

300617  
42  
24



**UNIVERSIDAD LA SALLE**  
**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA**

**INCORPORADA A LA U.N.A.M.**

**ANALISIS DE UN ALGORITMO DE  
CONTROL AUTOAJUSTABLE**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A**  
**ALEJANDRO FRANCISCO OLIVARES CHAVEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**  
**ING. GUILLERMO ARANDA PEREZ**

MEXICO, D. F.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1993



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# I N D I C E

Introducción.	4
Capítulo I.- Principios básicos del control	6
1.1 El problema de control	6.
1.2 Sistema de retroalimentación	8
1.3 Sistema anticipatorio	9
1.4 Control con retroalimentación	10
1.5 Emergencia y arranque	12
1.6 Lazo abierto contra lazo cerrado	13
1.7 Retroalimentación positiva contra negativa	15
1.8 Oscilación	17
1.9 Características de la oscilación	19
1.10 Características del proceso	20
1.11 Tiempo muerto	21
1.12 Capacitancia y sus efectos	22
1.13 Modelo del proceso	26
1.14 Ganancia y fase	29

1.15 Aplicación del esquema en lazo cerrado	31
---	----

<b>Capítulo II.- Variables físicas de control</b>	<b>34</b>
---	-----------

2.1 Medición de temperatura	34
2.2 Medición de gasto	42
2.3 Medición de nivel	49
2.4 Medición de pH	63

<b>Capítulo III.- Modos de control</b>	<b>71</b>
--	-----------

3.1 Modos de control para la retroalimentación	71
3.2 Modos de control	72
3.3 Control ON-OFF	73
3.4 Aplicando el control ON-OFF	75
3.5 Control proporcional	77
3.6 Midiendo la acción proporcional	78
3.7 Propiedades dinámicas de la acción proporcional	80
3.8 Aplicando el control proporcional	82
3.9 Acción integral	87
3.10 Aplicando la acción integral	90
3.11 Sumando la acción derivativa	94
3.12 Aplicando la acción derivativa	98

Capítulo IV.- El controlador ajustable	100
4.1 Método del reconocimiento del comportamiento a lazo cerrado	101
4.2 Indicación y operación	102
4.3 Parámetros requeridos	106
4.4 Parámetros opcionales	108
4.5 Implementación de la opción preajuste	109
Conclusiones.	115
Bibliografía.	117

## INTRODUCCION

Cualquier estudio de control de proceso debe empezar por investigar el concepto de proceso. Desde un punto de vista de producción se piensa generalmente en un lugar en donde los materiales y muchas veces la energía van juntos para producir un producto determinado. Desde un punto de vista de control el significado es más específico, un proceso se identifica por tener una o más variables asociadas y es muy importante conocer los valores de éstas variables para poder controlarlas.

Los parametros que indican la calidad del producto o las condiciones de operación del proceso se llaman variables de control, como son: presión, nivel, temperatura, flujo, gravedad específica o densidad, pH, contenido de humedad, peso, velocidad y otras variables dependiendo del tipo de proceso.

Hay otro tipo de variables las cuales se denominan variables manipuladas y son: posición de la válvula, posición del amortiguador y velocidad del motor, entre otras. Así, en muchas ocasiones, un lazo de control se manipula para controlar otra variable en un proceso de control más complicado. Por ejemplo, una variable de flujo se manipula por un control de temperatura o nivel.

Todas las variables que afectan a una variable de con-

trol y otras que se manipulan al principio del proceso se definen como carga. Ambas la carga y la variable manipulada pueden influenciar una variable de control para el suministro o la demanda del proceso.

Por ejemplo, la temperatura de salida de un intercambiador de calor se puede controlar, manipulando la válvula de vapor, mientras que el nivel del tanque se puede controlar manipulando la válvula de flujo de salida del mismo tanque.

En ocasiones una variable de control en un proceso, es una variable de carga en otro. Por ejemplo, la temperatura del flujo de salida de un intercambiador de calor estará afectando a otras variables de la planta.

El propósito de este trabajo de tesis, es el tener una visión un poco más clara de que es la instrumentación y control, sus componentes y los beneficios que se pueden obtener tanto a nivel industrial como a nivel tecnológico del país. Para esto traté de analizar un poco todos los parámetros que integran el control, empezando con los parámetros más sencillos que aparecen en cualquier tipo de control, así como las variables más comunes. Posteriormente analicé los diferentes tipos de control en sus distintas etapas, hasta llegar a lo más sofisticado en control que es el controlador autoajutable, el cual nos puede ayudar a conocer más el proceso de nuestra planta.

## CAPITULO I

### PRINCIPIOS BASICOS DEL CONTROL.

#### 1.1 EL PROBLEMA DE CONTROL

La relación entre las variables de control, manipuladas y de carga, califican las necesidades de un proceso de control. La variable manipulada y las variables de carga pueden de igual modo incrementar o disminuir la variable de control, dependiendo del diseño del proceso. Los cambios en la variable de control reflejan el balance entre carga y la variable manipulada.

En un intercambiador de calor, si hay incremento en el vapor (apertura de la válvula), la temperatura de entrada y la temperatura ambiente tenderan a alcanzar la temperatura del producto, mientras ésta disminuye debido a un incremento en el flujo. La temperatura responderá al efecto neto de éstas influencias. Si las influencias positivas son mayores que las negativas, entonces la temperatura aumentará, en caso contrario disminuirá.

Para tener la temperatura del producto constante en el valor deseado, se necesitaría que las variables de carga permanecieran constantes, y así poder ajustar la válvula de vapor



en un punto determinado. Como es muy difícil que las variables de carga permanezcan constantes, es necesario un equipo de control para el proceso.

Por ejemplo, las variaciones en la temperatura de entrada y en el flujo afectan la temperatura del producto, y requieren una posición diferente de la válvula de vapor para poder mantener la temperatura del agua en un valor deseado. El trabajo del control es determinar y actualizar continuamente la posición de la válvula, dependiendo de los cambios en la carga.

Generalmente, el problema de control es determinar un valor de la variable manipulada para establecer un balance entre todas las influencias en la variable de control y mantenerla en un valor deseado. Otros factores como son la velocidad de respuesta, forma de respuesta y la interfaz con el operador son también importantes en el diseño del sistema de control.

No importa que tan complicado sea, ya que cualquier sistema de control resuelve el mismo problema básico, para unas condiciones de proceso y carga dados se debe llegar al mismo resultado.

El sistema de control se puede resolver por 2 métodos cada uno de los cuales corresponde a los sistemas básicos de control, estos son:

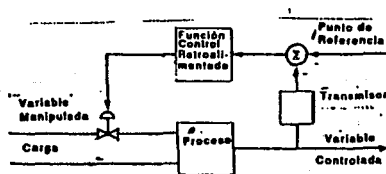
Sistema con retroalimentación. - En el que el control compara el valor de la variable de medición con el valor deseado para producir un error, después de lo cual se toma una acción co-

rectiva para reducir la magnitud del error.

Sistema anticipatorio.- Control en el cual cualquier información que pueda afectar la variable controlada pasa por una acción correctiva para minimizar desviaciones en la variable de control.

## 1.2 SISTEMAS CON RETROALIMENTACION

El sistema con retroalimentación es más común que el anticipatorio. La estructura del lazo retroalimentado se muestra en la figura 1.



En esta figura el valor de la variable de control responde al efecto neto de las cargas y la variable manipulada. Un sensor/transmisor mide el valor actual de la variable de control y manda una señal al control con retroalimentación, donde la señal se compara con un valor de referencia. La función del control es la de generar una señal, la cual posicio-

una válvula en base a la señal y magnitud de la diferencia entre la medición y la referencia o valor del punto de ajuste "set point".

Así, un controlador con retroalimentación resuelve el problema de control a través de un procedimiento de prueba y error. Suponiendo que un cambio en la variable de carga afegte a la temperatura y se requiera una nueva posición de la válvula, el controlador llega a ser "consciente" del cambio cuando el desequilibrio entre la carga y la variable manipulada empieza a cambiar la variable controlada.

El control inmediatamente comienza a hacer cambios en la salida, todavía como monitoreando los efectos de esos cambios en la variable controlada. Cuando el controlador "ve" que éstas correcciones están regresando la variable controlada al valor deseado, mantiene estable la salida y continúa observando la variable controlada en espera del próximo cambio en el proceso (disturbio).

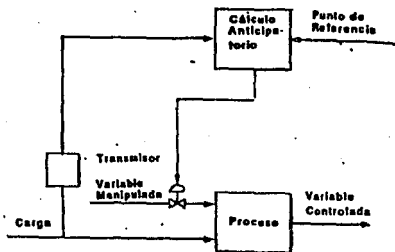
### 1.3 SISTEMA ANTICIPATORIO

Mientras que el control con retroalimentación es reactivo por naturaleza y responde a los efectos de un disturbio, los sistemas anticipatorios responden directamente a distur-

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

bios y así ofrecen un mejor desempeño. . .

Un diagrama de bloques de un sistema de control anticipatorio se muestra en la figura 2.

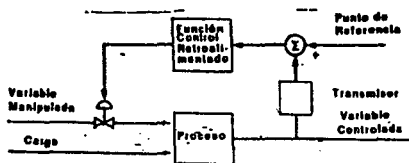


El transmisor mide el valor de la variable de carga, y ésta señal llega al controlador, en el cual se calcula la señal correcta de control para las condiciones de carga existentes y valores de referencia. De este modo los cambios en las condiciones de carga causan un cambio directo en la señal de control sin esperar a que el sistema tenga un disturbio.

En general esta técnica es más complicada y más cara, ya que requiere un mayor conocimiento del proceso, comparado con el método de prueba y error usado en el sistema con retroalimentación.

#### 1.4 CONTROL CON RETROALIMENTACION

Un lazo normal para un control con retroalimentación se muestra en la figura 3.



La medición debe ser hecha para indicar el valor actual de la variable controlada por el lazo. Comúnmente la medición usada en la industria incluye flujo, presión, nivel, temperatura, medición analítica como pH, ORP y conductividad, entre otras.

Cualquier proceso debe tener un actuador final que regule el suministro de energía o materia al proceso, e indirectamente modifica la señal medida. La mayoría de las veces es una válvula, pero también puede ser la velocidad de una banda o de un motor, etc., éste último elemento normalmente se controla automáticamente.

Las clases de procesos que se encuentran en las plantas industriales son tan variados como los materiales que producen, los cuales pueden tener mucho en común como un lazo de control de flujo u otros tan complicados como una columna de destilación en la industria petroquímica.

Para un lazo sencillo la señal de referencia entra directamente desde la consola del operador y se llama punto de

ajuste o "set -point" remoto. Muchas veces el control puede aceptar los dos tipos de punto de ajuste y con un interruptor remoto/local es posible que el operador seleccione que tipo de ajuste se debe usar en el control.

En el controlador los valores de la medición y el punto de ajuste se comparan, la diferencia se llama error y es la entrada al mecanismo, circuito o algoritmo que genera la salida. Generalmente éste algoritmo contiene componentes proporcional, integral y derivativo (PID), sin embargo, no todas deben presentarse en cualquier controlador. El proporcional e integral responden al error, mientras la derivada usualmente responde directamente a la medición. La suma de las respuestas individuales forman la señal automática de control.

## 1.5 EMERGENCIA Y ARRANQUE

Para las condiciones de arranque y emergencia, el controlador también incluye un generador de señal manual del control que puede ser manipulado por el operador. Cuando la salida proviene de un generador de respuesta FID, el controlador se dice que está en automático. Cuando la señal de salida proviene de un generador manual se dice que está en manual.

El procedimiento para hacer el cambio de estas dos señales es que el rango involucrado sea casi transparente, dependiendo

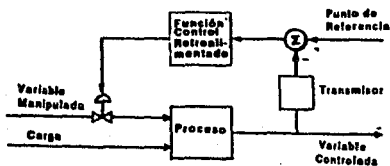
do de lo sofisticado del control. Lo más importante no es ta par la señal de salida y causar un disturbio en el proceso.

En un lazo sencillo, esa señal designa la posición de una válvula, mientras que en un esquema más complicado la señal será una entrada a otro instrumento. Típicamente el controlador tendrá una interfaz como mínimo con el operador y ésta desplegará el punto de ajuste, medición, salida actual y el estado de remoto/local y manual/automático.

Lo mismo que todos los controladores con retroalimentación tienen ciertos elementos en común, así todos los lazos de control de retroalimentación comparten tres conceptos importantes, lazo abierto contra lazo cerrado, retroalimentación positiva contra negativa y oscilación.

#### 1.6 LAZO ABIERTO CONTRA LAZO CERRADO

La figura 4 muestra el primero de éstos conceptos.



Una vez que un controlador con retroalimentación se instala en un proceso y es puesto en automático, se crea un lazo ce-

rrado. La salida del controlador afecta a la medición y viceversa. Así el lazo cerrado crea la posibilidad de control por medio de la retroalimentación.

Este efecto puede romperse en cualquier dirección, por tal motivo el lazo se llama abierto y el control con retroalimentación no existe.

Existen gran cantidad de eventos que pueden abrir un lazo de control, como son:

- Poner el controlador en manual. Esto causa que la salida permanezca constante (a menos que el operador la cambie) lo mismo que si la medición cambia.
- Falla en el sensor o transmisor. Esto acaba con la capacidad que tiene el controlador de observar la variable controlada.
- Saturación de la salida del controlador en 0 a 100% de la escala. Esto acaba con la capacidad del controlador para afectar al proceso.
- Falla del actuador de la válvula debido a la fricción o desechos en la válvula.

Cuando un lazo de control no parece estar operando adecuadamente, lo primero que se tiene que revisar es si el lazo está cerrado. Muchas veces, una gran parte del tiempo se pierde tratando de ajustar el controlador cuando el problema está en otra parte del lazo.



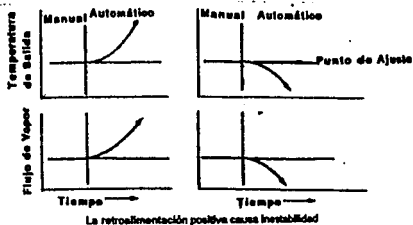
## 1.7 RETROALIMENTACION POSITIVA CONTRA NEGATIVA

Conectando un controlador a un proceso, se crea un lazo cerrado, sin embargo, la retroalimentación puede ser positiva o negativa y la diferencia es crucial en el desempeño del lazo.

Cada controlador con retroalimentación tendrá un medio de cambiar la acción controlada, la cual define la dirección de la respuesta del controlador a un cambio en la medición.

La acción directa "increase-increase" causa que el controlador incremente su salida en respuesta a un incremento en la señal medida. La acción inversa "increase-decrease" causa que el controlador decremente su salida cuando se incrementa la señal medida. Si se escoge la acción incorrecta hará imposible el control.

La figura 5 muestra un registro de un lazo de control temperatura-salida, instalado en un intercambiador de calor.



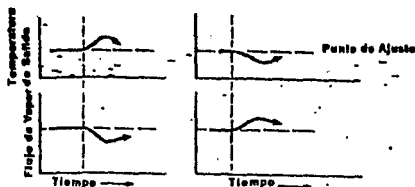
La válvula de vapor se fija en aire para abrir (falla cierra). Esto quiere decir, que un incremento en la señal de control abrirá la válvula para incrementar el flujo de vapor. La acción de control se fija directa lo cual es incorrecto.

La medición puede llevarse al punto de ajuste con un controlador manual, pero tan pronto como el controlador sea puesto en automático, el lazo se considera inestable. Cualquier pequeño disturbio que incremente la temperatura también causará un incremento en la salida del control. Esto abre la válvula, causando un incremento mayor en la temperatura y la válvula continuará abriendo. El resultado es una fuga de calor. Si un pequeño disturbio causa una caída en la temperatura, el controlador podrá cerrar la válvula y la temperatura podrá caer aún más, y esto causaría que la válvula cerrara aun más.

En ambos casos, la respuesta del controlador ha reforzado un cambio en la medición. Esto es retroalimentación positiva.

Para que un lazo de retroalimentación sea satisfactorio deberá tener retroalimentación negativa. El controlador debe cambiar su salida en la dirección opuesta al cambio en la medición.

La figura 6 muestra el mismo lazo con la diferencia de que el controlador ha sido fijado con la acción inversa.



La retroalimentación negativa causa estabilidad

El controlador entonces responderá a un incremento en la temperatura cerrando la válvula. Un decremento en la temperatura causará que el controlador abra la válvula. Esta respuesta produce que la medición regrese al punto de ajuste. Seleccionar la acción de control adecuada, es fundamental para estar seguro que el lazo está realmente cerrado, una mala selección destruye el control.

La selección correcta para la retroalimentación dependerá de la aplicación. Por ejemplo si el nivel de un tanque se controla con una válvula aire para abrir, la salida requerirá de una acción directa. Moviéndola la misma válvula de control al flujo de entrada requerirá de una acción inversa.

## 1.8 OSCILACION

Mientras que la retroalimentación negativa es necesaria



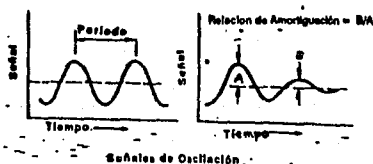
para el control, esto también manda una oscilación dentro del lazo. Con el mismo ejemplo del intercambiador de calor.

Cuando la medición empieza a alejarse del punto de ajuste, el controlador empieza a hacer un cambio en la salida. Por los retardos dentro del proceso, la temperatura de salida no responde inmediatamente por lo cual se sigue alejando del punto de ajuste, entonces el controlador continuará cambiando la salida hasta que la medición cambie y empiece a regresar al punto de ajuste.

Cuando la medición cambie por si misma así será la salida del controlador, pero el efecto de éste cambio también será retardado. Después la medición puede cambiar una segunda vez y causar otro cambio en la salida así esto causará otro cambio en la medición y sucesivamente. El resultado es una oscilación en ambos, la medición y la salida.

Así, la combinación de retroalimentación negativa y los retardos en el proceso significa que la oscilación es la respuesta natural a un disturbio en un lazo de control retroalimentado. Las características de ésta oscilación son los primeros puntos para evaluar el desempeño de un lazo de control.

La figura 7 muestra una oscilación típica



El periodo de éste ciclo debe medirse con el tiempo (usualmente en minutos) entre 2 puntos análogos, como puede ser entre 2 picos positivos o negativos. También se puede apreciar otra oscilación que está decayendo constantemente a una señal constante. La relación de amortiguamiento indica el nivel de decadencia.

#### 1.9 CARACTERISTICAS DE LA OSCILACION

La característica exacta de la oscilación en un lazo particular dependerá principalmente de los ajustes de las respuestas proporcional, integral y derivativa dentro del controlador. Ajustes incorrectos pueden hacer al periodo tan largo o tan corto, o todavía peor, ellos pueden hacer mas amplio el ciclo en lugar de reducirlo.

Para un buen control, el ciclo en la señal de la medición debe decaer constantemente y finalizar con la medición de regreso al punto de ajuste. Simultáneamente, el ciclo en la salida del controlador deberá decaer también constantemente y finalizar con la salida en un nuevo valor. Esto restablece el balance entre la variable de carga y la variable manipulada.

Esta oscilación representa la prueba y error y busca la



nueva solución al problema de control. El controlador no es-  
ta "consciente" de la variable de carga, por lo tanto cuando  
"ve" que la medición empieza a cambiar, trata con un nuevo va-  
lor de salida hasta que se acerque a un valor que regrese la  
medición al punto de ajuste.

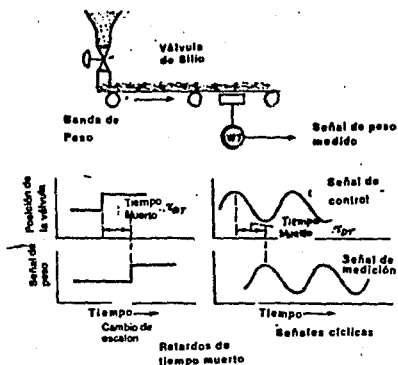
Si el controlador en un lazo particular responde a un  
disturbio con una oscilación en el cual cada pico sucesivo es  
de  $1/4$  de amplitud del anterior, el lazo llega a tener un  
amortiguamiento de  $1/4$  de onda, como se muestra en la figura  
7.

#### 1.10 CARACTERISTICAS DEL PROCESO

La existencia de retardos en el proceso tiene un efecto  
fundamental en el desarrollo de un lazo de retroalimentación.  
Si no sabemos las causas y características de éstos retardos,  
es imposible evaluar que modos de control pueden requerirse  
o si un control de retroalimentación puede tener efecto en  
una aplicación en particular. Básicamente los retardos pue-  
den considerarse en 2 categorías, tiempo muerto y capacitancia.

### 1.11 TIEMPO MUERTO.

Un proceso que tiene esencialmente una respuesta de tiempo muerto puro se muestra en la figura 8.



La compuerta deposita material en una cinta móvil. Un transmisor de peso mide la carga del material.

Esta figura muestra un cambio en la señal de control que inmediatamente empieza a depositar más material en la cinta. Este cambio aparecerá en la medición después de una demora (tiempo muerto) que corresponde al tiempo necesario para que el material vaya de la compuerta al sensor.

En general el tiempo muerto está definido como el tiempo de demora entre un cambio en la señal de control y el comienzo de este efecto en la medición. El estado de cambio en la

señal de control no es relevante. La figura anterior muestra una entrada en la señal de control oscilante, retardada por el mismo intervalo de tiempo.

Un retardo en la respuesta del proceso puede crearse con otros modos. El desempeño de un mezclador ( agitador ) tiene gran influencia en el tiempo muerto en lazos que monitorean la composición como son pH, densidad, etc.

Desde el punto de vista de control, lo que es importante es el largo del retardo. El tiempo muerto representa un intervalo durante el cual el controlador no tiene información acerca del efecto de una acción de control ya tomada.

El tiempo muerto no baja la velocidad con la cual la medición puede cambiar, excepto en el retraso, donde los cambios en la medición son a la misma velocidad que en la señal de control. La longitud del retardo es lo más difícil de controlar y como hemos visto el tiempo muerto en el proceso tiene un efecto muy fuerte en los ajustes del control y en el desempeño que se espera del lazo.

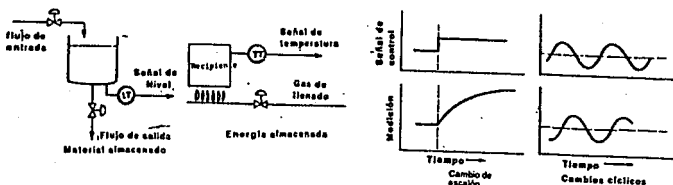
Como el tiempo muerto interfiere a un buen control, cada intento debe de reducir el retardo, ya sea con un transmisor local adecuado, especificar el mezclado suficiente, diseñar un tanque apropiado y minimizar los retrasos en la transmisión.

## 1.12 CAPACITANCIA Y SUS EFECTOS



Un proceso de tiempo muerto puro es muy raro, pero cualquier lazo de control lo incluirá y será dominado por elementos capacitivos.

Un elemento capacitivo es la parte de un proceso en donde el material o la energía puede acumularse. El tanque que se muestra en la figura 9 representa una capacitancia sencilla.



Capacitancias almacenadas

El flujo en el tanque se manipula para afectar al nivel, el flujo de salida del tanque es la variable de carga. Inicialmente el nivel permanece constante porque el flujo de entrada y salida son iguales.

Si asumimos que la válvula y el flujo responden inicialmente a cambios en la señal de control, cuando un cambio ocurre en la señal, la diferencia entre la entrada y la salida inmediatamente causará un incremento en el nivel. Sin embargo, como el incremento de nivel, gradualmente incrementa la

presión a través de la válvula de drene, el flujo de salida aumenta, esto tiende a llevar los dos flujos a un balance, con los resultados que el nivel aumenta más rápido que al principio, después más lento y finalmente no cambia para cuando los flujos llegan a ser iguales.

En otro recipiente como el que se muestra en la figura también se representa una capacitancia sencilla (almacenamiento de energía). La temperatura responde a la acumulación de energía en un proceso, como el nivel responde a la acumulación de material. La respuesta de la temperatura a un cambio en el calor de entrada será la misma respuesta que el nivel a un cambio en el flujo de entrada.

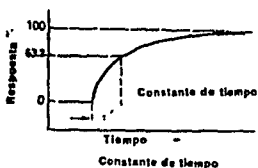
La respuesta de éstos elementos capacitivos difiere de elementos de tiempo muerto en 2 aspectos significativos:

- 1.- Los retardos no ocurren antes que la medición empiece a cambiar (el tiempo muerto no está asociado con un elemento de capacitancia sencillo).
- 2.- La capacitancia disminuye el porcentaje de variación de la medición.

Esto es porque el nivel es una medición de líquido almacenado en el tanque y porque el porcentaje de acumulación (positivo o negativo) responde a la diferencia entre el flujo de entrada y de salida, el nivel no puede cambiar instantáneamente aunque la señal de control lo haga, debido al almacenamiento de materia y/o energía. La altura del tanque en comparación con el flujo hará más lento el cambio de nivel. Por lo tanto, el elemento capacitivo en el proceso tiende a atenuar

los disturbios. Esto hace el control más fácil, sin embargo el tiempo muerto hace el control más difícil.

El tamaño de la capacitancia se mide por una constante de tiempo. La figura 10 muestra la respuesta del nivel de la figura anterior.



La respuesta se cuantifica con una constante de tiempo que se define como el tiempo requerido para completar 63.2% de la respuesta total. Como una primera aproximación la constante de tiempo de un elemento capacitivo será aproximadamente igual a el tiempo de residencia, el cual se define como el volumen dividido por la producción (en unidades consistentes)

Por ejemplo si el tanque tiene una capacidad de 1000 gal y el flujo a través del tanque es de 100 gpm, el tiempo de residencia será  $1000/100 = 10$  min.

También se puede mostrar la respuesta de un elemento capacitivo en una señal de control cíclica. Si la señal es cíclica en la entrada, la salida se acercará al valor promedio de la entrada. El nivel aumentará mientras la entrada sea mayor que la salida y disminuirá si la entrada es menor que la salida.

Para una entrada cíclica, la señal de medición para un

elemento de capacitancia será cíclica en el mismo periodo.

La variación en la medición, en comparación con la variación en la señal de control depende fuertemente del periodo.

### 1.13 MODELO DEL PROCESO

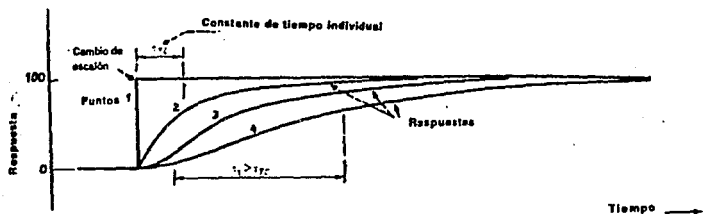
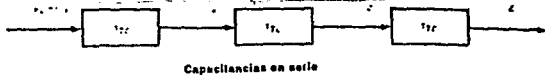
Los procesos de capacitancia simple y el tiempo muerto puro existe solo en teoría. Cualquier proceso real incluirá a un número de cada uno de éstos elementos dinámicos. Por ejemplo el intercambiador de calor de la figura anterior incluye un tiempo muerto asociado con el tiempo que toma el agua caliente en fluir del intercambiador al sensor. En suma la identificación de la capacitancia incluye:

- Volumen de aire del actuador para la válvula de control,
- Volumen de la cara de la armadura del intercambiador,
- Energía almacenada en los tubos,
- Energía almacenada en el agua de los tubos,
- Energía almacenada en el sensor y termopozo.

Si los controles son neumáticos, el tiempo muerto efectivo y la capacitancia están asociados con cada línea de transmisión. En una situación típica existen uno o dos tiempos muertos identificables y un número de capacitancias grandes o pequeñas.

Los tiempos muertos en serie se suman (un minuto de retardo seguido por dos minutos de retardo combinados para formar

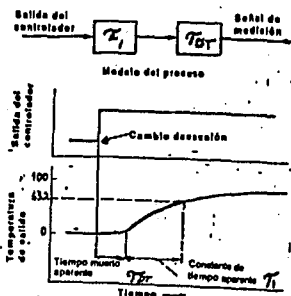
mar tres minutos de retardo ). Sin embargo el efecto combina do de un número de capacitancias en serie no es tan obvio. La figura 11 muestra una serie de tres capacitancias teniendo una misma constante de tiempo.



La entrada aparece en el punto 1.

El punto 2 muestra la respuesta de una capacitancia sencilla a una entrada. Los puntos 3 y 4 muestran los efectos de capacitancias subsiguientes. El efecto neto es que una secuencia de capacitancias se ve como la combinación de un retraso debido al tiempo muerto, seguido por una capacitancia sencilla con una constante de tiempo, que es tan larga como la constante de tiempo en la capacitancia individual.

En un lazo abierto la respuesta del intercambiador de calor a un cambio en la salida del controlador se muestra en la figura 12.



Inicialmente la temperatura permanece constante pero después empieza a elevarse y se acerca a un nuevo valor constante.

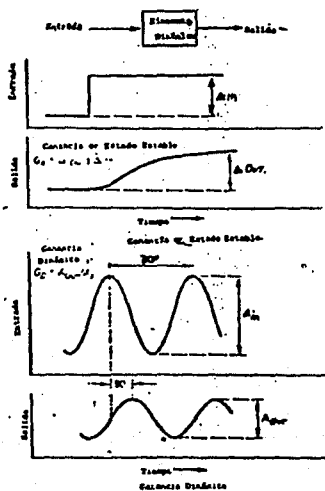
También un proceso puede ser en realidad una compleja colección de elementos de capacitancia y tiempo muerto y esto se puede representar por un modelo de tiempo muerto más capacitancia para diseñar un lazo con retroalimentación. Los parámetros para este modelo pueden tomarse como el tiempo muerto aparente y la constante de tiempo aparente.

Mientras la representación puede ser obvia en el diseño, el controlador no puede conocer las diferencias. Si el tiempo muerto hace el control más difícil, la capacitancia lo hace más fácil, un estimado de la dificultad del control se puede hacer calculando la relación del tiempo muerto aparente  $T_D$  y la constante de tiempo aparente  $T_i$ . Esta relación  $T_D/T_i$  tendrá un efecto fuerte en los ajustes del control.

El comportamiento de un lazo de control con retroalimentación puede entenderse desde puntos de vista prácticos o teóricos.

### 1.14 GANANCIA Y FASE

Un elemento de un lazo de control con retroalimentación está representado en la figura 13.



Este elemento puede ser el proceso, la válvula, el transmisor o el controlador. Cada uno de éstos elementos tiene una entrada y una salida. El primer parámetro, la ganancia, describe la cantidad de cambios en la salida que serán causados al provocar un cambio en la entrada. Ambos, el estado estable y la ganancia dinámica deben considerarse. Para una medición en la entrada el elemento de salida empieza a cambiar y se acerca a un nuevo valor. La ganancia de estado estable ( $G_{ss}$ ), se define como la relación del cambio final en la salida a un cambio en la entrada:

$$G_{ss} = \Delta (\text{out}) / \Delta (\text{in}) \quad \textcircled{1}$$

ES importante seguir con atención las unidades de la ganancia. Por ejemplo si la ganancia en estado estable de la válvula en un lazo de temperatura fue determinada, la salida debe ser en unidades de flujo de vapor, mientras que la entrada puede ser en porcentaje.

Así, un cambio del 10 % en la salida del controlador causará un cambio de 200 lb/hr, en el flujo de vapor, la ganancia en estado estable será  $G_{ss} = 200/10 = 20 \text{ (lb/hr)\%}$ .

En muchos casos las señales que viajan en un lazo de control normalmente varían cíclicamente. La sensibilidad de un elemento a una entrada cíclica se mide por la ganancia dinámica. Cuando la entrada es cíclica, la salida también será cíclica en el mismo periodo. La ganancia dinámica se puede calcular como la relación de la magnitud de las oscilaciones de salida  $\Delta \text{ out}$  a la magnitud de las oscilaciones de entrada  $\Delta \text{ in}$  en el



$$GD = \Delta \text{ out} / \Delta \text{ in.} \quad (2)$$

Para el intercambiador de calor suponemos que una variación de 200 lb/hr en el flujo de vapor causa una variación de 20 grados F en la temperatura de salida. La ganancia dinámica es:  $GD = 20^\circ\text{F}/200 \text{ lb/hr} = 0.1^\circ\text{F}/(\text{lb/hr})$ .

El segundo parámetro de la respuesta de un elemento en una entrada cíclica es el ángulo de fase el cual se muestra en la figura 13.

Debido a los retardos dentro del elemento, el pico de la salida no coincide con el pico de la entrada. El ángulo de fase de la medición de un elemento está desplazado. Un ciclo completo en cualquier señal periódica se considera que está compuesta de 360 grados. Si el pico de salida cíclica ocurre en un cuarto del camino a través del ciclo de entrada, el ángulo de fase es:  $\phi = (360)(-1/4) = -90 \text{ grados} \quad (3)$

En esta ecuación el signo negativo indica que el pico de salida ocurre después del pico en la entrada. Este es un período con retardo de fase. Esto es posible si el pico de salida ocurre antes del pico de entrada, y esto es llamado una fase guiada.

### 1.15 APLICACIONES DEL ESQUEMA EN LAZO CERRADO

Los parámetros de ganancia y fase son fundamentales para entender el comportamiento de un lazo de retroalimentación.

Estos son muy importantes en el ajuste del controlador porque ambos son funciones de un periodo de la señal de entrada.

Cuando un lazo de retroalimentación tiene disturbios por un cambio en cualquiera de las condiciones de carga o punto de ajuste, esta llegará a oscilar en algún periodo característico de ese lazo.

Cualquier elemento en éste lazo parece una señal de entrada variando en éste periodo.

Empezando con cualquier punto en el lazo, consideraremos los efectos en esa señal como si viajara una vez a lo largo del lazo. La señal se hace más grande o más corta conforme pasa a través de cada elemento, de acuerdo a las ganancias de cada elemento.

Para que el ciclo continúe, el efecto total de un desplazamiento debe ser igual a 360 grados, así que la señal, regresa al punto de partida.

Por lo tanto un lazo de control de retroalimentación será cíclico en el período que haga la suma de los ángulos de fase igual a 360 grados.

Más importante aún, el efecto neto en el tamaño de la señal depende del producto de las ganancias individuales o la ganancia a lazo abierto  $G_{ol}$ :

$$G_{ol} = (G_d)_c (G_d)_v (G_d)_p (G_d)_t \quad (4)$$

donde:  $(G_d)_c$  es la ganancia dinámica del controlador.

$(G_d)_v$  es la ganancia dinámica de la válvula.

$(G_d)_p$  es la ganancia dinámica del proceso.

$(G_d)_t$  es la ganancia dinámica del transmisor.

Las unidades dimensionales para la ganancia individual deben especificarse de tal forma que se cancelan cuando la ganancia a lazo abierto se calcule en la ecuación anterior. Si la ganancia es mayor que 1 la señal llegará al punto de partida mas grande que cuando empezó. Como si al continuar su viaje a través del lazo siguiera creciendo. En cualquier punto del lazo como la entrada de la medición al controlador, la señal aparece siempre con un incremento en la oscilación. Por lo tanto un lazo de control con retroalimentación será estable solo cuando el producto de la ganancia dinámica en el lazo sea menor que 1.

El ajuste de las respuestas proporcional, integral y derivativo afecta los parámetros de ganancia y fase del controlador y el comportamiento del lazo completo.

## CAPITULO II.

### VARIABLES FISICAS DE CONTROL.

#### 2.1 MEDICION DE TEMPERATURA

Calor técnicamente, es una forma de energía contenida en un sistema, el cual no puede medirse directamente. Sin embargo, el calor causa un cambio en los grados cuantificables de caliente o frío del sistema, los cuales pueden medirse. Esto se conoce como temperatura.

La temperatura se expresa como grados de una escala, generalmente Fahrenheit o Centígrados, pero también se usan Kelvin o Rankine.

Los sensores de temperatura son los siguientes:

- Sistemas termales llenos.
- Termopares.
- Termómetros bimetalicos de vidrio.
- Pirómetros ópticos y de radiación.

Sistemas Termales Llenos. - Un sistema termal lleno, el cual tradicionalmente ha sido más usado en la industria alimenticia, de papel y textil, consiste de un sensor conectado a través del tubo capilar a elementos sensitivos de presión ó voltaje

men. Este sistema es simple y barato y generalmente tiene una rápida respuesta dinámica. Su uso con transmisores neumáticos y electrónicos ha eliminado las limitaciones inherentes de la distancia de los sistemas llenos, y ha minimizado el peligro de daño en el capilar.

Además, la amplificación del transmisor ha hecho más agradable el span prácticamente, y ha mejorado la linealidad la respuesta.

Algunas aplicaciones específicas de muchos tipos de sistemas llenos se listan en la siguiente tabla.

TIPO	IA - IB	II-A; II-B; II-C;	III-B
Llenado	Líquido Kerosina	Liq. volátil y su vapor Cloruro de metilo Eter etílico	Gas Inerte (N <sub>2</sub> )
RANGO	IA -180 - +310°C IB -120 - +310°C	-250 - +320°C	-268 - 760°C
SPAN	25-225°C	50-225°C 10-50°C	225-538°C
LONG. CAPIL.	I-A 100' I-B 20'	150'	100'
TAMANO	El mas pequeño	Grande	El mas grande
MULBO			
VELOC. DE RESP.	Rápida	La más rápida	La más lenta
GRAFICA	Uniforme	No uniforme	Uniforme
POTENCIA	La mayor	Buena	Muy débil
PRECIO	El mas caro	El mas barato	Medio

Esto incluye la "Scientific Apparatus Makers Association" (SAMA), Classes I (expansión de líquido), II (presión de vapor), III (presión de gas). La clasificación SAMA Clase II también incluye designaciones alfabéticas, por lo cual A y B indican el sensor sobre o debajo del caso ambiente respectivamente, C indica un sistema en el cual el sensor puede cruzar el ambiente y D denota un sistema el cual puede cooperar a con

diciones ambiente.

Los sistemas de expansión de líquidos se caracterizan por spans angostos, sensores pequeños, escalas uniformes, alta exactitud y capacidad para mediciones diferenciales. Los aparatos de Clase IA tienen un elemento y capilar auxiliar el cual provee la compensación de temperatura ambiente y los sistemas IB muchas veces utilizan técnicas bimetalicas. Sin embargo los sistemas compensados totalmente por la expansión de líquido son complejos y caros.

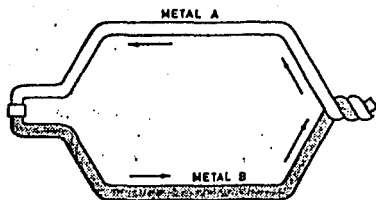
Los sistemas de presión de vapor son confiables, exactitud inherente y no requiere compensación por efectos de temperatura ambiente. Los instrumentos siguen las curvas de presión de vapor del fluido lleno, asocian cuadrantes y las gráficas no son uniformes, teniendo espacios mas anchos incrementandose en altas temperaturas. La medición ocurre entre las fases líquida y vapor del medio de llenado. Si la temperatura en el sensor es mayor que en el capilar y el elemento indicador, el sensor se llena con vapor, mientras que el capilar y el indicador contienen líquido. Lo contrario es cierto cuando la polaridad de la temperatura relativa es opuesta. Una transición entre líquido y vapor puede causar una operación errática, así los sistemas de vapor son inadecuados para rangos que mezclan la temperatura del elemento y el capilar.

Los sistemas de presión de gas, que se clasifican segundo en los aparatos de presión de vapor en simpleza y costo, ofrece el rango más amplio de todos los sistemas llenos. Los convencionales usan sensores de gran volumen, los cuales puer-

den ser la forma de satisfacer aplicaciones particulares. Por ejemplo, el porcentaje de temperatura en un ducto, el sensor debe ser construido de una gran longitud de tubo de pequeñas secciones. Los registradores convencionales no son recomendables para spans de temperatura de menos de  $110^{\circ}\text{C}$ , pero los transmisores que operan bajo el principio de balance de fuerzas pueden utilizarse con spans tan angostos como  $28^{\circ}\text{C}$ . Con los sistemas llenos de gas, se dificulta la compensación por errores de temperatura ambiente, pero un tamaño de sensor suficientemente largo debe reducir los efectos a límites aceptables.

Termopares.—La termo-electricidad fue descubierta por Seebeck en 1821. El observó que se generaba una fuerza electromotriz (fem), en un circuito cerrado de dos metales diferentes cuando sus uniones están a temperaturas diferentes. Esta electricidad, producida por la acción directa del calor, se usa hoy para medir temperaturas abajo de cero o rangos altos.

Un termopar básicamente consiste de dos materiales diferentes como son alambres de hierro y constantano, las uniones producen una fuerza termo-electromotriz cuando los extremos están a diferentes temperaturas.



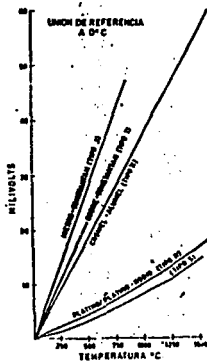
La junta de medición o caliente se inserta en el medio en donde la temperatura va a medirse.

La junta de referencia o fría es el extremo abierto que está conectado normalmente a las terminales del instrumento de medición.

La FEM de un termopar se incrementa tanto como la diferencia en la temperatura de las juntas se incrementa. Por lo tanto, un instrumento sensible, capaz de medir la FEM, puede calibrarse y usarse para leer temperaturas directamente.

La siguiente figura indica la salida aproximada FEM-milivolts contra la relación de temperatura para los tipos de termopar mas populares. La desviación de la relación lineal esencial es generalmente menor que el 1 %.





RTD.-La Resistividad Termométrica se basa en el cambio de conductividad eléctrica con la temperatura. Por lo tanto, una bobina de alambre puede actuar como un sensor de temperatura, con una relación establecida directa entre resistencia y temperatura. Las curvas estandar estan disponibles, con exactitudes certificadas de  $0.1^{\circ}\text{F}$  o  $0^{\circ}\text{C}$ . Los RTD's de platino usados como estandares en los laboratorios se pueden obtener con buenas tolerancias dentro de los limites y son capaces de medir la temperatura con precisión hasta 900 C. Si un RTD se ajusta para concordar con su curva, se debe intercambiar con otro RTD calibrado de acuerdo a la misma curva.

La medición de temperatura de un RTD puede leerse en muchos diferentes tipos de instrumentos. Si la medición de temperatura va a ser usada, en conjunto con un sistema neumático de control, el RTD debe conectarse a un convertidor de resistencia a señal neumática.

El convertidor de resistencia a señal neumática, convierte la medición de temperatura de un RTD en una señal de salida

da neumática proporcional de 3-15 psi. Esta señal es compatible para usarse con muchos tipos de instrumentos receptores neumáticos, como registradores, controladores, etc.

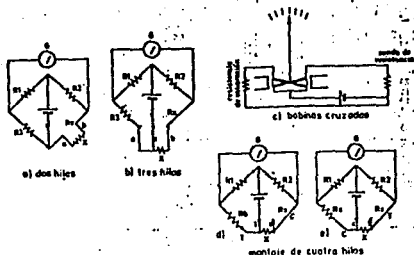
Estos transmisores tienen muchas características. Por ejemplo cuando se usan con el bulbo de níquel apropiado, el convertidor tiene una salida que es lineal con la temperatura. Spans tan bajos como  $3^{\circ}\text{C}$  pueden ser fácilmente medidos. Un rango ajustable permitira un procedimiento simple de calibración en campo para cambiar el rango en la temperatura de entrada requerida para una salida de 3-15 psi. Esto también opera con todos los voltajes de suministro normales.

El RTD se alambra en un puente de medición y se excita mediante una fuente de corriente directa regulada. El cambio de resistencia del RTD causa un cambio en el puente de salida que es proporcional a la temperatura. La retroalimentación negativa se obtiene de la corriente de salida aplicada al lado opuesto del puente de medición. Un cambio de la retroalimentación por los ajustes del span cambia la ganancia del amplificador y por eso cambia el span de medición.

El transmisor de un RTD de platino incorpora una impedancia negativa. el circuito amplificador integrado que opera el RTD de platino para linearizar las características de temperatura contra las del RTD.

Durante la alineación o calibración del transductor de salida, el ajuste de cero se hace girando un tornillo para avanzar o retractar un resorte el cual se sostiene en la barra de fuerza:

El ajuste áspero del span se hace repositonado el fuelle de retroalimentación con respecto al pivote.



Termómetro de vidrio.- El termómetro de vidrio consta de un depósito de vidrio que contiene, por ejemplo, mercurio y que al calentarse se expande y sube en el tubo capilar.

Mercurio de  $-35$  hasta  $+280^{\circ}\text{C}$

Mercurio de  $-35$  hasta  $+450^{\circ}\text{C}$

tubo capilar lleno de gas.

Pentano de  $-200$  hasta  $+20^{\circ}\text{C}$

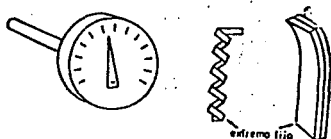
Alcohol de  $-110$  hasta  $+50^{\circ}\text{C}$

Tolueno de  $-70$  hasta  $+100^{\circ}\text{C}$



Termómetro bimetalico.- Los termómetros bimetalicos se fundan en el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes, tales como latón, monel o acero y una aleación de fe-

roniquel o Invar (35,5 % de níquel) laminados conjuntamente. Las láminas bimetalicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices.



Un termómetro bimetalico tipico contiene pocas partes móviles, solo la aguja indicadora sujeta el extremo libre de la espiral o de la hélice y el propio elemento bimetalico.

El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes y el conjunto está construido con precision para evitar rozamientos. No hay engranes que exijan un mantenimiento. La precision del instrumento es de 1 % aproximadamente y su campo de medida es de  $-200$  a  $+500^{\circ}\text{C}$ .

## 2.2 MEDICION DE GASTO

El gasto se puede definir como el producto de una veloci

dad por un área:

$$Q = V \cdot A$$

Dimensionalmente podremos ver que el gasto será la relación de un volumen entre un tiempo:

$$Q = \text{VOLUMEN} / \text{TIEMPO}$$

Sus unidades principales y más comunes serán:

ft<sup>3</sup>/min, gal/min, litros/hr, etc.

#### Diferentes tipos de medidores de flujo.

1.- MEDIDORES DIRECTOS.- Son aquellos de los que se obtiene una señal que es directamente proporcional al flujo, tales como el medidor de turbina y el medidor magnético de flujo.

2.- MEDIDORES INDIRECTOS O INFERENCIALES.- Son aquellos de los que se obtiene una señal, a partir de la cual se infiere el valor del flujo.

Los medidores inferenciales se basan en la producción de una diferencia de presiones, por medio de una restricción colocada en el paso del flujo.

De ésta diferencia de presiones (o presión diferencial), se infiere el valor del flujo que se desea conocer.

La relación existente entre la presión diferencial y el flujo es la siguiente:

$$Q = K \sqrt{2Gch}$$

donde:

Q = Gasto.

$K$  = Constante.

$G_c$  = Aceleración de la gravedad.

$h$  = Diferencia de presiones.

De la fórmula anterior se puede observar, que es necesario extraer la raíz cuadrada de la diferencia para obtener la lectura del flujo.

En la práctica esta extracción se hace directamente en el registrador de flujo, utilizando una gráfica que esté graduada en términos de raíz cuadrada.

Debido a que las graduaciones en las gráficas no son uniformes, se recomienda seleccionar el flujo máximo a 100 % de la gráfica, de tal forma que nuestro flujo quede siempre localizado entre el 65 % y el 75 % de la gráfica que es la zona donde la distancia entre las divisiones es adecuada, para obtener una visibilidad correcta en la lectura del flujo.

El elemento utilizado como restricción para producir la diferencial se llama elemento primario. Entre los más comunes podemos citar:

I.- Placa de Orificio.

II.- Tobera.

III.- Tubo Venturi.

IV.- Tubo Pitot.

El cálculo del tamaño del elemento primario debe hacerse en función de los valores reales de las condiciones de operación del flujo. Dicho cálculo se hace generalmente por medio de una computadora, sin embargo, es posible utilizar una re-

gla de cálculo para determinación de los tamaños de orificios

#### I.- PLACA DE ORIFICIO.

Es el elemento primario más comunmente usado en la industria. Para obtener la exactitud requerida, el orificio debe llenar las siguientes especificaciones:

- a) El espesor de la sección cilíndrica no debe exceder ninguno de los siguientes límites:  $d/8$ ,  $D/50$   
donde:  $d$  = Diámetro del orificio  
 $D$  = Diámetro de la tubería.

Si el espesor por la rigidez requerida debe ser mayor que éstos límites, las caras del orificio deberán estar biseladas a un ángulo no menor de 45° del eje de la tubería

- b) El filo de la cara del flujo corriente arriba debe ser en ángulo recto. Cualquier redondeo en el filo no deberá exceder de 0.025 % del diámetro del orificio, para asegurar una exactitud en la medición dentro del 0.1 %.
- c) La cara corriente arriba deberá ser tan pulida como comercialmente sea posible.
- d) La porción de la placa dentro de la tubería deberá ser plana, dentro de una tolerancia de 0.01" por pulgada de radio.
- e) La placa de orificio debe centrarse en la tubería de manera tal, que la excentricidad sea menor del 3 % del

diámetro de la tubería.

Ventaja de la placa de orificio:

- Su bajo costo.
- Su facilidad de instalación.
- Su tamaño.

Desventajas de la placa de orificio:

- Es inadecuada en la medición de fluidos con sólidos en suspensión.
- No conviene su uso en la medición de vapores con arrastre de condensados. (Para tales casos deberá incluirse una perforación de drenaje).
- El comportamiento con fluidos viscosos es errático ya que se calcula para una temperatura y una viscosidad dada y si hay cambios de temperatura la lectura será incorrecta.
- Produce las mayores pérdidas de presión, en comparación con los otros elementos primarios.

## II.- TOBERA.

Este elemento fue diseñado para el manejo de flujos con cantidades moderadas de sólidos en suspensión o siempre que la relación,

$W$

sea mayor de 140

$$D2 \sqrt{wh}$$



donde:  $W$  = Gasto en lb/hr.  
 $D$  = Diámetro interno de la tubería en pulgadas.  
 $w$  = Densidad de flujo en lb/ft<sup>3</sup>.  
 $h$  = Diferencial en pulgadas de agua.

**Ventajas:**

- Medición de flujos con altas velocidades.
- Medición de flujos con cantidades moderadas de sólidos en suspensión.

**Desventajas:**

- Tienen un costo mucho mayor que el de una placa de orificio, teniendo casi todas sus limitaciones.
- Su fabricación es más complicada.

**III.- TUBO VENTURI.**

Es el elemento primario de mayor tamaño y consiste de un cono de entrada, donde se localiza la toma de presión de alta una garganta que nos produce la restricción en donde se encuentra la toma de presión de baja, un cono llamado de recuperación, que como su nombre lo indica, está construido de tal forma que se obtiene la máxima recuperación posible de presión.

La aplicación característica del tubo venturi, es la medición de flujos de gases a bajas presiones y fluidos visco-

sos.

**Ventajas:**

- Menores caídas de presión.
- Exactitud adecuada en fluidos viscosos.

**Desventajas:**

- Costo.
- Dificultad de manufactura.
- Problemas de transportación.

**IV.- TUBO PITOT.**

Es un elemento primario utilizado para obtener lecturas de punto y no promedios como los elementos anteriores.

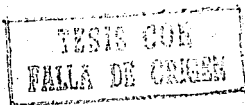
Consiste en un pequeño tubo que tiene dos perforaciones, una axial al sentido del flujo y otra perpendicular al mismo.

De esta manera las presiones que en realidad se están midiendo son la presión dinámica y la presión estática del fluido, por lo tanto la diferencia de estas dos presiones estará determinando el flujo que pasa en el punto donde se encuentran las tomas de presión.

Existen dos diferentes tipos de tubo pitot, aquellos que tienen una inserción fija y aquellos en los cuales es posible variar la inserción del elemento dentro de la tubería.

**Ventajas:**

- Medición instantánea.
- Facilidad de maniobrabilidad ya que puede transportarse de un lugar a otro fácilmente.



#### Desventajas:

- La lectura obtenida es de punto.
- Solo son aplicables en fluidos limpios.
- No son muy comunes en la industria en general.

### 2.3 MEDICION DE NIVEL

El nivel es una variable importante para algunas industrias, en algunas de las cuales es indispensable, tales como, la del papel y la del petroleo, por mencionar algunas. Los instrumentos para la medición de nivel varían en complejidad de acuerdo con la aplicación entre si y su dificultad.

En la selección correcta de un instrumento para la medición de nivel se deben considerar en mayor o menor grado, los siguientes factores:

- Rango de medición.
- Naturaleza del fluido que va a ser medido.
- Condiciones de operación.

Los instrumentos que se describen a continuación cubren prácticamente todas las aplicaciones, en cuanto a medición de nivel en tanques abiertos y tanques cerrados.

Estos instrumentos pueden ser registradores o indicadores y cuando el caso lo requiere controladores. Cuando las distancias entre el punto de medición y el lugar donde quiere

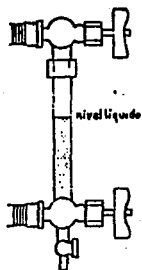
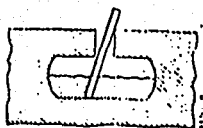
mos la lectura de nivel son muy grandes nos podemos auxiliar con transmisores, los cuales también se describen.

### Medición de Nivel en Tanques Abiertos.

Los instrumentos para la medición de nivel en tanques abiertos se clasifican dentro de varias categorías: visuales, de presión o cabezas hidrostáticas (columna de agua), de contacto directo o sea flotadores y otros tipos.

Visual.- Este método es uno de los más antiguos y de los más simples para la medición continua de nivel de líquidos contenidos en un tanque o vasija. Se usa solamente cuando se requiere indicación local directa sobre el proceso y cuando el líquido es apreciablemente limpio. Las mirillas y los manómetros de vidrio consisten simplemente en un vidrio transparente o tubo de plástico (transparente) adjunto al tanque de tal manera que la "cabeza" de líquido en el tubo sea igual al nivel del líquido en el tanque. Una escala calibrada marcada en el tubo o colocada dentro de éste, nos proporciona un medio conveniente para leer el nivel en pulgadas, pies, centímetros o metros o bien unidades de volumen, galones, pies cúbicos, litros, metros cúbicos, etc.

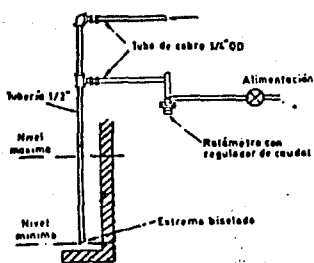
La figura 1 nos muestra una instalación típica de mirilla.



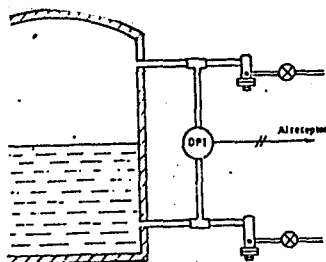
Presión Hidrostática.- Una columna líquida crea una presión hidrostática directamente proporcional a la altura del líquido arriba del punto de referencia. Un elemento de presión apropiado, conectado adecuadamente al proceso, mide el nivel del líquido en unidades apropiadas para las cuales se debe calibrar cada elemento. Los instrumentos que con más frecuencia se usan para medir nivel de presión hidrostática son el de tipo burbujeo y la caja de diafragma.

Los instrumentos para medición de nivel de purga continua se usan cuando los líquidos son corrosivos o tienen sólidos en suspensión; cuando se dispone de aire o gas y se requieren lecturas remotas. Este tipo de medición, es el más simple, el más barato, el más confiable y el más usado. La figura 2 ilustra una instalación típica para medición de nivel por el método de purga continua: Un pedazo de tubo abierto se introduce dentro del tanque hasta un punto de cerca de tres pulgadas por encima del fondo o del sedimento, o se efectúa la conexión por fuera del tanque (a un lado) a la misma altura. Esta altura no es crítica pero a la altura en que se coloque el tubo tiene que ser nuestro punto de referencia para la calibración del elemento para la medición de la presión hidrostática en términos de altura o volumen y debe estar (el

punto de referencia) arriba de cualquier sedimento que se pueda tener.



a) Tanque abierto



b) Tanque cerrado

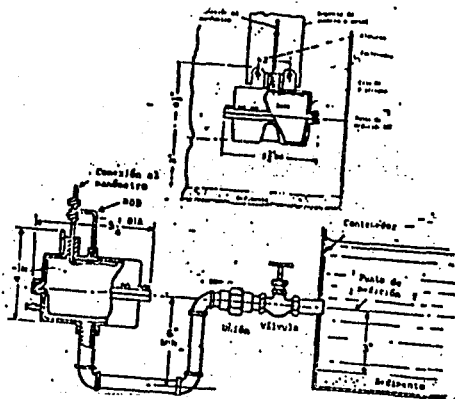
El aire comprimido o cualquier fluido similar se suministra a través de una válvula y restrictor y un rotámetro de purga, de tal manera que el fluido escape solamente por el extremo abierto del tubo. La presión de aire en el tubo corresponde exactamente a la altura del líquido en el tanque. Si el nivel del líquido cambia, la presión de aire en el tubo de burbujeo cambia también proporcionalmente.

Un instrumento de presión conectado al tubo de burbujeo registra la presión de aire en la gráfica o la indica en una escala graduada apropiadamente en unidades de nivel, centímetros, pies, pulgadas, etc. o en unidades de volumen litros, galones, etc. tal como se requiera.

Los sistemas de caja de diafragma se usan para medir nivel en tanques abiertos, cuando es necesario contar con aire o



gas o cuando el método por tubo de burbujeo no es recomendable como se muestra en la figura 3, consisten esencialmente en una "copa" recubierta con un diafragma flexible el cual es está protegido por medio de un anillo metálico.

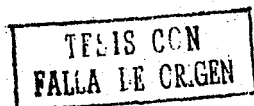


La caja está dividida en dos secciones, con el diafragma insertado entre las dos y sellado a prueba de aire. Un tubo capilar se usa para conectar la parte de arriba de la caja del diafragma con el instrumento. La caja está colocada a una altura determinada del tanque la cual servirá como nivel de referencia. La presión causada por la columna del líquido por encima del nivel de referencia actúa sobre el diafragma para comprimir el aire en el sistema sellado de presión en una cantidad equivalente a la cabeza actual del líquido.

Las variaciones de nivel producen cambios de presión proporcional en el sistema de aire. . Esos cambios de presión actúan un resorte de presión en el instrumento el cual está conectado en una pluma de registro o a un puntero indicador.

Uno de los instrumentos del tipo diafragma más ampliamente aceptado para la medición de nivel sobre todo, en aquellos procesos que tienen sólidos en suspensión, es el transmisor de presión diferencial bridado. Dos versiones de éste tipo se muestran en la figura 4. El de diafragma al ras se monta al nivel de la pared interior del tanque tal como se muestra en la figura 5. El de diafragma de extensión se usa cuando el líquido con sólidos en suspensión puede dejar sedimentos sobre las paredes interiores del tanque y éstos puedan impedir que el diafragma esté en contacto con el líquido perdiéndose la lectura. El diafragma con extensión se monta de tal manera que quede embutido dentro de la pared interior del tanque. La cabeza del líquido ejercida sobre el diafragma se balancea simultáneamente por medio de una fuerza de retroalimentación neumática o eléctrica en la parte de arriba del transmisor. Esta fuerza de retroalimentación representa el nivel de líquido y se usa para indicaciones, registros o controles remotos (1000 pies o 300 metros).

Flotador y Cable.— La medición directa de nivel de líquidos en tanques abiertos se lleva a cabo frecuentemente por el método del flotador y cable, pero está limitado a líquidos limpios ya que aquellos que tienen partículas o sólidos que pueden



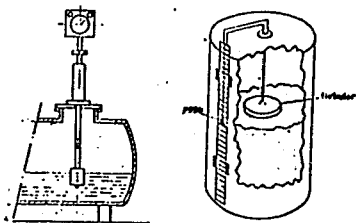


dan adherirse al flotador provocarían que éste falseara la lectura.

La medición por medio de flotador y cable es más factible encontrarla en las plantas de tratamiento de agua. Este sistema no depende de la presión hidrostática para la medición de nivel. Son instrumentos que se auto-operan por el movimiento del flotador sobre la superficie del líquido.

Existen muchas versiones de los instrumentos de flotador y cable. Fundamentalmente consisten de un flotador y contrapeso conectados por medio de un cable el cual opera una polea.

El flotador hace que la polea se mueva. De esta manera el movimiento vertical del flotador se transforma a una medición uniforme por medio de un mecanismo de reducción, el cual puede usarse para indicación, registro o control.



Generalmente otros tipos de unidades para medición de nivel en tanques abiertos se usan para mediciones especiales. Para esto se usa un equipo más complicado y por lógica más caro. Algunos usan medios radioactivos, pruebas de capacitancia, ondas sónicas, celdas de carga, etc.

### Medición de Nivel en Tanques Cerrados.

Cuando es necesario medir nivel de líquido en tanques cerrados, como digestores, tanques para recibir condensados, evaporadores, etc., una medición simple de presión hidrostática no se puede usar. La influencia de la presión en un tanque cerrado incluye: el peso o presión del líquido y la presión o el vacío ejercidos encima de la superficie del líquido.

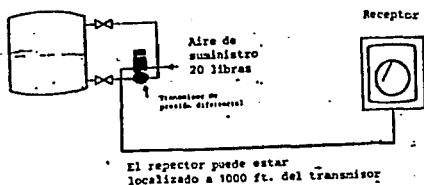
Bajo estas condiciones, la medición de nivel de líquido debe hacerse con unidades de presión diferencial, desplazamiento por medio de flotadores, dispositivos radioactivos, sónicos, unidades de capacitancia y otras unidades eléctricas.

Presión Diferencial. - En este caso, el nivel del líquido se infiere por la medición de la presión total, compensándola al mismo tiempo por la presión ejercida por encima de la superficie del líquido o sea la diferencia existente entre las dos presiones. En este caso, los elementos usados para la medición son, por ejemplo, manómetros, fuelles y celdas de balance de fuerzas de presión diferencial. En la figura 7 se muestra como se usa el manómetro de mercurio de tubo en U para la medición de nivel de líquidos limpios en tanques cerrados.

En algunas ocasiones se usan sellos, los cuales consisten en un fluido inherente para proteger al medidor si el líquido que se está midiendo es corrosivo, o contiene sólidos en suspensión o es demasiado volátil. En algunas ocasiones en su-

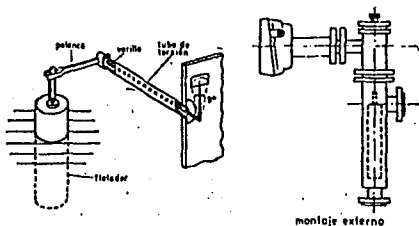
gar de sellos se usan sistemas de purga.

En la figura B se muestran los transmisores diferenciales de balance de fuerzas para la medición de nivel de tanques cerrados. La instalación de éstos instrumentos es frecuentemente más sencilla que la de los manómetros de mercurio. Debido a su construcción a prueba de corrosión, y a el desplazamiento despreciable del líquido en las líneas, éstos instrumentos se pueden usar en la medición de nivel de líquidos corrosivos sin la necesidad de usar sellos o sistemas de purga.



Flotadores de Desplazamiento.- El flotador de desplazamiento puede usarse en tanques abiertos y cerrados. La operación de éste dispositivo se basa en el principio de Arquímedes, el cual establece que la fuerza resultante que en un fluido ejerce sobre un cuerpo sumergido en éste, actúa verticalmente a través del cuerpo de gravedad del fluido desplazado y es igual al peso del fluido que se desplaza. La fuerza resultan

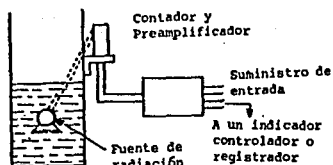
te, cuyo sentido es hacia arriba sobre el cuerpo se denomina "boyante" y puede balancearse por medio de otra fuerza de tal manera, que el cuerpo puede usarse como elemento para la medición de nivel. La figura 9 es un arreglo esquemático de una medición de nivel con un dispositivo de éste tipo (desplazamiento) con la fuerza "boyante" balanceada por medio de un resorte. La fuerza "boyante" puede balancearse también por medio de un sistema de balance de fuerza ya sea neumático o eléctrico el cual produce una señal correspondiente al nivel del líquido la que se puede transmitir para una indicación, registro o control remotos. La figura 10 muestra una unidad típica.



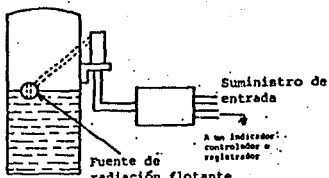
Nuclear-Radioactiva.— Los sistemas radioactivos se usan para la medición de nivel en tanques cerrados. Consisten de un ensamble de medición y un indicador amplificador. El ensamble de medición contiene una fuente radiactiva, como radio, cesio o cobalto y la célula detectora de radiaciones la que produce

ser de la forma de un contador o una celda diseñada especialmente para ionización de gas. La celda detectora produce una señal eléctrica proporcional a la intensidad de los rayos radiactivos esta señal se amplifica para que produzca una medición en unidades apropiadas.

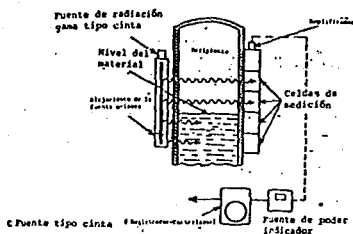
Se pueden usar varios arreglos en la instalación de éstos sistemas tal como se muestra en la figura 11 (a). La fuente radiactiva se puede fijar dentro o sobre un lado del tanque a un nivel bajo y la celda detectora fija en la parte de afuera del tanque a un nivel más alto. Cuando el nivel aumenta dentro del tanque el material que se absorbe entre la fuente de radiación y el detector disminuye la intensidad radiactiva que recibe el detector. La radiación recibida, el detector la convierte en una señal eléctrica que permite la medición de nivel (b). En un sistema similar, se emplea una fuente colocada en un flotador. La intensidad de la radiación está en función de la distancia entre la fuente y el detector y es directamente proporcional a los cambios de nivel (c). En este caso se usa una fuente tipo vertical que se coloca verticalmente en una columna y las celdas de medición correspondientes se colocan sobre el tanque de tal manera que el líquido cuyo nivel deseamos medir, se interpone entre las dos columnas en cuanto aumenta el nivel. La corriente que sale de las celdas detectoras, la cual varía con el nivel, es inversamente proporcional a los cambios de nivel.



A. Fuente de radiación fija



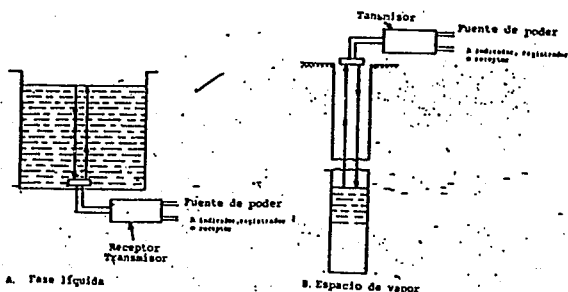
B. Fuente flotante



Sónico.— Este es otro método para la medición de nivel en tanques cerrados y también se puede usar con amplificaciones para tanques abiertos. La medición de nivel sónica se basa en la emisión pulsante de ondas sonoras por medio de una fuente emisora, la transmisión de esas ondas de energía a través de la fase líquida, o la fase de vapor en el tanque, y reflejándolas en la superficie hacia un receptor. El tiempo de tránsito de este impulso se usa como medición del nivel del líquido. (figura 12)

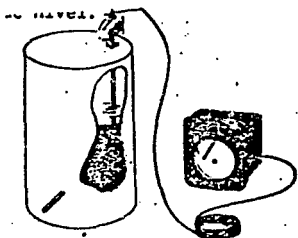
En este tipo de arreglo los pulsos de energía ultrasónica se dirigen directamente hacia la superficie del líquido que se está midiendo. Estos pulsos rebotan en la superficie hacia el receptor. El tiempo de tránsito desde la fuente hasta el receptor es una medida de la distancia entre la superficie y la fuente de emisión de pulsos y directamente proporcional al nivel del líquido.

Este tiempo de tránsito se convierte electrónicamente a una medición de nivel de unidades comunes. El arreglo de Vapor-Espacio está basado en el rebote o el principio del eco a través de una fase de vapor o gas encima de la superficie del líquido. En operación es similar al de fase líquida, excepto que el tiempo de respuesta en la transmisión del pulso sónico es inversamente proporcional al nivel del líquido que se está midiendo.



Capacitancia. - Otro método eléctrico para medir nivel de líquido en un tanque cerrado es la capacitancia. Básicamente,

un sistema para medición de nivel por capacitancia consiste de un elemento primario de medición y un instrumento secundario que transforma la variación de capacitancia en un movimiento que es proporcional al nivel del líquido en los tanques (figura 13)



Generalmente existen otros métodos para medición de nivel en tanques cerrados, los cuales tienen uso limitado. Entre estos se encuentran: la celda de temperatura para un solo punto de nivel, el tubo de expansión, el tipo de oscilación, conductividad y una combinación de vidrio fotoeléctrico y manómetro.





En la medida del pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales el más exacto y versátil de aplicación industrial es el sistema de electrodo de vidrio.

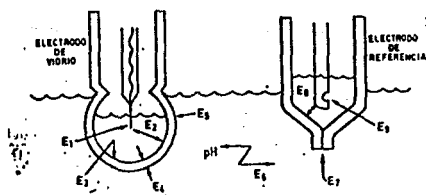
El electrodo de vidrio consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidrógeno del pH. En la parte interna de esta membrana se encuentra una solución de cloruro tampón de pH constante dentro de la cual está inmerso un hilo de plata recubierto de cloruro de plata.

Aunque el mecanismo que permite que el electrodo de vidrio mida la concentración de ión hidrógeno no se conoce exactamente, está establecido que al introducir el electrodo en el líquido se desarrolla un potencial relacionado directamente con la concentración del ión hidrógeno del líquido. Es decir, si esta concentración es mayor que la interior del electrodo existe un potencial positivo a través de la punta del electrodo y si es inferior, el potencial es negativo.

Este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54.2 mV a 0°C a 74 mV a 100°C por unidad de pH. Para medir el potencial desarrollado en el electrodo de vidrio es

necesario disponer en la solución de un segundo elemento o electrodo de referencia. Este, aparte de cerrar el circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el potencial variable del electrodo de vidrio. El electrodo de referencia contiene una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata en contacto con un electrolito de cloruro de potasio. Este electrolito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida. De este modo, la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que por lo tanto proporciona una referencia estable de potencial.

En la siguiente figura puede verse la disposición interna de los electrodos y los potenciales que miden.



Los potenciales existentes son los siguientes.

E1.- Potencial entre el electrodo metálico interior y la solución tampón que puede considerarse constante para una temperatura dada. Las temperaturas extremadamente altas pueden dar lugar a la disolución del revestimiento de

cloruro de plata del electrodo.

E2.- Caída de potencial entre el electrodo interior y la cara interna de la membrana de cristal que puede considerarse despreciable.

E3.- Potencial entre solución tampón y superficie de la membrana de cristal que es constante gracias a la estabilidad de la solución tampón y de la membrana de cristal.

E4.- Caída de potencial a través de la membrana que se mantiene constante en cortos periodos mientras la membrana de cristal no sufra alteraciones de origen químico o mecánico. Si éste potencial deriva, se calibra con una solución tampón de pH conocido.

E5.- Potencial entre superficie exterior de la membrana de cristal y la solución ensayada que varía con la concentración de iones hidrógeno (pH) de la solución ensayada.

E6.- Caída de potencial a través de la solución ensayada que se considera despreciable, salvo si se trata de agua poco conductora o de soluciones no acuosas.

E7.- Representa el potencial de la unión líquida entre la solución ensayada y la de referencia. Su valor es despreciable, aunque un atascamiento o un exceso de presión externa contra la unión puede influir en la medición.

E8.- La caída de potencial dentro del electrodo de referencia es despreciable.

E9.- Potencial de contacto entre el electrodo de referencia y la solución de cloruro de potasio que puede considerarse constante si dicha solución no está contaminada.

La ecuación de Nernst de la f.e.m. E5, desarrollada en el electrodo de referencia,

(H) exterior al electrodo.

$$E = (RT/F) \ln \frac{(H)_{\text{exterior}}}{(H)_{\text{interior}}} = -(RT/F) \text{pH}$$

(H) interior en el electrodo.

en la que:

E = Potencial.

R = Constante de los gases perfectos.

F = Número de Faraday.

T = Temperatura absoluta.

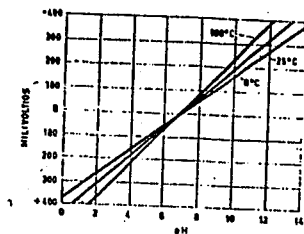
(H) = Concentración de iones hidrógeno.

La medida del pH con el electrodo de vidrio se reduce a medir un potencial resultante entre los electrodos de E1-E9 con una resistencia interna considerable. En la medida pueden presentarse algunas dificultades. Las más comunes son:

- a.- Recubrimiento o abrasión de la membrana del electrodo de vidrio (influye en el potencial E4 y/o en el E5).
- b.- Soluciones no acuosas o de alta resistencia (influye en E6 y E5)
- c.- Taponamiento o fallo mecánico de la unión del líquido en el electrodo de referencia (influye en E7) que impide el paso del cloruro de potasio, quedando el circuito abierto. Si el taponamiento es parcial se desarrolla un potencial indeterminado.

- d.- Entrada de la solución de ensayo dentro de la solución interna del electrodo de referencia (influye en E<sub>B</sub> y de modo más importante en E<sub>9</sub>) con lo que se destruye el potencial constante deseado.
- e.- Variación con el tiempo del potencial de asimetría que depende de la naturaleza del vidrio, del tipo de fabricación, de las impurezas, de la disolución gradual del vidrio en la solución, del desgaste por erosión de la punta del vidrio, etcétera. Este potencial sólo es de unos pocos mV, pero se mantiene constante aunque existan las mismas soluciones a ambos lados del electrodo de vidrio.

Los instrumentos de pH disponen de un ajuste para corregir este potencial.



La variación de temperatura influye en la medida del pH. A pH constante alcanza los 0.2 mV por grado centígrado. En la figura anterior puede verse esta influencia. Como en el

instrumento final de indicación o registro o control, la medida se realiza en unidades de pH en lugar de mV, es necesario compensar la influencia de las variaciones de temperatura de la solución de ensayo. Hay que señalar que el termocompensador o sonda de resistencia compensa sólo la relación tensión-temperatura del electrodo de vidrio y que solo asegura la medida del pH real de la solución a su temperatura real. No detecta las variaciones con la temperatura propias del pH de cada solución, que siguen una ley distinta de una solución a la otra y para las cuales habría que diseñar un compensador especial para cada una de ellas.

Así pues, la medida del pH es sólo válida a la temperatura a que se encuentra la solución.

Aunque la variación de señal en mV por unidad de pH es relativamente grande (59mV), la alta resistencia del circuito de los electrodos aconseja utilizar un amplificador de pH que por las características del circuito debe poseer una alta impedancia de entrada, un bajo nivel de ruido para disminuir los errores, y opcionalmente un aislamiento de señal entre la entrada y la salida para eliminar los lazos de tierra ya que la unión de referencia está al potencial de tierra. El registro o el control del pH una vez amplificada la señal se realiza en un instrumento potenciométrico.

En la medición del pH puede presentarse el recubrimiento

de los electrodos, en cuyo caso el electrodo se comporta como si apreciara bajas concentraciones de ion H<sup>+</sup> y por lo tanto el instrumento registrador leería altos valores de pH. En éstos casos es, pues, necesario limpiar periódicamente el electrodo con una frecuencia que la experiencia determina en cada caso. Existen métodos automáticos de limpieza que todavía no han dado un resultado completamente satisfactorio.

Los instrumentos de pH tienen una precisión de 0.25 a 1 %, o bien, 0.03 pH.



## CAPITULO III

### MODOS DE CONTROL

#### 3.1 MODOS DE CONTROL PARA LA RETROALIMENTACION

Entender los modos individuales en un control es esencial para aplicar con éxito un control retroalimentado. Esos modos son: "ON-OFF", acción proporcional, acción integral y acción derivativa. Cada combinación posible representa un balance entre costo y funcionamiento.

Un control retroalimentado debe conectarse en un lazo cerrado y se debe seleccionar la acción de control apropiada, para establecer la retroalimentación negativa. Después de esto, el controlador puede resolver el problema de control por una búsqueda de prueba y error y la salida establecerá un balance entre todas las influencias en la variable controlada.

Seleccionando la acción de control apropiada, estableceremos la retroalimentación negativa, para definir la dirección de la respuesta del controlador.

### 3.2 MODOS DE CONTROL

Un controlador en un lazo de retroalimentación está en una posición difícil. Fuerzas impredecibles pueden influenciar la medición que se trata de controlar. Peor aún, las características dinámicas del resto del lazo retrasara y distorcionara las variaciones de la salida que son usadas por el controlador para reducir el error.

Por esta razón es engañoso creer que el control es impuesto en el proceso. En lugar de que la relación entre el controlador y el proceso sea interactiva. Aquí, el tamaño, la forma y el porcentaje de las variaciones en la salida del controlador son cruciales para que el controlador restablezca la medición al valor del punto de ajuste seguido de un disturbio.

Un modo de control es una respuesta de un control en particular a un cambio en la medición o error. Las cuatro respuestas básicas son:

- 1 ON-OFF (dos posiciones).
- 2 Proporcional.
- 3 Integral.
- 4 Derivativo.

Existen variaciones de estas respuestas básicas entre las manufactureras de instrumentación. Algunas veces, esas respuestas son identificadas con diferentes nombres o se cuantifican en diferentes unidades.

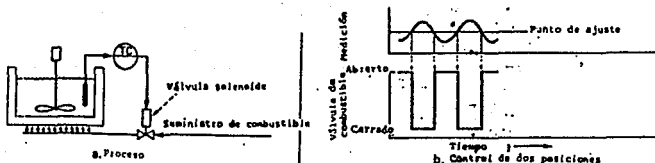
Para situaciones específicas, muchas características se suman para mejorar el control como una retroalimentación integral externa, interruptores "batch", seguidores y el "bias" de salida. En el futuro la flexibilidad inherente del algoritmo de retroalimentación digital incrementará la especialización y variedad de los controles de retroalimentación. Sin embargo, los sistemas de control todavía se construirán en los cimientos provistos por las respuestas básicas.

Un controlador es un aparato no pensante, es decir, sus respuestas son construidas. Especificando la combinación errónea de los modos de control conduce a un sistema con pobre funcionamiento, incrementando la complejidad en el problema de la sintonía y puede adicionar un costo innecesario.

### 3.3 CONTROL ON-OFF

La respuesta ON-OFF o de dos posiciones es la forma más simple en un lazo de control de retroalimentación. La figura 1 muestra el desempeño de este lazo para un proceso en el

cual el líquido está siendo calentado.



La función de un control ON-OFF tiene solo dos posibles salidas (ON, 100%; OFF, 0%) y solo considera el signo del error. En este ejemplo el controlador cierra la válvula de combustible cuando la medición se sobrepone al punto de ajuste. A causa de los tiempos muertos y los retrasos en el proceso, la temperatura continua subiendo antes de regresar y moverse hacia el punto de ajuste. Cuando la temperatura se cae por debajo del punto de ajuste el controlador abre la válvula de combustible. Los tiempos muertos y los retrasos crean una demora antes que la temperatura empiece a subir. Cuando se cruza el punto de ajuste, el controlador otra vez desconecta el flujo de combustible y se repite el ciclo. La condición normal para un lazo bajo un control ON-OFF es que sea cíclico. La limitación surge porque con solo dos posibles salidas el controlador está inhabilitado para resolver exactamente el problema de control. La salida es muy alta o

muy baja para establecer un balance entre todas las influencias en la temperatura del recipiente. Un 100% de salida suministra mucho calor, causando que la temperatura aumente. Un 0% de salida suministra muy poco calor, permitiendo que la temperatura se reduzca. La retroalimentación negativa causa un ciclo entre dos condiciones.

### 3.4. APLICANDO EL CONTROL ON-OFF

La principal desventaja de un control ON-OFF es que constantemente hay ciclos, la principal ventaja es el bajo costo. Esto no requiere un controlador, la misma función puede ser creada con alarmas, contactos, salidas digitales y relevadores.

La aceptación de un controlador ON-OFF depende de las características del ciclo en la medición. Si la amplitud de la oscilación es muy larga, ocurren variaciones inaceptables en la variación del producto o disturbios a otras unidades del proceso. Si el periodo del ciclo es muy corto el deterioro en la válvula y disturbios en el sistema de distribución de combustible pueden ser inaceptables.

La amplitud del ciclo depende en que tanto cambia la medición antes de regresar. Así, esto depende de la longitud

del periodo y el porcentaje de cambios en la medición.

El control ON-OFF se debe aplicar en situaciones donde se presenten tres condiciones:

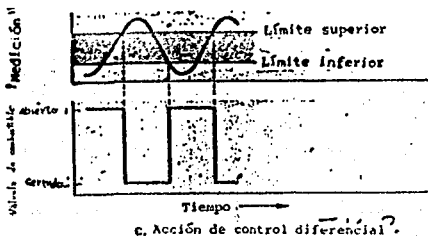
- 1.- Se requiere un control preciso, porque la medición oscila constantemente.
- 2.- El tiempo muerto debe ser moderado para prevenir el desgaste de la válvula para un periodo muy corto.
- 3.- La relación  $T_{or}/T_i$  debe ser chica para prevenir una amplitud muy larga en el ciclo de la medición.

donde:  $T_{or}$  = tiempo muerto aparente.

$T_i$  = constante de tiempo aparente.

Cuando estas condiciones aplican la simplicidad y economía de un control ON-OFF ofrece ventajas significativas.

Una variación del control ON-OFF que reduce el desgaste en el operador final y que debe ser descrito como intervalo diferencial se muestra en la figura 2



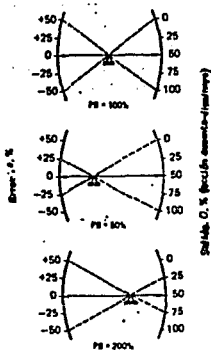
En lugar de cambiar la salida en ambas direcciones a un punto sencillo, la función del control debe tomar acción solo para los límites alto y bajo especificados. Mientras la medición permanece dentro del intervalo el controlador sostiene el último estado de la salida. Como se muestra en la figura anterior, el efecto de esta variación es extender el periodo e incrementar la amplitud.

Muchas veces, el tamaño del intervalo será ajustable y no necesita ser simétrico, por lo tanto se pueden lograr algunos compromisos.

### 3.5 CONTROL PROPORCIONAL

El control proporcional está basado en el principio del tamaño de la respuesta debe ser proporcional al tamaño del error. Para lograr esto, el control proporcional iguala el cambio en la salida al cambio en el error, con ambos valores siendo normalmente representados como porcentajes del rango.

La figura 3 es una representación gráfica de la acción proporcional.



Acción proporcional

A pesar de como se crea la acción proporcional (neumática, electrónica o digital) este efecto debe imaginarse como un puntero de dos extremos con un pivote a la mitad (para una banda proporcional del 100%) y moviéndose a través de las escalas de error y salida. Cualquier cambio en la medición o en el punto de ajuste crea cambios en el error, el cual lleva al extremo del puntero a la izquierda. El extremo del lado derecho indica la salida correspondiente.

Como se muestra en la figura, la escala de salida describe la acción indirecta. Cambiando a una acción directa simplemente invertimos la escala de salida.

### 3.6 MIDIENDO LA ACCIÓN PROPORCIONAL

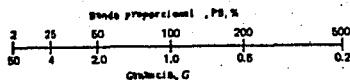
La figura anterior muestra muchos conceptos importantes.



de la acción proporcional, el primero de los cuales es la banda proporcional PB, o ganancia G. Estos parámetros ajustables definen que tan fuerte reacciona el controlador a cambios en el error. La localización del pivote fija el cambio de la salida igual que el cambio del error dado. Con el pivote en la mitad, un cambio del 100% en la medición causará en la salida un cambio de 0-100%. Moviendo el pivote a la izquierda puede reducir el cambio de la medición requerida de un 100% a un cambio en la salida de un 50%. Del mismo modo, moviendo el pivote a la derecha incrementará el porcentaje de error y cada uno se expresa en términos del otro:

$$G = 100\%/PB.$$

La relación de la fórmula anterior se puede expresar en la siguiente escala:



La figura anterior también muestra el concepto del "bias" proporcional. Sin tener en cuenta el valor de la banda proporcional, la salida será 50% cuando el error en la entrada sea 0.

Este "bias" en la salida, proporciona al controlador un valor alrededor del cual puede variar la salida o reducir el error. Como el error incrementa (o llega a ser negativo) la

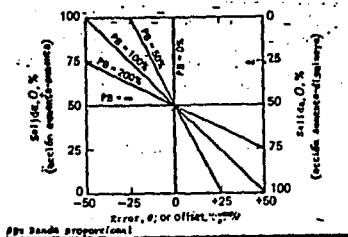
salida cambiará un 50% de acuerdo al valor de la banda proporcional. Normalmente, el "bias" en un controlador proporcional es ajustable en la fábrica de instrumentación aunque algunos fabricantes hacen este ajuste disponible al operador.

### 3.7 PROPIEDADES DINAMICAS DE LA ACCION PROPORCIONAL

La figura anterior muestra dos propiedades de la acción proporcional que tienen mucha influencia en un lazo cerrado. La acción proporcional es inmediata y específica:

- 1.- La unión entre el error y la salida, representado por el puntero, significa que el cambio en la salida ocurre simultáneamente con el cambio del error. No ocurren retardos en la acción proporcional.
- 2.- Cada valor del error para una banda proporcional dada, genera un valor único de la salida. La respuesta proporcional generada es incapaz de cualquier otra combinación. Esta combinación uno a uno entre el error y la salida posiciona muchas limitaciones en el desempeño de un lazo cerrado para una acción proporcional.

La figura 4 presenta otra representación gráfica de la acción proporcional.



Cada valor de la banda proporcional define una relación específica entre el error  $e$ , y la salida  $O$  la cual se expresa como  $O = e(100)/PB + 50\%$ .

donde  $O$  = es la salida en porcentaje.

$e$  = es el error en porcentaje.

$PB$  = es la banda proporcional en porcentaje.

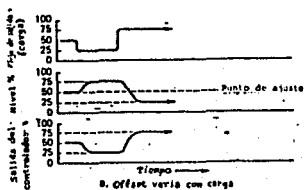
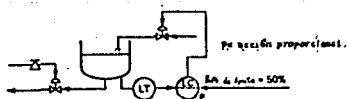
La relación en línea recta entre el error y la salida identifica un controlador proporcional como un aparato lineal o de ganancia constante. En esta representación la característica específica de la acción proporcional significa que las coordenadas de error y salida deben identificar un punto dado en la línea de la banda proporcional dada y el punto de operación del controlador se puede mover a través de esa línea.

Como la banda proporcional disminuye, la acción proporcional se concentra en una banda muy cercana al punto de ajuste.

Desde un punto de vista de las ganancias, el mismo cambio en el error ocasiona grandes cambios en la salida. En el caso de que la banda proporcional sea cero (ganancia infinita) el mas pequeño error ocasiona que la salida vaya hacia el límite de la escala. El control ON-OFF entonces, llega a ser un caso limitativo del control proporcional. Por otro lado cuando la banda proporcional es infinita (ganancia cero) el controlador simplemente no responde a cambios en el error.

### 3.8 APLICANDO EL CONTROL PROPORCIONAL

Un proceso de nivel con control proporcional se muestra en la figura 5.



Donde la carga es el flujo de salida. Para controlar el

nivel el controlador debe balancear el flujo de salida manipulando el flujo de entrada. Esto requiere una acción inversa.

Ambos flujos varían de 0 a 100%, el punto de ajuste del controlador está al 50% y la banda proporcional es de 100%.

Como un punto de arranque, asumimos que la carga está al 50% y que el nivel está en el punto de ajuste. Entonces la salida del controlador estará al 50% también, el flujo de entrada será igual al flujo de salida y el nivel permanecerá constante.

Después, asumimos un disturbio en forma que la carga disminuya un 25%, entonces el flujo de salida se reduce. ¿Cómo responderá el lazo a este disturbio?

Desde que el flujo de salida es menor que el flujo de entrada inicial, el nivel empezará a subir y el error será negativo. Si nos referimos a una banda proporcional del 100% se verá la salida del controlador disminuyendo simultáneamente como el punto de operación se mueva hacia la esquina izquierda más alta de la gráfica. Esta acción restringe gradualmente el flujo de entrada hasta que sea igual al 25%, cuando el nivel haya alcanzado un 75%. Entonces, el flujo de entrada es igual al flujo de salida y el nivel permanecerá constante.

El controlador no puede regresar la medición al punto de ajuste, cuando la banda proporcional sea igual al 100%, la salida igual al 25%, siempre y cuando el error sea -25%. Por lo tanto una desviación de estado estable se requiere para balancear la carga en el proceso. Del mismo modo, si la carga aumenta un 75% el nivel caera hasta el 25% por debajo del punto de ajuste, donde el 75% de salida será balanceada desde la carga del controlador en el proceso.

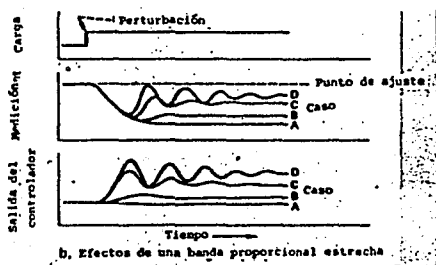
La desvracion en estado estable del punto de ajuste es llamado "offset". Esto se origina porque el "bias, B". (salida cuando la medición es igual al punto de ajuste), es estable. Si las condiciones de carga requieren una salida diferente del "bias", algun error en estado estable debe presentarse. Cada variacion en la carga requerira una salida diferente y un "offset" diferente. La cantidad de "offset" es una funcion de la salida requerida y de la banda proporcional, de acuerdo a las siguientes ecuaciones en que se describe un controlador proporcional:

$$O = e(100/PB) + B, e = (PB/100)(O-B). \quad (3)$$

Así el proposito de un "bias" ajustable llega a ser evidente. Cambiando el "bias" en la respuesta proporcional, para poder igualar la salida requerida, la medición puede regresarse al punto de ajuste. Este ajuste es muchas veces llamado "reset manual".

Asumiendo que el "bias" permanece fijo al 50%, el "offset" para una salida requerida parece variar con la banda proporcional. Refiriéndonos a la gráfica de error contra salida, si las condiciones de carga requieren un 75% de salida y la banda proporcional es de 200%, el "offset" será de 50%. Reduciendo la banda proporcional a 50%, se reduce el "offset" requerido a 12.5%. Sin embargo, reduciendo la banda proporcional, también incrementa la ganancia del controlador y reduce el amortiguamiento en la respuesta del lazo.

La figura 6 muestra el efecto de estrechamiento de la banda proporcional en una respuesta de lazo cerrado a un disturbio en la carga.



CASO A.- El controlador no responde. La medición cae a un nuevo valor en estado estable.

CASO B.- La respuesta proporcional es muy débil mandando un "offset" excesivo.

CASO C.- La banda proporcional es correcta. La respuesta del controlador es suficientemente fuerte para causar un

amortiguamiento de  $1/4$  de onda.

CASO D.- La banda proporcional es muy estrecha. La sobre-reacción causa una oscilación excesiva en la medición, la cual toma la mayor para igualar:

Si la banda proporcional se reduce mucho, la ganancia en el controlador llegará a ser lo suficientemente alta para hacer la ganancia a lazo abierto mayor que 1. En lugar de decaer, el ciclo para ambos, la medición y la salida del controlador crecerá hasta que la válvula varíe entre esos límites, como un control ON-OFF.

Para cualquier proceso bajo el control proporcional, una banda proporcional particular (ganancia) crea la respuesta a lazo cerrado deseado. El valor exacto dependerá de los otros elementos en el lazo, cada uno teniendo ganancias individuales. En general, donde la ganancia de un proceso sea baja, por una relación pequeña  $T_{01}/T_1$ , la banda proporcional requerida será también baja. Una vez sintonizado, el "offset" variará con la carga en el proceso, como en la figura anterior.

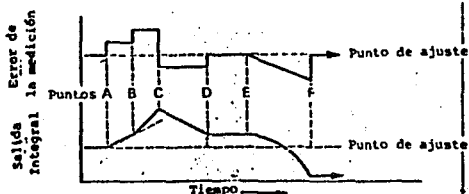
El control proporcional es una mejora al control ON-OFF por la habilidad para estabilizar el lazo. Su principal desventaja es el inevitable "offset". Donde la carga está constante y la banda proporcional requerida sea estrecha, el "offset" no será un problema. El punto de ajuste puede ser ajustado hasta que la medición esté en el valor deseado.



### 3.9 ACCION INTEGRAL

La acción integral debe ser combinada con la acción proporcional para eliminar el "offset". Como la acción proporcional, la acción integral también responde al error. Sin embargo, la acción integral está basada, en el principio de que la respuesta debe ser proporcional al tamaño y duración del error.

La respuesta a lazo abierto en la figura 7 muestra como la acción integral está relacionada con el error.



2. Acción integral responde a la señal, tamaño y duración del error

Inicialmente, mientras el error sea igual a cero, la salida permanece constante en un valor que dependerá de la historia del error. El error en la medición producirá lo si-

quiente:

PUNTO A.- Un error constante aparece. La respuesta integral conduce la salida en una velocidad constante, proporcionalmente al tamaño del error, tan largo como el error permanezca constante.

PUNTO B.- El tamaño del error se incrementa. La respuesta integral conduce la salida a una velocidad más rápida.

PUNTO C.- La señal del error cambia. La respuesta integral conduce la salida en la dirección opuesta.

PUNTO D.- El error regresa a cero. La acción integral deja la salida en el valor existente.

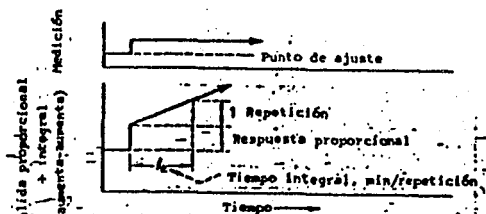
PUNTO E.- El error se incrementa en una velocidad constante. La respuesta integral conduce la salida en un incremento de velocidad.

PUNTO F.- El error regresa a cero. La acción integral suspende la salida.

Estas respuestas ilustran la propiedad más significativa de la acción integral. Mientras la acción proporcional iguala la salida a la medición a través del error, la acción integral puede llevar a cabo cualquier valor de salida, parando solamente cuando el error es cero. Esta es la propiedad que posibilita a la acción integral a eliminar el "offset". La acción integral es solamente satisfactoria cuando la medición ha retomado el punto de ajuste. Tan largo como el error exis-

ta, la acción integral conducirá la salida en la dirección que el error se reduce.

La respuesta a lazo abierto en la figura 8 muestra como las acciones proporcional e integral se combinan en un controlador.

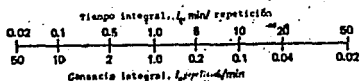


b. El tiempo integral determina la velocidad de respuesta

Inicialmente la salida es constante porque el error es cero. Cuando un cambio en el error aparece, ocurre simultáneamente un cambio en la salida por la acción proporcional. El tamaño de la respuesta depende de la banda proporcional. En el mismo tiempo, la acción integral, empieza a conducir la salida, como se muestra en la figura anterior.

Para un error constante, el ajuste de la acción integral cambia la velocidad en la cual se conduce la salida. Esta velocidad se cuantifica en términos del tiempo requerido para que el cambio en la salida iguale o repita la respuesta causada por una acción proporcional.

Algunas fábricas de instrumentos usan unidades dimensionales de minutos/repetición, aplicado a un tiempo integral. Otras usan unidades de repeticiones/minuto aplicado a una ganancia integral. Cada uno es simplemente el inverso del otro como se muestra en la gráfica:



Incrementando el tiempo integral, o bajando la ganancia integral, se reduce la eficacia de la acción integral.

### 3.10 APLICANDO LA ACCION INTEGRAL

La combinación de la acción proporcional más integral puede expresarse en forma de ecuación:

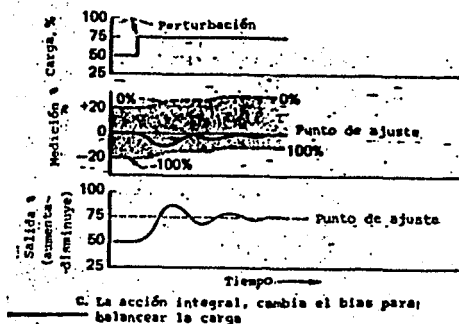
$$G = (100/PB)e_p + (100/PB)(1/It) \int e_p dt \quad (4)$$

Cuando la ecuación 4 se compara con la ecuación 3, la cual describe un controlador proporcional, la única diferencia es en el término "bias".

Cuando el control proporcional es limitado por un "bias"

fijo, la acción integral usa la integral del error para ajustar el "bias", parando cuando el error es igual a cero.

La figura 9 es una representación de como la acción integral elimina el "offset" siguiendo un disturbio en la carga. Inicialmente un 50% de carga y un 50% de salida sostienen la medición en el punto de ajuste. En estado estable, este es también el valor de la variable "bias", desde que el error es igual a cero. El controlador tiene un 40% de banda proporcional, el 50% de "bias" indica que una variación del 40% en la medición sobre la cual, la acción proporcional trate de centrarla alrededor del punto de ajuste.



Cuando la medición empieza a caer, siguiendo un incremento en la carga, la acción proporcional e integral regresan

la medición al punto de ajuste vía  $1/4$  de amplitud de la respuesta amortiguada. La contribución del integral es incrementar el término "bias" como una función del error. Cuando la respuesta es completa, el término "bias" se incrementa al 75% y el término proporcional regresa a cero. El 75% del bias significa que la banda proporcional se mueve en un rango de acción proporcional que va de un 10% abajo a un 30% arriba del punto de ajuste. Así, la acción integral continúa ejecutando la función "reset manual", descrita con anterioridad.

La habilidad de la acción integral para eliminar el "offset" es muy ventajoso, y la acción integral casi siempre se especifica para un control de retroalimentación. Sin embargo, esta acción tiene una desventaja significativa. Para crear una respuesta gradual se construye un retardo en el controlador. Esto causa un retardo de fase en el controlador y hace más grande el periodo de oscilación del lazo, como una función de la contribución relativa de las acciones proporcional e integral.

Típicamente el periodo de oscilación para un lazo, bajo una sintonía apropiada del control proporcional más integral será 50% mayor que si el controlador fuera solo proporcional. Para lazos relativamente rápidos como un control de flujo, esta no será significativa. Sin embargo, para lazos lentos, la extensión del periodo puede ser una limitación seria. Para lazos donde el valor exacto de la medición no es crítico

(como un control de nivel) el periodo corto de un control proporcional puede ser una ventaja.

Como la acción proporcional, la acción integral incrementa la ganancia del controlador. Mucho de ello puede causar ciclos en el lazo. En general, el tiempo integral deberá ser proporcional a la rapidez de respuesta del proceso en la acción de control. Si el tiempo es muy corto, conducirá al operador final al límite antes que la medición este disponible a responder. Entonces, cuando la medición no responde, esto pasaría del punto de ajuste causando que el integral conduzca al operador al límite opuesto.

Para aplicaciones en las cuales el error se sostiene, probablemente (proceso batch o cambios largos en el punto de ajuste) puede guiar a un "windup" integral. Aunque el tiempo integral debe ser conseguido por un control normal en situaciones semejantes, la salida debe saturarse durante el sostenimiento del error y la guía a pasar cuando la medición final se acerca al punto de ajuste.

En esas aplicaciones un interruptor debe agregarse al circuito integral (electrónico o neumático) del controlador. Este interruptor llega a comportarse como un interruptor "batch", porque el problema "windup" está primeramente asociado con un proceso discontinuo o "batch". Los controladores nuevos y los algoritmos de control están diseñados para

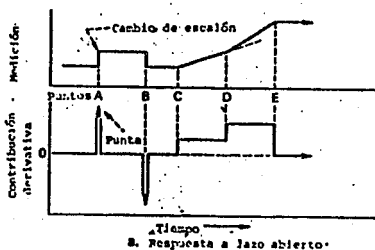
evitar la saturación integral o el problema "windup".

### 3.11 SUMANDO LA ACCION DERIVATIVA

Las acciones proporcional e integral comparten una seria limitación. Un error significativo se presenta porque cualquiera de esos modos genera una respuesta fuerte.

La acción derivativa está basada en el principio que el controlador deberá responder también a la velocidad en la cual la medición este cambiando, aunque el error real es todavía pequeño.

La respuesta a lazo abierto de la figura 10 muestra como la respuesta derivativa está relacionada con la medición.



La velocidad del cambio debe calcularse como una cantidad del cambio dividida entre el tiempo sobre el cual los



cambios toman un lugar. Por ejemplo en esta figura:

PUNTO A.- Aparece un cambio en la medición. Porque el cambio toma un lugar en un tiempo cero, esta velocidad es infinita y la acción derivativa responde con una salida de punta. La dirección de la respuesta será determinada por la acción del controlador. La figura anterior muestra la respuesta para una acción directa. Desde que la medición esta estable despues del cambio, la contribucion de la derivativa inmediatamente regresa a cero.

PUNTO B.- En un segundo aparece una medicion negativa. La contribucion derivativa responde con una punta negativa.

PUNTO C.- La medición empieza a incrementarse a una velocidad constante. La derivativa responde con una contribución positiva constante que es proporcional a la velocidad del cambio.

PUNTO D.- El cambio en la velocidad de medición sufre un incremento. La contribución derivada se incrementa proporcionalmente.

PUNTO E.- La medición deja de cambiar. La contribución derivativa regresa a cero.

La respuesta derivativa no está relacionada con el valor absoluto de la medición. Cuando la medición quiera dejar de cambiar, la derivativa regresa a cero. Cuando esta empieza a



Dt/min. La acción derivativa algunas veces es erróneamente llamada acción anticipatoria. (NOTA: El controlador solo puede responder a un error real, y no puede anticipar el arribo del error). Incrementando el tiempo derivativo se generará una larga respuesta derivativa, que aparecerá como un tiempo largo, diferencia entre las dos respuestas de la figura anterior.

Siguiendo las técnicas de las acciones proporcional e integral, los controladores primero aplican la acción derivativa al error. Sin embargo, esto causa que la acción derivativa responda a cambios en la medición y punto de ajuste. Ya que los cambios en el punto de ajuste son usualmente hechos gradualmente, éstos acercamientos amortiguan el proceso con largos puntos en la salida, como se muestra en la primera figura de éste subtítulo.

Casi todos los fabricantes hoy en día, diseñan los controladores de tal manera que el generador de la respuesta derivativa busque solamente en la señal de la medición. Inicialmente las acciones proporcional e integral responden a cambios en el punto de ajuste.

Cuando la acción derivativa se combina con las acciones proporcional e integral, la respuesta está dada por:

$$O = (100/PB) \left[ e_0 + (1/Td) \int e_0 dt - Dd(dc/dt) \right] \quad (5)$$

97

donde  $c$ , es una variable controlada que representa a la señal de la medición.

La ecuación anterior describe un ideal, un controlador no interactivo. En los tres modos de control, alguna interacción ocurrirá entre los modos de control, así que cambiando cualquiera de los ajustes, se tendrá algún efecto en todas las respuestas.

### 3.12 APLICANDO LA ACCION DERIVATIVA

Al incorporar la acción derivativa los procesos con retardos muy largos tienen una mejoría en el control. La acción derivativa es opuesta a la acción integral. Para generar la respuesta derivativa, la inversión dinámica de un retardo es construido dentro del controlador. Aunque la acción derivativa también incrementa la ganancia del controlador, esto adelanta características para poder cancelar efectivamente un retardo en otra parte del lazo de control, y por lo tanto acorta el periodo de oscilación. Esto puede cancelar el incremento en el periodo, causado por la acción integral, aunque el "offset" está eliminado.

La principal desventaja de la acción derivativa es la

sensibilidad al ruido. Ya que ésta reacciona al cambio de la velocidad de la medición, con una amplitud de ruido muy baja puede causar variaciones largas en la salida del controlador.

En efecto, la derivada trata de controlar el ruido. Una tarea imposible.

Desde que la medición es usualmente sensible al ruido, la reducción en el periodo proporcionado por la acción derivativa no será un beneficio significante. Por lo tanto, la acción derivativa no debe ser aplicada en lazos ruidosos.

Las variables controladas que son muy lentas, benefician a la acción derivativa, porque normalmente no son ruidosas. Una excepción es la salida de muestras analizadas, como el cromatógrafo. Esta señal, la cual cambia gradualmente, debe ser filtrada antes de aplicar un control que tenga la acción derivativa.

## CAPITULO IV

### EL CONTROLADOR AUTOAJUSTABLE

Un controlador autoajustable de propósito general debe poder:

- Ofrecer una puesta en marcha más rápida.
- Permitir mayor libertad al personal calificado para realizar otras tareas.
- Optimizar los ajustes del controlador frente al ruido, de la variable dinámica, no-linealidad del proceso, tiempo muerto, cambios del valor deseado y variaciones de carga.
- Mantener los ajustes para las condiciones operativas presentes.
- Reducir los costos.

En este capítulo describiremos un controlador PID (proporcional más integral más derivativo) que provee una herramienta práctica basada en microprocesadores para uso en el control de procesos. Se eligió el algoritmo PID debido a su familiaridad, su utilidad y su aplicación en la mayoría de los problemas de control industrial con retroalimentación negativa. Este controlador algunas personas lo perciben con-

controlador EXACT "Expert Adaptive Controller Tuning".

#### 4.1 METODO DEL RECONOCIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO A LAZO CERRADO

Por años, los controladores automáticos se han sintonizado manualmente usando la técnica de respuesta al proceso. Típicamente, con éste método se introduce una perturbación en el lazo cerrado, se observa el tipo de respuesta, y la respuesta real se la compara con la que personalmente se desea. La experiencia y el conocimiento del proceso permiten al ingeniero de control, el ajuste correspondiente de los parámetros de control.

La respuesta que se debe reconocer es la del error contra el tiempo. Las características distintivas son la ausencia o la presencia de picos, el tiempo entre picos y el error en estado estacionario. La información se representa usando términos familiares como: sobreimpulso, relación de amortiguamiento y a periodo de oscilación. (ver figura 1).

El método de reconocimiento de la respuesta del proceso como técnica de autosintonía es único y exclusivo. Para determinar la acción requerida, el controlador usa directamente la realimentación negativa del comportamiento del proceso (img

nitoreando la variable del proceso) y no se necesita un modelo matemático del proceso. Cuando el método se usa en un controlador PID ajustable, se convierte en un sistema experto, basado en las reglas de sintonía que usualmente usan los ingenieros con experiencia en control.

El algoritmo PID EXACT monitorea la recuperación del lazo cerrado luego de una perturbación (en el valor deseado o en la carga) y automáticamente calcula los términos P, I y D, para minimizar el tiempo de recuperación sujeto a las condiciones de amortiguación y sobreimpulso especificados por el usuario.

Para la mayoría de los procesos, la amortiguación y el sobreimpulso no son independientes, y se debe incluir el periodo de oscilación del lazo para definir inequívocamente la forma de respuesta. Los cocientes I/periodo y D/periodo definen el ángulo de desfase (adelanto, atraso) del controlador. El resultado es que se obtienen valores únicos de P, I y D basándose en el periodo de oscilación, y en los valores prefijados de amortiguación y sobreimpulso.

#### 4.2 INICIACION Y OPERACION

Típicamente el valor deseado y la medición están cerca-



nos, el algoritmo está en el estado de reposo, significando que no hay información disponible del proceso (fig 1a).

El proceso de autosintonía comienza solamente cuando el error excede un umbral mínimo de ruido, si esto ocurre el algoritmo se despierta. Los ajustes PID permanecen fijos, pero el algoritmo comienza a revisar la magnitud del error con anticipación al valor extremo del pico, o sea está en un estado de búsqueda del primer pico. Cuando esto ocurre, el algoritmo almacena la magnitud y activa un temporizador para registrar el periodo (entre picos).

Antes de buscar el segundo pico, el algoritmo entra en el estado de verificación, para comprobar que el primero es un pico verdadero. Si un nuevo valor extremo ocurre durante esta verificación, se le interpreta como si fuera el primer pico y el temporizador se reinicializa.

Una vez que el pico 1 ocurre y se verifica, el algoritmo usa el mismo método para localizar y verificar los picos 2 y 3. La información del pico se expresa entonces en los términos previamente definidos de sobrepico, amortiguación, I/periodo y D/periodo. A esta información se le asigna un cierto grado de validez basándose en las alturas de los picos relativas a la banda nominal de ruido y el tiempo de aparición de los picos, comparandolos con los tiempos de una sinusoides nominal amortiguada.

Dado que es muy común encontrar una curva de respuesta sobreamortiguada sin los tres picos mencionados, el algoritmo debe hacer frente a esta situación. El caso sobreamortiguado se maneja reconociendo la respuesta como sobreamortiguada, y suspendiendo la búsqueda de los picos 2 y 3, asignando un cambio "pseudo" valores de picos. Los "pseudopicos" permiten que los nuevos parámetros de ajuste se calculen usando el mismo procedimiento que sería usado si se hubieran realmente encontrado los tres picos.

Hasta este punto, el controlador EXACT está operando como un controlador PID de parámetros fijos, pero que ha observado la respuesta del lazo frente a una perturbación. El algoritmo usa la información de la respuesta para computar los nuevos valores de P, I y D. Este estado de adaptación contiene muchas reglas basadas en el conocimiento y que fueron diseñadas basándose en observaciones de expertos en ajustes con muchos años de experiencia. Las reglas fundamentales se seleccionaron cuidadosamente y se comprobaron para asegurar una aplicabilidad generalizada. Estas reglas le permiten al controlador usar los datos asimilados y estimar los nuevos parámetros de ajuste, de forma similar a como lo haría un ingeniero con experiencia en control. Cuando el lazo está apropiadamente sintonizado, los parámetros de control se vuelven a computar cuando aparece la siguiente perturbación en el sistema, pero permanecen fijos entre perturbación y perturbación. Sin embargo, si la perturbación cambia de forma, o si

el proceso cambia, el controlador se vuelve a autosintonizar.

El primer paso para computar los nuevos parámetros  $P$ ,  $I$  y  $D$ , es usar la información del periodo para determinar directamente  $I$  y  $D$ . La interacción entre  $P$ ,  $I$  y  $D$  fuerza al algoritmo a ser un poco más sofisticado:  $P$  se debe ajustar para compensar por los cambios de  $I$  y  $D$ .

Los primeros ajustes de  $I$  y  $D$  son hasta que  $I/\text{periodo}$  iguale a 0.5 y  $D/\text{periodo}$  iguale a 0.12. Se encontró que resulta un mejor ajuste y una mejor convergencia cuando los cocientes referidos se cambian por medio del algoritmo. Un proceso con un tiempo muerto dominante necesita valores menores de esos cocientes, y un proceso con retardo capacitivo dominante usa valores más altos. Si la respuesta es sobreamortiguada, y no se pueden encontrar picos netos,  $I$  y  $D$  se deben ajustar usando el amortiguamiento y el sobreimpulso.

El paso final al computar  $P$ ,  $I$  y  $D$  es comparar que el amortiguamiento y el sobreimpulso son menores que los valores máximos permitidos por el usuario, si ocurrieron picos definidos y ambos amortiguación y sobreimpulso son menores que en valores máximos permitidos, entonces disminuye  $P$ . La disminución depende, de la diferencia entre el amortiguamiento máximo y el real o de la diferencia entre el máximo sobreimpulso y el real. Dado que el amortiguamiento y el sobreimpulso no son independientes, el algoritmo usa la diferencia que tiene el

menor valor. Si no se detectan picos precisos, P, I y D disminuyen un porcentaje que depende de los valores máximos permitidos de amortiguamiento y sobreimpulso.

El ciclo de autosintonía se completa cuando los últimos valores de P, I y D calculados se usan para control. El algoritmo va a un estado de asentamiento que permite una transición suave en encontrar un nuevo primer pico, si es necesario.

#### 4.3 PARAMETROS REQUERIDOS

Los parámetros requeridos se pueden obtener e ingresar de dos formas: pueden ser alimentadas directamente por el usuario basándose en el conocimiento previo de los requerimientos del lazo, o calculados por el controlador con una propiedad llamada preajuste. Los parámetros requeridos son:

VALORES INICIALES DE P, I Y D (PF, IF, DF).- Los valores de éstos parámetros pueden conocerse por experiencia anterior del usuario con ese lazo particular o esa clase de lazos, o pueden no conocerse por completo. El controlador rápidamente va a modificar los valores iniciales que no sean razonables. Estos valores son los que se usan si el controlador opera como un controlador PID de parámetros estáticos.

**BANDA DE RUIDO (NB).**— Virtualmente toda medición de proceso tiende a ser ruidosa debido a la naturaleza intrínseca de la tecnología de medición (ej. una medición de presión diferencial como medida de caudal), o la ubicación del sensor (ej. proximidad con una bomba de desplazamiento positivo).

Se llama ruido porque contiene información que no es útil para el ajuste del lazo. El algoritmo debe conocer la magnitud de ese parámetro (porcentaje pico a pico) para evitar que se trate de extraer información de sintonía cuando no haya nada en juego. El algoritmo comienza el autoajuste cuando el error excede dos veces la banda de ruido. La banda de ruido se usa también para decidir si un pico es o no es ruido.

**MAXIMO TIEMPO DE ESPERA (WMAX).**— El algoritmo EXACT necesita una estimación aproximada de la escala de tiempo del proceso. Este parámetro representa el máximo tiempo que el algoritmo espera para la aparición del segundo pico. Usualmente, esto es fácil de definir porque por medición u observación se puede tener una idea razonable de la constante de tiempo dominante del proceso. Normalmente se debe usar un tiempo mayor que la mitad del periodo máximo y menor que ocho veces el periodo mínimo. (FIG 2)

#### 4.4 PARAMETROS OPCIONALES

Los parámetros que pueden definirse a discreción del usuario son los siguientes:

MAXIMA AMORTIGUACION (DMP) Y MAXIMO SOBREPICO (OVR) PERMITIDOS.- Dado que ni la amortiguación ni el sobrepico pueden ser definidos independientemente, ellos representan los máximos valores permisibles. El controlador usa el límite que está más próximo a ser excedido. Generalmente, se obtiene un mejor control usando el límite de amortiguación.

FACTOR DERIVATIVO (DFCT).- El factor derivativo permite que la influencia derivativa sea reducida multiplicando el tiempo derivativo D por el factor derivativo. El término derivativo no es útil en presencia de procesos de gran tiempo muerto o con medición altamente ruidosa. Por lo tanto, poniendo esta variable con 0.0 el controlador se transforma en PI solamente.

LIMITE DE CAMBIO (CLM).- Algunos usuarios querran tener la posibilidad de limitar la acción adaptiva del controlador dentro de cierto rango expresamente como una fracción y múltiplo de los valores iniciales P, I y D. Por ejemplo, si el valor inicial de P es 100 y CLM es 4, entonces el algoritmo autoajustable durante la ejecución de la autosintonía no es-

tablecerá valores de  $P$  menores de 25 y mayores de 400.

#### 4.5 IMPLEMENTACION DE LA OPCION PREAJUSTE

La opción preajuste permite a un usuario sin experiencia, estimar los parámetros que el controlador requiere, cuando el proceso está en estado estacionario y puede seleccionarse cuando el controlador está en manual. Antes de iniciar esta acción, el usuario debe especificar el tamaño del salto escalón en la salida del controlador (positiva o negativa) que causa que la medición responda con la característica curva de reacción del proceso.

Una curva de reacción de proceso típica, identifica el tiempo muerto efectivo del proceso y sensibilidad del proceso (velocidad de reacción). La estimación del tiempo muerto se usa para determinar el tiempo integral, el tiempo derivativo y el máximo tiempo de espera. (fig 3a)

La banda proporcional se calcula basándose en la sensibilidad de la curva de reacción del proceso y en el tiempo muerto. La banda nominal de ruido se determina por observación de la medición y estimando la amplitud pico a pico que es de mayor frecuencia que la que el lazo cerrado puede eliminar. Si el contenido de ruido es alto, el factor derivativo

se reduce dado que la acción derivativa no es efectiva en un proceso altamente ruidoso.

Hay cuatro fases principales en el preajuste:

FASE 1.- El proceso es perturbado por un salto escalón en la salida del controlador.

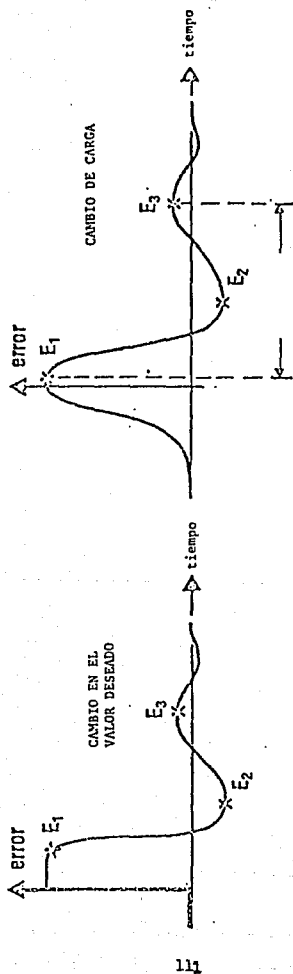
FASE 2.- El controlador espera el nuevo estado estacionario.

FASE 3.- Se calculan los parámetros de control, y se retorna la salida del controlador a su valor inicial.

FASE 4.- Se calculan la banda de ruido y el factor derivativo.

Si el proceso es de característica integral o tiene ganancia alta, la Fase 3 se alcanza cuando la medición cambia un 10 por ciento de su rango o del tamaño del salto (cualquiera sea mayor). (FIG 3b)





$$\text{SOBREFICO} = -\frac{E_2}{E_1}$$

$$\text{AMORTIGUAMIENTO} = \frac{E_3 - E_2}{E_1 - E_2}$$

FIG. 1

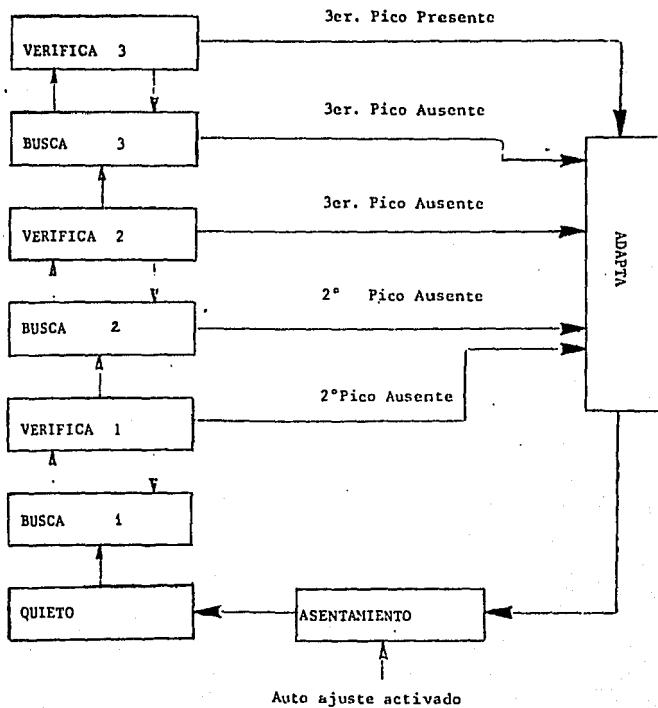


Figura 1a DIAGRAMA DE ESTADOS - ALGORITMO EXACT

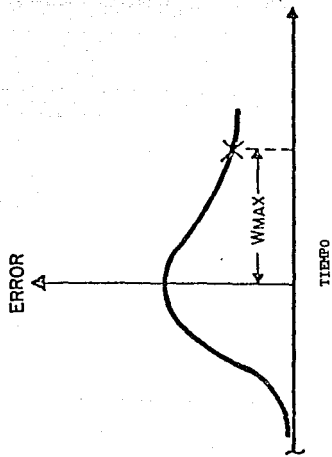


FIG. 2

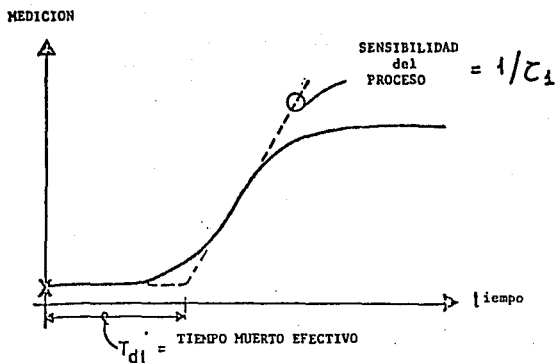


FIG. 3 a

CURVA DE REACCION DE UN PROCESO TIPICO FRENTE A UN SALTO ESCALON EN LA SALIDA DEL CONTROLADOR

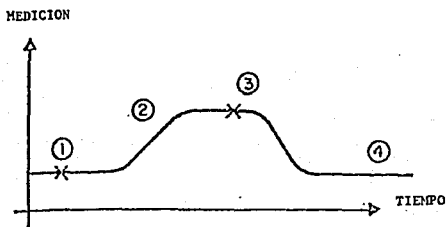


FIG. 3 b

## CONCLUSIONES

El objetivo que trata de obtener éste trabajo es el de conocer con más detalle la instrumentación y control en todas sus etapas, y saber de la importancia que éste tiene para el desarrollo de cualquier proceso, ya que con ésta ayuda se pueden tener mejores logros a nivel empresa y país.

Es lógico que con éste trabajo no vamos a poder estabilizar un lazo de control, porque para esto se requiere de la experiencia y conocimiento del proceso, pero si vamos a entender el significado que tiene un instrumento en una planta.

Esta experiencia y conocimiento del proceso que tiene el operador de una planta, se implementó dentro de un controlador como una herramienta más para la mejora de su trabajo, la herramienta referida tiene el nombre de EXACT, con el cual se puede hacer un ajuste fino de los modos de control que intervienen en la configuración del controlador y así responder a cualquier disturbio en el proceso de una manera más efectiva.

Como se menciona en los capítulos anteriores el algoritmo EXACT es un PID ajustable, ya que el PID controla un proceso pero sin hacer modificaciones a sus parámetros por sí mismo. Parte muy importante para que un controlador con EXACT trabaje bien es el factor humano, ya que el operador al configurar el instrumento le transmi-

ta sus experiencias y conocimientos, pero no por esto va a dejar el trabajo, por el contrario, tendrá más tiempo para supervisar toda la planta y no solamente un lazo de control.

Este tema es muy importante en la industria, ya que al tener automatizada una planta, el producto terminado tendrá una mejor calidad, con la cual se puede competir internacionalmente con cualquier empresa y en cualquier mercado. Así mismo, al tener automatizada una planta, aumentará la eficiencia de la misma y se podrán bajar los costos de producción, ya que solamente se usaran los materiales necesarios.

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

Miller, R.W. Flow Measurement Engineering Handbook.

Printed in USA, Ed. McGraw Hill Book Company, 1983.

Anderson, A. Norman. Instrument for Process Measurement and Control. 3rd. Edition, Printed in Radnor, Pennsylvania,

Ed. Chilton Company.

Considine, Douglas. Process Instrument and Control Handbook.

2nd Edition, Ed. McGraw Hill Book Company, 1974

Creus, Antonio. Instrumentación Industrial. 3a. Edición,

Ed. Publicaciones Morcombo, S.A., 1981

Bulletin 104 C. El Controlador Autoajustable. Printed in

Foxboro Mass, USA, Foxboro Company.

Bulletin. 89. Medición de pH. Printed in Foxboro Mass,

USA, Foxboro Company.