

**LIBRO DE TEORIA**  
**DESARROLLO DE EXPERIENCIAS CON EL MODULO FEEDBACK 38-100 PARA**  
**CONTROL DE NIVEL Y FLUJO**

**HECTOR SAUL PEDRAZA MARTÍNEZ**

**LUIS DARIO CARREÑO ARIAS**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA**  
**BUCARAMANGA**

**2009**

**LIBRO DE TEORIA**  
**DESARROLLO DE EXPERIENCIAS CON EL MODULO FEEDBACK 38-100 PARA**  
**CONTROL DE NIVEL Y FLUJO**

**HECTOR SAUL PEDRAZA MARTÍNEZ**

**LUIS DARIO CARREÑO ARIAS**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

**ING. MSC EDGAR BARRIOS URUEÑA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA**  
**BUCARAMANGA**

**2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios nuestro señor por siempre estar con nosotros y brindarnos esta gran oportunidad.

A nuestros Padres que siempre fueron un apoyo incondicional en el transcurso de este proyecto

A nuestros hermanos por acompañarnos y ser nuestra mano derecha en todo este recorrido

A la universidad por darnos la oportunidad de convertirnos en profesionales

Al Ing Edgar Barrios por aportarnos sus conocimientos y experiencia para el correcto desarrollo de este proyecto.

## **DEDICATORIA**

A mis padres por siempre estar conmigo y apoyarme en todo este proyecto.

A mi Dios y la Virgen Maria por darme esta gran oportunidad y una gran familia que siempre me apoyó.

A mi hermana por ser mi amiga incondicional.

A mi novia por acompañarme y soportar todo este duro proceso.

A mis Tios que en paz descansen por ser mis angeles de la guarda.

A mi sobrinita linda que gracias a Dios la puso en nuestro camino....te amo Valepipa.

Y a todos mis amigos que me acompañaron durante toda la carrera.....

*Luis Dario Carreño Arias*

## **DEDICATORIA**

A mi hermano Juan David por ser mi mano derecha, mi amigo y confidente en todas las mis cosas, por apoyarme en cada nueva etapa que quise emprender en la vida.

Ami madre por estar siempre y apoyarme a pesar de mis equivocaciones, por su apoyo incondicional.

A mi padre que gracias a su apoyo y consejos logro culminar esta etapa de mi vida.

*Héctor Saúl Pedraza Martínez*

**CONTROL DE PROCESOS**  
**“DISCOVERY SOFTWARE”**  
**INDICE DE TAREAS**

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. FAMILIARIZACIÓN CON EL MODULO DE NIVEL Y FLUJO**
- 3. CALIBRACIÓN DEL MODULO DE NIVEL Y FLUJO**
- 4. FAMILIARIZACIÓN CON LA INTERFAZ DE TRABAJO**
- 5. CALIBRACION DE LA INTERFAZ DE TRABAJO**
- 6. FAMILIARIZACION CON EL CONTROLADOR**
- 7. CALIBRACION DEL CONTROLADOR**
- 8. TRANSMISOR DE NIVEL POR FLOTACIÓN**
- 9. TRANSMISOR DEL MEDIDOR POR FLUJO DE PULSOS**
- 10. CONTROL DE NIVEL DE TIPO ON/OFF**
- 11. CONTROL PROPORCIONAL: NIVEL**
- 12. CONTROL PROPORCIONAL: FLUJO**
- 13. CONTROL DE NIVEL PI Y PID**
- 14. CONTROL DE FLUJO PI Y PID**
- 15. SINTONIZACION DEL CONTROLADOR PID**
- 16. CONTROLADOR DE PROCESO: AVANZADO**

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** REVISION Y ESTRUCTURACION GENERAL DEL PROGRAMA DE EXPERIENCIAS CON EL MODULO FEEDBACK 38-100 PARA CONTROL DE NIVEL Y FLUJO

**AUTOR(ES):** Luis Dario Carreño Arias  
Héctor Saúl Pedraza Martínez

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** Ing Edgar Barrios Urueña

### RESUMEN

La finalidad principal del proyecto fue revisar, estructurar y elaborar un conjunto de experiencias en sistemas de control de nivel y flujo basadas en el módulo 38-100 de la feedback, bajo el soporte del software Discovery. Así mismo el de generar un documento guía que para las prácticas de laboratorio que sirviese de soporte para la mejor comprensión y relación por parte de los estudiantes del desarrollo de las practicas y el fundamento teórico que se pretende lograr con el desarrollo de las mismas. Para esto se trabajo con el software Discovery que es la herramienta utilizada en el laboratorio para cubrir las practicas del modulo de nivel y flujo; éste software está constituido por dos secciones principales; una de ellas de componente netamente teórico que trata los conceptos de control y fundamentos científicos que sustentan el propósito de cada una de las practicas para el control de un proceso de tipo industrial; esta sección no es indispensable para el desarrollo de las experiencias de laboratorio pero es muy importante en el ambiente académico ya que se deben conocer claramente los conceptos teóricos que explican una determinada acción de control a fin de identificar la relación causa efecto sobre un determinado dispositivo de control; además se tiene una segunda sección que constituye el desarrollo de la practica en si misma; ésta sección contiene, para el desarrollo de cada una de las experiencias, algunos elementos como son el background, el patching, practicals y questions.

**PALABRAS  
CLAVES:**

Software Discovery, Controlador, Sistema de control, PI,  
servoválvula, sensor



## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** REVISION Y ESTRUCTURACION GENERAL DEL PROGRAMA DE EXPERIENCIAS CON EL MODULO FEEDBACK 38-100 PARA CONTROL DE NIVEL Y FLUJO

**AUTOR(ES):** Luis Dario Carreño Arias  
Héctor Saúl Pedraza Martínez  
Héctor Saúl Pedraza Martínez

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** Ing Edgar Barrios Urueña

### RESUMEN

The project's main purpose was to review, structure and develop a set of experiences in control systems level and flow based on the feedback module 38-100, under the support of the Discovery software. Also to generate a guidance document that laboratory practices that would serve as a support for better understanding and respect by students of the development of practical and theoretical foundation which aims to achieve development. For this they were working with the Discovery software tool that is used in the lab to cover the practices of the module level and flow, this software consists of two main sections, one component that deals purely theoretical concepts of control and scientific foundations that underpin the purpose of each of the practices for the control of an industrial process, this section is not essential for the development of laboratory experiments but it is very important in the academic environment and that should be heard clearly theoretical concepts that explain the action of control in order to identify the cause and effect relationship on a given control device, also has a the second section which is the development of the practice itself, this section contains, for the development of individual experiences, some elements such as the background, the Patching, practicals and questions.

**PALABRAS** Software Discovery, Controller, Control System, PI,  
**CLAVES:** servovalve, sensor

## INTRODUCCION

**D**urante la realización de experiencias didácticas en el área de control automático es conveniente que el estudiante tenga una fundamentación teórica que le sirva para confirmar y validar sus conceptos y le facilite la manipulación y el trabajo con elementos, dispositivos e instrumentos para conseguir una vivencia cierta de los fenómenos y resultados esperados en el campo de los ensayos científicos y tecnológicos usando el modulo de nivel y flujo que hace parte de las herramientas con las que cuenta el laboratorio de sistemas y control el cual se encarga de darle a los estudiantes una visión general de los fundamentos teóricos y prácticos de cómo se operan algunos de los elementos que intervienen en un proceso de control de tipo industrial, tales como servoválvulas, sensores, adquisición de datos, linealización de señales, interfaces de usuario, el manejo practico y teórico del funcionamiento de todos estos instrumentos se hace necesario para el estudiante que cursa la asignatura de control, ya que estos van a ser finalmente algunos de los elementos con el que se tendrán que enfrentar en su ejercicio profesional, además de servir para que el estudiante pueda ver la aplicación de toda la teoría recibida en las aulas en un sistema de control de tipo real.

## **1. INTRODUCCION**

- **Teoría 1: Introducción a Procon**
- **Teoría 2: Sistemas de control**
- **Teoría 3: Modulo de nivel y flujo (BPR)**

### **TEORIA 1**

#### **INTRODUCCIÓN A PROCON**

El control del proceso es una parte de la ingeniería del control que tiene que ver con la operación de plantas en industrias tales como las petroquímicas, de alimentos, del acero, del papel, del vidrio y de la energía.

El sistema de series Procon 38 es un paquete completo que tiene que ver con todos los aspectos del control de procesos. Este introducirá equipo estándar industrial y cubrirá todos los aspectos del empleo de equipos (los relacionados con el uso general y específico del control de procesos). Cada parte del equipo es investigada individualmente, de tal forma que su utilización sea comprendida completamente y se valore su ubicación en el control del proceso.

Cuando todo el hardware ha sido cubierto, son explorados los distintos métodos del control moderno de proceso. Estos comienzan con lo mas básico, con el control on/off, y conducirán a una completa integral proporcional y a un control del circuito dual derivativo. Para cada tipo del control, una serie de experimentos prácticos demostrara sus ventajas y desventajas, y discutirá las situaciones que serian apropiadas y no apropiadas.

## TEORIA 2

### SISTEMAS DE CONTROL

El siguiente diagrama muestra un sistema general de control. Este diagrama puede ser aplicado a todas las situaciones del control.

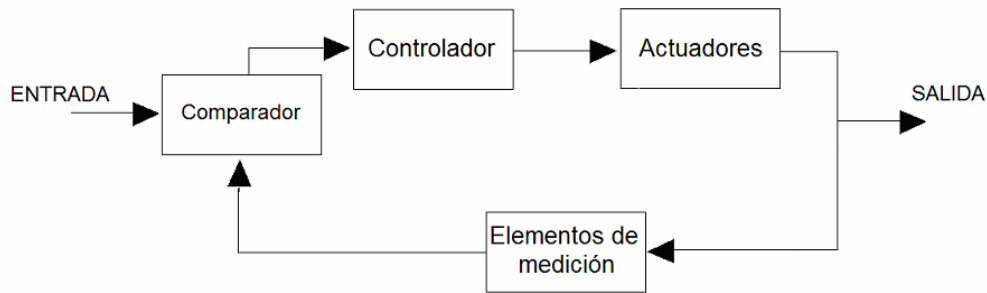


Figura 1.1

(Sistema de control)

A medida que las tareas prosiguen, esta configuración del control se aplicara una y otra vez a cada elemento asumiendo las distintas formas.

Por ejemplo, los aparatos de medición tendrán un rango según usted decida, si el proceso esta en operación, tal como debería ser para un sensor de flujo de pulsos y una configuración del transmisor que automáticamente mide la tasa del flujo de fluido.

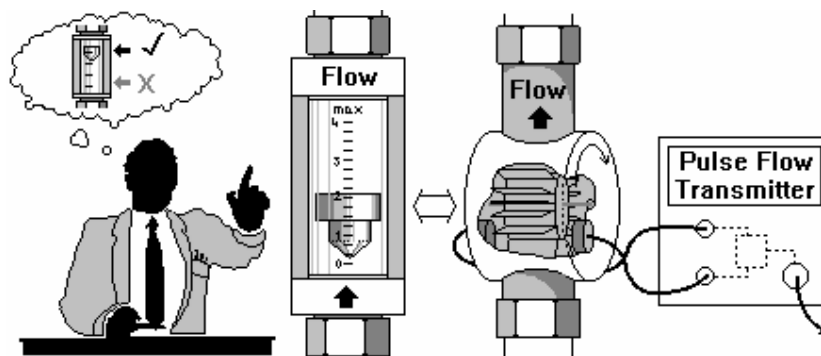


Figura 1.2

(Flujometro)

El controlador tendrá un nivel lógico simple que switchea el equipo o tendrá un indicador / controlador basado en un microprocesador universal con 300 algoritmos internos de control.

### **TEORIA 3**

#### **INTRODUCCION AL MODULO DEL PROCESO BASICO**

El modulo de proceso básico (BPR) primordialmente consiste de un circuito de agua de flujo con baja presión, el cual esta completamente auto contenido. Los siguientes componentes se ubican estratégicamente dentro de este circuito:

Tanque colector

Tanque dual del proceso del compartimiento

Bomba de circulación

Medidor visual del flujo de indicación

Válvula motorizada del puente del flujo

Tres válvulas solenoides

Cinco válvulas manuales

Los siguientes componentes son opciones adicionales para utilizarlas con el BPR. Este software DISCOVERY asume que estos aparatos están a disposición:

Sensor del nivel de flotamiento

Switch de flotamiento

Sensor del flujo de pulso

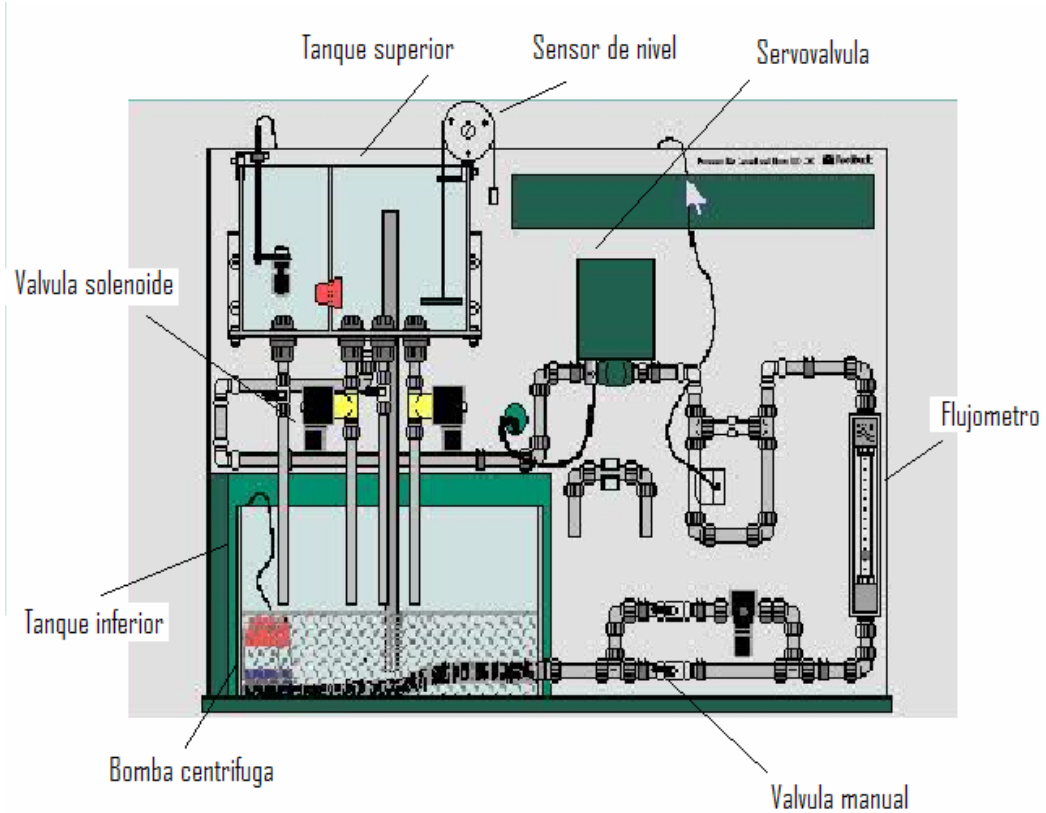


Figura 1.3  
(Modulo de nivel y flujo)

Las siguientes actividades contienen numerosas prácticas asociadas al BPR, las cuales mostrarán los conceptos del control del proceso desde la parte más básica hasta los escenarios de control más complejos.

## **2. FAMILIARIZACION CON EL MODULO DE NIVEL Y FLUJO**

- **Teoría 1 : Introducción al control de procesos**
- **Teoría 2: Control de procesos y Servo-sistemas**
- **Teoría 3: Clasificación de los instrumentos de control**
- **Teoría 4: Características de los instrumentos**

### **TEORIA 1**

#### **INTRODUCCION AL CONTROL DEL PROCESO**

El control del proceso no es una nueva disciplina. Un proceso es aquello que puede comprender desde llenar un balde de agua con una llave, hasta monitorear el rendimiento de un carro y determinar los parámetros de operación (combustible inyectado, mezcla del combustible, frenos, temperatura, aceite, etc) lo cual producirá un rendimiento optimo.

Aunque el último ejemplo es obviamente complejo y moderno, el primero es un problema muy simple pero todavía requiere de control. La llave debe ser abierta para llenar el balde y la tasa del flujo determinara el lapso de tiempo transcurrido. Cuando el balde este completamente lleno, la llave debe cerrarse. Aunque estos dos no serán considerados muy similares, ambos requieren de control para operar efectivamente.

El control del proceso a manera de ayuda a la industria se esta convirtiendo en una área cada vez mas importante debido a que determina el buen funcionamiento de una planta. Con el tipo correcto de control, una planta deberá operarse lo más eficiente y óptimamente posible.

El desarrollo inicial del control del proceso y otra disciplina, ósea los servo-sistemas, ocurrirán conjuntamente, y con muy poca interacción. Durante la segunda guerra mundial se hicieron los mayores avances en el campo de la ingeniería del control, pero la seguridad evitaba la publicación abierta y el debate sobre estos desarrollos.

Como resultados, la terminología utilizada por los ingenieros del control del proceso se diferenciaba en relación a la utilizada por los diseñadores de servo-sistemas, a pesar de que ambas disciplinas estaban buscando conjuntamente objetivos similares.



## TEORIA 2

### CONTROL DEL PROCESO Y SERVO-SISTEMAS

La diferencia básica entre un sistema de control de proceso y un servo-sistema es que generalmente el énfasis del control del proceso se manifiesta sobre el rendimiento del circuito a manera de un “regulador”, por ejemplo rechazo de la perturbación.

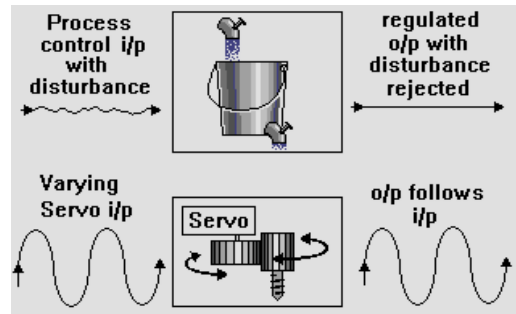


Figura 2.1

(Control de procesos y servo-sistemas)

Mientras que en los servo-sistemas se hace énfasis sobre que tanto el sistema de control puede seguir los cambios de la referencia o de la señal de entrada deseada.

Esto no significa que los sistemas del control del proceso nunca se sometan a cambios de los valores de referencia, o que los sistemas servo nunca reciban perturbaciones. Lo que es cierto, es que en un sistema típico de control de procesos, el valor de referencia no cambiara frecuentemente. Por ejemplo, la temperatura requerida de un producto particular puede ser constante durante días.

La terminología de la industria de procesos esta influenciada por el hecho de que las cantidades son con frecuencia tratadas no dimensionalmente, por ejemplo aparecen en una lista como cifras de porcentaje. Por ejemplo, una válvula puede estar abierta un 80%, un flujo tiene un 50% de máximo etc.

Esto simplifica la tarea de seguirle la pista a una gran diversidad de variables que tiene que ser controladas, y es posible esto, debido a que todo dentro de la planta esta limitado a permanecer dentro de ciertos límites.

El termino punto de fijación (Set Point) se utiliza para representar la entrada de referencia al sistema de control de proceso. La referencia representa un punto deseado constante de operación. El punto de fijación puede ser impuesto dándole un giro a un botón, tecleando un valor, o puede ser transmitido a un controlador mediante un computador u otro controlador.

El termino “valor medido” representa la salida del sistema de medición (transmisor, sensor, o transductor). El sistema de medición produce una señal la cual esta en función del valor presente de la variable de proceso físico que se esta controlando. La señal puede ser eléctrica, neumática o mecánica.

El punto de fijación se compara con el valor medido para producir la desviación, la cual simplemente es la diferencia entre las dos. El controlador luego utiliza esta desviación para hacer que el punto de fijación y el valor medido sean lo mas cercanos posibles.

Las consideraciones sobre la seguridad son siempre fundamentales en el control de proceso. Por tanto, deben incluirse sistemas de seguridad y monitoreo para manejar las situaciones de falla del equipo. Todos los fallos posibles deben tenerse en cuenta de tal forma que se logre evitar el fallo del sistema o si el fallo del sistema no puede evitarse, entonces que exista falla pero que esta suceda con seguridad.

### **TEORIA 3**

#### **CLASIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS**

Generalmente existen dos clases de instrumentos utilizados en un control del proceso:

Primera, los instrumentos para monitorear las variables de proceso tales como la temperatura o la presión, darán una indicación auditiva o visual de la magnitud de la cantidad física medida. Un ejemplo es el termómetro líquido de vidrio.

Segundo, los instrumentos denominados como transmisores de una ingeniería de control de proceso son los incorporados en un sistema de control automático. Estos son necesarios para suministrar información (transmitir) al controlador acerca del estado de la planta, y por ello su

salida debe tener una forma apropiada (eléctrica, hidráulica, neumática) para ser aceptada por el controlador.

El componente primario de ambos tipos de instrumentos de medición es un transductor o un sensor que convierte la cantidad física medida de una forma a otra.

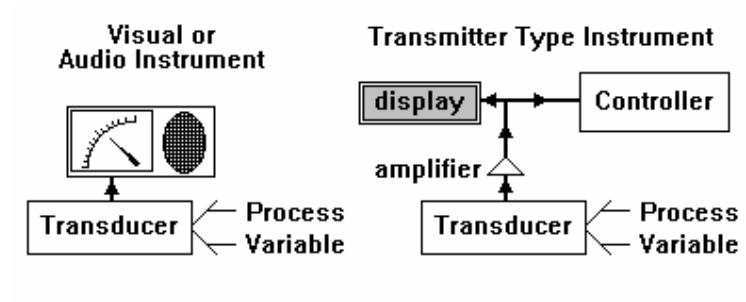


Figura 2.2

(Instrumentos de medición)

Otros componentes posibles dentro del instrumento son un amplificador y una exhibición de la salida.

**Otra clasificación existente es la de los instrumentos activos y pasivos.**

Si la salida del instrumento es producida completamente por la cantidad que se está midiendo, el instrumento es denominado pasivo. Un medidor de presión es un instrumento pasivo debido a que la presión del fluido es pasada a movimiento de una aguja frente a una escala sin ninguna fuente externa de energía.

El indicador del líquido del nivel del tanque es un instrumento activo debido a que el cambio en el nivel del líquido mueve un brazo del potenciómetro, en cuyo caso la señal de salida es parte del voltaje externo aplicado en los dos extremos del potenciómetro.

Puede obtenerse más control de la resolución de la medición de un instrumento activo debido a una fuente externa de energía. Sin embargo, un instrumento activo es más costoso que uno

pasivo. Por tanto, con frecuencia se requiere hacer un balance de los requisitos de la resolución de la medición en comparación al costo.

**Otra distinción son los instrumentos nulos vs. Los instrumentos de deflexión.**

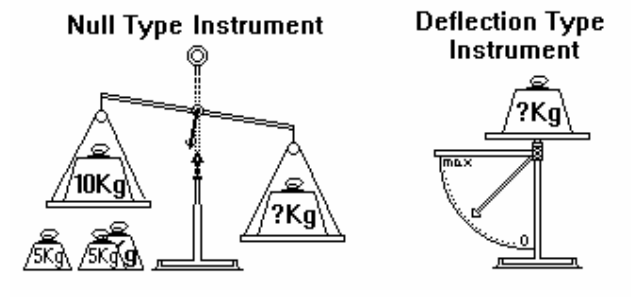


Figura 2.3

(Tipos de instrumentos de medición)

En un instrumento de tipo de deflexión muestra la cantidad que se esta midiendo en función del desplazamiento de una aguja.

Un medidor de presión de peso muerto es un ejemplo de un instrumento de tipo nulo. La presión que se esta midiendo desplaza un pistón, y los pesos se colocan en la parte superior del pistón hasta que este nuevamente alcanza la posición de 0. El valor de los pesos necesarios para alcanzar esta posición representa la medida de la presión.

Los instrumentos de tipo nulo son más exactos que los de deflexión debido a la exactitud de la calibración del primero de los mencionados. Sin embargo, los instrumentos de deflexión son generalmente más fáciles para el operario.

Una comparación final esta representada por los instrumentos análogos y digitales.

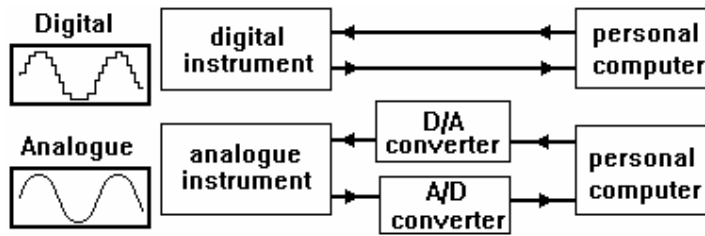


Figura 2.4

(Instrumentos de tipo análogo y digital)

Un instrumento análogo produce una señal de salida que es una función continua de la señal de entrada que se esta midiendo. Un ejemplo de un instrumento análogo es el medidor de presión del tipo deflexión.

Un instrumento digital produce sin embargo una salida que varia mediante pasos discretos. La ventaja de utilizar un instrumento digital es que este puede estar directamente conectado a un computador para que el control digital del proceso pueda realizarse. El aumento de la aplicación de los computadores digitales en un control automático de proceso aumenta enormemente la facilidad de conexión del computador.

Sin embargo por otra parte si se utiliza un instrumento análogo en un sistema de control digital, es necesario un convertidor análogo a digital para convertir la señal análoga de salida del instrumento a una forma digital, para el procesamiento por medio del computador. Esto produce sobre costos y tiempo extra. Obsérvese que el tiempo extra involucrado puede ser crítico en el control de los procesos rápidos, y como resultado puede disminuirse la exactitud.

## **TEORIA 4**

### **CARACTERISTICAS DE LOS INSTRUMENTOS**

El conocimiento de las distintas características de los instrumentos proporciona indicaciones sobre el posible grado de los errores de medición que pueden afectar el rendimiento de un sistema de control de proceso.

Las características de un instrumento pueden ser clasificadas como estáticas o dinámicas. Los ejemplos de las características estáticas de un instrumento son la exactitud, la tolerancia, la precisión, el rango, la desviación, la linealidad, la sensibilidad, la histéresis y la resolución.

La exactitud es una medida de la desviación de una lectura respecto al valor real, y usualmente es citada a manera de porcentaje de la lectura de la escala completa del instrumento.

La tolerancia describe la desviación máxima de un componente respecto a un valor especificado y puede utilizarse en vez de la exactitud.

La precisión describe el grado en que un instrumento está libre de errores aleatorios, estos son errores producto del ruido eléctrico, de los cambios ambientales etc. Un gran número de lecturas de la misma cantidad tomada por medio de un instrumento de alta precisión debe diferenciarse mínimamente.

Aquí, la distinción clara entre la precisión y la exactitud, debe enfatizarse para evitar la confusión. La alta precisión no implica nada acerca de la exactitud de la medición. Un instrumento de alta precisión puede tener baja exactitud. Las mediciones de baja exactitud de un instrumento de alta precisión normalmente son causadas por una compensación en el instrumento y pueden ser corregidas mediante la calibración.

El rango, o span, se definen como el rango de valores de una cantidad que tiene el instrumento para medir.

La desviación es un error constante que aparece en cada medición realizada por un instrumento y es causada por una compensación en el aparato. Este puede quitarse mediante calibración.

La linealidad describe un instrumento cuya lectura de salida es linealmente proporcional a la cantidad que se está midiendo durante un gran número de mediciones.

La no linealidad es el porcentaje máximo de desviación de cualquiera de las lecturas de la salida por medio de una línea recta que tiene la mejor fijación en todas las lecturas de la salida, mostradas gráficamente.

La sensibilidad de la medición se define como la proporción entre la deflexión del medidor y el cambio de la cantidad de la entrada del instrumento.

El efecto que los cambios ambientales (temperatura, presión, etc) tiene sobre los instrumentos está caracterizado por una “desviación de cero” y una “desviación de la sensibilidad “. La desviación de cero describe el cambio en la lectura cero de un instrumento, debido al cambio en las condiciones ambientales.

La variación de la sensibilidad específica cualquier cambio en la “sensibilidad de la medición” causada por un cambio en las condiciones del ambiente.

Con referencia a las cifras siguientes, pueden ilustrarse los siguientes parámetros de los instrumentos: espacio muerto, histéresis y umbral.

El espacio muerto puede observarse a continuación.

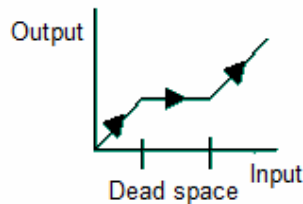


Figura 2.5  
(Espacio muerto)

El espacio muerto es el rango de los valores de entrada para los cuales no existe cambio de la salida. El espacio muerto también algunas veces se denomina banda muerta.

La curva de la histéresis se muestra a continuación:

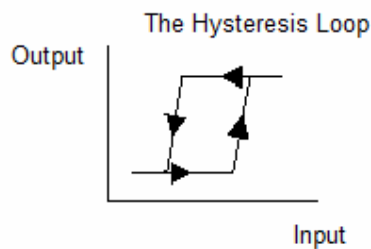


Figura 2.6

(Curva de histéresis)

Esta consiste de dos curvas que tienen forma idéntica. Las flechas hacia arriba y hacia abajo describen la forma en que la lectura de la salida varía, a medida que aumenta y disminuye la cantidad de la entrada al instrumento, respectivamente. Podemos observar que el instrumento tiene diferentes características de salida para los cambios de bajo a alto y de alto a bajo. La histéresis es la no coincidencia entre estas dos curvas.

A continuación se muestra el umbral.

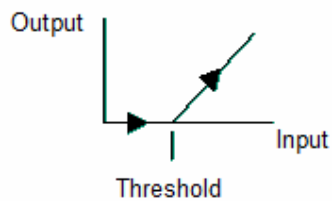


Figura 2.7

(Curva de umbral)



El umbral es el valor mínimo de entrada en el cual la salida comienza a cambiar. Si la entrada es menor que este valor de umbral, no habrá cambio correspondiente de la salida respecto al cambio de la entrada.

Otra característica importante de un instrumento es su resolución de medición, la cual es el cambio mínimo de la cantidad medida de la entrada, que producirá un cambio observable en la salida del instrumento. La resolución depende de la subdivisión de la escala de la salida.

Mientras que las características estáticas de un instrumento están referidas solamente a la lectura del estado estable que alcanza el instrumento, las características dinámicas describen la respuesta transitoria del instrumento, por ejemplo el tiempo de respuesta de salida respecto a una señal de entrada antes que la salida alcance el estado estable.

Los parámetros dinámicos son la constante del tiempo, la sensibilidad estática, la frecuencia natural no amortiguada, la proporción del amortiguamiento (damping) y el error de estado estable.

La proporción de amortiguamiento controla la forma de la respuesta de la salida. Surgen dificultades al escoger los valores apropiados para el factor de amortiguamiento debido a que la respuesta de la salida también depende del tipo de la señal de entrada aplicada al instrumento.

En la mayoría de los casos las cantidades físicas que requieren los instrumentos para hacer las mediciones, tienen la forma de rampas con amplitudes variables y por tanto debe alcanzarse un compromiso al escoger el factor de amortiguamiento para una variable particular de entrada.

Finalmente, se tendrán en cuenta los aspectos del costo, la durabilidad y el mantenimiento cuando se escoge un instrumento para una medición en particular.

### **3. CALIBRACION DEL MODULO DE NIVEL Y FLUJO**

- **Teoría 1: Calibración del instrumento**
- **Teoría 2: Errores de medición**
- **Teoría 3: Errores sistemáticos**
- **Teoría 4: Procesamiento de la señal de medición.**

#### **TEORIA 1**

##### **PROCESO DE CALIBRACION DEL INSTRUMENTO**

En cualquier sistema de control de procesos, se pueden realizar mediciones en las etapas intermedias y finales de la línea de producción para monitorear los parámetros de proceso relacionados con la calidad y para inspeccionar y probar el producto final.

Tales mediciones permiten que ciertos criterios de calidad sean conservados. Por tanto, debe garantizarse la exactitud de las mediciones por medio de la calibración apropiada y regular de los instrumentos utilizados.

Es necesaria la calibración regular debido a las características de cualquier cambio del instrumento (variación) respecto a un periodo de tiempo, debido al desgaste mecánico, envejecimiento de los componentes, cambios ambientales, suciedad y polvo, etc.

La calibración consiste en la comparación de la salida del instrumento de proceso que se está calibrando en relación a la salida de un instrumento estándar con exactitud conocida, cuando se aplica la misma entrada (cantidad medida) a ambos instrumentos. Durante la calibración, el instrumento de proceso es probado en relación a su rango total, repitiendo el procedimiento de comparación para un rango de entradas.

La calibración garantiza que la exactitud de la lectura de la salida en un instrumento calibrado tendrá cierto nivel aceptable cuando el instrumento se utiliza bajo condiciones ambientales (por ejemplo, temperatura, humedad, presión) presentes durante el proceso de calibración.

Además de estas condiciones, las características del instrumento de medición pueden cambiar, y por ello la exactitud del instrumento variará en mayor o menor proporción de acuerdo a su susceptibilidad a las entradas variables inherentes a las nuevas condiciones ambientales.

Sin embargo, en la mayoría de las situaciones de medición, usualmente es imposible controlar las condiciones ambientales para que estén en niveles especificados durante la calibración, y por tanto la corrección de la lectura de salida del instrumento de medición es necesaria.

Deben tomarse precauciones para preservar la exactitud del equipo que se utiliza para la calibración, manipulándolo cuidadosamente y utilizándolo solo para el proceso de calibración. También, el equipo de calibración con frecuencia se escoge de forma que tenga una mayor exactitud que los instrumentos de proceso.

El equipo de calibración debe formar parte de la cadena de calibración, en la cual este equipo se calibra en relación a estándares todavía más exactos.

Esta práctica debe realizarse de tal forma que la exactitud de todos los instrumentos de proceso, y el equipo estándar usado para calibrarlos, puedan ser seguidos según los estándares fundamentales propuestos y se conserven mediante una organización internacional (el laboratorio nacional físico del Reino Unido).

Cuando se calibra un instrumento de proceso frente a un instrumento estándar, se encontrara que su exactitud esta dentro o por fuera de lo requerido para la aplicación de los límites de la exactitud de la medición.

En el primer caso, los resultados de la calibración se registran en la hoja de registro de los instrumentos.

Sin embargo, si se encuentra que la exactitud del instrumento esta por fuera de los límites de medición aceptables, entonces sus características deben acomodarse mediante el giro de los tornillos de ajuste (de cero y de span) suministrados, hasta que las características del instrumento estén dentro de los límites de medición especificados.

Sin embargo, existen casos en los que no es posible el ajuste, o es insuficiente un posible ajuste para volver a llevar al instrumento a los límites de medición exactos. En tales casos, el instrumento debe ser reparado o descartado.

Debe tenerse en cuenta que todos los procedimientos de calibración y medición deben documentarse de tal forma que este siempre a disposición un registro de la historia de la calibración del instrumento.

Los procesos que involucran el flujo de los fluidos a través de conductos conectados y de vasos son ejemplos comunes de procesos industriales y con frecuencia se emplean para demostrar los diferentes métodos de operación.

Por tanto, cualquier cosa que se haya dicho antes se aplica al modulo de Proceso básico y a todo el equipo asociado.

Como resultado, antes de intentar todo experimento, debe realizarse una calibración apropiada de todos los instrumentos de medición.

## **TEORIA 2**

### **ERRORES DE MEDICION**

La medición es importante en el control de procesos. Esta puede afectar significativamente la calidad del producto final. En el caso de una estación de energía nuclear por ejemplo, esta puede también ser un aspecto fundamental de la seguridad.

Pro tanto, todos los parámetros de proceso deben medirse según estándares conocidos de exactitud.

El objetivo principal es reducir los errores en las lecturas de la salida del instrumento en lo máximo posible, y cuantificar el error restante, debido a que no siempre es posible, o por lo menos ser productivo según el costo invertido, quitar todos los errores de medición.

Cuando existen errores conocidos, puede realizarse un apropiado procesamiento de las señales de medición para mejorar la calidad de la información de la medición. Esto se describe en la siguiente sección de la teoría.

Para reducir los errores a un mínimo, las fuentes de error de medición deben tenerse en cuenta, lo cual es el propósito de esta sección de teoría.

**Existen dos tipos de error de medición, el aleatorio y el sistemático.**

Los errores aleatorios representan pequeñas diferencias de las lecturas de salida de un instrumento cuando se mide la misma cantidad varias veces. La magnitud y el signo del error es aleatorio, de tal forma que para un gran número de muestras, los errores positivos se equilibren aproximadamente con los errores negativos, y el error neto sea cero.

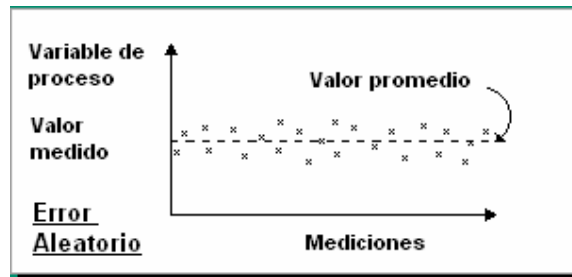


Figura 3.1

(Medición del error)

Un ejemplo típico de un posible error aleatorio existe cuando las mediciones se realizan por medio de la observación humana mediante la lectura de un medidor análogo. Otras fuentes de error aleatorio son el ruido eléctrico, los cambios ambientales (temperatura, presión), el polvo, la fricción, vibración, etc. Tal como se expresó antes, los errores aleatorios pueden ser evitados si se repite la misma medición un gran número de veces y se toma el promedio.

Sin embargo, esto únicamente será así, si los errores son realmente aleatorios.

Esto quiere decir, que en el caso de las lecturas del medidor análogo, realizadas por un humano, si el observador humano esta continuamente leyendo el medidor solamente de un lado, entonces el error inducido no es aleatorio sino sistemático, y al promediar cualquier numero de lecturas, no se eliminara éste.

Similarmente, los errores debido a las fluctuaciones de temperatura no serán aleatorios, si en vez de esto, las variaciones de la temperatura tanto positivas como negativas, en relación a un valor constante, existe un cambio neto en la temperatura durante el periodo de tiempo en el cual se toman las lecturas.

Los errores sistemáticos son errores en las lecturas de la salida de un instrumento de medición, los cuales no tienen la posibilidad de ser mostrados por medio de lecturas repetidas, por tanto causando mayores problemas.

Fuera de los errores aleatorios y sistemáticos, existen errores inherentes a cada instrumento, y se citan por parte del fabricante del instrumento como cifras exactas. Ejemplos de estos errores son el sesgamiento y la sensibilidad.

### **TEORIA 3**

#### **ERRORES SISTEMATICOS**

Las dos principales fuentes de errores sistemáticos son la perturbación del sistema debido a la medición y el efecto de las entradas variables. Otras fuentes de error sistemático incluyen la utilización de instrumentos sin calibrar o calibrados inadecuadamente, cableado problemático y la generación de los e.m.f.s. térmicos.

#### **Perturbación del sistema debido a la medición**

En casi toda situación de medición, el proceso de medición altera el sistema y afecta los valores de las cantidades físicas que se están midiendo.

A manera de ejemplo, consideremos el proceso de la medición de las presiones de las llantas en un carro mediante un medidor común de presión. La medición es realizada empujando un extremo del medidor de presión sobre la válvula de la llanta y leyendo la deflexión de la aguja en relación a una escala.

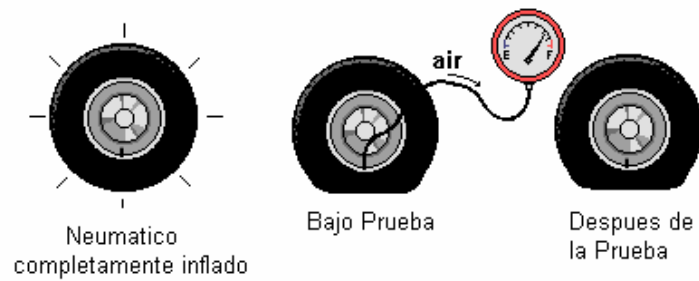


Figura 3.2

(Perturbaciones en la medición)

Durante este proceso una pequeña cantidad de aire fluye desde la llanta al medidor. Este aire no regresa a la llanta después de la medición y por lo tanto, la llanta ha sido perturbada, y la presión del aire que esta dentro de esta se ha reducir permanentemente.

Un ejemplo eléctrico es un voltímetro común que es aplicado al medir el voltaje a través de las terminales de un circuito. Este toma la corriente, por tanto cargando el circuito y corrompiendo todas las mediciones hasta cierto grado.

En todos los casos, se requiere un mejor diseño del instrumento (para compensar o para evitar la perturbación del sistema) el cual minimice esta clase de error. En el ejemplo anterior, un voltímetro con una impedancia muy alta extraerá una corriente que no se toma en cuenta, y el efecto será insignificante.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que con los instrumentos pasivos, la mejora de un parámetro del rendimiento deteriora a otro parámetro. Esta es la razón por la cual, son preferidos los instrumentos activos tales como los voltímetros generales, y la inclusión de una unidad de corriente mejora el rendimiento considerablemente.

## **Entradas modificantes**

Las características estáticas y dinámicas de los instrumentos de medición se definen en la primera sección de la teoría para las condiciones especificadas ambientales de trabajo. Estas condiciones deben reproducirse lo más semejantemente posibles durante los procedimientos de calibración, si se requieren instrumentos de medición que trabajen de acuerdo a las especificaciones.

Cualquier variación de las condiciones ambientales especificadas se describe como una entrada modificante o alteración al sistema de medición. Esto se debe a que el cambio ambiental en la salida del sistema, tiene el mismo efecto que tiene un cambio en la cantidad medida.

En cualquier situación de medición es impracticable o imposible controlar las condiciones ambientales que rodean un sistema de medición. Debido a que es muy difícil evitar las entradas modificantes, debido a que se restringe la susceptibilidad de los instrumentos de medición, o alternamente, el efecto de las entradas modificantes es cuantificado (en términos de variación de la sensibilidad y de variación del cero) y es corregido en la lectura de salida.

Los instrumentos apropiados, denominados transductores secundarios deben escogerse para medir los parámetros ambientales relevantes de tal forma que puedan efectuarse correcciones apropiadas para las mediciones obtenidas por medio de los instrumentos primarios de medición.

Es fundamental un cuidadoso diseño del instrumento para hacer que el instrumento sea insensible en la mayor medida posible a las entradas modificantes.

El método de oponer las entradas compensa el efecto de una entrada modificante en un sistema de medición, introduciendo una entrada igual y opuesta la cual anula cualquier modificación.

También se utiliza una retroalimentación alta de ganancia negativa para compensar el efecto de la perturbación en el sistema. El efecto de un ruido periódico es minimizado por medio de la filtración apropiada de la señal de salida.

El cableado de los instrumentos de medición hacia el equipo es otra fuente de error. Estos errores son provocados cuando se ignora la resistencia y el coeficiente de temperatura de las



puntas conectoras. La selección adecuada de los cables puede minimizar el ruido inducido y la interferencia. Con frecuencia, la conexión apropiada de los cables también ayudara a reducir el ruido.

Otra fuente de error de la medición es el e.m.f. térmico. Un voltaje e.m.f. térmico es generado a través de los extremos de una unión que conecta dos metales distintos debido a la diferencia de la temperatura en los dos metales. Por tanto, se presentaran errores en las mediciones del voltaje siempre y cuando los e.m.f. térmicos no sean tenidos en cuenta.

## **TEORIA 4**

### **PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL DE MEDICION**

En la mayoría de los casos no es posible ni representa una ventaja en relación al costo quitar todos los errores de medición. Las técnicas de procesamiento de las señales son utilizadas para mejorar la calidad de la señal en la salida del sistema de medición.

Operaciones tales como la amplificación, la atenuación, la linealización, la remoción del sesgamiento y la filtración son métodos comunes del procesamiento de las señales de medición. El procesamiento específico depende de la naturaleza de las señales sin analizar de salida provenientes de los transductores de medición.

Por ejemplo, la amplificación de la señal se realiza cuando el nivel de la salida de la señal de un transductor de medición es muy bajo. La linealización de la señal podría requerirse en casos en los que el transductor de la medición tenga una salida que represente una función no lineal para la cantidad de la entrada medida.

La filtración de la señal se utiliza para retirar una banda particular de frecuencias dentro de una señal. Por ejemplo, un filtro pasa bajo puede requerirse para retirar el componente de ruido con alta frecuencia en una señal.

El procesamiento de la señal puede ser análogo o digital. Sin embargo, cierto condicionamiento análogo de la señal es con frecuencia necesario antes del procesamiento a señal digital.

La escogencia entre un procesamiento de la señal análogo o digital principalmente esta determinado por el grado de exactitud requerido.

El procesamiento digital de la señal tiene un grado de exactitud mucho mayor en comparación al procesamiento análogo, pero el costo implicado en el equipo de procesamiento es bastante mayor y el tiempo de procesamiento es también mas largo, lo cual puede ser un factor critico cuando se controlan procesos rápidos.

En los casos en los que se mide una cantidad física por medio de un transductor inexacto es suficiente utilizar un procesamiento análogo.

Cuando se escoge el procesamiento digital de la señal, este se realizara por medio de un procesador digital implementado ya sea en el software o el hardware. Debido a que la señal de la salida de la mayoría de los transductores de medición tiene forma análoga, y debido a que un computador acepta solamente señales digitales, se requiere un convertidor análogo a digital (A/D) en la interfaz entre los transductores análogos y el computador digital.

#### **4. FAMILIARIZACION CON LA INTERFAZ DE TRABAJO**

- **Teoría 1: Interruptores automáticos**
- **Teoría 2: Lazos de corriente en el control de procesos**

##### **TEORIA 1**

##### **INTERRUPTORES AUTOMATICOS**

Un interruptor automático de circuito, el cual es parte de una unidad de suministro de corriente, es un aparato de protección que con frecuencia se utiliza en vez de un fusible. Una diferencia entre este y un fusible, es que el fusible se rompe permanentemente, mientras que el interruptor automático se cierra temporalmente y puede proporcionar una protección mas integral.

Otra diferencia es que la sección del interruptor automático realiza las funciones de switcheo y aislamiento, de protección contra las corrientes con sobrecarga y protección contra las corrientes de los cortos circuitos, mientras que los fusibles son elementos de seguridad eléctrica que protegen el equipo y los componentes solamente del daño causado por los circuitos sobrecargados.

Estas funciones de los interruptores automáticos son realizadas por medio de aparatos de protección térmicos y electromagnéticos. La sección de la detección de falla en la tierra energiza una bobina que se dispara cuando se presenta falla en la tierra, provocando que se abra el interruptor automático.

Los interruptores automáticos son producidos con varios tamaños y especificaciones dependiendo de la aplicación propuesta.

El interruptor automático protege el circuito contra las corrientes con sobre carga, desconectándose automáticamente del suministro. Sin embargo cuando únicamente se presenta una ligera sobre carga, la acción de la abertura del interruptor automático debe ser retardada.

Esto es para resguardarse contra los efectos de los voltajes y de los picos, los cuales pueden provocar un disparo innecesario del aparato, así como los efectos causados por la conexión del switch de un motor, la iluminación y los circuitos inductivos.

En contraste, las corrientes de corto circuito deben ser interrumpidas lo más rápidamente posible.

Para realizar la protección tanto de las corrientes con sobrecarga como las corrientes de corto circuito, el interruptor automático tiene una banda bimetalica y una unidad electromagnética. La banda bimetalica suministra las características del disparamiento térmico. Cuando se presenta una corriente sobre cargada la banda se calienta a una temperatura que depende del tamaño y de la duración de la corriente de sobre cargada.

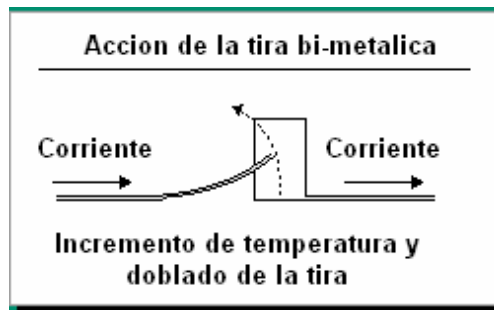


Figura 4.1

(Acción de la banda bimetalica)

Este calentamiento doblara la banda luego de un tiempo de que se desconecta el switch del aparato.

La sección electromagnética contiene una bobina y un pasador en movimiento. Cuando la corriente de corto circuito fluye por la bobina, se crea un campo magnético, el cual hace que el pasador sea atraído a la bobina.

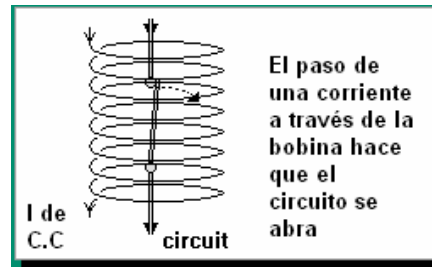


Figura 4.2

(Acción del campo magnético)

Este efecto es inmediato y el interruptor automático se disparara instantáneamente.

Otro aparato, también parte del interruptor automático protege contra las corrientes de falla en la tierra. La función principal del aparato es detectar cualquier diferencia entre las corrientes que fluyen entre las líneas vivas y neutras. Si se detecta una discrepancia, los contactos vivos y neutros se abren por medio de un aparato electromecánico.

El sistema de switcheo utilizado en el aparato es un sistema retirable que es clasificado como de seguridad para las fallas. Este sistema contiene un circuito magnético el cual se enlaza al núcleo de una bobina adyacente, cuando se ha detectado una falla en la tierra. Cuando no esta en operación, el sistema es conservado en pausa por medio de un magneto permanente que permite que el pin percusor (accionador) se mantenga en posición.

Si se presenta una falla en la tierra, esta es detectada por la sección electrónica del aparato. Luego se descarga un condensador y se le da un pulso a la bobina del sistema de disparo. Como resultado, la bobina se energiza, el núcleo de la bobina se convierte en parte del circuito magnético. En esta situación, el flujo magnético ya no existe en el pin accionador, el cual se libera descargando un resorte y por tanto suministrando la energía para operar el mecanismo de disparo.

El test del circuito incluye un botón blanco de prueba, marcado con una T, el cual cubre un resorte de contacto y una resistencia. La resistencia se conecta al voltaje de la fase y cuando se presiona el botón de prueba, se conecta también al conductor neutro situado por fuera del núcleo.

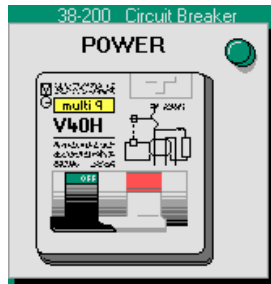


Figura 4.3

(Interruptor de encendido del PI)

Al presionar el botón de prueba, se simula la falla en la tierra y se dispara el interruptor automático.

## TEORIA 2

### CIRCUITOS DE CORRIENTE EN EL CONTROL DEL PROCESO

La señalización es necesaria en las instalaciones controladas:

Consideremos por ejemplo que un controlador está situado en un cuarto de control, y su transmisor y válvula de control están montados localmente a un tanque. Para que el controlador obtenga información del transmisor y también para que este esté en capacidad de afectar la posición de la válvula de control (por ejemplo, para alterar la tasa de flujo o el nivel en el tanque), es necesario que las unidades estén en capacidad de comunicarse entre sí.

La señalización puede realizarse neumáticamente (señalización con aire comprimido) o eléctricamente (señalización con corriente). Una gran ventaja que tiene la señalización es que las señales estándar pueden ser utilizadas, lo cual significa que los instrumentos pueden adquirirse provenientes de diferentes proveedores y sin embargo ser compatibles.

Las señales eléctricas en un sistema de control son usualmente señales DC (corriente directa), y puede dividirse en señales de corriente y de voltaje.

Las señales de corriente son utilizadas para señalar durante largas distancias, y el señalamiento del voltaje se utiliza para distancias cortas.

Actualmente, los computadores cada vez más se apropian de la instrumentación del cuarto de control y ha existido una baja correspondiente en la utilización de la señalización de voltaje.

La señalización de corriente se utiliza frecuentemente entre los transmisores, controladores y transductores de señal.

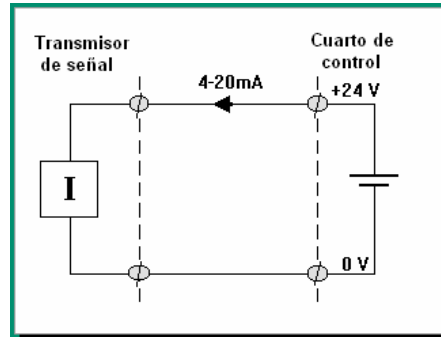


Figura 4.4  
(Circuito de control)

Esta figura muestra una configuración simple de señalización entre un cuarto de control y su transmisor.

Desde un punto de vista eléctrico, un transmisor puede ser considerado como un generador de corriente, el cual en nuestro caso es energizado por medio de la interfaz de proceso (PI), situado en un cuarto de control remoto. Esto significa que es el transmisor el que determina la corriente independientemente de la línea de resistencia.

Aplicando la ley de Ohm se puede calcular  $I_{max} = E/R$ , de donde E es el voltaje suministrado por PI (en el cuarto de control) y R es la resistencia de la línea.

Las señales de corriente estándar en la industria son de 4 – 20 mA y 0 – 20 mA.

Un transmisor para un circuito de señalización de 4 – 20 mA trabaja así:

El transmisor saca cerca de 3mA para su propio funcionamiento. El voltaje requerido en las terminales del transmisor usualmente es del orden de 12 a 15 V.

Este diagrama muestra una configuración típica del transmisor.

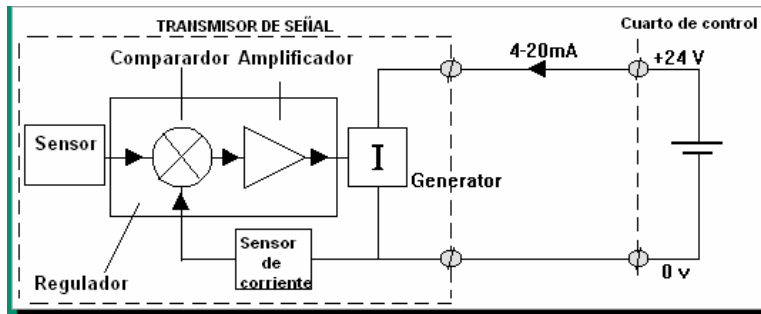


Figura 4.5

(Circuito de un transmisor de control)

El aparato sensor convierte una cantidad física (por ejemplo, nivel, tasa del flujo, presión, etc) a una señal de corriente. Esta es comparada por medio del sensor de corriente con la corriente que se esta produciendo, y la diferencia es amplificada y es utilizada para alterar la fijación del generador de corriente.

La señal de la corriente cambia en proporción a la señal del aparato sensor.

La señalización entre el transmisor y el número de instrumentos situados en el cuarto de control con frecuencia requiere de una conversión de la corriente a voltaje, que ocurre en los instrumentos por medio del paso de la corriente por sus resistencias.

Este instrumento múltiple de señalización se muestra a continuación.

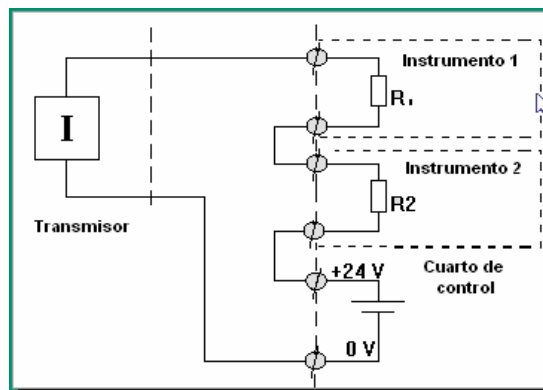


Figura 4.6

(Convertor de corriente a voltaje)



Los niveles del voltaje obtenidos son usados internamente dentro de los instrumentos los cuales están basados en una electrónica análoga.

Las señales del voltaje también se presentan en el equipo del computador donde las señales análogas son procesadas en primer lugar utilizando una conversión de corriente a voltaje y luego una conversión análoga a digital (A / D).

El rango más común de la señal es de 0 a 10 V pero 1–5 V y 2–10 V son también utilizados. La señalización de voltaje no es común entre los transmisores y controladores dentro de las industrias de procesos. Sin embargo existen excepciones, particularmente con los motores rotacionales de control de velocidad, donde la señal de salida del generador generalmente es un voltaje DC.

Las señales de corriente mas comúnmente utilizadas son 4 – 20 mA y 0 – 20 mA.

**Para la señalización que utiliza un circuito de 0 – 20 mA, tenemos las siguientes ventajas y desventajas.**

**Ventajas:**

Resolución de 20 mA

La señal de la corriente depende de la resistencia de cable, sin embargo,  $I_{max} = E / R$  todavía se aplica.

**Desventajas:**

El transmisor debe tener un suministro separado. A esto se le agrega el costo de instalación.

No es posible proporcionar un sistema transmisor totalmente a prueba de fallas.

Es difícil calibrar el cero.

**Similarmente, para la señalización utilizando un circuito de 4 – 20 mA.**

**Ventajas.**

Sistema de conexión de dos cables, por ejemplo pueden utilizarse la señalización y suministro de corriente en los mismos cables.

El punto cero de flotamiento 4mA significa:

Simplemente calibrar el punto cero debido a que la corriente mas baja puede reducirse por debajo del 0%.

Simplemente suministrar un sistema de seguridad de falla del transmisor.

La señal de la corriente es independiente de la resistencia de la línea, sin embargo  $I_{max} = E / R$  todavía se aplica.

### **Desventajas:**

Resolución de solamente 16 mA

Considerando los puntos anteriores el circuito de la corriente de 4 – 20 mA se utiliza en los experimentos que se efectuaran en este paquete.

## **5. CALIBRACION DE LA INTERFAZ DE PROCESO**

- **Teoría 1: Calibración de los instrumentos de proceso**
- **Teoría 2: Comparadores**
- **Teoría 3: Comparadores con retroalimentación positiva**

### **TEORIA 1**

#### **CALIBRACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE PROCESO**

En cualquier sistema de control de procesos, las mediciones en las etapas intermedias y finales de una línea de producción son realizadas con el fin de monitorear los procesos relacionados con la calidad y para inspeccionar y probar el producto final.

Esto se hace para permitir que se conserve la calidad del producto. Para esto, deben supervisarse las mediciones de la exactitud y corregirse si es necesario por medio de una calibración apropiada de los instrumentos utilizados.

Es necesaria la calibración regular debido a que las características de los instrumentos cambian (desviaciones) durante un periodo de tiempo, debido al desgaste mecánico, envejecimiento de los componentes, cambios ambientales, suciedad polvo y etc.

Cuando se calibra un instrumento, sus salidas se comparan con la de un instrumento estándar de exactitud conocida, cuando la misma entrada (cantidad medida) se aplica a ambos instrumentos (ver figura 5.1). Durante el proceso de calibración, los instrumentos de proceso se prueban en relación a su rango total, repitiendo el procedimiento de comparación para un rango de entradas.

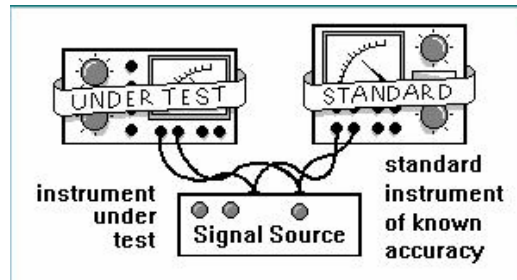


Figura 5.1

(Calibración de los instrumentos)

La calibración permite que la exactitud de un instrumento calibrado tenga cierto nivel aceptable cuando se utiliza bajo las condiciones ambientales presentes durante el proceso de calibración.

Por fuera de estas condiciones, las características del instrumento de medición cambian, y no se puede confiar en su exactitud.

Si embargo, en la mayoría de las situaciones usualmente es imposible o impráctico controlar las condiciones ambientales y la corrección de la lectura del instrumento de medición se hace necesaria.

El equipo calibrado debe formar parte de una cadena de calibración, en la cual cada eslabón de la cadena se calibra frente al otro, permitiendo la confiabilidad y la exactitud

Cuando un instrumento de proceso es calibrado frente a un instrumento estándar, se encontrará que su exactitud está dentro o fuera de lo requerido por los límites de la exactitud de la aplicación de la medición. En el primer caso mencionado, la calibración son los resultados que se registran en el formato de registro del instrumento.

Sin embargo, si se encuentra que la exactitud del instrumento esta por fuera de los límites de medición aceptables, sus características deben corregirse hasta que estén dentro de los límites de la medición especificada.

Si no es posible el ajuste, el instrumento debe ser reparado o retirado.

Los procesos que involucran el flujo de líquidos por tuberías conectadas y por vasos son ejemplos comunes de procesos industriales y con frecuencia se emplean para demostrar la operación de muchas clases distintas de procesos. En consecuencia, antes de intentar cualquier experimento debe utilizarse la calibración apropiada de todos los instrumentos.

## TEORIA 2

## COMPARADORES

Los circuitos comparadores son circuitos no lineales que están basados en amplificadores operacionales, y usualmente producen dos salidas discretas, cada una es dependiente del nivel de entrada.

Los comparadores son ampliamente empleados en aplicaciones que involucran la selección de un número finito de condiciones posibles de los circuitos. Los comparadores se utilizan como elementos claves de los sistemas de conversión A/D y D/A y también en las aplicaciones del oscilador y del generador de ondas.

Los circuitos en los cuales se presentan una o mas condiciones de operación con un nivel de saturación se denominan circuitos saturados. Los circuitos comparadores saturados son relativamente lentos al funcionar y por tanto tienen una aplicación limitada. Utilizando algunas técnicas, es posible establecer niveles de referencia por debajo de la saturación, y por ello el aumento significativo de la velocidad de switcheo. Tales circuitos son denominados circuitos no saturados.

Los comparadores pueden también clasificarse como invertidos o no invertidos, de acuerdo a lo siguiente: si la salida es “alta” cuando la entrada está por encima de cierto nivel mínimo de transición, el circuito se considera como no invertido

Contrariamente, si la salida es “baja” cuando la entrada esta por encima de cierto nivel limite de transición, el circuito se considera invertido.

### Comparadores de circuitos abiertos:

Los circuitos comparadores más simples, son aquellos que operan sin retroalimentación alguna. Tales comparadores se denominan comparadores de circuitos abiertos.

El comparador de circuito abierto más simple es el comparador saturado no invertido.

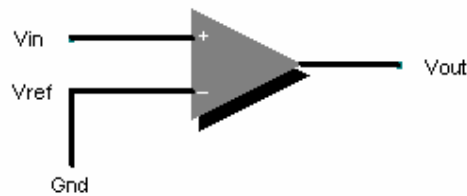


Figura 5.2

(Amplificador operacional)

La señal de entrada es aplicada a la entrada no invertida  $V_{in}$ , y la entrada invertida  $V_{ref}$  va a tierra si  $V_{in} > 0$ , el voltaje de entrada y el voltaje de salida diferenciales son positivos.

Debido a la gran ganancia típica del voltaje de los circuitos abiertos,  $A_d$  un voltaje positivo en el rango de micro voltios llevará a la salida a que tenga saturación positiva. Por ejemplo, si  $V_{sat}=13\text{ V}$  y  $A_d = 200.000$ , el voltaje positivo de hasta  $V_{in} = 65$  micro-voltios provocará que la salida se sature.

Si  $V_{in} < 0$ , el voltaje de entrada y de salida diferenciales son negativos.

Por tanto la operación del comparador saturado no invertido puede describirse por medio de las siguientes dos expresiones.

$$V_{out} = V_{sat} \quad \text{para } V_{in} > 0$$

Y

$$V_{out} = -V_{sat} \quad \text{para } V_{in} < 0$$

Un circuito comparador saturado no invertido se forma mandando a tierra la entrada no invertida y aplicando la señal a la entrada invertida.

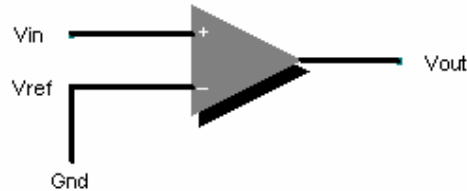


Figura 5.3

(Amplificador operacional)

En este caso la operación matemática puede expresarse.

$$V_{out} = V_{sat} \quad \text{para } V_{in} < 0$$

Y

$$V_{out} = -V_{sat} \quad \text{para } V_{in} > 0$$

Los dos circuitos comparadores abiertos considerados anteriormente tienen los puntos de transición en 0 voltios, establecidos por el nivel de voltaje de  $V_{ref}$ . Al aplicar un voltaje fijo DC a cualquiera de las entradas de op-amp (amplificador operacional), puede establecerse el nivel de transición con cierto nivel de voltaje arbitrario.

### TEORIA 3

#### COMPARADORES CON RETROALIMENTACIÓN POSITIVA

Los comparadores que emplean la retroalimentación positiva se conocen ampliamente como circuitos de Schmitt Trigger. La adición de la retroalimentación positiva produce un efecto que se denomina histéresis.

La histéresis, de acuerdo a lo presentado en tarea 2, teoría 4, es la no coincidencia de las curvas de transición de la salida cuando la entrada cambia de un estado alto a bajo y de un estado bajo a alto. La curva de respuesta a los cambios del estado de entrada es sensible a la dirección.

**Las ventajas del circuito de Schmitt son:**

La posibilidad de cambios de estado no aconsejables debido a que el recolector de ruido es minimizado al emplear la histéresis. El cambio en la entrada debe tener cierta magnitud antes de que se desencadene un cambio en el estado, con la magnitud controlada por el nivel de histéresis.

También el proceso de switcheo es enfatizado o exagerado por el efecto de histéresis y este efecto puede ser ventajoso en ciertos generadores de ondas.

Consideremos el siguiente circuito de Schmitt Trigger invertido.

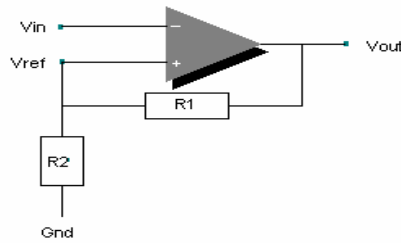


Figura 5.4

(Circuito amplificador invertido)

La red divisora comprende una resistencia R1 y una resistencia R2, también establece un voltaje en la Terminal de entrada no invertida proporcional al voltaje de salida. La magnitud del voltaje en la resistencia R2 es definido como el voltaje del umbral  $V_t$ .

Este voltaje es  $V_t = R2 \cdot V_{out} / (R1 + R2)$

Obsérvese que:

$V_{ref} = V_t$  cuando  $V_{out} = V_{sat}$

Y

$V_{ref} = -V_t$  cuando  $V_{out} = -V_{sat}$

Con referencia a la curva característica de entrada y salida mostrada, se asume inicialmente que el circuito está en un estado que corresponde a la posición A.

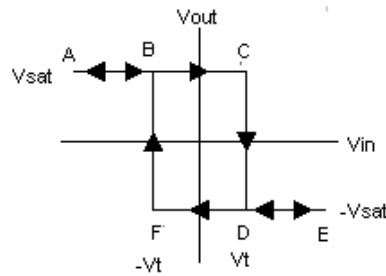


Figura 5.5

(Señal de salida del amplificador operacional)

$V_{out} = V_{sat}$ ,  $V_{ref} = V_t$ , y  $V_{in}$  es negativo

Debido a que  $V_{ref} = +V_t$ , el voltaje de entrada  $V_{in}$  debe exceder ligeramente  $V_t$  para forzar a que el voltaje de entrada diferencial del amp-op cambie de signo.  $V_{in}$  debe pasar por la línea AC.

Cuando  $V_{in}$  alcanza y excede ligeramente  $V_t$  (en el punto C), la salida del amp-op comienza a descender. El voltaje en la entrada no invertida, la cual es siempre una fracción constante del voltaje de salida, seguirá la salida. Esto aumenta el voltaje diferencial y acentúa el proceso de transición. La salida viaja por la línea CD.

La salida del amp-op ha cambiado ahora de  $+V_{sat}$  al  $-V_{sat}$  en un corto tiempo, limitado primordialmente por la tasa máxima de cambio (la tasa lenta). Cualquier aumento en  $V_{in}$  hace que la entrada se desplace por la línea de DE, pero la salida se conserva en  $-V_{sat}$ .

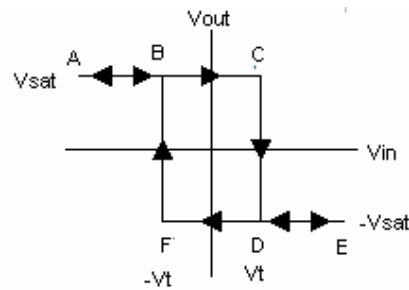


Figura 5.6

(Salida del amplificador operacional)

Mientras tanto  $V_{out} = -V_{sat}$ ,  $V_{ref} = -V_t$ . Para retornar al estado inicial,  $V_{in}$  debe disminuir en la línea EF hasta que sea menor a  $-V_t$ . Punto en el cual el switcheo se inicia nuevamente y la salida viajará por la línea FB hasta que  $V_{out} = +V_{sat}$ .

Observe como el nivel de switcheo es una función de la dirección de cambio. Escogiendo un valor apropiado de  $V_t$  los efectos del ruido en los puntos de transición pueden minimizarse. Sin embargo, si  $V_t$  es muy grande, la exactitud del punto sobre el cruce puede degradarse, y por tanto el umbral debe seleccionarse cuidadosamente.

El rectángulo en la curva característica de la entrada y salida se denomina un circuito de histéresis. Observe que es necesario marcar el circuito de histéresis con flechas para así identificar las direcciones apropiada que se aplica. Es difícil escribir una sola expresión matemática que describa el Schmitt Trigger, por tanto el circuito de la histéresis de entrada y salida es de gran utilidad en este caso.

Con el circuito de retroalimentación conectado a la entrada no invertida, la señal de entrada  $V_{in}$  siempre esta conectada a la entrada no invertida del Schmitt Trigger. Esto significa que un Schmitt Trigger es un aparato de inversión. Cuando su entrada se hace más positiva que  $V_t$ , la salida se cambia a baja (normalmente negativa). Cuando su entrada se convierte en mas negativa que  $-V_t$ , la salida cambia a alta (normalmente positiva). Esto siempre debe tenerse en cuenta cuando se utilizan estos aparatos.

## **6. FAMILIARIZACION CON EL CONTROLADOR**

- **Teoría 1: Sistemas de control**
- **Teoría 2: Sistemas de control automático**
- **Teoría 3: Tipos de control**
- **Teoría 4: control Feedforward/retroalimentación**
- **Teoría 5: control de retroalimentación on/off**

### **TEORIA 1**

#### **SISTEMAS DE CONTROL**

Un sistema de control consiste de un controlador y una planta. La planta es la maquina, el vehiculo o proceso que se controla. El controlador es el sistema que se requiere para producir resultados satisfactorios de la planta.



Un sistema de control manual es aquel donde el controlador es una persona. La alternativa a este sistema es un sistema de control automático, en el cual el controlador es un aparato, usualmente implementado electrónicamente, ya sea mediante circuitos análogos o mediante un computador digital (microprocesador).

Pueden también encontrarse en la industria controladores neumáticos e hidráulicos, estos son también sistemas de control automáticos.

La interfaz entre la planta y el controlador requiere de “actuadores” (elementos de control) para dar acción de control. Los actuadores comúnmente son eléctricos, neumáticos o hidráulicos, dependiendo de la aplicación y del nivel de fuerza requerido.

Además, son necesarios detectores, sensores (elementos de medición) e instrumentación para proporcionar información acerca del status de la planta con el controlador.

El diagrama de la figura 6.1 muestra los elementos básicos de un sistema de control. Puede observarse el flujo de información entre estos elementos.

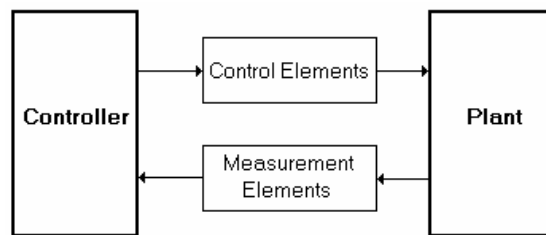


Figura 6.1

(Elementos básicos de un sistema de control)

La información que pasa entre el controlador y la planta está en forma de señales. Estas señales pueden ser muy diversas, por ejemplo eléctricas, neumáticas, mecánicas, etc.

El termino transmisor se utiliza para describir la acción del elemento de medición cuando este envía señales al controlador, lo cual representa los valores medidos del sistema.

Un sistema de control puede ser de circuito abierto o circuito cerrado.

Un sistema de control de circuito abierto usa un controlador o un actuador para obtener la respuesta deseada, sin incorporar retroalimentación. La relación entre la entrada y la salida del sistema es solamente la relación de causa y efecto de la salida del controlador y de la planta.

Contrariamente a un sistema de control de circuito abierto, el de circuito cerrado utiliza una medida adicional de la salida real. Esta luego se compara con la respuesta de salida deseada, ósea una señal de entrada de referencia. La medida de la salida se denomina señal de retroalimentación. Un sistema de control de retroalimentación con frecuencia utiliza una función prescrita entre la salida y la entrada de referencia para controlar el proceso. Con frecuencia, se amplifica la diferencia entre la salida del proceso que se esta controlando y la entrada de referencia, y se utiliza para controlar el proceso, de tal forma que la diferencia continuamente se reduce.

El concepto de retroalimentación existe en la vida diaria, por ejemplo, nosotros utilizamos una retroalimentación visual para caminar. La retroalimentación no solamente nos da verificación de

las acciones, si no que nos permite enfrentar un ambiente que esta cambiando, al acomodar nuestras acciones frente a eventos imprevistos y a condiciones cambiante.

La retroalimentación tiene ventajas similares cuando se aplica al control automático. La retroalimentación presenta un sistema de control automático, que es la capacidad de enfrentar perturbaciones no esperadas y cambios del comportamiento de la planta.

Un sistema de circuito cerrado controlado manualmente para regular el nivel de fluido en un tanque, utiliza retroalimentación negativa. La entrada es un nivel de referencia de fluido, y para el cual el operador recibe instrucciones de mantener. Esta referencia es memorizada por el operador. El operador observa el nivel de fluido que pasa por un puerto a un lado del tanque. El amplificador de potencia es el operador y el sensor es visual. El operador compara el nivel presente con el nivel deseado y abre o cierra la válvula (actuador) para ajustar el flujo, y así conservar el nivel deseado.

## **TEORIA 2**

### **SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO**

El control de un proceso industrial automatizado por intervención humana se denomina automatización.

En su empleo moderno, la automatización puede definirse como una tecnología que utiliza comandos programados para operar un proceso dado, en combinación con la retroalimentación de la información para determinar que los comandos hayan sido ejecutados apropiadamente. Esta clase de automatización es suministrada por el controlador de procesos digitales PID, COMMANDER 300.

Los sistemas modernos de control son autoorganizados, adaptativos, sólidos y capaces de aprender un proceso, pudiendo optimizar el control.

Con frecuencia se utiliza la automatización para procesos que fueron previamente operados por humanos. Cuando está automatizado el proceso puede operar sin asistencia o interferencia humana. De hecho, la mayoría de los sistemas automatizados están en capacidad de realizar sus funciones con mayor exactitud y precisión, y en menos tiempo que los procesos realizados por humanos.

Sin embargo, los procesos semiautomatizados (híbridos o por humanos – robots) que incorporan trabajadores humanos y robots (maquinas controladas por computador) así como los sistemas manualmente controlados, todavía existen, debido a que algunas tareas son realizadas mas eficazmente por humanos.

### **Los sistemas de control algunas veces se dividen en dos clases.**

Si el objeto del sistema de control es conservar la variable física en algún valor constante, con presencia de alteraciones, el sistema se denomina “regulador”.

Un ejemplo de sistema de control regulador es el sistema de control de la velocidad en los generadores AC de las compañías de energía. El propósito de este sistema de control es mantener la velocidad de los generadores con un valor constante que da como resultado que el voltaje generado tenga una frecuencia de 60 Hz en presencia de cargas eléctricas variables.

Otro ejemplo de un sistema de control regulador de procesos es el sistema biológico que conserva la temperatura del cuerpo humano aproximadamente en 36 grados centígrados en un ambiente que usualmente tiene una temperatura diferente.

La segunda clase de sistemas de control es el “servomecanismo” (algunas veces se denomina sistema de control cinético). Aunque ese termino se aplicó originalmente a un sistema que controlaba una posición mecánica o un movimiento, ahora se utiliza comúnmente para describir un sistema de control en el cual se requiere una variable física para seguir cierta función de tiempo deseada.

Un ejemplo de este tipo de sistema es el sistema de aterrizaje automático, en el cual un avión sigue una trayectoria de “rampa” de acuerdo al punto de contacto deseado.

Un segundo ejemplo es el sistema de control de un robot, en el cual el robot se programa para seguir cierta trayectoria deseada espacialmente.

## **TEORIA 3**

### **TIPOS DE CONTROL**

Pueden realizarse distintos tipos de control por medio del controlador de procesos 38 -300, dependiendo de los requisitos del proceso y de la salida deseada. Todos los tipos de control son cubiertos completamente en sus propias teorías, pero en esta teoría se presenta una introducción para cada uno de estos. Cada tipo se muestra aplicándolo a un nivel simple de problema de control, y al hacer esto se obtendrá comprensión acerca de los tipos de control disponibles.

Un tanque contiene el líquido para alimentar un proceso. El proceso que se está abasteciendo requiere de un nivel constante de líquido y por tanto se requiere un sistema de control para conservar constante el nivel del tanque. Se localiza una válvula en la entrada del tanque para variar el ritmo del flujo.

La figura 6.2 ilustra la situación

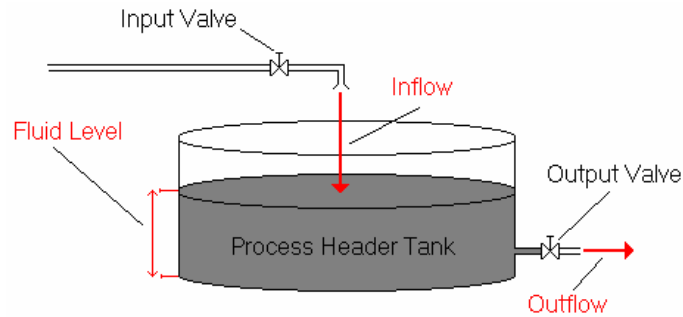


Figura 6.2

(Operación del circuito abierto)

La estrategia más simple es calibrar la válvula de entrada. Por medio de experimentación, puede obtenerse una relación entre el nivel del tanque y la posición de la perilla manual. Si el sobreflujo es constante, la posición de la perilla manual conserva el nivel constante, si la válvula se abre un poco más, entonces llega más agua al tanque en comparación a la que está saliendo y el nivel aumentará. Contrariamente, si la válvula se cierra un poco, de tal forma que salga más agua que la que entra, entonces bajará el nivel.

Ahora, si se requiere un nivel distinto la perilla manual puede cambiarse para que aumente o disminuya el flujo hasta que se alcance el nuevo nivel. Este método es de operación de circuito abierto; es simple y funciona completamente, dado que no existe cambio en el sobreflujo del líquido y todos los otros parámetros que afectan el nivel en el tanque permanecen constantes.

No existe un lazo de retroalimentación eléctrica o mecánica, por tanto el sistema es de circuito abierto, pero se suministra retroalimentación por medio del usuario. El usuario decide si el nivel presente está por encima o por debajo del nivel deseado, y ajusta el actuador según esto.

## TEORIA 4

### CONTROL FEED-FORWARD

La causa principal de las alteraciones que afectan el nivel de tanque comúnmente son los cambios de la tasa de sobre flujo del tanque. El aumento en el sobre-flujo hará que el nivel del tanque disminuya. Por tanto, un método más razonable es producir curvas de calibración para cierto número de ritmos de sobre-flujo.

Al hacer el monitoreo de la tasa de sobre-flujo, la posición correcta de la perilla manual puede determinarse examinando la curva de calibración para el nuevo flujo. La rueda manual es luego ajustada para conservar el tanque en un nivel requerido. Esta técnica es denominada control de realimentación, y requiere de la medición de la tasa de sobre-flujo para calcular el cambio en la posición de la válvula de entrada.

Aunque el control de realimentación es una mejora en relación a la operación del circuito abierto, este tiene desventajas que restringen su utilidad.

Una de estas desventajas son las curvas de calibración entre la posición de la rueda manual, el sobreflujo y el nivel. Estas deben ser exactas para que el proceso funcione correctamente. Otra desventaja es que el proceso puede variar con el transcurso del tiempo, o se pueden presentar alteraciones que no están incluidas en las curvas de calibración o que no son monitoreadas. Con estas circunstancias, el control de realimentación no tendrá éxito.

### Control con retroalimentación

Podemos realizar más mediciones para compensar los errores que pueden presentarse en el control de la realimentación. Sin embargo, la solución obvia para conservar constante el nivel en el tanque es monitorear el nivel mismo. Si se desvía del valor deseado, la válvula de entrada es ajustada por medio de una cantidad que es dependiente de la diferencia entre el nivel presente y el nivel deseado. Esta estrategia de control se denomina control de retroalimentación.

El control retroalimentado es un error direccionado debido a que la acción de control está en función de la diferencia entre los niveles deseados y el presente. La relación entre el error y la acción del control se denomina "Ley del Control".

El control del nivel de la retroalimentación requiere de una técnica elaborada de medición de nivel, y de un actuador exacto para la válvula. Este también requiere de una señal relacionada con el nivel presente (por ejemplo un transmisor del nivel). Además, el actuador de la válvula debe estar en capacidad de mantener la válvula en cualquier posición, y también cambiar su posición de forma gradual y suave;

el diagrama de la figura 6.3 ilustra como se puede implementar la situación descrita.

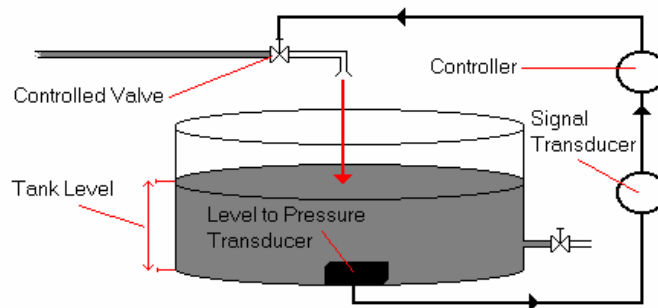


Figura 6.3

### (Control retroalimentado)

Una característica importante del control de retroalimentación es que puede proporcionar un rango para la acción de control, quiere decir esto, puede producir correcciones tanto grandes como pequeñas. Una ley apropiada del control debe ser diseñada o seleccionada para producir un rendimiento satisfactorio.

La Ley de Control representa la acción del controlador. Los tipos comunes de Ley de Control son los tipos P (proporcional), I (integral), D (derivativo), o una combinación de estas, por ejemplo PI, PID.

Pueden encontrarse ejemplos de sistemas de control de retroalimentación en la naturaleza; uno de estos es el control de la temperatura en el cuerpo humano. Este sistema de control intenta conservar la temperatura corporal con un valor constante. Generalmente, el ambiente tiende a variar la temperatura del cuerpo. El cuerpo responde a una diferencia en la temperatura, por medio de la transpiración, por medio del aumento o la disminución del flujo sanguíneo, por medio de los estremecimientos y así sucesivamente.

Este sistema de control tiene una característica que los sistemas de control diseñados por los humanos con frecuencia no tiene: este normalmente opera de una manera satisfactoria durante 70 años o más. Otra característica de este sistema y una que usualmente está presente en los sistemas de control que diseñamos, es que si la magnitud de error se hace muy grande, el sistema fracasa.

## **TEORIA 5**

### **CONTROL RETROALIMENTADO ON/OFF**

Una simplificación del tipo general de control de retroalimentación es el control retroalimentado On/Off. El nivel en nuestro ejemplo no solamente tendría dos estados; ya sea por encima del nivel deseado o por debajo de este. Se puede realizar el monitoreo por medio de un switcheo de flotamiento, montado en el nivel deseado.

El switcheo produce una señal binaria (on/off) que indica si el nivel esta por encima o por debajo del valor deseado. La señal puede luego utilizarse para operar en la válvula de entrada directamente.

Cuando el nivel está por encima del valor de referencia la válvula de entrada se cierra y cuando está por debajo se abre. La Ley de Control en el control on/off se conserva simple. Esta switchea la acción de control entre dos extremos, dependiendo del signo del error.

La figura 6.4 ilustra el método de control en el contexto del montaje del equipo.

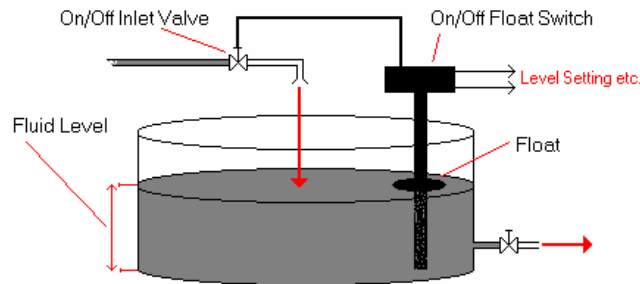


Figura 6.4  
(Implementación de un sistema de control retroalimentado)

Cualquiera que sea la causa del cambio en el nivel, dado que la desviación es suficientemente grande para activar el switch, entonces la acción del control se aplicará al estado presente.

Al utilizar el control on/off, los requisitos de nuestro equipo se han simplificado. Si embargo, existe varios problemas asociados con el control on/off.

Un problema se refiere a las fluctuaciones abruptas en el flujo debido a que la válvula hace switcheo entre los estados completamente abierto y completamente cerrado.

Otro problema es que la predicción del control on/off muy dependiente de las demoras asociadas con el switcheo, con la válvula de entrada y la tasa de cambio del flujo. Con las demoras largas, se puede presentar sobre-flujo si la válvula no se cierra tan pronto como se alcanza el nivel deseado. La respuesta es no realizar el switcheo rápidamente, y de forma sensible debido a que esto conducirá a un switcheo innecesario producido por las ondas o los rozamientos.

El tipo de control escogido para una situación dependerá de la exactitud requerida, el costo del equipo, el mantenimiento (entre mas simple el sistema mas fácil de conservarlo), de las alteraciones que se esperan y del grado de rechazo esperado de la alteración, del grado de intervención humana requerida, de la salud y la seguridad (que tan peligroso es el sobreflujo del proceso en cuestión?), y así sucesivamente.

## **7. CALIBRACION DEL CONTROLADOR**

- **Teoría 1: Controladores prácticos**
- **Teoría 2: Sistemas de control digital**
- **Teoría 3: Registradores**
- **Teoría 4: Texto desplegable**

**TEORIA 1**

**CONTROLADORES PRÁCTICOS**



Para mejorar el comportamiento puede hacerse cambiando ciertos parámetros del sistema tales como la ganancia, o incluyendo un filtro específico o compensador para el sistema particular con características conocidas.

El objetivo de un controlador es mantener el rendimiento deseado del sistema a pesar de las perturbaciones en el sistema.

Usualmente los controladores son implementados electrónicamente, ya sea utilizando circuitos análogos o un computador digital (microprocesador). Sin embargo, los controladores neumáticos e hidráulicos están todavía en uso.

En el control de procesos no es usual diseñar un controlador específico para una planta en particular, debido a que la dinámica de la planta presenta incertidumbre y con frecuencia es muy dependiente de las condiciones de operación.

Por tanto, un controlador de propósito general normalmente es el implementado, el cual tiene numerosos parámetros variables que pueden ser fijados para cumplir con los requisitos estáticos y dinámicos del sistema de control.

Nota: las características estáticas de un sistema son independientes del tiempo y la respuesta del sistema depende solamente de las entradas. Las características dinámicas de un sistema dependen tanto del tiempo como de las entradas.

Existen varios tipos de controladores de propósito general y cada uno puede ser caracterizado por sus acciones y métodos para el control del sistema.

A continuación se presenta un diagrama de bloques de un sistema general de control de procesos.

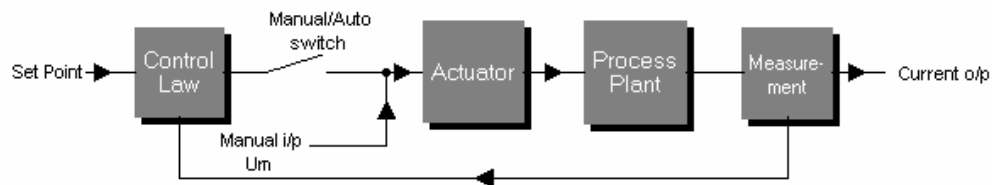


Figura 7.1  
(Diagrama de bloques de un sistema de control)

La Figura 7.1 muestra la planta y algunos medios para medir una variable de proceso. Esta variable medida se retroalimenta con el controlador para determinar como está funcionando el sistema. Al agregar este circuito de retroalimentación el sistema se convierte ahora en un sistema de circuito cerrado. El controlador comparará la salida medida y la salida deseada (punto de fijación) para determinar la acción de control. Um es la entrada manual y se puede también observar el switcheo manual/auto.

Con el switch en la posición manual se desconecta la Ley de Control de la planta de proceso y el sistema es controlado únicamente por el operador (un sistema de control manual, óseo el tipo de control que hemos estado implementando hasta ahora). Con el switch en la posición de auto se adiciona la Ley de Control a la entrada manual y esta determina el comportamiento del proceso. El proceso puede ahora ser controlado automáticamente, dado que está en sus niveles de operación deseados. Un controlador automático no puede determinar como controlar un proceso; éste puede solamente realizar el control deseado que se determina por una tercera parte, que es usted.

Se realizaran varios tipos de control de retroalimentación en prácticas posteriores.

## **TEORIA 2**

### **SISTEMA DE CONTROL DIGITAL**

La utilización de los computadores digitales para el control y monitoreo de los procesos es cada vez mas importante. Los computadores digitales ofrecen una mejora en el rendimiento, mejor manejo de un proceso, confiabilidad, flexibilidad y pueden realizar cálculos complejos que no podrían realizarse por otros medio análogos. Además, herramientas poderosas de desarrollo de software (lenguaje de programación, por ejemplo) las cuales pueden ser corridas en computadores digitales, dan como resultado una reducción en los costos de desarrollo de los sistemas de control basados en el computador.

#### **Existen dos tipos de control con computador que pueden ser implementados.**

Se pueden utilizar numerosos controladores de circuitos individuales digitales (un ejemplo de uno de estos controladores es el 38 -300). Donde cada cual tiene un control de retroalimentación con una sola variable para procesos multivariados. Estos controladores se denominan controladores “esclavos” y son coordinados por medio de un controlador digital denominado “maestro”.

El controlador maestro envía información de punto fijo a los controladores esclavos y recibe nuevamente la información sobre las variables medidas. Este tipo de control se denomina “control de punto fijo” y un beneficio principal de este tipo de control es que incluso en el caso de una falla en el controlador maestro, los controladores esclavos individuales seguirán operando, y, con estos operando, el proceso deberá continuar funcionando.

El otro tipo del control del computador se denomina control digital directo (DDC). El DDC, como su nombre lo indica, utiliza controladores digitales para determinar el esfuerzo presente del control aplicado al proceso o la planta.

Los controladores digitales son controladores de circuito individual o de multicircuito basados en microprocesadores que controlan una planta individual o multivariable, en vez de los controladores antiguos, análogos, mecánicos o neumáticos.

La Ley del Control digital para un proceso que determina el acción de control puede obtenerse de dos técnicas de diseño completamente diferentes.

El método simple es aproximar la Ley de Control análogo a una ley de control de tiempo discreto. En esencia, implementamos el controlador análogo existente con un controlador digital. Este método tiene la ventaja de la familiaridad con los conceptos análogos y la terminología. Sin embargo, una desventaja principal es la de limitar las bastas capacidades de los computadores digitales debido a que la aproximación digital de los controladores análogos tienen capacidades limitadas.

El otro método para el diseño de controladores digitales es diseñar el control directamente en tiempo discreto. La desventaja de este método es que durante el tiempo discreto (por ejemplo, durante los tiempos de muestra) no se puede lograr un muy buen control, pero entre las muestras, la variable controlada, está efectivamente en la condición de circuito abierto y puede oscilar. Las técnicas de diseño deben ser exactas y completas para abarcar tales eventualidades.

Los diagramas de bloques muestran los controladores análogos y de tiempo discreto digital, y muestran como estos se diferencian. La Ley de Control en el ejemplo del tiempo discreto se implementa digitalmente, pero la planta es un sistema análogo continuo. Debe incluirse un convertidor de análogo a digital (DAC) entre la salida del controlador y la entrada de la planta, también debe incluirse un convertidor correspondiente de análogo a digital (ADC) entre la salida de la planta y el comparador en la ruta de retroalimentación.

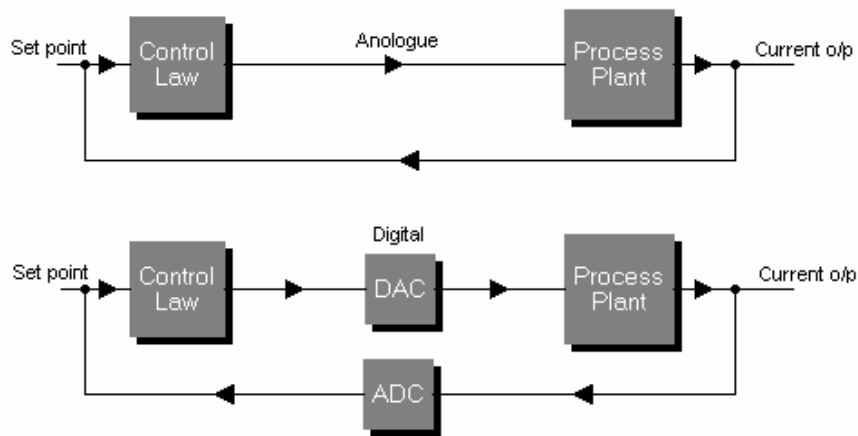


Figura 7.2  
(Tipos de variables de control)

La frecuencia de muestreo,  $f_s$ , del DAC y ADC determinará como el control maneja la oscilación y las fluctuaciones. Consecuentemente, este debe ser mucho más rápido que la dinámica del proceso, de tal forma que la aproximación digital produzca resultados similares al controlador análogo convencional.

El controlador que se proporciona (commander 300 ABB) es un controlador digital de circuito individual. DAC y ADC son partes integrales del controlador y como tales no interesarán en las prácticas.

### **TEORIA 3**

#### **REGISTRADORES**

En esta teoría se trata el registrador por primera vez. Esto le suministrará varias comodidades para que monitoree las variables de proceso junto con el controlador. Igualmente las variables de exhibición en tiempo real del registrador tienen la facilidad de registrar una curva. Los archivos registrados pueden seleccionarse nuevamente y volverse a ejecutar utilizando la práctica sobre repetición de la ejecución.

#### **Registro:**

Se utilizan dos botones junto con el botón del registrador de guía para llevar a cabo el registro. Para iniciar el proceso de registro, haga clic en el botón “registro”. El botón será resaltado y permanecerá así hasta que se presione el botón “detener el registro”. El sistema automáticamente dará el nombre y abrirá un archivo en el directorio especificado en el archivo sysinfo.ini

La ruta de autenticación de la información debe ser establecida en el archivo sysinfo.ini antes de correr el software Discovery. Si al iniciar un registro, no puede encontrarse la ruta del directorio, el mensaje <creación de directorio, nombre de la ruta> aparecerá con los botones “OK y Cancelar”. Si se selecciona OK, se creará un directorio y se iniciará el proceso de registro.

Si se selecciona cancelar, no se creará el directorio y el mensaje <el directorio no existe, archivo no guardado> aparecerá en un recuadro con el botón OK. No ocurrirá ningún registro y la entrada de autenticación de información en el archivo sysinfo.ini deberá cambiarse para permitir el registro.

Para detener el registro, haga clic en el botón detener el registro. Lo resaltado en el botón de registro desaparecerá y un recuadro de mensaje formulará el nombre del archivo de la información registrada (basado en la fecha y la hora). Haga clic en el botón OK o presione el botón retornar para retirarlo.

Si usted trata de terminar la práctica del software o iniciar otra práctica sin terminar el registro, Discovery terminará automáticamente el registro produciendo el recuadro del mensaje con el nombre del archivo antes de iniciar la selección del nuevo menú.

#### **Volver a ejecutar (playback):**

Cuando se selecciona la práctica “playback” aparece un recuadro con la lista de todos los archivos disponibles para playback. Si el recuadro está vacío, verifique que la ruta de

autenticación de información en el Sysinfo.Ini sea la misma ruta del patrón que se utilizo cuando ocurrió el registro.

Para seleccionar un archivo, haga clic en el nombre del archivo, utilizando el botón izquierdo del ratón. Los archivos pueden ser deshabilitados dando click derecho del ratón. Solamente se puede seleccionar un archivo a la vez y cuando se ha seleccionado, se hace clic en el botón “graficar” (Plot). Después de seleccionar un archivo haga clic en el botón Plot. Aparece un registrador de guía y la información comenzará a ejecutarse nuevamente.

Existe una barra de progreso en el botón del registrador de guía con botones de flechas en cualquier extremo de la barra. Esto muestra que tanto ha avanzado el playback (la repetición de la ejecución) en el archivo. El ancho de la barra de movimiento da una indicación del tamaño del archivo de información.

Los botones de flechas pueden ser utilizados para desplazarse hacia delante y hacia atrás en el archivo. Cada vez que se presionan los botones, la gráfica se desplazará hacia atrás o hacia adelante en la pantalla de información. El botón de congelación “Freeze” detendrá el registrador de guía. “Clear” (borrar) borrará la curva presente de un registrador y se mostrará “Ghost” (fantasma) el cual mostrará una curva congelada ficticia desde el momento en que se hizo click.

Al utilizar Playback, cuando el botón congelar esta presionado y le sigue un movimiento hacia adelante o hacia atrás, saldrá la información pero no continuará desplazándose hasta que el botón congelar se presione nuevamente.

Para seleccionar un nuevo archivo, y que este se vuelva a ejecutar, cliquee en el botón nuevo archivo (New File). Esto producirá el recuadro con la lista y los archivos disponibles.

### **Formato de la información del archivo:**

Existen dos archivos relacionados con cada registro. Estos son:

PDH= Archivo encabezador de información Procon

PDF= Archivo de información Procon

El archivo encabezador contiene dos líneas de información con el siguiente formato: Nombre del archivo, fs1, bipolar1, calinc1, text1, fs2, bipolar2,calinc2, text2, tiempoinc, tamaño del archivo de información en bytes.

De donde fs1, ds2 =deflexión total de la escala para los canales 1 y 2.

Bipolar = tipo del registrador de guía, ya sea 0 para unipolar o 1 para bipolar

Calinc= incrementos de la calibración del eje Y.

Texto= describe lo que cada canal muestra.

Tiempoinc = valores de incremento en el tiempo para los ejes.

El archivo encabezador es utilizado para establecer el tipo correcto del registrador de guía antes que la nueva ejecución inicie. Si el archivo encabezador no está presente, o la información se ha corrompido, el registrador de guía no se establecerá correctamente cuando se inicie la nueva ejecución (Playback).

El archivo de información contiene la información registrada, este formato es:

Nombre del archivo

Información 1, información 2, tiempo, relleno

Información 1, información 2, tiempo, relleno

De donde información 1= información del canal 1

Información 2= información del canal 2 (nota si la guía original era solamente un canal, entonces esta será 0).

Tiempo = tiempo en segundos

Los archivos están agrupados en tiras de “aaa” para hacer que se establezca la longitud de cada línea. Los archivos son registrados en formato ASCII de tal forma que puedan ser cargados en las hojas y observados por fuera del ambiente Discovery.

## **TEORIA 4**

### **TEXTO DESPLEGABLE**

Esta es la primera sección de la teoría en la cual se menciona el texto desplegable para las prácticas. Esto le permite que una gran parte de la pantalla muestre el registrador de guía y le permite que el texto se asocie con el desarrollo de la práctica.

El bloque del texto desplegable tiene una barra de desplazamiento en el lado derecho del bloque del texto en gris, y el texto puede ser desplazado hacia arriba y hacia abajo de dos formas. El primero utilizando el ratón y dando click en las flechas hacia arriba o hacia abajo. El segundo es para utilizar las teclas del cursor hacia arriba o hacia abajo. Ambos se encuentran disponibles y se puede alternar entre cualquiera de los dos modos.

La barra de desplazamiento también muestra su posición presente en todo el bloque completo del texto. Se recomienda leer todo el texto antes de iniciar las prácticas.

## **8. TRANSMISOR DE NIVEL POR FLOTACIÓN**

- **Teoría 1: Control de retroalimentación**
- **Teoría 2: Dinámica del sistema de control**

### **TEORIA 1**

#### **CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN**

La idea de la retroalimentación fue introducida en la teoría 7 pero no fue explorada teóricamente o aplicada experimentalmente. En esta teoría, y la siguiente, el tema de retroalimentación se considera en forma completa, por lo tanto existe familiaridad con las teorías que consideran diferentes estrategias de control y ejemplos de control de procesos.

La Ley del Control, la cual fue considerada primera en la teoría 6 es la relación entre los valores medidos y los deseados de un parámetro de procesos. La adición de un circuito de retroalimentación a un proceso permite la implementación automática de la Ley del Control, y ahora la acción del control es dependiente del valor medido. Un sistema que emplea control de

retroalimentación pasa a ser controlado mediante el error; este sistema está en capacidad de manejar alteraciones no esperadas.

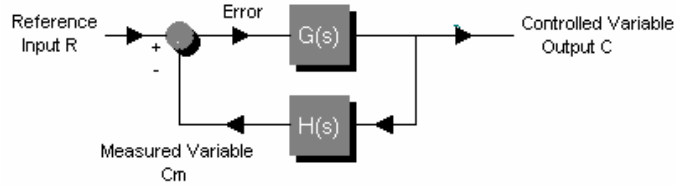


Figura 8.1  
(Control de tipo retroalimentado)

La figura 8.1 muestra el sistema general de control de retroalimentación. Este diagrama se aplica a todos los sistemas que incorporan un circuito de retroalimentación. Los diagramas cumplen con la teoría 7 (sistema general del control de los procesos, sistema de controles digitales y análogos) todos basados en esta forma general.

La figura 8.1 muestra la ruta de avance que abarca la planta, representada por G. Esta función, (G), incluye cualquier dinámica del controlador. La ruta de retroalimentación esta representada por H, y esta incluye el sistema de medición.

Un sistema de medición puede ser modelado de tal forma que su comportamiento pueda ser evaluado antes de su implementación física. Mediante el uso de un diagrama del sistema de retroalimentación (reproducido a continuación),

Se explicara el modelamiento del siguiente sistema (figura 8.2).

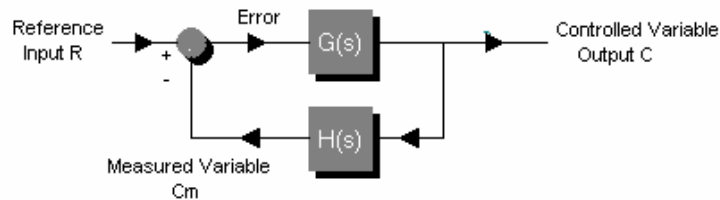


Figura 8.2  
(Análisis del sistema de control de tipo retroalimentado)

La salida C puede ser descrita en función de la entrada, R, y el valor medido, Cm, y la función de transferencia G.

$$C = (R - C_m) G$$

Esto es justamente lo mostrado en el diagrama siguiente.



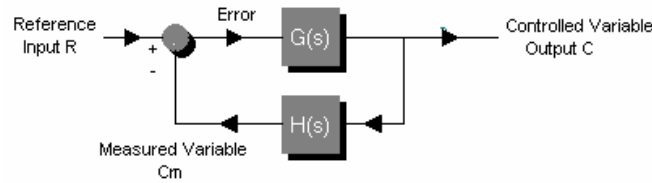


Figura 8.3  
(Análisis del control retroalimentado)

Pero  $C_m = CH$ , por tanto

$$C = (R - CH)G \quad \text{ó} \quad C(1+H) = RG$$

Reacomodando esto, puede producirse una función de la salida en relación a la entrada.

$$C/R = G / (1 + GH)$$

Esta es la función de la transferencia de todo el sistema y muestra que la salida y la entrada están relacionadas.

La función principal de un controlador es la de realizar una acción directa sobre el sistema a controlar para ajustar de esta forma la respuesta de este, los controladores más comunes son los de tipo-P (proporcional), tipo-I (integral) o tipo-D (derivativo) o también una combinación de estos, cada uno de estos controladores serán tratados en el desarrollo de las prácticas posteriores.

Un ejemplo de sistema de control biológico es el cuerpo humano y la autorregulación que este hace para controlar su propia temperatura. Este sistema intenta mantener constante la temperatura del cuerpo. Las condiciones ambientales tienden a variar la temperatura normal del cuerpo, el cuerpo humano responde a esto incrementando o disminuyendo la temperatura corporal para mantener un valor constante.

## TEORIA 2

### DINÁMICA DEL SISTEMA DE CONTROL

Los sistemas invariablemente tienen características dinámicas. El comportamiento del sistema siempre dependerá del tiempo, debido a que la respuesta de cualquier sistema a una entrada no es instantánea. Entre mayor sea la distancia de una llamada telefónica, más se hace evidente el comportamiento dinámico; el tiempo de retraso entre la transmisión y la recepción aumenta. Los computadores cada vez son más rápidos pero siempre habrá un “tiempo de acceso” para recuperar la información de su disco duro.

El modelamiento de los sistemas dinámicos se refiere a la causa y efecto entre la entrada y la salida. Los modelos de comportamiento dinámico para un sistema se pueden obtener mediante dos métodos. Las ecuaciones básicas de la física y la mecánica pueden aplicarse a un sistema en el cual los principios de fundamento son claros, y este es suficientemente simple, o pueden subdividirse en subsistemas simples. Este es un primer método introductorio.

El segundo método es observar el comportamiento normal o introducir señales de prueba. Un modelo producido por medio de este método se basa en una observación y en un comportamiento de entrada y salida.

Ambos métodos producirán ecuaciones diferenciales que describen las características dinámicas del sistema. Las ecuaciones diferenciales implican el tiempo como una variable, normalmente en la forma de sus derivadas e integrales en relación al tiempo. Pero resolver estas manualmente es difícil y demandan tiempo, por tanto se han desarrollado métodos numéricos los cuales pueden implementarse en computadores digitales.

Se pueden utilizar modelos para hacer predicciones sobre el sistema, o estos pueden acomodarse para permitir que el diseño de un sistema cumpla con un rendimiento requerido. Un modelo no puede determinar explícitamente la salida en un tiempo particular, pero suministra la relación entre la entrada, la salida y el tiempo de tal forma que para una entrada dada, pueda encontrarse la salida.

## **9. TRANSMISOR DEL MEDIDOR POR FLUJO DE PULSOS**

- **Teoría 1: Teoría del modelo de sistemas**
- **Teoría 2: Operadores de transferencia**
- **Teoría 3: Transformada de Laplace**

### **TEORIA 1**

#### **TEORÍA DEL MODELO DE SISTEMAS**

Las ecuaciones diferenciales que encontramos en la teoría anterior, (teoría 8), son la base para el análisis y el diseño de los sistemas de control. Un ejemplo simple del tanque de agua se utilizará para ilustrar esto.

Un tanque de agua de área de sección transversal fija  $A$  se está llenando con un flujo  $q$ ; la tasa de  $q$  es igual a la tasa del intercambio de volumen, por tanto el sistema de flujo es inicialmente:

$$q = dv / dt$$

Pero  $v = A \cdot h$ , de donde  $h$  es el nivel. Por tanto ahora el modelo se convierte en:

$$q = A \cdot dh / dt$$

Este es un modelo dependiente del tiempo para el tanque, donde la entrada es un flujo  $q(t)$  y la salida es el nivel  $h(t)$ . Este modelo se puede utilizar para descubrir el comportamiento del sistema para una entrada particular. Al analizar un sistema se deducen ecuaciones para simplificar la matemática. En vez de producir una solución exhaustiva para una entrada muy específica, es más útil una idea general del comportamiento, aunque puede ser inexacta.

El switch de la bomba se encuentra encendido. La servo-válvula se encuentra abierta inicialmente, pero se cierra gradualmente a los 30 segundos hasta que se cierra completamente. El flujo máximo es un litro/segundo ( $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se hacen tres suposiciones: el nivel de tanque es 0 antes de que el switch de la bomba se conecte, ningún fluido sale del tanque, y cuando el switch de la bomba se conecta, se alcanza un flujo máximo instantáneamente.

La tasa del flujo es ahora

$$q = 0.001(1 - t/30) \text{ m}^3/\text{s}$$

Esta es sustituida en el modelo para producir

$$A \cdot dh/dt = 0.001(1 - t/30) \text{ m}^3/\text{s}$$

Ahora integrando en relación al tiempo y al reacomodar, se produce

$$h(t) = (t - t^2/60)/A \text{ m}$$

Esta describe el comportamiento del nivel del tanque para esa entrada particular

## TEORIA 2

### OPERADORES DE TRANSFERENCIA

Las ecuaciones diferenciales no son una forma ideal de representar los sistemas dinámicos debido a que la entrada del sistema, la salida y sus derivadas se dispersan en la ecuación. Esto hace que sea difícil de reconocer la relación de causa y efecto.

Una manera de simplificar éstas, es utilizar los operadores de transferencia, los operadores matemáticos que representan el proceso de diferenciación con respecto al tiempo. Estos pueden ser manipulados en ecuaciones diferenciales para simplificar la representación del sistema, pero debido a que estas son operaciones matemáticas, estas no tienen valor y no se pueden multiplicar explícitamente.

El operador de transferencia es D, y este se representa:

$$dx/dt = Dx$$

Esto permite que las ecuaciones diferenciales se reduzcan de la siguiente forma. La tasa de flujo q esta dada por:

$$q = A * dh/dt$$

Tal como se observó en la ultima sección de la teoría. Utilizando el operador D esto se convierte:

$$q = A * Dh$$

Y esto puede reconfigurarse para producir:

$$h = q / (A * D)$$

De acuerdo a lo mencionado antes esto no podría multiplicarse explícitamente debido a que D no tiene valor. Usado en su forma, el operador D no presenta alguna simplificación, pero una mejor forma de manejar las ecuaciones diferenciales es usando la transformada de Laplace. Este método de resolver ecuaciones diferenciales representa funciones en el tiempo, t, como funciones de s, o sea una nueva variable. Esto es abarcado en la siguiente teoría.

### **TEORIA 3**

#### **TRANSFORMADA DE LAPLACE**

La transformada de Laplace es una transformación matemática que permiten que las funciones en el dominio del tiempo, t, sean representadas en el dominio s, de donde s es una nueva variable. La transformada de Laplace se da por medio de:

$$L\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Esto se aplica a todas las ecuaciones del dominio del tiempo para producir sus equivalentes del dominio s. un ejemplo simple de la función del dominio del tiempo es:

$$x(t) = e^{-at}$$

La función exponencial.

Su transformada es:

$$\begin{aligned} L\{x(t)\} &= X(s) = \int_0^{\infty} e^{-at} e^{-st} dt \\ &= \int_0^{\infty} e^{-(s+a)t} dt = \left[ \frac{-1}{s+a} e^{-(s+a)t} \right]_0^{\infty} = \frac{-1}{s+a} [0 - 1] \end{aligned}$$

La ecuación ha sido sustituida en la forma estándar de la transformada de Laplace y de la integración realizada.

Aunque se observa que la matemática esta implicada el resultado es:

$$L\{x(t) = e^{-at}\} = X(s) = \frac{1}{(s+a)}$$

Otro ejemplo es la transformada de Laplace derivativa de una función del tiempo.

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

Al sustituir esto en la forma estándar como antes....

Y realizando la integración, la transformación es:

$$\begin{aligned} L\left\{\frac{dx}{dt}(t)\right\} &= \int_0^{\infty} \frac{dx}{dt}(t) e^{-st} dt \\ &= \left[ e^{-st} x(t) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} x(t) s e^{-st} dt \\ &= -x(0) + sX(s) \end{aligned}$$

X (0) es el valor de x (t) en t = 0, o sea la condición inicial dado que esta es 0....

La transformada se reduce a lo siguiente:

$$L\left\{y(t) = \frac{dx(t)}{dt}\right\} = sX(s)$$

Lo cual también es sencillo.

De esta se puede extraer un resultado general, diferenciando que una función del tiempo es equivalente a multiplicar la transformada de Laplace por medio de s, dado que las condiciones iniciales son 0.

Al aplicar la transformada de Laplace algunas ecuaciones generales, se puede producir una tabla de transformaciones comunes:

$f(t)$	$L\{f(t)\} = F(s)$	
$a$	$\frac{a}{s}$	
$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$	
$\cos at$	$\frac{s}{s^2 + a^2}$	
$\sin at$	$\frac{a}{s^2 + a^2}$	
$t^n$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$	$n \geq 0$

Esto puede utilizarse directamente para problemas simples y se adaptan a otros.

Existe una equivalencia entre el operador D y el operador de Laplace, s, pero es solamente aplicable mientras las condiciones iniciales sean 0.

$$\frac{dx(t)}{dt} \equiv Dx(t) \Leftrightarrow sX(s)$$

También debe recordarse que D es un operador pero s es una variable, de tal forma que esta equivalencia nunca debe ampliarse a la igualdad.

La razón para utilizar las transformadas de Laplace es simplemente resolviendo las ecuaciones diferenciales. Estos métodos estándar van a sustituir una solución asumida o a utilizar operadores D pero ambos son tediosos, mientras se encuentre primeramente una solución general con las constantes arbitrarias evaluadas por medio de la inserción de las condiciones iniciales.

Al utilizar la transformada de Laplace, la solución se encuentra en gran medida utilizando medios algebraicos, con las condiciones iniciales implicadas desde una etapa temprana. Esto acorta la determinación de una solución particular.

Debido a que se exploran métodos de control distintos en las siguientes teorías, las transformadas de Laplace serán abarcadas nuevamente con ejemplos prácticos. Esto tiene como propósito, únicamente una introducción teórica al tema.

## **10. CONTROL DE NIVEL DE TIPO ON/OFF**

- **Teoría 1: Tipos de control**
- **Teoría 2: Operadores de transferencia**

### **TEORIA 1**

## **TIPOS DE CONTROL**

La estrategia de control mas simple es la operación del circuito abierto, la cual no tiene retroalimentación. Este no es estrictamente un tipo de control, debido a que no puede realizarse un control del proceso. Aunque el control manual es una configuración de circuito abierto, este no puede denominarse control de circuito abierto debido a que este no implica retroalimentación, y existe retroalimentación por parte del usuario.

El problema con una operación de circuito abierto es que un proceso que utiliza esto es inherentemente inestable. Sin ninguna fluctuación el proceso debe operar de forma exitosa, pero se presentaran fluctuaciones. Esto pasará sin que exista ningún mecanismo de verificación, simplemente debido a que el controlador no esta al tanto de su presencia.

La utilización de un controlador de retroalimentación, sin retroalimentación conducirá al fallo del sistema debido a que el controlador está intentando hacer que la variable medida sea igual al punto de fijación. Sin retroalimentación, el controlador continuará aplicando una acción de control, sin tener conocimiento del valor medido.

Esta situación que se presenta con el BPR conducirá a un sobre-flujo o a un tanque vacío (los dos extremos), pero al considerar los sistemas de proceso generalmente se puede presentar cualquier tipo de falla del sistema, lo cual podrá ser muy serio si por ejemplo, la planta es el sistema de calefacción de una oficina, el motor de un ascensor, o un reactor nuclear.

### **Control de retroalimentación on/off:**

Entonces es obvia que cierta clase de retroalimentación es requerida para que un sistema opere bajo control automático exitosamente. En las ultimas dos teorías, 8 y 9, fueron presentados los instrumentos que hacen que la opción de la retroalimentación sea viable (estas fueron transmisor/sensor del nivel de flotamiento y el transmisor/sensor de flujo de pulsos). Ahora, puede iniciarse la investigación de los distintos tipos del control de retroalimentación disponibles.

El primer tipo de control es realmente una simplificación de la configuración general de control de retroalimentación, y este es el control de retroalimentación on/off. Este requiere un equipo mucho más simple cuando se implementa en una situación de control.

Al decidir que estrategia de control se implementa en la situación de una planta, las características de cada tipo normalmente serán confrontadas entre si. En el caso del control on/off, las principales características que se oponen son la simplicidad general confrontada a su naturaleza inherente binaria.

Al utilizar el control on/off todos los aparatos a controlar, (planta), están completamente encendidos o completamente apagados, ciento por ciento abiertos o ciento por ciento cerrados. No existe termino medio, por tanto la oscilación con frecuencia es una característica de los sistemas de control on/off, debido a que la ley del control switchea ambos extremos, llevando a la salida a estar entre los estados.

Cualquiera que sea la causa del cambio en el valor medio, si la desviación es suficientemente grande para activar el switch, entonces la acción de control se aplicará a la situación correcta.



Esto significa que el control on / off es con frecuencia sometido a un switcheo innecesario provocado por las alteraciones.

En seguida se ilustra una de tales situaciones. El nivel del agua en el tanque de cabecera debe conservar cierto nivel para permitir que el proceso funcione correctamente. Se controla el flujo del agua hacia el tanque por medio de una servo-válvula puesto en alguna parte de la tubería de flujo. La abertura y cierre de esta válvula, en este caso es controlada por el switch de flotamiento.

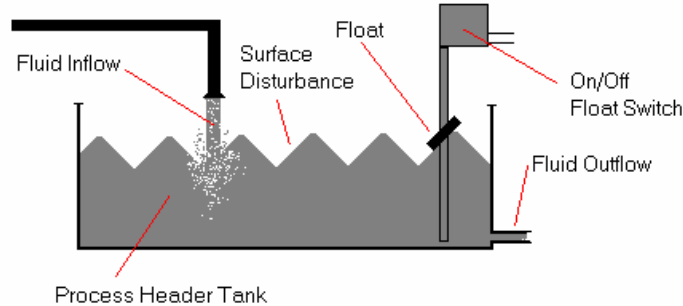


Figura 10.1  
(Medición de la variable de nivel)

Las alteraciones causadas por el flujo del fluido son suficientes para elevar y disminuir el nivel del flotador por encima y por debajo de los puntos de switcheo on/off. Esto da como resultado que la válvula de flujo se abra y se cierre innecesariamente. El método on/off de control obviamente no es apropiado en esta situación.

El control on/off es apropiado para las situaciones donde solamente es necesario conservar una variable de proceso entre dos límites. Para los procesos continuos, donde se requiere que una variable esté en un nivel particular, este es impráctico.

## TEORIA 2

### EL COMPARADOR DE LA INTERFAZ DE PROCESO

La histéresis fue inicialmente introducida en el capítulo 2, y los comparadores se discutieron en el capítulo 5. Ahora estas ideas se aplicaran directamente y su relevancia para esta teoría será más clara.

El comparador en el PI tiene dos entradas, una no invertida marcada con (un +) y una invertida marcada con (un -). Las entradas al comparador deben ser señales de voltaje, por tanto cuando se utiliza este, deben incorporarse comparadores de corriente/voltaje. Estos tomarán las señales de la corriente (valores de referencia o valores medidos) y los convierten a señales de voltaje apropiadas para el comparador.

Este comparador alimenta su salida con un Schmitt Trigger (el cual es un comparador que tiene una retroalimentación positiva conectada a una entrada no invertida).

Esta configuración se muestra a continuación.

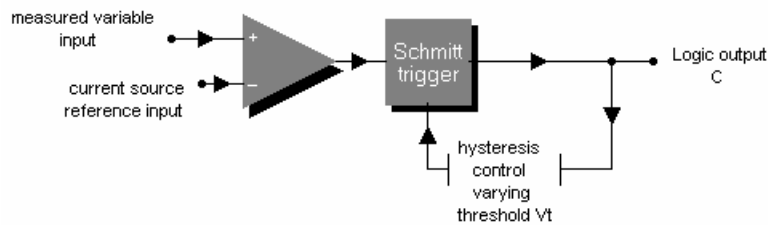


Figura 10.2  
(Comparador de la interfaz de proceso)

La fuente de corriente proporciona la entrada de referencia para la variable de proceso medida en el comparador A, que es la otra entrada y la diferencia entre estas es la desviación. El tamaño de esta desviación controlara la salida lógica C del Schmitt Trigger, el cual estará en cualquiera de estos dos valores: 0 voltios ó 5 voltios.

Aunque la señal medida se muestra en la práctica, conectada a la entrada positiva (no invertida), esta puede ser medida dependiendo de que acción se desee. Estas acciones se exploraran en las prácticas.

La salida lógica C del Schmitt Trigger se utiliza para controlar las servo-válvulas switcheadas (y también los aparatos que estos abastecen).

Recordemos la curva del circuito de histéresis.

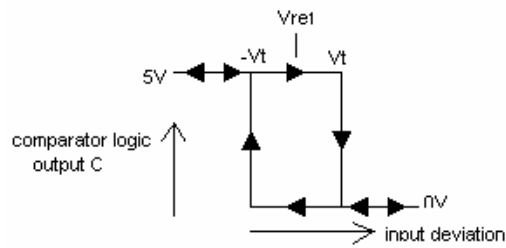


Figura 10.3  
(Curva de histéresis)

Esto muestra las dos rutas de estado y cambio que son seguidas, dependiendo de la dirección de un cambio de la desviación. También se muestran los dos niveles de voltaje  $+V_t$  y  $-V_t$ , los cuales son los niveles reales de switcheo.

Inicialmente, la desviación podrá definirse como grande y como negativa, de tal forma que la operación pueda ser explicada. La salida será alta (5 V) de acuerdo a lo mostrado en la curva de histéresis. Debido a que el valor medido y el valor de referencia se aproximarán entre si, la desviación se aproximará a 0 y en cierto punto será 0, y luego pasará a ser positiva.

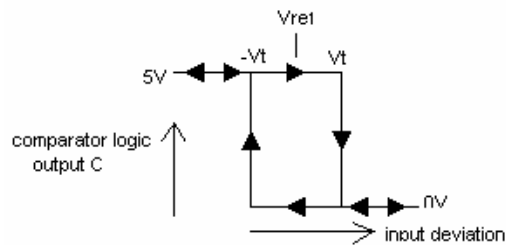


Figura 10.4  
(Desviación de la señal de histéresis)

Cuando la desviación se ha hecho más positiva que  $V_t$ , la salida se cambiará a su estado bajo (0V). Esto se demuestra en la curva de la histéresis. Este es la acción de control, el cual conducirá al valor medido en otra dirección. La desviación disminuirá, hasta cierto punto esta será más negativa que  $-V_t$ . Esto cambiará nuevamente la salida a su estado original (alta, 5V).

El control de la histéresis determina el valor del voltaje del umbral  $V_t$ , y así, este controlará la diferencia entre los niveles de switcheo de alto a bajo y de bajo a alto. Esto se hace controlando el rechazo de la alteración, debido a que la desviación debe cambiar de manera considerable para provocar un estado de cambio si  $V_t$  es grande.

Tal como se observara con el control on/off, el valor medido no puede permanecer constante a nivel del valor de referencia, pero este estará entre dos límites, cualquiera de los lados de la referencia, determinados por la cantidad de histéresis. Entre mayor sea la histéresis, mas estarán separados los dos límites.

Por tanto, la técnica de control on/off no se utiliza donde se requiere un control preciso, sino donde se requiere que una variable esté entre los dos valores. Con frecuencia este es apropiado únicamente en ciertas aplicaciones, por ejemplo controlar la temperatura en un salón.

## 11. CONTROL PROPORCIONAL: NIVEL

- Teoría 1: Control proporcional
- Teoría 2: Banda proporcional
- Teoría 3: Control on/off o control proporcional

### TEORIA 1

#### CONTROL PROPORCIONAL

El propósito de un controlador es conservar un rendimiento deseado del sistema compaginado con cualquier alteración del sistema.

Un controlador simple es el controlador proporcional. La acción del control es directamente proporcional a la desviación entre el valor medido y el Set Point (valor deseado).

El siguiente diagrama muestra un sistema general de control proporcional.

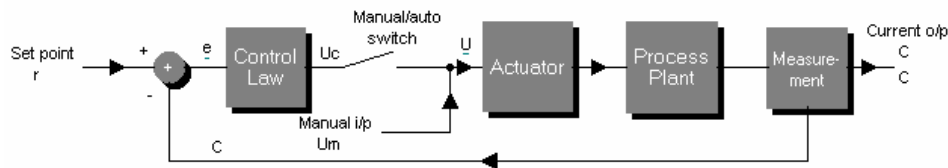


Figura 11.1

(Diagrama de bloques de un control de tipo proporcional)

Este muestra la entrada manual,  $U_m$  con el switch manual/auto. La salida  $C$  es retroalimentada a lo largo del circuito y se encuentra la desviación entre ésta y  $r$ , que es el Set Point. El error,  $e$ , pasa a la ley del control donde se produce una acción de control; La acción de control es proporcional al error.

La acción de control determina como reacciona el proceso en el periodo de tiempo siguiente.

Al considerar el control proporcional automático se puede escribir lo siguiente:

$$U = Ke$$

Se muestra que la acción de control,  $U$ , es directamente proporcional al error,  $e$ , de donde  $K$  es la ganancia o la sensibilidad del controlador.

Esta es la ecuación básica que describe este tipo de control pero presenta un problema, sin error no habría entrada al sistema. Esto no es estrictamente cierto; si no hubo error la entrada en la práctica estaría en el nivel inactivo. Aplicando esto a las ecuaciones se tiene:

$$U = Ke + U_m$$

Donde  $U_m$  es el punto inactivo.

Al aplicar esto a una situación práctica de control el punto inactivo,  $U_m$ , sería el esfuerzo manual o la entrada y  $K_e$  sería la acción de control automático,  $U_c$ , del controlador. En este ejemplo de control del proceso (Procon), el flujo total en el tanque es  $U$ ; el error,  $e$ , es la diferencia entre el Set Point y el valor medido; la ganancia,  $K$ , representa en que proporción está abierto el servo, y la salida,  $C$ , es el nivel del tanque.

El flujo total puede también dividirse de la siguiente forma:  $U_m$  es la entrada de agua que se necesita para superar cualquier sobre flujo y  $U_c$  el cambio del flujo producido por un cambio en la posición de la servo-valvula (para contrarrestar cualquier desviación).

Ahora el flujo total puede describirse así:

$$U = U_c + U_m$$

$U_c$  es el resultado de la ley del control, y para el control proporcional esto simplemente es:

$$U_c = K e$$

Para establecer un punto de operación deseado el nivel establecido se ajusta hasta que tenga el valor deseado y la salida inactiva (manual) del controlador se cambia para reducir la desviación a 0. En este punto  $U$ , la salida total, es igual a  $U_m$ , o sea la salida manual, y el controlador puede ser switchado a un modo automático de operación. Debido a que no existe desviación el controlador no aplicará ningún esfuerzo y se alcanza una transferencia sin sobresaltos (sin choque).

Si se reduce la desviación a 0, el controlador intentará corregir la salida con una acción de control, y esto se observaría como un sobresalto entre los modos de operación del switch. El proceso realmente se distanciaría del punto de operación deseado.

## TEORIA 2

### BANDA PROPORCIONAL

Es usual en los controladores industriales considerar la ganancia en términos de una banda proporcional (PB) o en porcentaje del PB. La banda proporcional representa el cambio en el valor medido, normalmente cambio fraccional, que generará un ciento por ciento de cambio en la acción de control. Este puede también representarse como la desviación que generará un ciento por ciento de cambio en la acción de control.

$$\text{PB} = (\text{desviación fraccional}) / (\text{Cambio fraccional})$$

Pero esto puede reducirse.

La desviación es el error,  $e$ , dividido por el intervalo de la medición, y el cambio fraccional en la acción de control es el cambio en la acción de control dividido por el intervalo de la salida del controlador. Ahora PB es:

$$\text{PB} = (e) / (\text{intervalo de medición}) * (\text{intervalo de la salida del controlador}) / (U_c)$$

La ganancia del controlador,  $K$ , es justamente  $U_c$ , que es la acción de control dividido por el error y este reduce la ecuación a:

$$\text{PB} = (1) / (K) * (\text{intervalo de la salida del controlador}) / (\text{intervalo de la medición})$$

La ecuación anterior muestra la relación entre la banda proporcional y la ganancia del controlador, lo cual es inverso proporcionalmente.

Un valor para la sola ganancia es insignificante debido a que esta será dependiente de las unidades usadas. Tiene sentido expresar PB como porcentaje, incluso si no se sabe nada acerca de la planta de proceso.

El solo control proporcional normalmente no se utiliza en el control del proceso debido a que siempre debe existir un error de estado estacionario para que sea ejercido cualquier esfuerzo del control. El control proporcional es una forma de corrección de la desviación pero sin cierta desviación no se producirá ninguna acción correctiva.

Al aumentar la ganancia se reducirá esta desviación, pero una ganancia grande aumenta la posibilidad de oscilación.

### **TEORIA 3**

#### **CONTROL ON/OFF O CONTROL PROPORCIONAL?**

De la anterior teoría se aprecia la naturaleza binaria del control on/off. Un límite superior y uno inferior son asignados para la variable medida y el controlador producirá un esfuerzo del control para conservar la variable medida dentro de estos límites. No existe controlador de término medio; el controlador no sabrá si la variable medida está cerca al valor deseado (por tanto un esfuerzo pequeño del control será más apropiado), o si la variable medida está lejos del valor deseado (por tanto se necesita un esfuerzo del control)

La oscilación invariablemente será una característica del control on/off debido a que la variable medida oscila entre sus dos límites. Estos límites pueden ser determinados de forma que queden cerca para reducir la oscilación, pero siempre serán distintos, y para conservar la variable medida dentro de estos límites próximos el actuador y el sensor deben actuar rápido.

El control proporcional, por otra parte, produce un esfuerzo del control que tiene una relación directa con el tamaño del error que se está corrigiendo. A medida que el error es más pequeño, más pequeño es la acción de control para corregir ese error. No existen límites medidos para delimitar el error, solamente existe un valor deseado que el controlador intenta alcanzar, (set point).

La desventaja con el control proporcional, de acuerdo a lo explicado en la sección de la teoría anterior, es que para corregir un error con un esfuerzo del control, se necesita un error para producir la acción de control. Esto conduce a la conclusión de que siempre estará presente algún error. Este puede reducirse al incrementar la ganancia, pero la oscilación puede entonces convertirse en un problema.

## 12. CONTROL PROPORCIONAL: FLUJO

- **Teoría 1: Oscilación y ganancia**
- **Teoría 2: Banda proporcional**

### TEORIA 1

#### OSCILACIÓN Y GANANCIA

De acuerdo a lo discutido en el capítulo 11 el control proporcional aplica una ley de control muy simple: la acción de control es directamente proporcional a la desviación entre el valor medido y el Set Point (valor deseado).

También un aspecto encontrado en el capítulo anterior, fue la idea de discutir la ganancia en términos de banda proporcional. Como se recordará, la ganancia y la banda proporcional están relacionadas inversamente, por tanto un aumento en la ganancia disminuirá proporcionalmente la banda proporcional.

Al recordar las expresiones para el control proporcional, se puede observar que entre mayor sea la ganancia del sistema,  $K$ , mayor es la acción de control,  $U_c$ :

$$U_c = K e$$

De donde  $e$  es el error o la desviación entre el valor medido y el deseado.

La ganancia del sistema determina como reacciona el proceso al error y su capacidad para rechazar la alteración. Si la ganancia es grande el controlador aplicará una acción de control grande para corregir un error. Al reducir ostensiblemente la banda proporcional en el capítulo 11, el controlador fue forzado a producir un esfuerzo grande de control.

Si un esfuerzo grande de control está en capacidad de producir un cambio considerable en el valor medido, es muy probable que el valor medido sea llevado más allá del Set Point, lo cual invertirá el error. Esto a su vez producirá un esfuerzo del control grande y opuesto, que obliga a que el valor medido regrese nuevamente. Este es el comportamiento oscilatorio que puede ser mostrado.

En el capítulo 11, teoría 4, la banda proporcional tuvo que ser muy pequeña (cercana a menos del 4%) para producir oscilación, pero cuando se manejaba con el flujo se presenta oscilación del control para un valor mucho mas alto de la banda proporcional.

### TEORIA 2

#### BANDA PROPORCIONAL

Para una operación normal con un nivel “aceptable” (que significa no extremo) de la ganancia, el aumento en el flujo del tanque aumentará en el nivel del tanque pero solamente en una cantidad pequeña debido a que el tanque es grande (un tanque grande, por supuesto solamente



subirá una pequeña cantidad para una unidad de agua, mientras que un tanque pequeño subirá mucho más). Esto significa que la ganancia debe ser muy grande para producir un esfuerzo del control que cambie suficientemente el flujo para llevar el valor medido más allá del Set Point y así presentar una oscilación rápida (arranque rápido).

Esto sugiere que este requeriría un valor mucho más pequeño de ganancia del sistema para producir oscilación si el tanque fuera mucho más pequeño (mientras que el resto de la planta permanecía invariable). Esto es cierto si el tanque fuera un tubo largo; esto quiere decir que será mucho más fácil hacer oscilar el nivel del tanque más allá del Set Point debido a que una unidad de agua aumentaría ostensiblemente el nivel.

Al cambiar el flujo variando la posición de la servo-válvula, se cambiará la tasa del flujo en una proporción mucho mayor en comparación al cambio del nivel del tanque. Esto significa que le toma un esfuerzo mucho más pequeño al control forzar el valor medido del flujo más allá de su Set Point. Para un sistema dado, una ganancia que produce un esfuerzo del control, el porcentaje de cambio para el flujo será más grande que el porcentaje del cambio para el nivel.

Esto puede ser demostrado con algunos cálculos simples:

Un tanque, cuya área transversal sea 40cm X 20cm (800cm<sup>2</sup>), contiene 15 litros de agua. El flujo y el sobre flujo serán iguales, 3L/min. Debido a que el volumen de un litro de agua es 10cm x 10cm (1000cm<sup>3</sup>), 15 litros tendrá un volumen de 150cm x 10cm x 10cm (15000 cm<sup>3</sup>).

La profundidad del agua del tanque será la proporción del volumen de agua en relación al área transversal del tanque.

$$15.000\text{cm}^3/800\text{cm}^2 = 18.75 \text{ cm de profundidad}$$

El flujo es aumentado en 1litro / min, y no existe cambio para el sobre flujo. Después de 1minuto, habrá un litro extra de agua, y esto aumentará el nivel del tanque en:

$$1\text{litro} = 10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10 \text{ cm} = 1000 \text{ cm}^3$$

$$1000\text{cm}^3/800\text{cm}^2 = 1.25 \text{ cm (esta es la profundidad de un litro)}$$

El nivel del tanque tendrá un aumento de alrededor de 1.25 a 20 cm. Este es un aumento de:

$$100 \times (1.25/18.75) = 13.3\%$$

Pero el flujo a aumentado de 3 litros / minuto a 4 litros/minuto en 1 minuto. Este es el aumento del porcentaje:

$$100 \times (1/3) = 33.3\%$$

Para un esfuerzo dado del control, y por tanto para un valor dado del sistema de ganancia, el nivel del tanque aumentó en alrededor de solo 13.3%. Pero el flujo aumentó alrededor del 33.3%. Esto significa que se presentará oscilación mucho más rápido, al medir y controlar el flujo. En una situación de un proceso de circuito individual, el flujo o el nivel se utilizarían como variable del control.

Al medir y controlar el flujo la ganancia del sistema debe ser mucho más pequeña (y por tanto la banda proporcional debe ser mucho más grande). Aunque esta sección de la teoría ha estado discutiendo como el nivel de la ganancia produce oscilación, y a que nivel se presenta esta, debe apreciarse que en una situación de control, el objetivo es evitar la oscilación. La operación del

sistema debe comprenderse de tal forma que la banda proporcional nunca se construya tan pequeña como para que produzca oscilación.

### 13. CONTROL DE NIVEL PI Y PID

- **Teoría 1: Control proporcional integral**
- **Teoría 2: Acción de control de tipo derivativo**
- **Teoría 3: Control proporcional + integral + derivativo (PID)**

#### TEORIA 1

#### CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

La acción de control necesaria para corregir un error es directamente proporcional al mismo y por tanto el mínimo error posible es un valor finito. La forma de disminuir el error es utilizar una acción de control que produzca una acción de control para que el error se acerque a cero.

Esto se hace introduciendo un componente extra al esfuerzo de control el cual es la integral del error. Esto continuará cambiando hasta que el error sea cero, lo cual debe eliminar el error.

Los controladores que emplean la acción integral son descritos como “controladores de reestablecimiento automático”. Estos muestran una acción proporcional y una acción integral (la acción integral con frecuencia se denomina la acción de reestablecimiento).

La acción integral depende de una por una constante,  $T_r$ , la cual es el tiempo de reestablecimiento. La acción del control del proceso se describe así:

$$U_c = U_p + U_r$$

De donde  $U_p$  es el término proporcional y  $U_r$  es el término de reestablecimiento (integral)

De los capítulos anteriores se dedujo la expresión para el término proporcional:

$$U_p = K e$$

El término de reestablecimiento,  $U_r$ , es descrito por:

$$U_r = (K / T_r) \int e \, dt$$

La ecuación anterior muestra la posición de la constante de tiempo de refinación,  $T_r$ .

De tal forma que la acción de control se puede determinar por la siguiente expresión.

$$U_c = K [e + (1 / T_r) \int e dt ]$$

Esta ecuación describe la acción de un controlador automático de reestablecimiento.

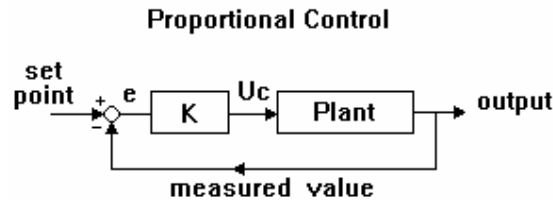


Figura 13.1  
(Control de tipo proporcional)

La figura 13.1 es el ejemplo del control proporcional previo donde:

$$U_c = K e$$

La figura 13.2 muestra la nueva configuración de la acción de control para producir el control PI. Ahora se puede observar que los distintos elementos  $U_c$  y  $U_r$  representan el término de reestablecimiento y  $U_p$  representa el término de la proporcionalidad.

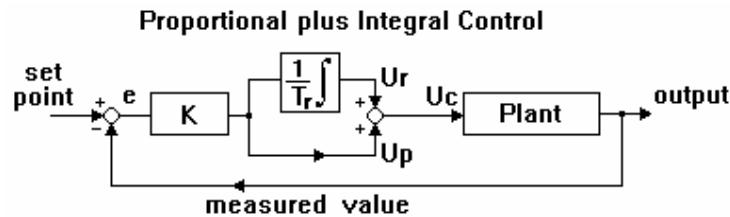


Figura 13.2  
(Control de tipo proporcional integral)

La constante del tiempo de reestablecimiento,  $T_r$ , es un parámetro muy importante debido a que regula la contribución de la acción integral para el esfuerzo de control en relación a una magnitud dada de tiempo.

Si a un integrador se le da una entrada de paso de duración fija su respuesta es una rampa. La pendiente de la rampa es controlada por  $T_r$ , mientras mas pequeña sea  $T_r$  mas inclinada es la rampa. Con una rampa inclinada, la contribución del término integral será grande en un tiempo dado y el tiempo tomado para reducir el error presente será corto.

Desafortunadamente no es posible continuar reduciendo  $T_r$  por medio del aumento de la acción integral y así eliminar el error. Al igual que con la banda proporcional habrá un nivel mínimo de tiempo de reestablecimiento constante que hace que el sistema sea inestable y esto debe evitarse. Con este nivel mínimo la acción integral será muy grande para el sistema y la oscilación.

Un problema que puede presentarse cuando se utilizan valores “normales” (por ejemplo no extremos) de  $T_r$  es el reestablecimiento de un determinado error. Esto se presenta cuando el aumento en la acción de control no reduce el error. Esta situación puede ser provocada por una falla en el sistema de control, como por ejemplo una válvula atascada de control que está completamente abierta. Si esto ocurre, la acción de control será una consecuencia debido a que la acción de control intenta reducir el error pero sin éxito.

Cuando la falla es despejada el error bajará rápidamente debido a la elevada acción de control. La salida del controlador, por otra parte, no está en capacidad de disminuir debido a una larga acción de reestablecimiento. Esto seguirá hasta que el valor medido haya sido conducido más allá del punto de fijación, produciendo el error opuesto para un tiempo suficientemente largo y así cancelar la acción del esfuerzo de control.

El resultado neto de esta acción es que existirá un gran overshoot del valor medido y una demora significativa antes que el sistema esté nuevamente bajo un control completo.

El proceso anti-reestablecimiento, es una técnica incorporada en los controladores modernos que incluye al 38 -300, el cual limita la acción de integración tan pronto como la salida del controlador se satura. Esto evita el proceso de acción de control y espera que se elimine el overshoot y se restaure lo más pronto el control.

La acción integral o de reestablecimiento es cubierta nuevamente en el capítulo 14. Los temas siguientes tratan los controladores PI y PID (proporcional + integral + derivativo). La teoría detrás de cada tipo de control se trata nuevamente y el control PI/PID se aplica a un proceso cuyo valor a medir es el flujo.

## TEORIA 2

### ACCIÓN DE CONTROL DE TIPO DERIVATIVO

El control proporcional reacciona inmediatamente a cualquier desviación pero es insensible a la tasa de cambio de la desviación. Al agregar una acción integral la ley de control elimina los errores a largo plazo (offset) pero si el error aumenta rápidamente sería aconsejable un esfuerzo muy grande de control (mucho más grande de los que una proporcionalidad directa simple pueda suministrar) para detener el error. El control PID agrega un término derivativa el cual es proporcional a la tasa de cambio del error.

Al considerar el esfuerzo de control de una forma similar a la teoría acerca de la acción integral se puede dividir de la siguiente forma:

$$U_c = U_p + U_r + U_d$$

Donde  $U_p$  es el término proporcional,  $U_r$  es el término de reestablecimiento y  $U_d$  es el término derivativa.

Los términos proporcionales e integrales ya se han descrito

$$U_p = k e$$

$$U_r = (K / T_r) \int e dt$$

El término derivativa se describe con la siguiente expresión:

$$U_d = k T_d (de/dt)$$

Donde  $T_d$  es el tiempo derivativa

El tiempo,  $T_d$ , es muy similar al tiempo del reestablecimiento,  $T_r$ . Donde  $T_d$  regula la contribución del término derivativo respecto al esfuerzo general de control.

El esfuerzo de control producido por un controlador PID es:

$$U_C = K [e + (1/T_I) \int e dt + T_D (de / dt)]$$

La constante de tiempo del término derivativo aparece en el numerador pero la constante de tiempo del término de la integral aparece en el denominador. Esto significa que un tiempo derivativo de 0 elimina cualquier acción derivativa pero se necesita de un tiempo infinito para eliminar toda acción de reestablecimiento.

La contribución derivativa es directamente proporcional a la tasa de intercambio de la desviación entre el valor medido y el Set Point. Como resultado el término derivativa será positivo mientras que la desviación esté en aumento y será negativo mientras que la desviación disminuya.

Cuando se considera la acción del controlador mientras el error está en aumento el término derivativo aumenta la acción de control y el aumento se determina por la rata de intercambio del error. Cuando el error disminuye el término derivativo reduce la acción de control debido a que la tasa del intercambio del error disminuye. Junto con la acción proporcional, esto produce un efecto de reestablecimiento debido a que el valor medido se aproxima al Set Point.

El efecto general del término derivativo es aumentar la velocidad de respuesta para mejorar el amortiguamiento de la oscilación y reducir el tamaño de overshoot.

La acción derivativa no participa en la remoción del offset presente en el control proporcional. Este offset es un estado de error estacionario y no tiene tasa de intercambio debido a que no es dependiente del tiempo y la derivada del offset es 0.

Desafortunadamente la acción derivativa no puede aplicarse a cada situación de control y no es apropiada para los sistemas con ambiente de ruido. Las señales de ruido contienen componentes de alta frecuencia los cuales son amplificados por la acción derivativa. Estos componentes amplificados de alta frecuencia se observan en la salida del controlador y causan grandes cambios en la posición del actuador. Aunque no afectan la planta en gran medida (debido a que la dinámica de la planta usualmente actúa como un filtro para las frecuencias altas), los cambios rápidos acortan el tiempo de vida del actuador. Las frecuencias altas pueden también provocar fluctuaciones en el suministro de energía.

También debe comprenderse que la acción derivativa es empleada con éxito en los sistemas que tienen variables que cambian rápidamente. La velocidad de reacción del nivel y las variables de flujo en este sistema no son suficientemente rápidas para “desaparecer” el potencial de acción derivativo.

Este hecho será demostrado posteriormente durante la auto-afinación del controlador donde se deciden los niveles mas apropiados para la banda proporcional, integral y derivativa para controlar el proceso.

La servoválvula no permite que la rata de flujo cambie lo suficientemente rápido como para requerir la característica de la acción de “freno” del componente derivativo.

Sin embargo existen ciertas situaciones en las cuales el término derivativo tiene gran uso. Por ejemplo el diseño de un servomotor que responde casi inmediatamente a las señales de entrada relacionadas con la velocidad y dirección. La entrada de la onda cuadrada al servomotor somete las reacciones del motor al máximo.

Si un servomotor está siendo accionado por una onda cuadrada de gran amplitud la respuesta del motor será similar a la figura 13.3. Se puede observar que existe un overshoot grande en los cambios de dirección.

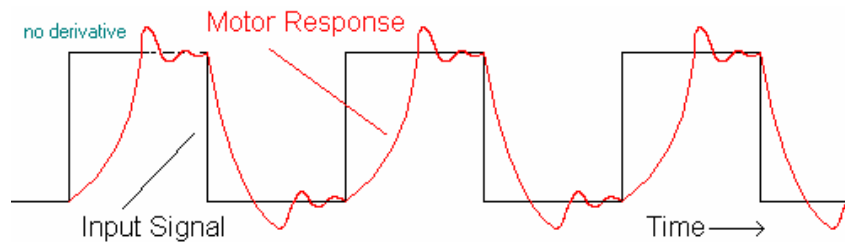


Figura 13.3  
(Señal de tipo onda cuadrada)

La figura 13.4 ilustra la resta y la suma de la acción derivativa que podría constituir la respuesta del servosistema. Existe todavía cierto overshoot pero el efecto del freno reduce el overshoot al mínimo.

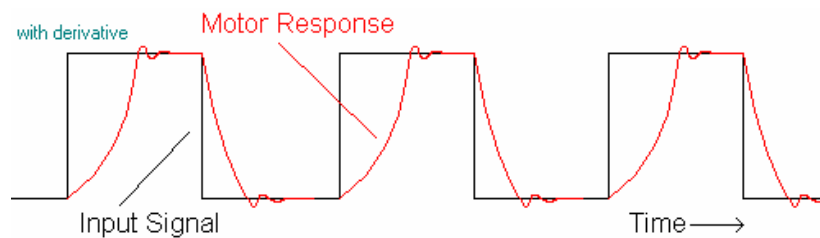


Figura 13.4  
(Señal con acción proporcional derivativa)

Se puede observar que la acción derivativa reduce considerablemente el overshoot de la respuesta.

### TEORIA 3

#### CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

La acción de control por parte de un controlador PID está constituida por tres términos. Cada término cumple una tarea específica en el control del proceso y cada uno requiere una consideración cuidadosa al operarlo. Los tres términos han sido introducidos; el control proporcional en los capítulos 11 y 12, el control integral y el control derivativo se tratan en este capítulo.

En esta sección el objetivo es estudiar los tipos de error. Para cada tipo los términos de control serán tenidos en cuenta para determinar que efecto tiene cada uno en la acción de control y como eliminar el error.

Para simplificar los siguientes ejemplos se asumen ciertos parámetros; tanto PB como el tiempo de reestablecimiento son suficientemente altos para evitar la oscilación y el tiempo derivativa, Td, es suficientemente bajo para evitar la oscilación.

La figura 13.5 muestra los casos de error que serán tenidos en cuenta.

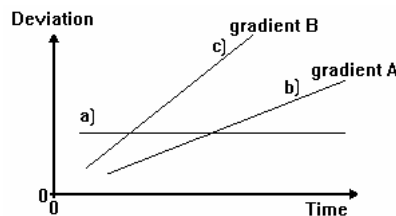


Figura 13.5  
(Tipos de error)

Las curvas muestran los tipos de error y el comportamiento de estos si no se aplica una corrección. Esto no ocurriría estrictamente debido a que un controlador tomaría cierta acción para eliminar el error ya sea que esta sea la acción correcta que se tome o no.

Caso a.: Error de posición (offset).

El término proporcional no puede eliminar este error debido a que se apoya en la existencia del error para producir cualquier acción de control.

La acción de reestablecimiento (integral) reduce el error debido a que el error reducido de esta forma reestablecería la posición, provocando una acción de control cero.

La acción derivativa solamente estaría presente cuando la acción de reestablecimiento hubiera comenzado a reducir el error (debido a que la derivada es la tasa de intercambio del error). Esto reduce la acción de control frenando la aproximación del valor medido en relación al Set Point y suavizando cualquier overshoot que pudiera ocurrir.

Caso b. Error integral (gradiente A).

El término proporcional intenta eliminar este aumento del error pero su acción solamente será dependiente del tamaño del error y no de la tasa de intercambio.

Para un aumento en el error la acción del reestablecimiento aumenta exponencialmente pero debido a que los otros términos disminuyen, el error rápidamente presenta una disminución en su gradiente.

La acción derivativa es el término importante debido a que es proporcional a la tasa de intercambio del error. La combinación de estos términos forzará la acción de control a disminuir el error hasta que éste finalmente cambie la dirección y el valor medido se aproxime al Set Point. Mientras más se acerque al Set Point más lenta es la disminución del error debido a que la acción proporcional está disminuyendo la acción de control y por tanto la tasa de intercambio del error y la acción derivativa.

Caso c. aumento del error (gradiente B,  $B \gg A$ ).

Esto es un caso muy similar al anterior (caso b), pero debido a que la tasa de intercambio del error es mayor, la acción derivativa será mucho más grande, aumentando el control del esfuerzo y corrigiendo el proceso de forma mucho más rápida que si no hubiera acción derivativa.



## 14. CONTROL DE FLUJO PI Y PID

- Teoría 1: Acción de reinicio del control PI
- Teoría 2: Los tres componentes del control PID

### TEORIA 1

#### ACCIÓN DE REINICIO DEL CONTROL PI

Esta sección de la teoría se apoya en el capítulo anterior y tiene en cuenta la acción de reestablecimiento y la acción de control representada gráficamente por las curvas teóricas de desviación. Esta teoría amplía el conocimiento de la acción de reestablecimiento del sistema y hará que se forme una idea acerca de la acción de control relacionado con las distintas formas de desviación producidas en situaciones prácticas. El control PID también será tenido en cuenta en la siguiente sección de la teoría.

Las representaciones gráficas de cada elemento de la acción de control aumentan la comprensión práctica de las distintas formas de control en mayor grado que la discusión puramente matemática y teórica. También permitir que se pueda realizar la configuración intuitiva y rápida de los elementos de un sistema de control.

Se espera que el vínculo entre los diagramas de bloques de la Ley de control y las características de las respuestas físicas sean más claras a medida que se avanza en las prácticas.

La figura 14.1 muestra la ley de control de un controlador PI.

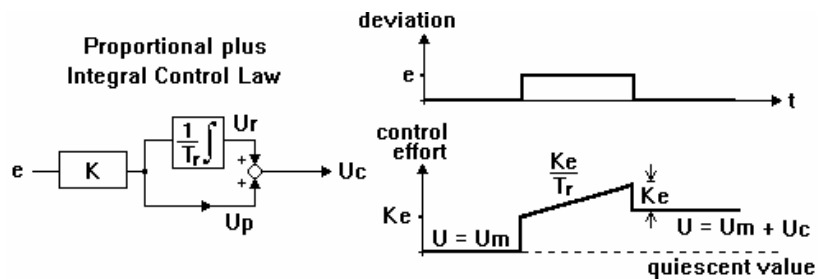


Figura 14.1  
(Acción de control de tipo PI)

La figura 14.1 muestra la respuesta a una desviación teórica de la entrada de paso. La constante del tiempo de reestablecimiento,  $T_r$ , es la variable que controla la contribución de la acción integral para la acción de control en relación a un lapso de tiempo dado.

Si a un integrador se le da una entrada por pasos con duración fija su respuesta es una rampa. La pendiente de la rampa es controlada por  $T_r$ ; mientras más pequeño el  $T_r$ , más empinada es la rampa. Con una rampa empinada la contribución del término de la integral será grande en un tiempo dado y se acorta el tiempo tomado para reducir el error que está presente.

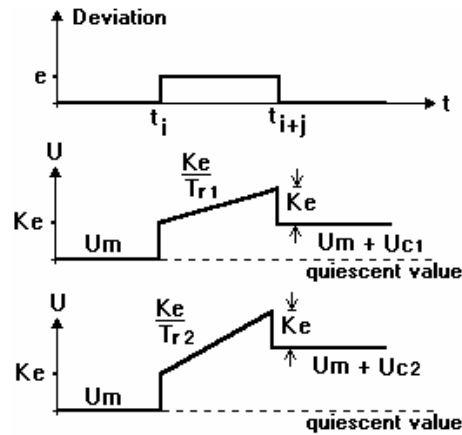


Figura 14.2  
(Respuesta del sistema a dos valores de  $T_r$ )

La figura 14.2 muestra las respuestas a dos valores  $T_r$  diferentes. Aquí  $T_r > T_{r2}$ .

La figura 14.2 muestra que antes del tiempo  $t_i$  la desviación es cero y el esfuerzo correspondiente del control,  $U$ , es el punto inactivo  $U_m$  (esto es usualmente un término para la acción de control manual). En el tiempo,  $t_i$ , la desviación se convierte en valor positivo,  $e$ , y la acción de control aumenta para  $K_e$ , lo cual es el resultado del término de control proporcional ( $U_p$ , se introdujo anteriormente).

La acción de control es entonces, una pendiente creciente del gradiente  $K/T_r$  debido al término de la acción de reestablecimiento,  $U_r$ . La integral de una curva es una medida del área bajo la curva, de tal forma que el área bajo la entrada por pasos incrementa a una rata constante. Con un valor pequeño para  $T_r$ , la pendiente es empinada y por tanto la contribución de la acción de reestablecimiento al esfuerzo del control es grande.

En el tiempo  $t = t_{i+j}$ , la desviación,  $e$ , se convierte nuevamente en cero y esto retira el término proporcional de la acción de control (debido a que  $U_p = K_e$ ); por tanto la acción de control disminuye por medio de una cantidad  $K_e$ . El término integral se ha convertido en una constante, debido a que el área bajo la curva ya no está aumentando.

Teniendo en cuenta los términos presentes durante cada periodo de tiempo pueden obtenerse las siguientes expresiones que describen la acción de control:

$$\text{Antes del momento, } t_i, \text{ la acción de control } U = U_m$$

$$\text{En el tiempo } t_i \quad U = U_m + U_p$$

$$\text{Desde } t_i, \text{ a } t = t_{i+j} \quad U = U_m + U_p + U_r$$

$$\text{Después de } t = t_{i+j} \quad U = U_m + U_r$$

Debe recordarse que la figura 14.2 solamente muestra la desviación y el esfuerzo correspondiente al control. Esto en efecto es un sistema de circuito abierto debido a que el efecto de la acción de control sobre la desviación presente no se tiene en cuenta. En una aplicación real la desviación no sería una entrada por pasos, debido a que la acción de control que se produce lo cambiaría (se espera que lo reduzca).

## TEORIA 2

### LOS TRES COMPONENTES DEL CONTROL PID

De una manera similar a la anterior sección acerca de la acción de reestablecimiento el PID se considera de forma grafica, dividiendo la acción de control en sus partes componentes; así es más fácil comprender como se crea la acción final del control.

El diagrama siguiente muestra la ley de control de un proceso realizado por el control PID.

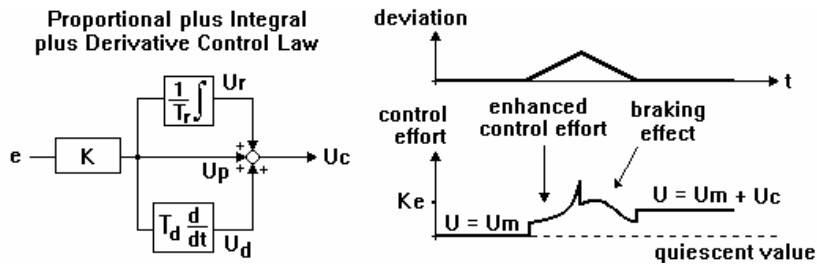


Figura 14.3  
(Control de tipo PID)

El aumento y los efectos de frenado sobre la acción derivativa del esfuerzo de control son claramente visibles.

El método de la derivada es más apropiado para los procesos cuyas variables cambian con rapidez y frecuencia. En tales procesos puede observarse el efecto del frenado de la componente derivativa.

Al igual que antes, la ley de control no puede construirse aisladamente tal como se muestra en el diagrama (Fig 14.3); Debe ser siempre un elemento de un circuito completo de retroalimentación debido a que su entrada representa la desviación entre el valor medido y el Set Point del sistema. Al producir una acción de control se cambia el perfil de la desviación que suministra la entrada pero éste no se toma en cuenta.

La ley de control muestra los términos del control PID y las expresiones que describen el comportamiento de cada uno. La curva superior es un perfil de desviación que tiene dos regiones obvias; la primera aumenta con una pendiente constante y la segunda disminuye a una pendiente constante. La curva inferior es el esfuerzo correspondiente del control producido por la desviación.

La figura 14.4 muestra los tres términos de la acción de control con la desviación en la parte superior.

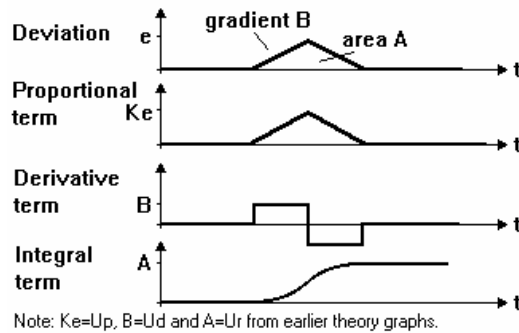


Figura 14.4  
(Respuesta del sistema al control PID)

Por medio de la figura 14.4 se puede observar las dos regiones definidas de desviación y las regiones correspondientes de cada componente de control.

Un punto importante a obtener es el perfil de la acción de control (el cual es la combinación de tres componentes) es el aumento y los efectos del frenado causado por la acción derivativa.

Aunque el error aumente la componente derivativa incrementa considerablemente la acción de control más allá de la sola proporcionalidad, para así detener el avance de la desviación lo más rápido posible. Aunque la desviación disminuye (el valor medido se aproxima al Set Point), la acción derivativa reduce la acción de control de tal forma que disminuye el ritmo de la aproximación del valor medido y la posibilidad de overshoot /oscilación es menor.

Esto se observa en la acción de control por medio “del pico” a medida que aumenta la desviación y que existe descenso a medida que la desviación disminuye.

## 15. SINTONIZACION DEL CONTROLADOR PID

- **Teoría 1: Afinación del controlador de proceso**
- **Teoría 2: Método repetitivo para la afinación**
- **Teoría 3: Método de afinación para la curva de reacción**

### TEORIA 1

#### AFINACIÓN DEL CONTROLADOR DE PROCESO

La afinación de los controladores de procesos es un procedimiento para seleccionar los parámetros de la acción de control que producirán un rendimiento deseado del sistema. La solución ideal es la simulación debido a que esto produce valores antes que el sistema sea operacional, de tal forma que el inicio del sistema estará corriendo con los parámetros afinados. Desafortunadamente, esto no siempre es posible.

El rendimiento deseado de un sistema es completamente dependiente del mismo pero existen criterios para el rendimiento del sistema que pueden ser aplicados a todos los sistemas. Por ejemplo, el objetivo de la afinación podría ser reducir a un mínimo el overshoot de la variable de proceso mientras se mantiene simultáneamente una respuesta rápida.

Un criterio de rendimiento comúnmente deseado para el afinamiento de los controles está representado por la fijación de los parámetros afinados que producen una respuesta transitoria con una disminución de la proporción de  $\frac{1}{4}$ . La respuesta transitoria de un sistema es su reacción a un cambio en la entrada en relación a un periodo de tiempo, normalmente el tiempo que está entre dos estados estacionarios. Esto se demuestra en el diagrama siguiente.

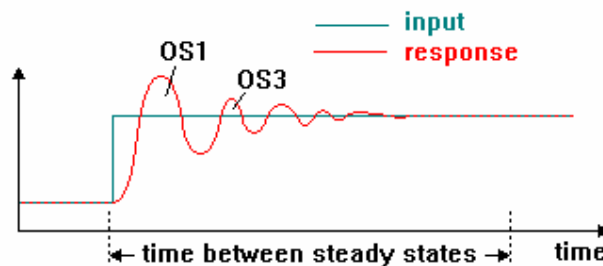


Figura 15.1  
(Overshoot de la señal de salida del sistema)

La disminución de la proporción es la proporción entre el tamaño de los overshoot sucesivos y se demuestran en la figura 15.1. La disminución de la proporción es:

$$OS3 / OS1 = \frac{1}{4} \text{ (para un sistema afinado)}$$

En este tema se tienen en cuenta tres métodos de afinación: el ciclado repetitivo, la curva de reacción y la auto afinación realizadas automáticamente por el controlador. Los primeros dos métodos se discutirán teóricamente y el ciclado continuo y la auto afinación serán implementados.

## TEORIA 2

### MÉTODO REPETITIVO PARA LA AFINACIÓN

El primer método de la afinación que se discute y uno de los más utilizados en la industria es el método del ciclado continuo de afinación de Zeigler – Nichols. Este método esta basado en un artículo publicado por Zeigler – Nichols en 1942 que estableció una serie de reglas empíricas para la afinación de los controles.

El objetivo del ciclado continuo es encontrar experimentalmente el valor de la ganancia (o el valor de PB para ser precisos) el cual produce estabilidad marginal. La estabilidad y el amortiguamiento son dos características importantes de un sistema y se muestran en el siguiente diagrama.

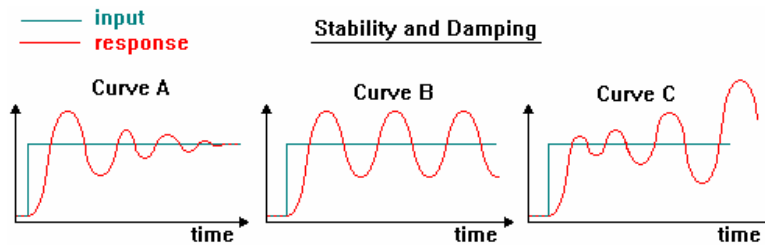


Figura 15.2  
(Diferentes tipos de señal de salida del sistema)

La curva A muestra un sistema cuya ganancia del controlador es tal que sus oscilaciones disminuyen. Este sistema es sobre-amortiguado, la curva B muestra un sistema cuyas oscilaciones son sostenidas y no aumenta ni disminuye, este sistema se considera marginalmente estable. Su ganancia es tal que es críticamente amortiguado. La curva C muestra un sistema que es inestable. Sus oscilaciones aumentan y la ganancia es tal que es subamortiguado. Las ganancias del sistema  $K_1$  son las siguientes:

$$K_a < K_b < K_c$$

El objetivo es encontrar el valor de una banda proporcional que produce estabilidad marginal y se utiliza el siguiente método práctico:

1. Se coloca el controlador en un modo de control manual y se logra un estado estacionario con el sistema en su condición normal de operación.
2. Se retiran todas las acciones del control excepto las proporcionales. Como se debe recordar, la acción de refinación es retirada cuando  $T_r = \text{máximo}$  (7201 en este caso) y la acción derivativa es retirada cuando  $T_d = 0$

3. Se selecciona una banda proporcional de tal forma que la ganancia del control sea pequeña
4. Se establece el switch del controlador para el control automático; esto no debe producir ninguna acción de control (esta es una transferencia sin choque) e introduce un pequeño cambio en el Set Point en la región del 5 al 10%.
5. Se observa la respuesta del sistema a este cambio.
6. Se switchea nuevamente el controlador a la operación normal y se restaura el sistema a la condición original de operación estacionaria con el valor medido igual al Set Point.
7. Se reduce la banda proporcional y se repiten los pasos 4, 5, 6 y 7 hasta que el sistema muestre oscilaciones sostenidas. En este punto el sistema es marginalmente estable.

En el punto de estabilidad marginal se registra el valor de la banda proporcional; esta es la banda proporcional final  $PB_u$ . También el periodo de oscilación es registrado; este es el periodo final  $T_u$ .

<u>Continuous Cycling Zeigler-Nicholls Tuning</u>			
Control Algorithm	Controller PB	$T_r$	$T_d$
P	$2PB_u$	—	—
PI	$2.2PB_u$	$T_u/1.2$	—
PID	$1.7PB_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Figura 15.3  
(Parámetros de afinación por el método Zeigler-Nichols)

Mediante el uso de  $PB_u$ ,  $T_u$  y la tabla anterior de fijaciones recomendadas por Zeigler-Nichols, las contribuciones de la acción de control son calculadas para cada tipo de algoritmo de control.

### TEORIA 3

#### MÉTODO DE AFINACION PARA LA CURVA DE REACCIÓN

Este método proviene de la misma fuente que proviene el método del afinamiento del ciclo continuo pero utiliza la prueba del circuito abierto para determinar los parámetros de afinación. Este método es más apropiado para los procesos de reacción lenta donde la oscilación crea un rizado que vuelve incontrolable el sistema.

La afinación de la curva de reacción es muy simple de realizar y el método básico se describe a continuación:

1. Con el controlador en el modo manual se coloca el sistema de proceso en una condición de operación estacionaria tanto para la variable medida como para el Set Point
2. Se aplica un pequeño cambio por pasos a la salida del controlador y se registra la respuesta del sistema

Este método se denomina método de la curva de reacción debido a que utiliza la respuesta a la curva de reacción del sistema para determinar los valores de los parámetros de afinación. Un ejemplo de curva de reacción se muestra a continuación (Fig 15.4). Esta es una curva típica de la respuesta del sistema, esta respuesta presenta forma de S y muestra los retardos que se presentan con un proceso dinámicamente lento.

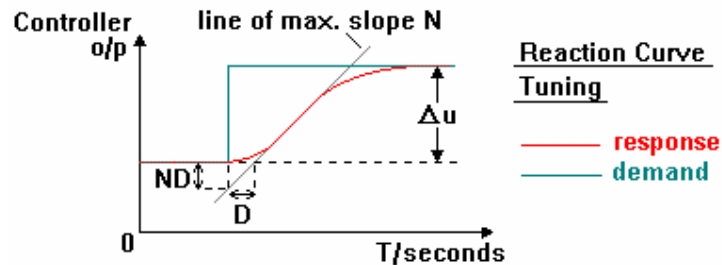


Figura 15.4  
(Curva de reacción para la afinación del sistema)

El primer paso es encontrar la línea de inclinación máxima en la curva de reacción  $N$  y trazar la tangente de este punto. El siguiente paso es el retardo efectivo,  $D$ , el cual se encuentra entre la aplicación del cambio por pasos y un punto en el cual la tangente de la inclinación  $N$  cruza la línea del valor de salida inicial del controlador. Ambas se observan en el diagrama

El cambio fraccional en la salida del controlador se calcula mediante la demora efectiva,  $D$ , la línea máxima de inclinación,  $N$ , de la tabla de Zeigler – Nichols de valores recomendados se calculan los parámetros de afinación.



Control Algorithm	PB	$T_r$	$T_d$	
P	$\frac{ND}{\Delta u}$	—	—	$\Delta u$ – fractional o/p change
PI	$\frac{ND}{0.9\Delta u}$	$\frac{D}{0.3}$	—	N – maximum slope of response
PID	$\frac{ND}{1.2\Delta u}$	$\frac{D}{0.5}$	$\frac{D}{2}$	D – effective delay

Figura 15.5  
(Parámetros de afinación de Zeigler-Nichols)

Para ambos métodos de Zeigler-Nichols existen dos expresiones para calcular todos los parámetros de control para los tres algoritmos del control P, PI, y PID. Al considerar las diferencias entre estos algoritmos se obtiene mas claridad acerca de cómo se determinan las constantes de las expresiones.

En el cambio de P a PI la ganancia del controlador debe reducirse (aumento del PB) debido a que la acción de la afinación aumenta el riesgo de oscilación del sistema. Al cambiar de PI a PID la ganancia del controlador puede aumentar debido a que la acción derivativa se opone a los cambios en la variable medida reduciendo la posibilidad de oscilación.

## 16. CONTROLADOR DE PROCESO: AVANZADO

- Teoría 1: Programación del perfil

### TEORIA 1

#### PROGRAMACIÓN DEL PERFIL

El perfil es una curva en relación a un periodo de tiempo el cual sube, decae o cambia normalmente. Hasta ahora el perfil del Set Point ha estado solamente implementado por pasos debido a que se puede cambiar con las barras de control en la pantalla. El controlador contiene un medio para producir perfiles que presentan rampas lo cual le permite crear muchos tipos diferentes de perfiles, incluidas las ondas que tienen forma de dientes de sierra.

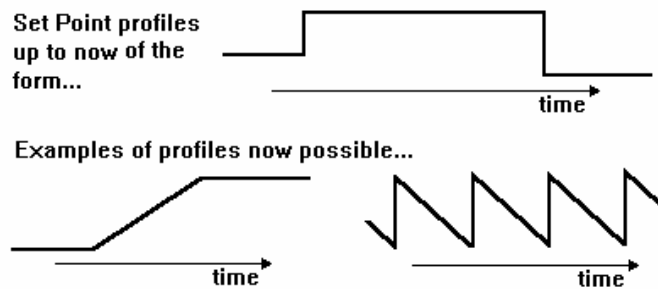


Figura 15.2  
(Curvas de perfil)

El controlador permite ingresar a un programa para crear el perfil o le permite escoger entre nueve grupos de hasta 31 segmentos y cada grupo es un proceso vacío. Se puede decidir la configuración de cada programa definiendo el número de segmentos, el nivel de inicio de cada segmento y el lapso de tiempo que dura cada segmento. Se puede luego seleccionar cuantas veces repetir cada programa y seleccionar hasta cuatro programas que van a ser ejecutados en cualquier orden.

El ambiente de programación del perfil también tiene una característica de retención la cual pausará el programa cuando se cumpla una de las tres condiciones.

El retención manual n – HLD switchea el controlador al modo manual y mantendrá el programa en funcionamiento.

OPERAT opera presionando enter o una señal única de entrada lógica (si se asigna en la página de control del montaje) mantendrá el programa.

H – bACK el programa se retiene si la variable de proceso se desvía más que el valor de histéresis asignado en el perfil.

La página de programación se reasumirá cuando vuelva a estar dentro del límite de la histéresis.

### **Programación de un perfil:**

Existen dos páginas que se pueden utilizar al hacer la programación y una tercera que monitorea el programa cuando éste está corriendo. La primera página es la página de programación del perfil ('PrOFLE PrOGr\_`) y sus parámetros son:

PrOFLE (activación del perfil), éste activa la característica de programación del perfil y debe estar en ON.

PrOGr\_ (selección del programa), representa el número del programa que se va a programar.

PG -bEG (inicio del programa): inicia el segmento (0-29).

PG - End (terminación del programa): termina el segmento (1-30).

LEUL X' (segmento X nivel de inicio). Este es el nivel del Set Point para que el primer segmento inicie en X, representando el número de inicio del segmento (cualquier valor entre 0 y 100%).

Los siguientes dos parámetros son establecidos para cada segmento del programa por ejemplo (PG -bEG= 1 y PG - End= 10, por tanto este se ciclará hasta el nivel y el tiempo en que haya sido fijado cada segmento).

tl-E x` (segmento X periodo de tiempo): la longitud del segmento X se mantiene durante cualquier valor desde 0.0 hasta 999.9 segundos.

LEUL xx (segmento xx nivel de inicio): este es el nivel del Set Point en el cual el segmento presente (x) termina y en el cual el siguiente segmento (xx) inicia. Cuando todos los segmentos son programados la página del parámetro continúa.

rEPEAt (repetición del programa): Es el numero de veces que se repite este programa (1-99 veces).

HYSt. (Histéresis del programa): si la variable de proceso se desvía mas allá de este valor, el programa se mantiene hasta que retorne dentro de este limite (cualquier valor entre 0 y 100%).

Una vez la página de programación del perfil se establece, la pagina PrOFLE StAtES (estados del perfil) es programada así:

PrOGr (selección del programa): aquí son seleccionados los números del programa que se van a correr. Se pueden correr hasta 4 programas en una sección, en cualquier orden. En la exhibición inferior del controlador, se selecciona el número del programa y se ingresa. Si van a ser ejecutados menos de 4 programas se ingresa el carácter terminador (éste está representado por tres líneas horizontales).

t\_ dLY (demora del tiempo): representa la demora en el conteo antes que el perfil se inicie (cualquier valor 0.0 a 999.9 minutos).

StArt (corrimento del perfil de inicio): este da inicio al perfil.

Una vez inicia el perfil, está a disposición el parámetro del sostenimiento y se muestra el estado de sostenimiento. Si no existe sostenimiento éste estará en OFF. Existe también la opción de reestablecer el perfil presente y también saltarse el segmento presente. Estos están a disposición mientras el perfil esta corriendo.

También mientras el perfil está corriendo existe una pagina de operación del perfil P \_ StAt. Esta contiene los siguientes parámetros.

P \_ StAt (status del perfil): este muestra el status actual del perfil, puede estar en cualquiera de las siguientes formas:

STOP: espera la acción del operador.

SOAK: el Set Point es constante en el segmento presente.

rA\_P (rampa): el Set Point sube o baja por el segmento presente.

C\_dO (conteo): existe una demora en el tiempo antes del inicio.

Hb\_HLd, OP\_HLd, \_n\_HLd: una de las características de sostenimiento ha sido activada.

End: ha concluido el perfil presente.

T\_Strt (tiempo de conteo): representa el tiempo de demora antes del inicio, si se fijó en la página de los estados del perfil.

PrG \_ SEG: programa actual y segmento.

t\_SEG: el tiempo remanente antes que termine el segmento presente.

rPt\_Ct: el conteo de repetición del programa es el número de repeticiones que sobresalen del programa presente.