Chemical Engineering, p. 186-189 June 7 (1965)
- 26) Stecen, D.: "Instrument Elements Guide 1961-1965"
Chemical Engineering, p. 196-204 June 7 (1965)
- 27) Ryan, F and Karp, H.R.: "New Directions in Process Measurement"
Chemical Engineering, p. 161-163 June 7 (1965)
- 28) Considine, D.M.: "What Lies Ahead in Process Control"
Chemical Engineering, p. 142-148 June 7 (1965)
- 29) Forman, E.R.: "Characteristics of Process Variables"
Chemical Engineering, p. 113-118 Part 4, Aug 16 (1965)
- 30) Forman, E.R.: "Control Level and Temperature"
Chemical Engineering, p. 199-204 Part 5, Sep.13 (1965)
- 31) Forman, E.R.: "Dynamic Responses of Processes"
Chemical Engineering, p. 83-88 Part 10, Jan 31 (1966)
- 32) Regenezak, T.J.: "Selecting Temperature Monitoring and Control Systems"
Chemical Engineering,
- 33) Gries, W.H.: "Thermocouples Calibrated through simple Set ΔP "
Chemical Engineering, p. 130-132 Dec. 18 (1967)
- 34) Considine, D.M.: "Process Instrumentation"
Chemical Engineering, p. 84-113 Jan. 29 (1968)
- 35) Noon, D.W.: "Nomograph Solves Rate-Limit Problems in Control Devices"
Chemical Engineering, p. 164-166 Feb. 12 (1968)
- 36) Gasset, L.D.: "Instruments: Pneumatic or Electronic"
Chemical Engineering, p. 136 June 2 (1969)
- 37) Moore, J.F. and Gardner N.F.: "Process Control in 1970'S"
Chemical Engineering, p. 98-133 June 2 (1969)
- 38) Soule, L.M.: "Basic Concepts of Industrial Process Control"
Chemical Engineering, p. 133-138 Sept 22 (1969)
- 39) Soule, L.M.: "Tuning Process Controllers"
Chemical Engineering, p. 101-104 Dec. 1 (1969)
- 40) Soule, L.M.: "Basic Control Modes"
Chemical Engineering, p. 115-119 Oct.20 (1969)