

50521
1



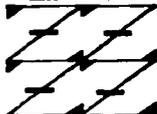
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FES "ZARAGOZA"

DESARROLLO DEL ALGORITMO PID PARA
MICROCONTROLADORES TIPO BASIC STAMP PARA
EL MONITOREO DE LAS VARIABLES DE PROCESO
UTILIZANDO SENSORES DIGITALES.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
RICARDO LANDARIO GARCIA

UNAM
FES
ZARAGOZA



LO HUMANO EJE
DE NUESTRA REFLEXIÓN

MEXICO D.F.

2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

ASUNTO: Revisión Oficial del
Trabajo de Tesis

AL JEFE DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA
P R E S E N T E

Por medio del presente, hacemos de su conocimiento la aprobación al trabajo recepcional, desarrollado bajo mi asesoría por parte del alumno (a):

ANDARIO GARCIA RICARDO

pasante de la carrera de Ingeniería Química, bajo el título:

DESARROLLO DEL ALGORITMO PID PARA MICROCONTROLADORES TIPO
BASIC STAMP PARA EL MONITOREO DE LAS VARIABLES DE PROCESO
UTILIZANDO SENSORES DIGITALES.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México D. F. a 22 de OCTUBRE del 2002.

EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA
Nombre y firma del Asesor del
Trabajo Escrito



Vo. Bo

M. EN C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA
JEFE DE LA CARRERA

c. c. p. Unidad de Administración Escolar
c. c. p. Interesado

NOTA: La impresión definitiva del trabajo, no se podrá efectuar hasta obtenida la aprobación por parte de los Sinodales para Examen Profesional.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/074/02

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: ANDARIO GARCIA RICARDO

P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	I.Q. Eduardo Vázquez Zamora
Vocal:	I.Q.P. Salvador J. Gallegos Ramales
Secretario:	Dr. Roberto Mendoza Serna
Suplente:	I.Q. José Antonio Zamora Plata
Suplente:	M. en C. Néstor Noé López Castillo

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”
México, D. F., 24 de Septiembre de 2002

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA

SECRETARÍA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

C

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES:

RAFAEL ANDRÉS JACOME

y

ALICIA GARCÍA CASTILLO

*Por su valioso ejemplo y cariño que siempre me han brindado.
Por su esfuerzo y cuidados, sacrificios y desvelos.
Por ayudarme a cumplir con el logro de ver finalizado una meta,
que por mucho tiempo venía alcanzando y que el día de hoy se ve
reflejada en este trabajo.*

GRACIAS.

A MI ESPOSA

Por tu gran ayuda, apoyo y amor, en todos los momentos que estés a mi lado.

A MI HIJA

Con todo el amor de mi corazón.

A MIS HERMANOS

Por su apoyo incondicional e inmensa motivación.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Por darme la oportunidad de cursar y concluir una carrera profesional.

A MIS PROFESORES

Por transmitirme sus conocimientos y orientarme a la vida profesional.

AL I. Q. EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA

Un agradecimiento especial por su paciencia y ayuda para la realización de este trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

D

INDICE

INTRODUCCION

CAPITULO I. GENERALIDADES

- 1.1 Antecedentes del control de procesos
- 1.2 Partes constitutivas de un sistema de control
 - Variables de entrada
 - Variables de salida
- 1.3 Diseño y modelado de un sistema de control

CAPITULO II. SISTEMAS DE CONTROL

- 2.1 Clasificación de los sistemas de control
 - Sistemas de control de circuito abierto
 - Sistemas de control de circuito cerrado
 - a) Sistema de control on-off
 - b) Sistema de control de cascada
 - c) Sistema de control feedback (retroalimentado)
 - d) Sistema de control feedforward (prealimentado)
- 2.2 Partes constitutivas de un circuito de control cerrado

CAPITULO III. MODOS DE CONTROL

- 3.1 Controlador automático
- 3.2 Modos de control
 - a) Control proporcional
 - b) Control de dos posiciones
 - c) Control integral (Reajuste automático)
 - d) Control proporcional con integral
 - e) Control derivativo (Anticipación)
 - f) Control proporcional con acción integral (Reajuste automático) y acción derivativa
- 3.3 Aplicación de los modos de control

CAPITULO IV. ESTABILIDAD DEL PROCESO

- 4.1 Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz
 - Casos especiales
- 4.2 Criterio de estabilidad de Root Locus
 - Construcción de la curva de localización de raíces (Root Locus)

CAPITULO V. ALGORITMO PID Y METODOS DE SINTONIA

- 5.1 El Circuito de control
 - Control básico de retroalimentación
 - Válvula lineal
 - Características instaladas: válvula lineal
 - Válvula de apertura por falla

- 5.2 El proceso de respuesta al controlador
 - Relaciones de estado estable: relación de cambio en válvula a cambio de medida
 - Relaciones a estado estable: cambio en carga
 - Dinámica de proceso: retardo simple
 - Dinámica al proceso: tiempo muerto
 - Medida de la dinámica
 - Perturbaciones

- 5.3 El Algoritmo PID
 - Acción
 - Automático / manual
 - Conceptos claves
 - El Algoritmo de control PID
 - Proporcional
 - Proporcional- salida vs medida
 - Proporcional-compensación
 - Proporcional-reducción de compensación con restablecimiento manual
 - Añadir restablecer automático
 - Restablecer o modo integral
 - Derivativo
 - Respuesta completa al PID

- 5.4 Conceptos adicionales PID
 - Algoritmo interactivo o no interactivo
 - Conversión entre interactivo y no interactivo
 - Retroalimentación externa
 - Propiedades de saturación

- 5.5 Otras características del controlador
 - Ganancia en el proceso en vez de error

- 5.6 Sintonización del circuito
 - Criterios de sintonía
 - Criterio matemático
 - Pruebas de sintonía en línea

- Método de sintonía de Ziegler Nichols: porcentaje de reacción en circuito abierto
- Método de sintonía de Ziegler Nichols: punto de inflexión de circuito abierto
- Método de sintonía de Ziegler Nichols: ganancia en el proceso de circuito abierto
- Método de sintonía de Ziegler Nichols: circuito cerrado
- Controlabilidad de procesos
- Flujo de circuitos

CAPITULO VI. BASIC STAMP Y DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL PID

- 6.1 Basic Stamp, arquitectura y tipos
- 6.2 Tamaños y paquetes
 - a) PCBOARD
 - b) OEM BASIC STAMP I Y II.
 - c) SURFACE MOUNT
 - d) CHIP
- 6.3 Conexión del Basic Stamp a una PC
- 6.4 Descargando el programa usando windows 95/98/NT 4.0 software editor
- 6.5 Buscando el Basic Stamp correcto
- 6.6 Descripción del algoritmo PID para el microcontrolador Basic Stamp

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El uso de Microcontroladores ha sido de gran utilidad en muchas áreas de la ingeniería, ya que éstos tienen variadas aplicaciones, que van desde controlar un aparato eléctrico hasta controlar reactores químicos o hasta un satélite artificial.

El modo de control de éstos microcontroladores varía dependiendo la complejidad de las variables de proceso a controlar. Asimismo, el microcontrolador forma parte de un sistema de control, el cual es una interconexión de componentes que satisfacen una función deseada, como mantener variables de proceso dentro de valores especificados. Los componentes de éstos sistemas son básicamente: un elemento detector, un transmisor, un amplificador, dispositivos de indicación y dispositivos de control. Estos dispositivos pueden ser eléctricos, electrónicos, mecánicos y/o electromecánicos.

Para medir una variable física como presión, temperatura, flujo, pH, etc, se emplean sensores los cuales detectan las condiciones de las variables y son transmitidas a un dispositivo de acondicionamiento de la señal, o bien, directamente al dispositivo analógico-digital. El dispositivo de acondicionamiento de la señal, amplifica y filtra la señal del sensor para que pueda ser empleada por el dispositivo analógico-digital, el cual convierte el voltaje o corriente a un formato digital usado por el Microcontrolador.

Existe una gran diversidad de microcontroladores usados en la industria, pero en especial, el uso de los microcontroladores Basic Stamp ha tenido un gran auge, debido a su facilidad de programación, su eficiente resolución y su gran rendimiento, además de su bajo costo. En este trabajo se pretende realizar un estudio sobre éste tipo de microcontroladores, a su vez, conocer los diferentes modelos como el BSI, II, Ite, IIsx y hacer notar la diferencia entre éstos.

Para mayor confiabilidad del Microcontrolador; éste tiene que estar sintonizado previamente, utilizando algunos métodos que se explicarán en la siguiente tesis, además su estabilidad es de gran importancia, así como su debida programación basada en un algoritmo Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

Los Microcontroladores Basic Stamp, proporcionan los siguientes beneficios tanto en condiciones de operación normal y de emergencia:

1. Medir e indicar el estado de las variables de proceso y del equipo (temperatura, presión, nivel, flujo, humedad, pH).
2. Analizar los datos con ayuda de software (programas).
3. Mantener la potencia de la planta dentro del rango de operación deseado.
4. Proporcionar al operador toda la información requerida para la operación segura y efectiva de la planta.

5. Proteger los sistemas y equipo, cuando los límites asignados de los parámetros físicos sean excedidos.
6. Efectuar un paro seguro de la planta en cualquier circunstancia de operación.
7. Proveer una respuesta apropiada de control para que influya en el proceso y así mitigar las consecuencias de un accidente por la acción de los sistemas de seguridad.
8. Activar al dispositivo apropiado para estabilizar el proceso y mantenerlo bajo control.

El interés primordial sobre el control de los procesos es obtener productos más uniformes y de más alta calidad mediante la aplicación del control automático, lo cual representa mayor ganancia. Los beneficios económicos incluyen la reducción de los costos de operación, mantenimiento y productos fuera de especificación; junto con el mejoramiento de la funcionalidad del proceso y una mayor producción.

CAPITULO

J

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES DEL CONTROL DE PROCESOS

En 1920 la instrumentación y el control de procesos industriales se reducían a una simple indicación local de las variables en cuestión y su corrección manual por medio de un elemento final de control. En ese mismo año surge la instrumentación mecánica y neumática, haciendo necesaria la construcción de cuartos de control adyacentes al proceso y aplicando algunas técnicas de control automático.

Durante la década de los '40, los métodos de: Transformada de Laplace y de respuesta de frecuencia, posibilitaron a los ingenieros el diseño de sistemas de control realimentado que satisfacían las necesidades de comportamiento.

De 1960 a 1970 la instrumentación tuvo como consecuencia la miniaturización del equipo electrónico, con esto se logró el aumento de la información de proceso en un área determinada de los tableros de control (uso de esquemas gráficos y semigráficos); también se permitió la aplicación efectiva de estrategias de control centralizado y la sofisticación del control mediante el uso de computadoras digitales.

El control automático ha jugado un papel de vital importancia en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su extrema importancia en vehículos espaciales, en guiado de proyectiles y sistemas de pilotaje de aviones, etc., el control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos. Por ejemplo, el control automático resulta esencial en operaciones industriales, tales como: el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de procesos; maquinado, manejo y armado de piezas mecánicas en la industria de fabricación de equipo mecánico, por citar algunos de los más importantes.

La ingeniería de control se basa en la teoría de realimentación y en el análisis de sistemas lineales e integra los conceptos de las teorías de redes y de comunicación. Por tanto, la ingeniería de control no está limitada a ninguna disciplina de la ingeniería, sino que igualmente es aplicable a las ingenierías aeronáutica, química, mecánica, del medio ambiente, civil y eléctrica. Por ello, un sistema de control incluye con frecuencia componentes eléctricos y/o mecánicos por ejemplo: termopares, tubo bourdon, flotadores, válvulas de apertura, entre otros.

Actualmente, las plantas más industrializadas emplean sistemas de control por computadora. Estas son empleadas para llevar a cabo la optimización del proceso a través de los siguientes puntos:

1. Aprovechamiento de las materias primas
2. Reducción del tamaño del equipo de proceso
3. Optimización de la energía
4. Menor desgaste del equipo
5. Uniformidad de los productos
6. Aumento en la productividad
7. Menor costo en mano de obra
8. Mejoramiento en la calidad del producto

El control de los procesos es un requisito fundamental para mantener la seguridad de operación a niveles deseados. En nuestro país al igual que en otros, existen leyes estatales y federales que especifican a que temperaturas, concentraciones y flujos de las especies químicas se deben emplear para proporcionar a la comunidad la seguridad apropiada; además del funcionamiento de los equipos. Estas leyes han establecido normas basadas en criterios de diseño. Estos criterios se establecen a partir del acervo técnico producto de los códigos como: API, ANSI, TEMA, ASTM, ISA, NEC, CFE, etc. Por ejemplo, el Basic Stamp I y II trabajan de 0° a 70°C con un 70% arriba. El OEM Basic Stamp I y II trabajan de -40° a 85°C con rangos de -40° a 125°.

1.2 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN SISTEMA DE CONTROL

Las variables presentes en un proceso industrial, se mantienen dentro de sus rangos deseados o cerca de un valor establecido de operación mediante un sistema de control. Por lo que definiremos sus partes constitutivas:

La **variable de proceso** es cualquier condición o estado que está sujeto a cambiar; estas se pueden clasificar de la siguiente forma:

- 1.- Variables relacionadas con la energía:
 - a) Temperatura
 - b) Presión
 - c) Electricidad
 - d) Sonido
 - e) Radiación
- 2.- Variables relacionadas con la cantidad y el gasto:
 - a) Flujo
 - b) Nivel
 - c) Peso
 - d) Velocidad
- 3.- Variables relacionadas con las características físicas y químicas del material:
 - a) Densidad
 - b) Humedad
 - c) Viscosidad
 - d) Composición
 - e) Ph

Partiendo de la definición de sistemas de control, las variables de un proceso industrial se dividen en dos grupos:

- a) Variables de entrada
- b) Variables de salida

VARIABLES DE ENTRADA

Las variables de entrada son aquellas que denotan los efectos de los alrededores en el proceso y se clasifican en:

- a) Variables ajustables y
- b) Disturbios

Las variables ajustables son aquellas cuyos valores pueden ser ajustados libremente, ya sea por un operador o por un mecanismo de control.

Los disturbios son aquellas variables que no se pueden controlar y que afectan la estabilidad de un proceso. Entre los más comunes se tienen los siguientes:

1. Disturbio escalón.
2. Disturbio pulso
3. Disturbio impulso
4. Disturbio rampa
5. Disturbio senoidal

Cabe señalar que estos disturbios son considerados como los más importantes para el análisis de los sistemas en la teoría de control; aún cuando su representación es sólo una aproximación a la realidad.

Disturbio escalón.- La perturbación o disturbio escalón es una función que cambia instantáneamente de un nivel a otro y enseguida se mantiene constante. Si la medida del disturbio es igual a la unidad, el disturbio se llama unitario y es definido como:

$$\left\{ \begin{array}{ll} X = 1 & \text{cuando } t > 0 \\ X = 0 & \text{cuando } t \leq 0 \end{array} \right.$$

La representación gráfica de lo anterior está dada a continuación:

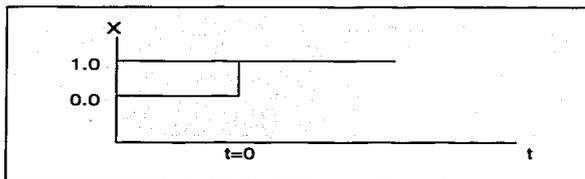


Fig. 1.1 Disturbio escalón

Para un disturbio escalón no unitario, se tiene lo siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} X = A \quad \text{para } t > 0 \\ X = 0 \quad \text{para } t \leq 0 \end{array} \right.$$

Cuya transformada de Laplace es la siguiente: $F(s) = \int_0^{\infty} A e^{-st} dt = A/s \quad \dots \quad \text{ec. (1)}$

Disturbio Pulso. _ El disturbio pulso es una función arbitraria que comienza y termina en el mismo nivel; generalmente es de forma rectangular o triangular. Un pulso rectangular es una combinación de dos disturbios escalón; uno positivo y otro negativo; ver fig.1.2

$$\left\{ \begin{array}{l} X = 0 \quad \text{para } t < 0 \\ X = A \quad \text{para } 0 < t \leq t_D \\ X = 0 \quad \text{para } t > t_D \end{array} \right.$$

La representación gráfica de lo anterior está dada a continuación:

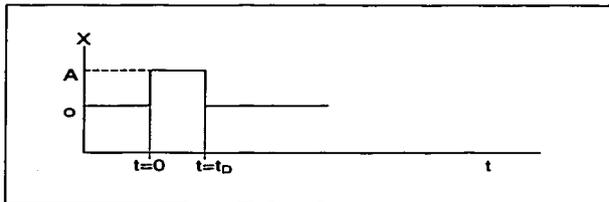


Fig. 1.2 Disturbio pulso

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

donde: $t_D = X(t) - X(t-t_D)$ y su transformada de Laplace es:

$$F(s) = \int_0^{\infty} A e^{-st} dt = A/s (1 - e^{-st_0}) \quad \dots \quad \text{ec. (2)}$$

Disturbio impulso. Esta definido como la función Delta de Dirac, $\Delta(t)$, el cual es un pulso de altura infinita, de ancho cero y cuya área es siempre igual a la unidad.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Altura} \longrightarrow \infty \\ \text{Base} \longrightarrow 0 \\ \text{Área} \longrightarrow 1 \end{array} \right.$$

La representación gráfica de lo anterior está dada a continuación:

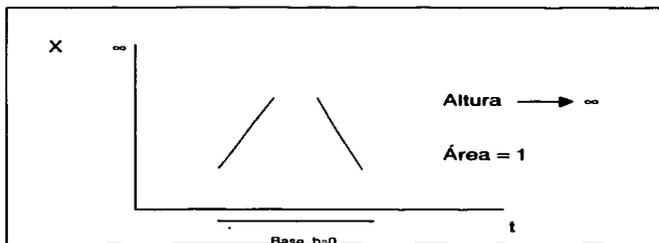


Fig. 1.3 Disturbio impulso

Lo anterior, definitivamente es un modelo hipotético que suele tener algunas aplicaciones en la ingeniería. Su transformada de Laplace es:

$$F(s) = \lim_{t \rightarrow 0} [(A/s) (1 - e^{-st})] = A \quad \dots \quad \text{ec. (3)}$$

cuando $A=1$ es un impulso unitario.

Disturbio rampa. Es una función que cambia linealmente con el tiempo; al igual que en los disturbios anteriores, se supone que este cambio ocurre a un tiempo cero ($t=0$).

$$\left\{ \begin{array}{ll} X=0 & \text{para } t < 0 \\ X=At & \text{para } t \geq 0 \end{array} \right. \quad \text{donde } A \text{ es una constante}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La representación gráfica de lo anterior está dada a continuación:

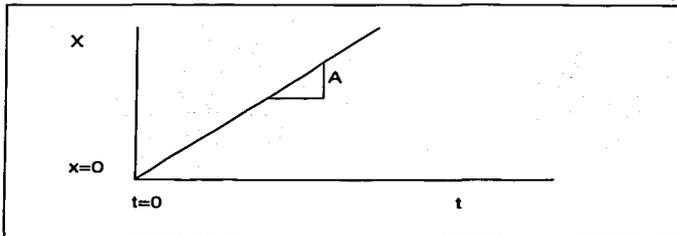


Fig. 1.4 Disturbio rampa

La transformada de Laplace de la función rampa es:

$$F(s) = \int_0^{\infty} Ate^{-st} dt = A/s^2 \quad \dots \quad \text{ec. (4)}$$

Disturbio senoidal. Este tipo de funciones seno y coseno son disturbios que tienen una gran importancia en el método de la respuesta a la frecuencia. Es un disturbio oscilatorio que se representa como:

$$\begin{cases} X = 0 & \text{para } t < 0 \\ X = \text{sen } \omega t & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad \text{donde } \omega = 2\pi/p \quad [=] \text{ rad/tiempo}$$

La fig. 1.5 muestra la respuesta de un disturbio senoidal .

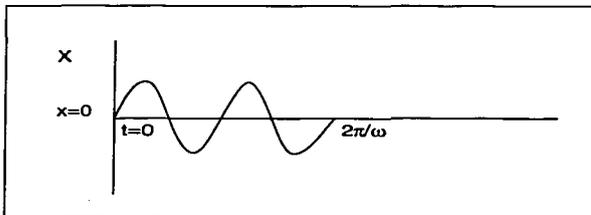


Figura 1.5 Disturbio senoidal

La transformada de Laplace de la función seno es:

$$F(s) = \int_0^{\infty} \text{sen}(\omega t) e^{-st} dt = \omega / s^2 + \omega^2 \quad \dots \quad \text{ec. (5)}$$

VARIABLES DE SALIDA

Son variables que denotan los efectos del proceso en los alrededores. Se clasifican en:

1. Variables controlables
2. Variables medibles
3. Variables manipulables

Las variables controlables generalmente son las variables de estado que desean mantenerse a un valor deseado al cual se le llama set point. Todas las variables que afectan a la variable controlada se les denomina disturbio.

Las variables medibles son la entrada a los controladores para generar señales de error; es decir, que son comparados con el Set point, el cual es el valor deseado a la variable controlada.

Las variables manipuladas son aquellas que se modifican para mantener el régimen permanente del proceso cuando en él influye un disturbio. Es decir, es aquella variable que el controlador modifica en un esfuerzo por mantener a la variable control en o cerca del set point.

Por otro lado, **el sistema de control** es aquel que mantiene automáticamente estables todas las variables, bajo ciertos límites deseados; sus partes constitutivas aparecen en la figura 1.6.

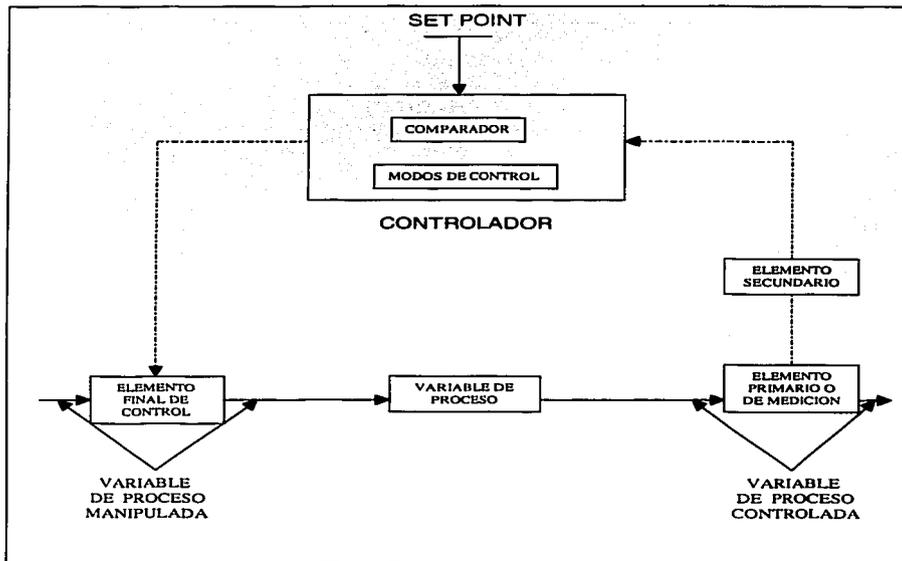


Figura 1.6 Partes constitutivas de un sistema de control.

En gran medida el buen funcionamiento de un sistema de control depende de una buena medición de la salida de la variable controlable y de una transmisión de la señal, libre de perturbaciones. El primer requerimiento implica la necesidad de un equipo de medición lo más exacto posible, mientras que el segundo requiere una buena y efectiva línea de transmisión.

Un sistema de control tiene los siguientes componentes: un elemento primario (sensor), un elemento secundario (transmisor), un controlador, un amplificador, dispositivos de indicación (alarmas) y elementos finales (dispositivos de control).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La función de cada componente es la siguiente:

1. Elemento primario (Sensor). Es el primer instrumento que detecta o sensa el valor de la variable de proceso y cuya salida asume un estado predeterminado e inteligible (ver figura 1.7).

Algunos de los equipos de medición más importantes son:

- Indicadores de flujo. Los más comúnmente empleados a nivel industrial son aquellos que usan como parámetro de medición el gradiente de presión (ΔP) que se desarrolla a través de una restricción al flujo. Siendo usada la conocida ecuación de Bernoulli para calcular el flujo. Entre otros se encuentran las placas de orificio y los tubos venturi, ambos útiles para cuando se trabaja con líquidos o gases. Los indicadores de flujo que usan la diferencial de presión como parámetro de la medición usualmente están modelados por la siguiente ecuación algebraica $\text{Flujo} = \alpha \Delta P$ donde α es una constante, la cual está determinada por las características de construcción del indicador de flujo y ΔP es la diferencia de presión entre un punto en la restricción al flujo y otro punto donde se encuentra el flujo totalmente desarrollado. Un indicador de flujo que funciona con un principio diferente es el medidor de flujo tipo turbina, el cual usa las revoluciones de su turbina para calcular el flujo.
- Indicadores de presión. Este tipo de indicadores se usa para medir la diferencia de presión, la cual es empleada para calcular el nivel de un líquido o el flujo de un fluido. Los transductores más comerciales son los de presión diferencial tipo capacitancia. La diferencia de presión causa un pequeño desplazamiento en el diafragma, este movimiento es detectado por las placas de un capacitor, colocadas a ambos lados del diafragma, de donde la diferencia de capacitancia entre las placas y el diafragma es convertida a voltaje. Un balance de fuerza alrededor del diafragma conduce al siguiente modelo de segundo orden

$$\tau^2 \frac{d^2 z}{dt^2} + 2\xi \tau \frac{dz}{dt} + z = k_p \Delta P \quad \dots \quad \text{ec. (6)}$$

donde

z = desplazamiento del diafragma

ΔP = diferencial de presión actuante

τ , ξ , k_p = tres parámetros de un sistema de segundo orden, definidos en este caso por las características de construcción del equipo.

- Indicadores de temperatura. Los indicadores de temperatura más comunes son los termocoples, termómetros de resistencia de bulbo y los termistores, todos ellos suministran su señal en forma eléctrica. Independientemente de las diferencias constructivas que pueden tenerse, el principio básico de su comportamiento está en términos de los diferentes perfiles de temperatura, siguiendo las leyes que aplican a la transferencia de energía. Motivo por el cual dependiendo de las partes

PARAMETRO	SENSOR	PRINCIPIO DE DETECCION
TEMPERATURA	<i>Detector de Temperatura Resistivo (RTD)</i>	La resistencia de ciertos metales varía linealmente con la temperatura
	<i>Termopar</i>	Dos metales diferentes al juntarse producen un voltaje proporcional a su temperatura
	<i>Expansión de metales</i> <i>Expansión líquida</i>	Algunos metales al calentarse se expanden o distorsionan en proporción al calor absorbido Los líquidos se expanden al calentarse o se contraen cuando se enfrían
PRESION	<i>Celda de presión</i>	Un diafragma se expande cuando la presión interna es mayor que la presión circundante. La presión del sistema se puede aplicar al volumen interno del diafragma a una presión circundante fija (generalmente la presión atmosférica).
	<i>Tubo Bourdon</i>	Un objeto curvado ovalado tratará de adoptar una forma cilíndrica cuando se le aplica presión interna.
NIVEL	<i>Celda de Presión</i>	Un diafragma se expande cuando la presión interna es mayor que la presión circundante La presión del sistema se puede aplicar al volumen interno del diafragma a una presión circundante fija (generalmente la presión atmosférica).
	<i>Flotador</i>	Un objeto curvado ovalado tratará de adoptar una forma cilíndrica cuando se le aplica presión interna. Un material menos denso que el fluido que está siendo monitoreado flotará en la superficie del líquido
FLUJO	<i>Restrictor de flujo combinado con una celda de presión diferencial</i>	La caída de presión a través de un restrictor de flujo es proporcional al cuadrado del flujo La celda de presión diferencial se usa para medir la caída de presión.
POTENCIA	<i>Contador proporcional</i>	Las interacciones de neutrones pueden causar una ionización de los gases. El conjunto de iones provoca pulsos eléctricos que pueden ser contados;
	<i>Camara de ionización</i>	Los iones producidos por la interacción de neutrones son colectados y la corriente producida es medida

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Figura 1.
 1.7. Tipos de sensores

15-R

- que lo constituyan (o las paredes que lo conformen) pueden generarse los siguientes modelos:

$$\tau_p \frac{dT_m}{dt} + T_m = T \quad \dots \quad \text{ec. (7)}$$

$$\tau \frac{d^2 T_m}{dt^2} + 2\xi \tau \frac{dT_m}{dt} + T_m = T \quad \dots \quad \text{ec. (8)}$$

donde:

T_m = Es la temperatura del elemento sensor

T = Temperatura del proceso

τ_p , τ , ξ = Parámetros que dependen de los materiales y la construcción de los equipos de medición.

- Analizadores de composición. Ejemplos típicos de este tipo de equipos son los cromatógrafos de gases y los diversos tipos de espectrógrafos de masas. Estos son usados para medir la composición de líquidos o gases en términos de uno, dos o todos los componentes de una corriente de proceso. La característica dinámica dominante de este tipo de analizadores es el tiempo muerto en su respuesta, el cual es bastante largo.

2. Elemento secundario (transmisor). Es el dispositivo que mediante un elemento primario detecta el valor de la variable de proceso y que posee una salida, cuyo valor en el estado estable, cambia únicamente en función de la variable de proceso. Esta señal de salida es enviada al controlador y puede ser neumática con un rango de 3-15 lb/in² o eléctrica de 4.20 mA. Las funciones de estas líneas son, por un lado llevar la señal del elemento primario al controlador y por otro llevar la señal del controlador al elemento final de control. Por lo que son considerados dos tipos de líneas, aquellas que manejan señales eléctricas para transmisores y actuadores electrónicos y aquellas que manejan señales neumáticas propiamente para actuadores neumáticos.

3. Controlador. Es el receptor de la señal enviada por el transmisor y lleva a cabo dos funciones en posición automática:

- a) Compara la señal recibida por el transmisor con el punto de ajuste (valor deseado de la variable o set point) y en caso de existir alguna diferencia entre estos dos valores, genera una señal de error proporcional a la magnitud del disturbio que exista en la variable de proceso.
- b) Por medio de los modos de control se procesa la señal de error, generándose una señal correctiva que es enviada al elemento final de control para minimizar la desviación existente entre el valor de la variable de proceso y el set point. Esta señal correctiva enviada al elemento final de control, puede ser neumática de 3-15 lb/in² o eléctrica de 4-20 mA.

4. **Elemento final de control.** Los elementos finales de control son aquellos equipos que implementan la acción de control, los cuales reciben la señal actuante y la adecuan de acuerdo a la variable manipulable. Los más comunes elementos finales de control son las válvulas neumáticas, operadas con aire el cual controla el flujo que pasa a través del área libre de la válvula.

Válvula de control. Dispositivo diferente a una válvula común de dos posiciones, operada manualmente que manipula en forma directa el flujo de una o más corrientes del fluido de proceso. En algunas aplicaciones se le conoce también como compuerta (damper) o persiana (louver).

5. **Alarma.** Dispositivo que indica la existencia de una condición anormal, por medio de un cambio discreto en una señal audible, visible o ambas, emitida para atraer la atención.

6. **Proceso.** Cualquier operación o secuencia de operaciones que involucra un cambio de energía, composición, dimensión o cualquier otra propiedad que se pueda definir con respecto a una referencia.

Algunos conceptos importantes relacionados con un sistema de control son:

Punto de ajuste. Es el valor deseado de la variable de proceso y también es llamado "Set Point".

Modo de control. Son los modos usados por los controladores para corregir el desvío de una señal de su punto de ajuste.

Medición. Es la determinación de la existencia o magnitud de una variable. Los elementos de medición incluyen todos los dispositivos que se emplean, directa o indirectamente para este propósito.

Instrumento. Dispositivo usado directa o indirectamente para medir, controlar o ambos una variable de proceso. El término incluye válvulas de control, válvulas de alivio y dispositivos eléctricos tales como anunciadores y botones de contacto, pero no se aplica a los componentes internos de un instrumento como serían fuelles, receptores, resistencias, etc.

Circuito. Combinación de uno o más instrumentos interconectados para medir, controlar o ambos una variable de proceso.

Convertidor. Dispositivo que recibe información en forma de señal, altera la forma y envía una señal de salida resultante. Un convertidor es un tipo especial de relevador; con frecuencia, al convertidor se le llama transductor, aunque es un término genérico cuyo uso no se recomienda para la conversión de una señal específica.

Relevador. Dispositivo que recibe información en forma de señales de uno o más instrumentos, transforma una variación pequeña de energía en una acción de amplitud mayor y emite una o más señales de salida resultantes. No se identifica como controlador, interruptor, conmutador ni de otra forma.

Interruptor. Dispositivo que conecta, desconecta o transfiere uno o más circuitos y que no se identifica como controlador, relevador o válvula de control; cuando es de acción manual se le llama conmutador.

Transductor. Término general para un dispositivo que recibe información en forma de una o más cantidades físicas; modifica la información, su forma, o ambas si se quiere, y emite una señal de salida resultante. Dependiendo de la aplicación, el transductor puede ser un elemento primario, un transmisor, un relevador, un convertidor u otro dispositivo.

Un dispositivo que conecta, desconecta o transfiere uno o más circuitos pueden ser un conmutador, un interruptor, un relevador o excepcionalmente una válvula de control, dependiendo de la aplicación.

- Conmutador (switch) si es operado manualmente.
- Interruptor (switch) o controlador de dos posiciones si es automático y es además el primer dispositivo del circuito.
- Relevador (relay) si es automático y no es el primer dispositivo en el circuito, es decir si es adicionado por un interruptor.

Escrutador. Muestrear cada una de un número de entradas en forma intermitente. Un escrutador puede tener funciones adicionales tales como registro o alarma.

1.3 DISEÑO Y MODELADO DE UN SISTEMA DE CONTROL

Anteriormente para controlar el flujo de un líquido que se alimenta a un recipiente, era necesario que el operador, primero observará el nivel del líquido físicamente y que después fuese a la válvula y cerrase o abriese esta, según fuese el caso.

A partir de 1960, se desarrollo la teoría de control moderna para afrontar la complejidad de los procesos y sus rigurosas necesidades en exactitud, peso y costo, en aplicaciones militares, espaciales e industriales. La teoría de control moderna se enfoca hacia el desarrollo de sistemas, tanto determinísticos (basados en ecuaciones algebraicas) como estocásticos (basados en funciones estadísticas), así como en sistemas de control complejos.

En la actualidad, existen modos de control tan complejos como los sistemas de control distribuidos, en los cuales la selección, cambio de variables, de configuraciones, los puntos de ajuste, etc., se realizan en un cuarto de control, que no necesariamente debe estar cerca de la planta. Debido a que los procesos con muchas entradas y salidas se van haciendo más complejos, la descripción de su sistema de control requiere de una gran cantidad de ecuaciones.

El diseñar un sistema de control implica: identificar los objetivos de control, la selección apropiada de las variables de proceso, la identificación de los circuitos y la interrelación de los mismos; Esto es debido a la complejidad de las estructuras de procesamiento, consecuencia de obtener una mejor administración de la energía y materias primas. Es por ello que el diseño de sistemas constituye un tópicó de sumo interés en ingeniería química.

El diseño de un sistema de control para un proceso químico, que garantice los objetivos operacionales del mismo sean satisfechos en presencia de cualquier tipo de disturbio, es el objetivo principal de la dinámica y control de procesos. La dinámica de un proceso se refiere al análisis del mismo conforme transcurre el tiempo. En este análisis la variable independiente generalmente es el tiempo.

Para llevar a cabo el modelado del proceso es necesario definir todas y cada una de las variables que afectan al mismo, para lo cual se han dividido en:

Las **variables de entrada** pueden ser: a) variables **manipulables o ajustables** cuyo valor es conocido por medición directa o indirecta, además de que como su nombre lo dice pueden ser ajustadas a un valor deseado; b) **disturbios o perturbaciones**, las cuales la mayoría de las veces son causadas por influencias externas al sistema.

Las **variables de salida** se dividen en: **medibles y no medibles**; Y en un momento determinado son las de mayor interés, ya que son las que deben mantenerse dentro de un determinado rango para cumplir con los objetivos operacionales del sistema.

Para caracterizar un sistema de procesamiento y su comportamiento es necesario:

1. Un conjunto de variables fundamentales dependientes de aquellos valores que pueden describir el estado del sistema y
2. Un conjunto de ecuaciones en las variables anteriormente mencionadas, las cuales describen cómo el sistema cambia con el tiempo.

Para los sistemas de procesamiento de interés, en ingeniería química, existen sólo tres cantidades fundamentales: masa, energía y momentum. Estas pueden ser caracterizadas por variables como: densidad, concentración, temperatura, presión y flujo (también llamadas variables de estado), y sus valores definen el estado de un sistema.

Las ecuaciones de estado asociadas con sus variables constituyen el modelo matemático de un proceso, el cual se deriva de la aplicación del Principio de Conservación de materia y energía (Primera Ley de la Termodinámica), y mediante el cual se puede conocer el comportamiento dinámico o estático del mismo.

La aplicación del Principio de Conservación puede producir un conjunto de ecuaciones diferenciales o algebraicas:

1. Si las variables de estado conforman las variables dependientes y el tiempo la independiente, el resultado es el conjunto de ecuaciones diferenciales, cuya solución determina el comportamiento dinámico del sistema.
2. Si las variables de estado no cambian con respecto al tiempo, el proceso se encuentra a régimen permanente, y el resultado es un conjunto de ecuaciones algebraicas cuya solución determina el comportamiento estático del proceso. Esto es la relación entre las variables de entrada y salida del sistema.

Las ecuaciones que conforman el modelo son el resultado de aplicar un balance alrededor del sistema, y para ello es necesario hacer uso de relaciones como:

1. Ecuaciones de transporte (masa, calor y momentum),
2. Ecuaciones de cinética química,
3. Ecuaciones de estado y,
4. Relaciones de equilibrio de fases, químico y termodinámico.

Con las cuales se fundamenta el modelo matemático de los fenómenos físicos y/o químicos. Cabe mencionar que en cualquier estudio sobre control, el modelado del sistema es la actividad más crítica. Y dependiendo de la exactitud del modelo será la efectividad del sistema de control.

Los elementos necesarios para el diseño, tienen que ver con el alcance del sistema a diseñar, entre estos se encuentran los siguientes:

1. Objetivos operacionales del sistema.
2. Variables posibles de medir, para monitorear el sistema.
3. Variables manipulables para el sistema de control.

Los objetivos operacionales del sistema de control son:

1. Suprimir o disminuir el impacto que pueden ocasionar los disturbios sobre el proceso, como son:
 - arranques
 - paros ordenados por mantenimiento
 - situaciones de emergencia causadas por: fallas en energía eléctrica, en agua de enfriamiento, en el suministro de vapor, en agua contra incendio, explosiones, derrame en tanques, reacción en cadena,
 - cuestiones de seguridad
 - control de calidad en los productos, etc.
2. Asegurar la estabilidad del proceso.
3. Optimizar el comportamiento del proceso.

4. La seguridad del personal y la satisfacción de cumplir con las especificaciones del producto.

Estos objetivos son sólo algunos de los aspectos operacionales que deben ser mantenidos dentro de una planta de proceso. Otro aspecto básico es la selección de la configuración para el sistema de control.

La configuración de control, es la estructura de información usada para relacionar las mediciones disponibles con las variables manipulables.

Dependiendo de cuantas salidas y entradas manipulables tenga un proceso, se tienen las siguientes configuraciones básicas de control (ver figura 1.8):

Una entrada—una salida (**SISO**)
Múltiple entrada—múltiple salida (**MIMO**)

donde:

SISO = Single Inlet, Single Outlet

MIMO = Múltiple Inlet, Múltiple Outlet

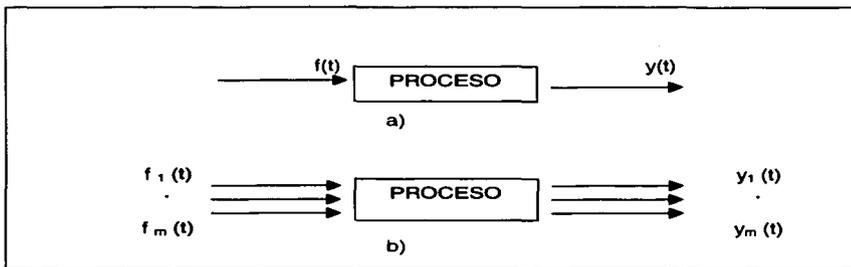
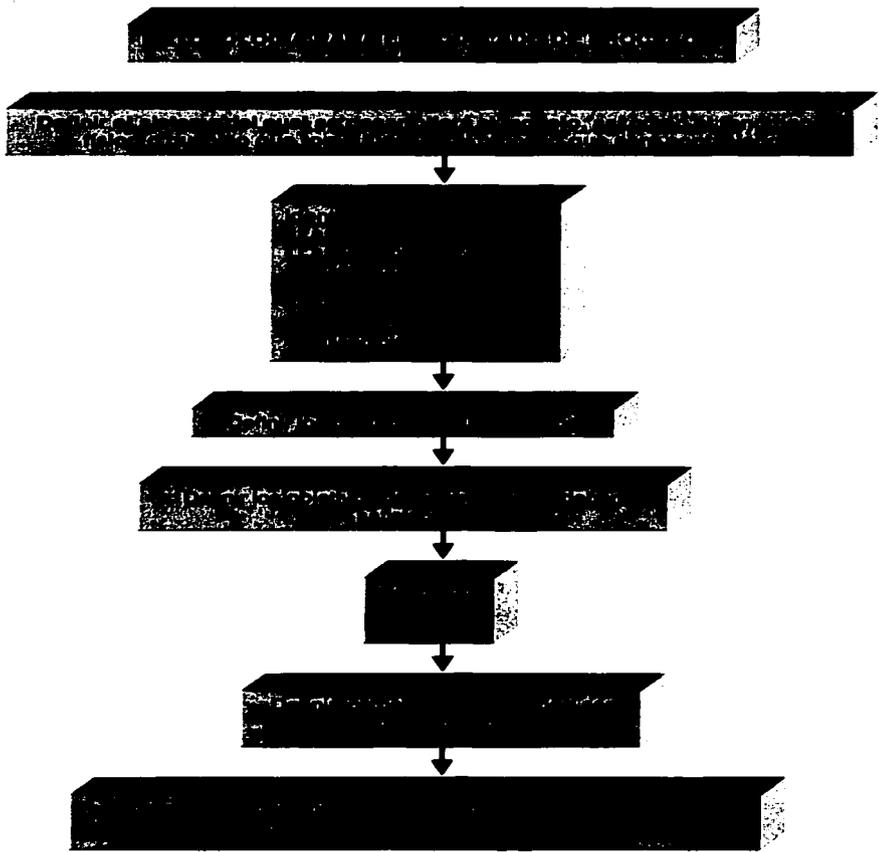


Figura 1.8. Configuraciones básicas de control: a) SISO y b) MIMO

donde:

$f(t)$, $f_1(t)$, $f_m(t)$ son las entradas al proceso y $y(t)$, $y_1(t)$, $y_m(t)$ son las salidas.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPITULO

II

CAPITULO II

SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control en una interconexión de componentes físicos conectados de tal manera que el arreglo se pueda comandar, dirigir o regular a sí mismo o a otro sistema. La base para el análisis de un sistema de control es el fundamento proporcionado por la teoría de los sistemas lineales, la cual supone una relación de causa-efecto para los componentes de un sistema.

Los sistemas de control proporcionan: la información (datos adquiridos) y función (modos de control) que se requiere para la operación general de la planta. Esto es referido a como lograr el control de las variables de proceso como la humedad, la presión, temperatura, etc.

Las funciones primarias realizadas por los sistemas de control bajo condiciones de operación normal y de emergencia son las siguientes:

1. Indicar el estado de las variables de proceso y del equipo (temperatura, presión y posiciones de interruptores de circuitos o válvulas).
2. Mantener la eficiencia de la planta, dentro del rango de operación deseado.
3. Proporcionar al operador toda la información requerida para la operación segura y efectiva de la planta.
4. Proteger los sistemas y equipo, cuando los límites asignados de los parámetros físicos sean excedidos.
5. Efectuar un paro seguro de la planta en cualquier circunstancia de operación.
6. Mitigar las consecuencias de un accidente por la acción de los sistemas de seguridad.

2.1 CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control se clasifican en dos grupos: de circuito abierto y de circuito cerrado.

A) Sistemas de control de circuito abierto

Este tipo de circuito se lleva a cabo como operación manual y es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida, como se ilustra en la figura 2.1.

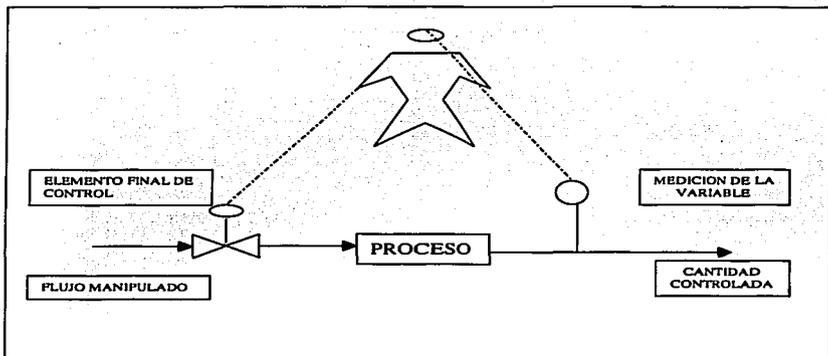


Figura 2.1. Sistema de control de circuito abierto

En esta figura se muestra un proceso con una cantidad controlada. En la línea de salida del proceso, hay instalado un indicador que proporciona información al operador del valor de la variable controlada. El operador puede ver este indicador y como resultado mover una válvula para manipular un flujo de entrada al proceso y lograr de esta manera, el valor deseado de la variable controlada. El set point está en la mente del operador y éste realiza todas las decisiones de control.

Las características de los sistemas de control abierto son las siguientes:

1. Los resultados obtenidos son cercanos al set point o dentro de los parámetros especificados.
2. La habilidad que estos tienen para ejecutar una acción con exactitud está determinada por su calibración.
3. Barato / sencillo.

El control depende del operador y su salida varía por efecto de las perturbaciones que son directas y no hay posibilidad de controlar, opcionalmente se tiene medición de salida.

B) Sistemas de control de circuito cerrado

Existe una gran cantidad de sistemas de control de circuito cerrado. Cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas, razón por la cual, en algunos casos se recurre a una u otra estructura de control. Entre las más importantes se tienen las siguientes:

1. Control on - off
2. Control de arranque
3. Control de relación
4. Control selectivo
5. Control de rango dividido
6. Control por posición de válvula
7. Control por sobre posición
8. Control en cascada
9. Control feedback
10. Control feedforward

Para los objetivos de esta tesis es necesario especificar claramente algunas estructuras de control, entre las más sobresalientes están las siguientes:

1. Sistema de control ON-OFF.

Las ventajas que presenta la estructura de control on-off se basan en su simplicidad tanto en dispositivos como en el funcionamiento de los mismos. Además de que el costo involucrado en su implementación es mucho más bajo que cualquier otro.

Su mayor desventaja radica en el hecho de que no son muy eficientes al implementarse en sistemas continuos, ya que operan por un periodo de tiempo determinado y dejan de hacerlo en otro. Además por sus constantes acciones de encendido y apagado tienden a fallar más frecuentemente que otros dispositivos

El empleo de esta estructura de control dentro de la ingeniería de procesos ocurre en situaciones donde se desea controlar el nivel de un tanque. El controlador de nivel acciona un dispositivo -bomba, válvula - para mantener el nivel a un valor fijado, y después de llegar a ese valor, el dispositivo es desactivado. La fig. 2.2 muestra esta situación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

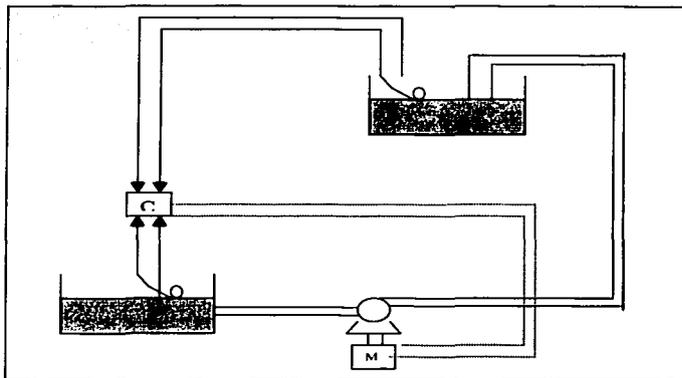


Figura 2.2 Estructura de control on-off

El sistema consta de dos tanques de almacenamiento y un equipo de bombeo. Para comenzar a enviar el líquido al tanque superior un operador debe accionar el controlador para dejarlo en encendido (on), después de un tiempo, los electrodos que contiene cada uno de los recipientes detienen el funcionamiento de la bomba cuando por medio del flotador se cierra el circuito. El circuito superior se cerrará hasta que el líquido llegue al nivel máximo deseado, mientras que el circuito inferior se cerrará y detendrá el funcionamiento de la bomba si el nivel del líquido en ese tanque es menor al recomendado.

2. Sistema de control de cascada.

En un control en cascada tenemos una variable manipulable y más de una variable medible. Se tienen dos ciclos de control que usan dos variables medibles diferentes, pero con una variable en común. La estructura de control en cascada tiene dos controladores. A uno de ellos se le llama maestro o primario y al otro esclavo o secundario. La fig. 2.3 muestra la estructura de control en cascada.

TRABAJOS CON
FALLA DE ORIGEN

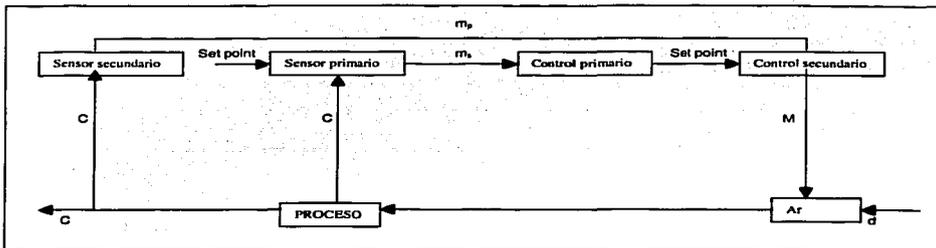


Figura 2.3 Estructura de control en cascada

La particularidad de esta estructura de control es que la señal que sale del controlador primario cambia el Set point del controlador secundario cada vez que detecta un disturbio en el sensor primario. El control en cascada se clasifica en:

1. Serie
2. Paralelo

Los dos procesos son básicamente diferentes y presentan distintas características dinámicas.

Cascada en serie.

En un sistema en serie la variable manipulada afecta a la variable controlada secundaria, y ésta afecta a la variable primaria (ver fig. 2.4).

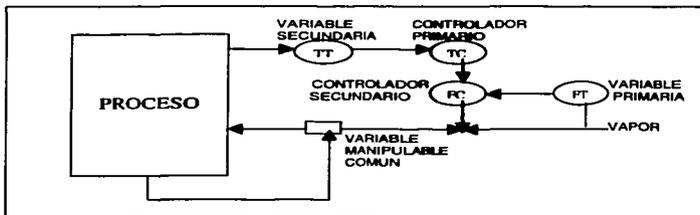


Figura 2.4 Estructura del control en cascada en serie

En un arreglo en bloques, como el que se muestra en la fig. 2.5, el controlador secundario C_s ajusta a la variable manipulada M , para controlar a la variable secundaria X_s . La señal del Set point X_s para el controlador secundario llega del controlador primario C_p ; es decir, la salida del controlador primario es el Set point del controlador secundario.

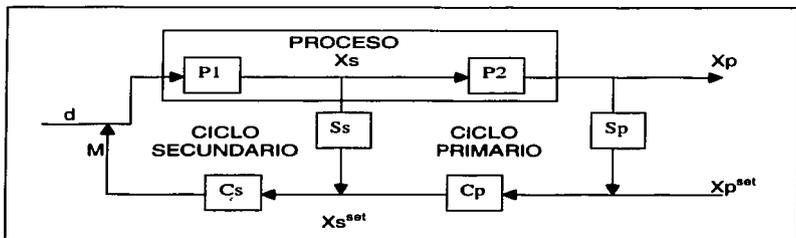


Figura 2.5 Diagrama de bloques para un control cascada en serie

Cascada en paralelo

En un sistema en paralelo la variable manipulada, afecta de manera directa tanto a la variable controlada primaria como a la variable controlada secundaria. Considere el reactor que se muestra en la siguiente figura.

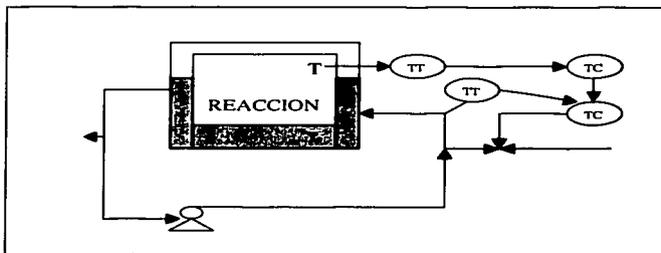


Figura 2.6 Control en cascada en paralelo

La reacción es exotérmica y el calor generado es removido con agua que fluye alrededor de la chaqueta del tanque. El objetivo es mantener la temperatura de la mezcla de reacción, T , constante a un valor deseado. El ciclo que mide a T es el control primario y utiliza un Set point proporcionado por el operador mientras que el ciclo que mide a T_c utiliza la salida del controlador primario como un Set point y éste es llamado controlador secundario.

Generando un diagrama de bloques del proceso anterior, se puede apreciar mejor este mecanismo de control de cascada en paralelo.

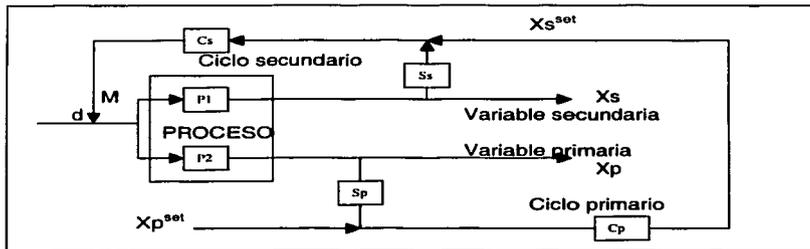


Figura 2.7 Diagrama de bloques para el control cascada en paralelo

3. Sistema de control FEEDBACK (retroalimentado)

En contraste con un sistema de control de circuito abierto, el de circuito cerrado utiliza una medición adicional de la salida real, para compararla con la respuesta de salida deseada.

Los sistemas de control de circuito cerrado son aquellos donde la acción de control está relacionada con la salida y se conoce como de retroalimentación; este se puede definir como el sistema que tiene la propiedad que permite que la salida (u otra variable controlada del sistema) se compare con la entrada del sistema (o alguna otra entrada de otro componente interno o con alguna referencia constante) de tal forma que la función del sistema sea una función de la entrada y la salida.

La estructura FEEDBACK implica usar mediciones directas de las variables controladas para ajustar los valores de las variables manipulables y su acción es independiente de la salida (Control hacia delante; ver figura 2.8).

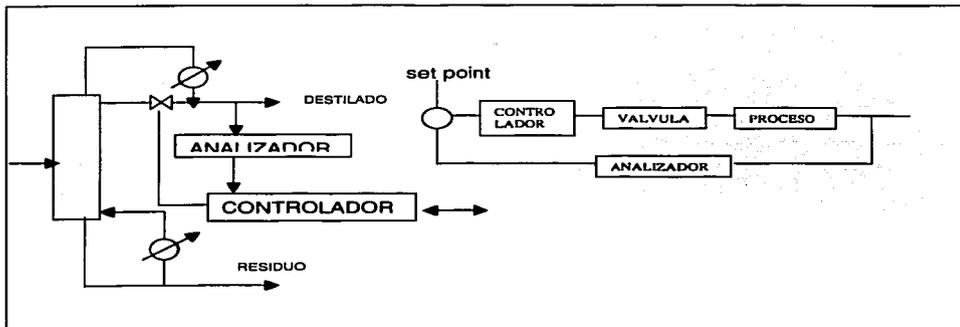


Figura 2.8. Sistema de control FEEDBACK

El camino más simple para automatizar un proceso es a través de un control convencional de retroalimentación.

Los sensores o elementos de medición se instalan para medir los valores actuales de las variables controladas. Estos son transmitidos al hardware del control de retroalimentación y realiza una comparación automática entre los valores de set point de la variable controlada y los valores medidos de estas mismas variables.

Basados en la diferencia (error) entre el valor actual y el set point de las variables controladas, el control de retroalimentación calcula las señales que reflejan los valores necesarios de variables manipuladas; estos son entonces transmitidos automáticamente para ajustar dispositivos (típicamente válvulas de control) las que manipulan entradas al proceso.

Existen dos tipos básicos de retroalimentación: en lazo cerrado positiva y negativa.

La retroalimentación negativa, es el mecanismo básico de los sistemas automáticos y la positiva es una operación que aumenta el balance, es decir impide la estabilidad del sistema.

El sistema de control antes mencionado, aplica la retroalimentación y puede absorber las influencias de otras variables que afectan el proceso y no son controladas (ver figura 2.9).

PROCESO CON
FALLA DE ORIGEN

Sus ventajas son:

- 1. Aumento en la exactitud, por ejemplo la habilidad para reproducir la entrada fielmente.**
- 2. Efectos reducidos de la distorsión.**
- 3. Más estabilidad que el sistema prealimentado.**
- 4. Se requiere poca información del proceso y se puede medir el valor de la variable controlada.**

Sus desventajas son:

- 1. No se puede controlar el efecto de las perturbaciones antes de que entren al proceso.**
- 2. No se eliminan por completo los tiempos muertos, tiempos de respuesta del proceso ni de los elementos de medición y transmisión.**
- 3. Más caro, complejo y mantenimiento difícil.**
- 4. Es inestable con respecto al circuito abierto.**

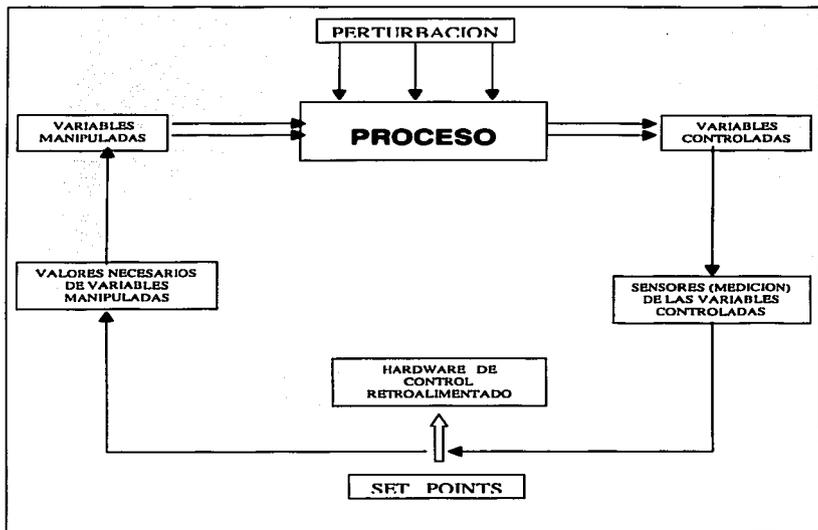


Figura 2.9. Sistema de control de circuito cerrado retroalimentado

Las siguientes representaciones son algunos de los sistemas de control feedback típicos encontrados en los procesos químicos:

- a) Control de flujo. Figura 2.10
- b) Control de presión. Figura 2.11
- c) Control de nivel de líquido. Figura 2.12
- d) Control de temperatura. Figura 2.13
- e) Control de composición. Figura 2.14

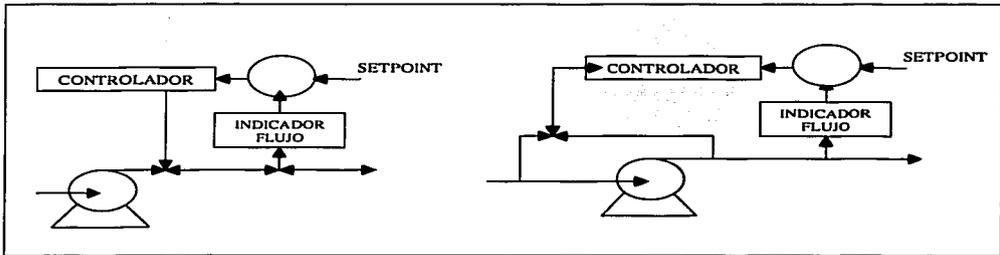


Figura 2.10. Arreglos feedback para control de flujo

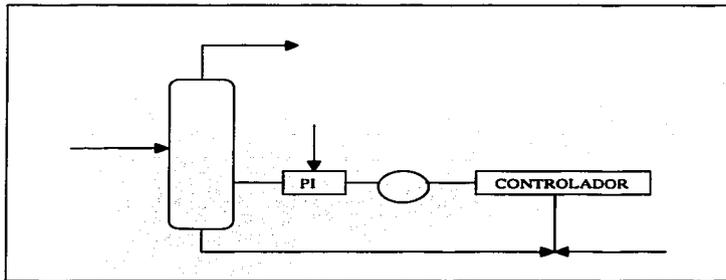


Figura 2.11. Control de Presión

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

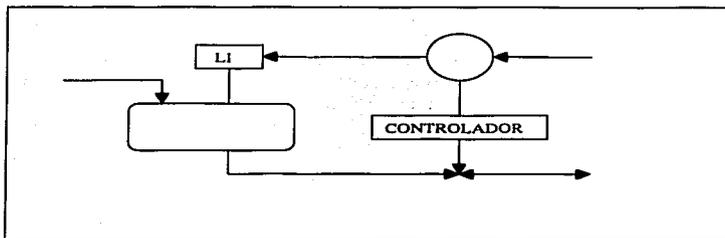


Figura 2.12. Control de nivel del líquido

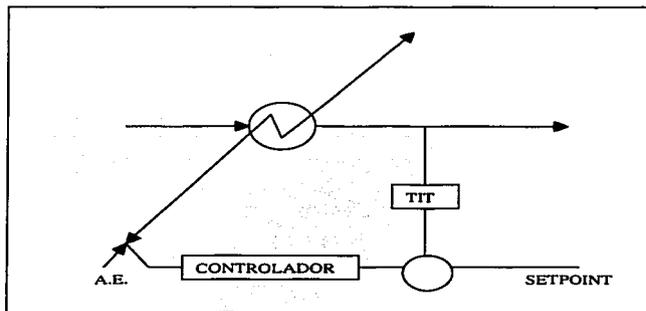


Figura 2.13. Control de temperatura

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

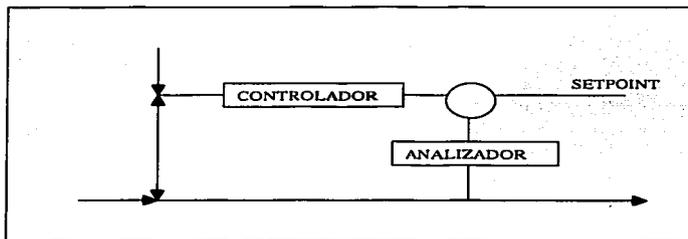


Figura 2.14. Control de composición

4. Sistemas de control FEEDFORWARD (prealimentado)

En la siguiente figura se muestra el esquema conceptual del control automático de prealimentación.

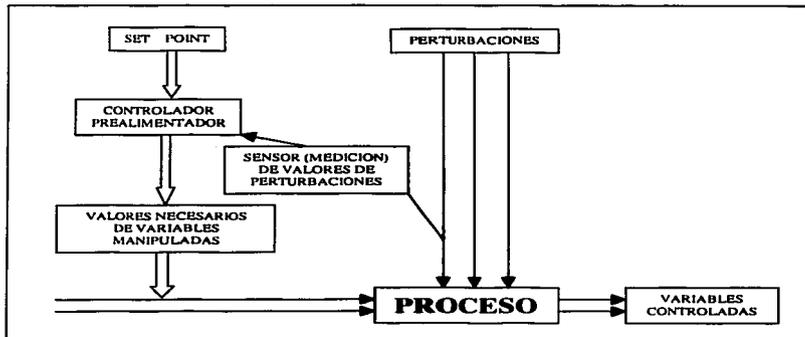


Figura 2.15. Sistema de control en circuito cerrado prealimentado

TRABAJOS
FALLA DE ORIGEN

El sistema de control **FEEDFORWARD**: Implica mediciones directas a los disturbios para ajustar valores de las variables manipulables (Control hacia atrás; ver figura 2.16).

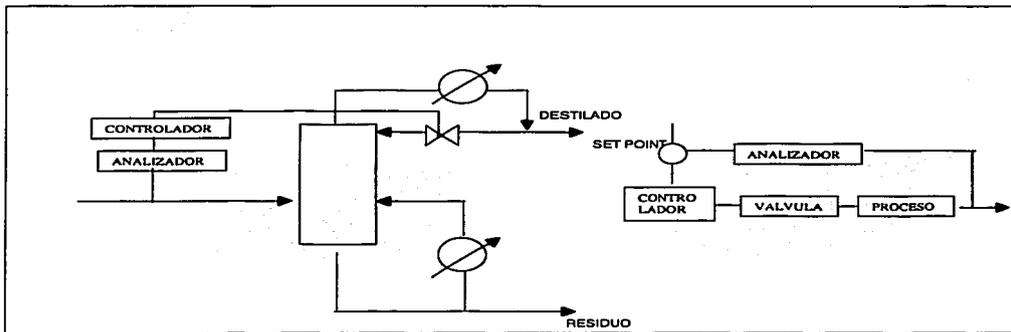


Figura 2.16. Sistema de control FEEDFORWARD

Los disturbios se muestran entrando al proceso y existen sensores para medirlos; los controladores prealimentados o feedforward, calculan los valores necesarios de las variables manipuladas.

Los set points, los cuales representan los valores deseados de las variables controladas son suministrados a los controladores prealimentados.

En este sistema se realiza la medición de la variable de entrada al proceso (perturbación principal) y se compara con el valor deseado de la perturbación y el error se trata con los modos de control, mandándose una señal de corrección al elemento final de control.

Es claro que los controladores prealimentados deben realizar cálculos muy sofisticados, estos deben reflejar los efectos exactos que los disturbios tendrán en las variables controladas. Asimismo implican un entendimiento específico de los efectos exactos que las variables manipuladas tienen sobre las variables controladas. Si se dispone de todas las relaciones matemáticas, entonces los

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

controladores prealimentados pueden computar automáticamente la variación necesaria en los flujos manipulados para compensar los disturbios.

Ventaja:

1. Elimina retrasos por tiempos muertos.

Desventajas:

1. Muy caro (esto es directamente proporcional al análisis requerido por el proceso y no al número de instrumentos).
2. Poco conocido.
3. Si no se conoce el proceso puede ser muy inestable y en algunos casos inapropiado para usarse.
4. Se debe tener el modelo matemático del proceso.
5. No se tiene medición de la variable controlada.

2.2 PARTES CONSTITUTIVAS DE UN CIRCUITO DE CONTROL CERRADO.

Por lo anteriormente expuesto se puede resumir que las partes constitutivas de un circuito de control cerrado son las siguientes:

- a) El proceso o secuencia de operaciones en que la variable va a ser controlada.
- b) El elemento primario de medición que mide el valor de la variable controlada y la transmite eléctrica o neumáticamente al controlador automático.
- c) El set point que suministra e indica el valor deseado de la variable.
- d) El controlador obtiene el mínimo error entre el valor deseado de la variable y el valor de la variable controlada.
- e) El elemento final de control ajusta el valor de la variable manipulada para obtener, en la variable controlada el valor deseado.

De las partes anteriores, el proceso está compuesto por equipos y líneas, por lo cual no es un instrumento y lo que interesa de él son sus características dinámicas.

Los elementos de los incisos: b, c, d, son instrumentos y pueden existir en una sola unidad o por separado.

El elemento final es normalmente una válvula de control, aunque en algunos casos puede ser equipo (bombas, compresores, etc). (ver figura 2.17).

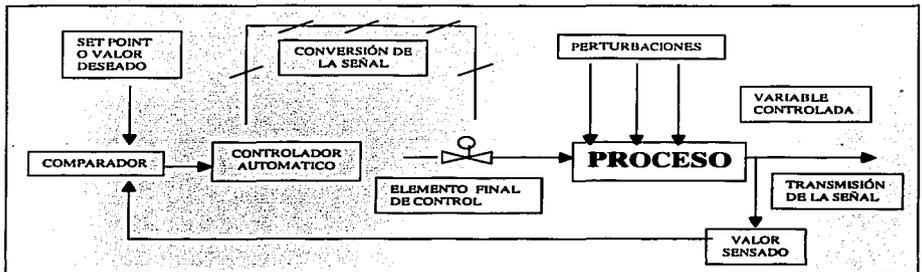


Figura 2.17. Partes constitutivas de un circuito de control cerrado

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO

III

CAPITULO III

MODOS DE CONTROL

3.1 CONTROLADOR AUTOMATICO

A diferencia del controlador manual en el que se requiere un operador para realizar los cambios pertinentes debido a disturbios, el controlador automático realiza los cambios necesarios de la variable manipulada para compensar los disturbios que afectan el proceso o por cambios en el set point. El **controlador** es un calculador de función especial que usa la señal de error del comparador como entrada, calculando los cambios necesarios de la variable manipulada (la caja del controlador y cada elemento dentro de la misma es conocido como el controlador). Dentro de la caja existen muchos otros elementos del circuito de retroalimentación por ejemplo los elementos de entrada, el comparador, el receptor del sistema de retroalimentación y un registrador.

Los controladores están clasificados de acuerdo con el tipo de energía que reciben: electrónicos, neumáticos, mecánicos o hidráulicos.

Todos tienen suficientes valores de respuesta adecuados para los requerimientos de procesos convencionales, pero recientemente los controles básicos usados en la mayoría del control de procesos han sido electrónicos y neumáticos.

Un diagrama de bloques de un circuito de control, se presenta en la figura 3.1.

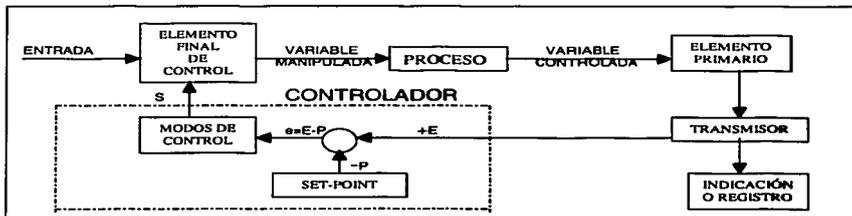


Figura 3.1. Circuito de control cerrado retroalimentado

donde:

E= variable controlada

P= valor deseado de la variable

e= Error o desviación

S= señal controlada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.2 MODOS DE CONTROL

Como se menciona anteriormente, el controlador tiene los medios necesarios para manipular el error o desviación y esos medios o "modos de control" establecen la acción correctiva del controlador sobre el elemento final de control para que la variable controlada se mantenga en el valor deseado. Dicho en otras palabras el "modo de control" es el que determina la acción de un sistema de control para ciertas condiciones de operación.

A continuación se analizarán los modos de control más empleados en los procesos continuos. Los modos de control existentes son:

- a) Proporcional (P)
- b) De dos posiciones (todo-nada)
- c) Integral (I)
- d) Derivada (D)

A) CONTROL PROPORCIONAL

Este es uno de los tipos de control más usado y produce una salida que es directamente proporcional al error.

$$S \propto e$$

La salida puede adquirir cualquier valor del mínimo o máximo y existe una relación lineal continua entre el valor de la medición actual de la variable controlada y la posición de la válvula.

Comúnmente el instrumento se ajusta de modo que tenga salida al 50% de la escala cuando el error sea cero.

La ecuación de control proporcional se puede expresar como la ecuación de una recta donde la pendiente (G) es el factor proporcional entre la salida (S) y el error (e), recibiendo el nombre de ganancia.

$$S = G(E - P) + C \quad \dots \quad \text{ec.(9)}$$

e = (E - P) = desviación o error

S = señal controlada en %

G = ganancia

E = variable controlada en %

P = valor deseado de la variable o set point en %

C = ordenada al origen = 50% o sea la mitad de la carrera del elemento final de control.

También se utiliza el término "Banda Proporcional (B. P.)", que se define como el porcentaje que debe variar la variable controlada para que el elemento final de

control se desplace de una posición externa a la otra y es función inversa de la ganancia.

$$G = 1 / B. P \quad \dots \quad \text{ec. (10)}$$

$$G = 100\% / B. P (\%)$$

Siendo la ecuación completa para el modo proporcional:

$$S = (E-P / B. P) + C \quad \dots \quad \text{ec. (11)}$$

De aquí se deduce que la posición del Elemento Final de Control (S) es:

- Directamente proporcional a la desviación.
- Inversamente proporcional al ajuste de la banda proporcional.

Cuando el punto de ajuste es constante por ejemplo igual al 50% la ecuación 11 representa una familia de rectas que tiene 0.5 de ordenada al origen cuya pendiente depende del valor de B. P. Por ejemplo B. P. = 50%, 100%, 200%, (ver figura 3.2).

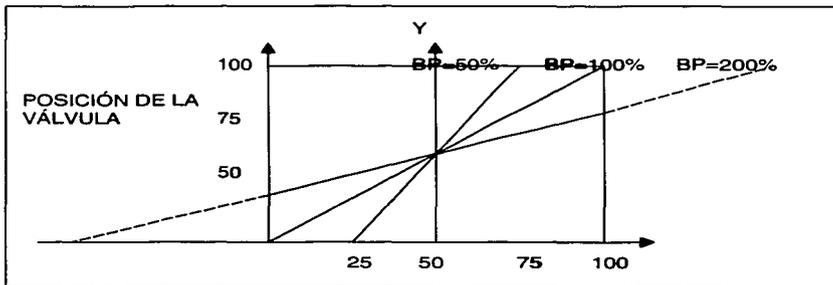


Figura 3.2. Representación de un punto de ajuste constante (BP VARIABLE).
BP=50%, 100%, 200% (MODO PROPORCIONAL).

Como se aprecia en la figura anterior; cuando BP = 200%, el elemento final de control (válvula automática) no abre ni cierra totalmente.

De la ecuación 11, se deduce que el eje de las Y deberá coincidir con el punto de ajuste P, ya que e=0 cuando E=P.

RESUMEN CON
FALLA DE ORIGEN

Por lo anterior se ve que la recta que representa el control proporcional se desliza con el punto de ajuste P ya que $e=0$ cuando $E=P$.

Por lo tanto se ve que la recta que representa el control proporcional se desliza con el punto de ajuste P por lo tanto BP es fija y la ecuación 11 representa una familia de paralelas que dependen del valor de P por ejemplo, $P = 0.25, 0.50$ y 0.75 (ver figura 3.2).

Como se aprecia en la figura 3.3 al correrse la recta con los valores de P habrá porciones en las cuales la válvula no abre y no cierra totalmente.

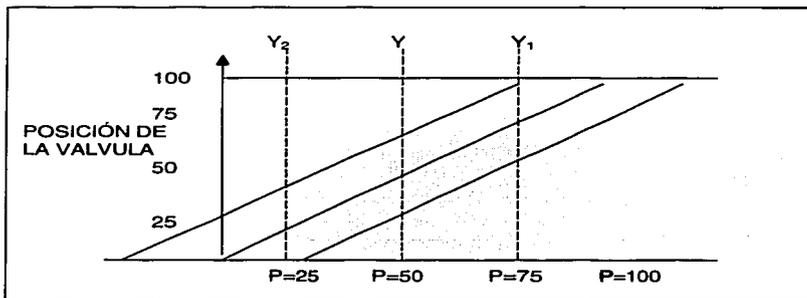


Figura 3.3. Representación de puntos de ajuste, variables con una BP fija (MODO PROPORCIONAL).

Cuando $P=25\%$ y $BP=100\%$ el elemento final de control solo podrá recorrer del 25% al 50% de su carrera y cuando $P=75\%$ el elemento final de control solo podrá recorrer de 0 a 75% de su carrera.

Como puede observarse solo cuando $BP=100\%$ y $P=50\%$ el elemento final de control puede recorrer el 100% de su carrera.

Con el objeto de entender la aplicación de la Banda Proporcional se analizarán algunos ejemplos con diferentes condiciones de proceso y se verá la reacción del control en tres condiciones distintas de la banda proporcional.

1. Se tiene una desviación o error de 10% (ver figura 3.4).

a) $e = 10\% = 0.1$; $BP=100\%$ sustituyendo valores en la ecuación 11.
 $S = (1/1) (0.1) + 0.5 = 0.6 = 60\%$

b) $e = 10\%=0.1$; $BP=200\%$ sustituyendo valores en la ecuación 11.
 $S = (1/2) (0.1) + 0.5 = 0.05 + 0.5 = 55\%$

c) $e = 10\%=0.1$; $BP=50\%=0.5$ sustituyendo valores en la ecuación 11.
 $S = (1/0.5) (0.1) + 0.5 = 0.2 + 0.5 = 0.7 = 70\%$

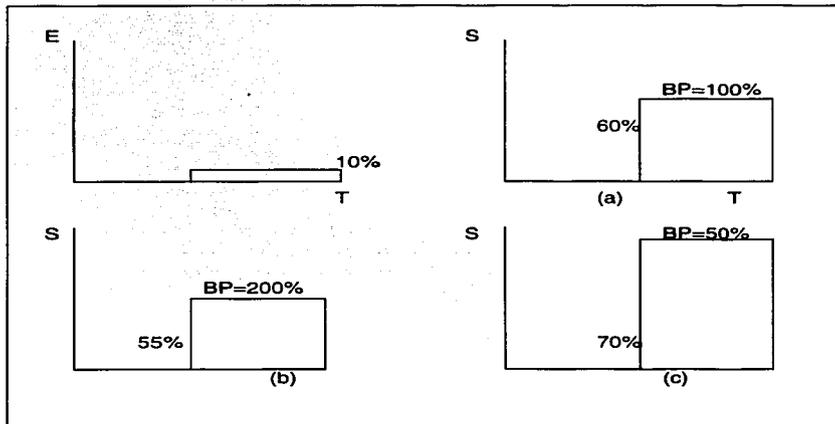


Figura 3.4. Aplicaciones de la banda proporcional con diferentes condiciones de proceso

Derivando la ecuación 11 con respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{dS}{dT} = \frac{1}{BP} \frac{dE}{dT} \quad \dots \quad \text{ec. (12)}$$

De la ecuación 12 se deduce que la velocidad de movimiento del Elemento Final de Control:

**TRABAJOS CON
 FALLA DE ORIGEN**

- a) Es directamente proporcional a la velocidad de cambio de la variable.
- b) Es inversamente proporcional al valor de la Banda Proporcional.

Cuando BP sea angosta, el Elemento Final de Control se moverá con mayor velocidad (mayor sensibilidad) y cuando BP sea ancha el elemento final de control se moverá con menor velocidad y menor sensibilidad.

- a) Se tiene una desviación o error con una velocidad de cambio de la variable de $10\%/min$ (ver figura 3.5).
- b) $dE/dT=10\%/min$, $BP=200\%$ sustituyendo valores en la ecuación 12 tenemos:
 $dS = (1/2) (0.1) = 0.05 = 5\%$
- c) $dE/dT=10\%/min$, $BP=100\%$ sustituyendo valores en la ecuación 12 tenemos:
 $dS = (1/1) (0.1) = 0.1 = 10\%$
- d) $dE/dT=10\%/min$, $BP=50\%$ sustituyendo valores en la ecuación 12 tenemos:
 $dS = (1/0.5) (0.1) = 0.2 = 20\%$

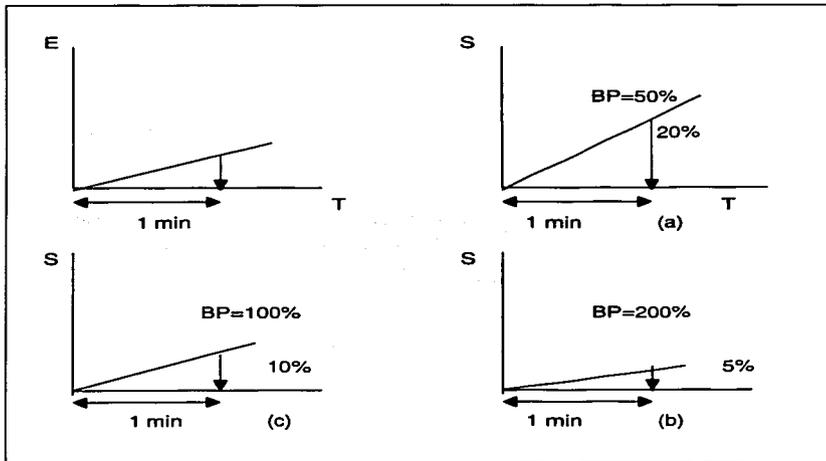


Figura 3.5. Representación de los cambios en el Elemento Final de Control (velocidad de apertura) con los cambios de magnitud de la Banda Proporcional.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Una característica propia del *Control Proporcional* es la desviación que existe entre el punto de ajuste y la variable controlada, cuando el control llega a la estabilización.

Esto se debe a que el control corrige proporcionalmente cuando siente un cambio en el error de entrada, o lo que es lo mismo, una desviación de la variable controlada con respecto al Punto de Ajuste o Set Point.

El control actúa cuando $E=P$, por la ecuación 11, $e=0$ y $S=0.5$, la válvula regresa al 50% de su carrera. Provocando que exista una desviación otra vez, teóricamente el control oscilaría, pero en la práctica se estabiliza provocando una desviación permanente entre E y P.

La figura 3.6 muestra las desviaciones de un Control Proporcional con diferentes ajustes de Banda Proporcional.

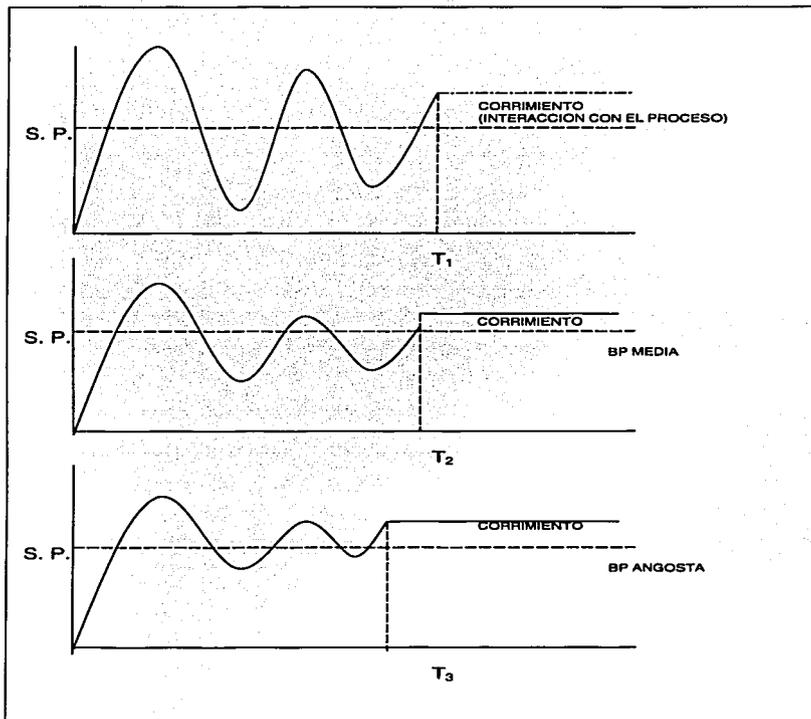


Figura 3.6. Desviaciones de un Control Proporcional con diferentes ajustes de Banda Proporcional

B) CONTROL DE DOS POSICIONES

El control de dos posiciones también llamado *abierto-cerrado* es aquel en el que el Elemento Final de Control sólo puede estar en una de sus dos posiciones extremas, dependiendo de que la variable controlada este arriba o abajo del valor deseado del set point.

La acción del *control de dos posiciones o control "on-off"* es sin duda el tipo de control más usado tanto en la industria como en el servicio doméstico.

El control de dos posiciones es un caso particular del Control Proporcional.

Salida (S) $\left[\begin{array}{l} - \text{ Máxima cuando } E > P \\ - \text{ Mínima cuando } E < P \end{array} \right.$

El Control de Dos Posiciones se logra de la siguiente forma, del Control Proporcional se tiene que:

$$S = G (E - P) + C \quad \dots \quad \text{ec. (13)}$$

Si $C=0$

$$S = G (E - P) \quad \dots \quad \text{ec. (14)}$$

Para satisfacer que $E > P$ y produzca la máxima salida, se logra así que la ganancia G tienda a α es decir la $BP = 0$.

$$S = \lim_{G \rightarrow \infty} G (E - P) = \infty$$

Cuando $E < P$:

$$S = \lim_{G \rightarrow \infty} G (E - P) = -\infty$$

Un valor de S infinito se interpreta como la máxima salida y un valor menos infinito se interpreta como la mínima salida. Por lo que se cumplen las dos posiciones.

La figura 3.7 muestra este fenómeno cuando $P = 50\%$. Este tipo de control se aplica en condiciones de alarma, paro o arranque y es adecuado cuando:

- No hay atrasos en la transmisión, ni tiempos muertos.
- La velocidad de reacción es lenta.
- Cuando no hay cambios grandes ni frecuentes de carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

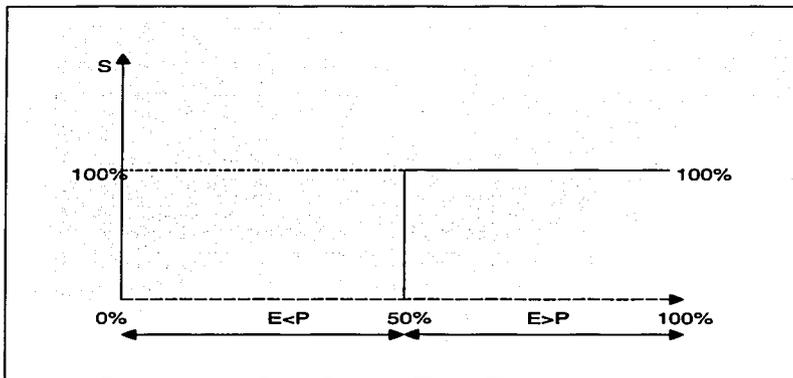


Figura 3.7. Representación del valor máximo y mínimo de S
(de más infinito a menos infinito)

La principal desventaja de este modo de control es que en procesos cíclicos, donde se requiere mucha precisión, el funcionamiento excesivo daña el controlador y el equipo.

Una solución a este desgaste excesivo del controlador sería el establecimiento de una "Zona Muerta" o "Banda Diferencial" de alrededor de 0.5% a 2% del rango total.

En este tipo de control se fijan dos puntos de ajuste, o sea, uno inferior P1 y uno superior P2, existiendo una Banda Diferencial como se muestra en la figura 3.8.

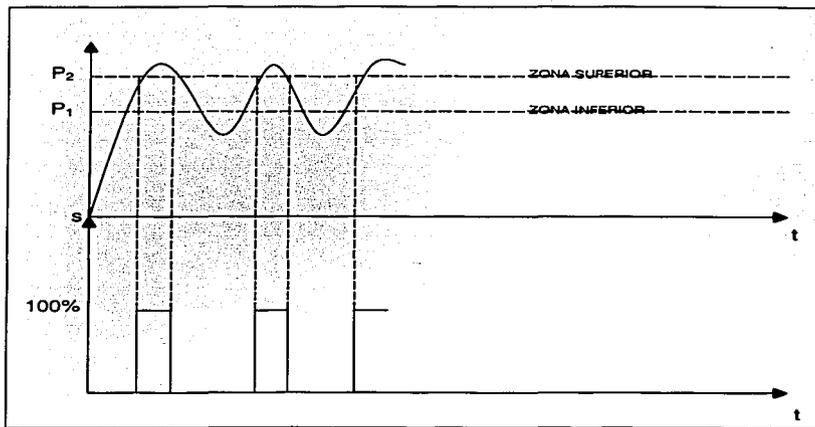


Figura 3.8. Respuesta del modo de Control de Posiciones con Zona Muerta

En este tipo de control se deben de cumplir las siguientes condiciones:

Salida (S)

- Máxima $E > P2$
- Valor original $P1 < E < P2$
- Mínima $E < P$

La ecuación que rige este modo de control es una función no continua.

a) $\text{Lim}_{G=\infty} G(E-P2) = +E > P2$ (zona superior) ... ec. (15)

b) $\text{Valor original} + \text{Lim}_{G=\infty} G(E-P2) + \text{Lim}_{G=\infty} (E-P1)$... ec. (16)
 $P1 < E < P2$ (zona muerta)

c) $\text{Lim}_{G=\infty} G(E-P1) = E < P1$ (zona inferior) ... ec. (17)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Como se puede ver en la ecuación anterior, este modo de control es un sistema de ganancia variable (dentro de la banda muerta $G=0$ y fuera $G=\alpha$) y memoria del último valor antes de entrar en la banda muerta.

C) CONTROL INTEGRAL (REAJUSTE AUTOMATICO O RESET).

La acción de “*reset*” es conocida también como *acción integral* o *reacción de reajuste*, y es una integración de la señal de entrada de error “e”. En efecto esto significa que en una acción de reset, el valor de la variable manipulada “S” se cambia con un rango proporcional al error “e” es decir, si la desviación es doble sobre un valor previo, el Elemento Final de Control se mueve al doble. La ecuación del modo integral es:

$$S = Gr \int_0^t (E-P) dt + C \quad \dots \quad \text{ec. (18)}$$

donde r = reajuste automático en repeticiones / minuto, derivando la ecuación 13 se tiene:

$$\frac{dS}{dt} = Gr e \quad \dots \quad \text{ec. (19)}$$

$$r = \frac{1}{ti}$$

donde ti= constante de acción integral

De la ecuación 19, se ve que la acción del Elemento Final de Control es:

- Directamente proporcional a r.
- Directamente proporcional a G.
- Directamente proporcional al error.

D) CONTROL PROPORCIONAL CON INTEGRAL

Uno de los modos de control que ayuda a evitar, la desviación característica del Control Proporcional es la acción Integral o de reajuste automático, por lo cual se utiliza en combinación con el Control Proporcional.

El efecto que produce el reajuste automático es el de repetir la acción efectuada por la acción proporcional, hasta eliminar la desviación entre la variable y punto de ajuste, no importando la posición del Elemento Final de Control.

Las unidades de control integral que normalmente se usan, se llaman “repeticiones por minuto” que significa el número de veces que repite la acción del Control Proporcional. Por ejemplo, suponiendo que la válvula de control se mueve

por la acción proporcional 1/16 de pulgada, para una desviación dada y, supongamos que la acción de reajuste moviera la válvula 1/8 de pulgada en un minuto después de la misma desviación.

El reajuste automático esta moviendo la válvula dos veces más que la acción proporcional. En otras palabras para una misma desviación la acción de reajuste automático está repitiendo dos veces por minuto lo que la acción proporcional hizo sola.

La ecuación que rige el Control Proporcional con Acción Integral o Reajuste Automático es:

$$S = Ge + Gr \int e dt + C$$

sustituyendo valores se tiene:

$$S = \frac{1}{BP} (E-P) + \frac{r}{BP} \int (E-P) dt + C \quad \dots \quad \text{ec. (20)}$$

r = reajuste automático en rep / min del efecto producido por la acción proporcional en un instante dado, debido a una acción instantánea.

T = tiempo

C = constante de integración.

Derivando la ecuación 20, con respecto al tiempo se tiene:

$$dS = \frac{1}{BP} dE + \frac{r}{BP} (E-P) \quad \dots \quad \text{ec. (21)}$$

Analizando la ecuación 21, con respecto al tiempo se observa que la velocidad de movimiento de la válvula debido al reajuste automático es:

- directamente proporcional a r (núm. rep / min)
- directamente proporcional al error o desviación (e = E-P)
- inversamente proporcional al valor de la banda proporcional.

A continuación se dará una interpretación de r. Supongamos que se tiene un control con BP=100% y un error de 10% cuando r=1rep/min (ver figura 3.9).

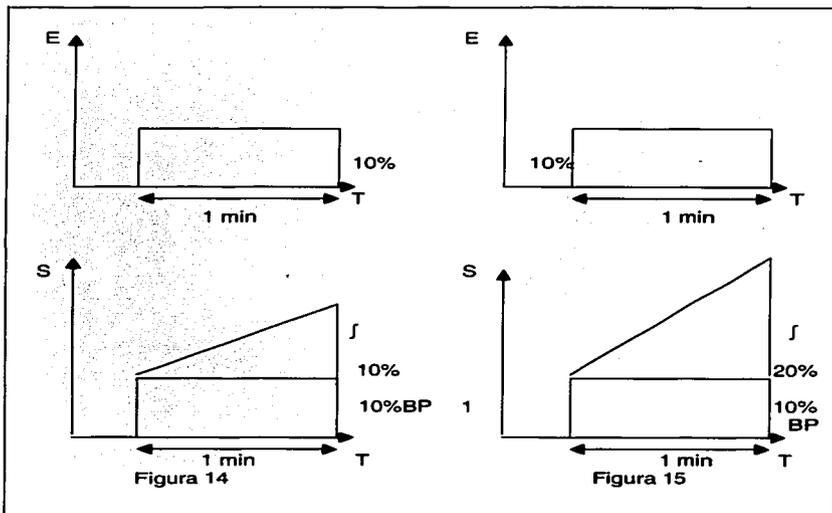


Figura 3.9 Y 3.10. Interpretación de r (reajuste automático).

El Control Proporcional corrige instantáneamente el 10%, el Reajuste Automático corrige 10%/min, o sea, la corrección total en un minuto será de 20%.

Cuando se ajusta el reajuste a 2 rep/min con las mismas condiciones anteriores, se tiene la figura 3.10.

El Control Proporcional corrige instantáneamente el 10% y el reajuste automático corrige 20%/min, con lo que la corrección total después de 1 minuto será 30%.

Del segundo miembro de la ecuación 21, se deduce, que cuando $e = 0$ hay desviación; la respuesta de la señal controlada debida al reajuste automático después de un minuto, repite la acción efectuada por la acción proporcional en un instante, debido a una desviación e .

Si la desviación se sostiene o sea que E no regresa al valor de P, la señal controlada se irá hasta el máximo o el mínimo según si la desviación es positiva (E-P) o negativa (E-P) y también depende de la acción del control que sea inversa o directa.

Quando: $E = P$ y $e = 0$ no hay desviación de la ecuación 20, y quedará como:
 $S = C$

Lo que significa que cuando la desviación es cero, el Reajuste Automático no actúa. Como ejemplo supongamos que tenemos un controlador con las siguientes características: $BP=100\%$, $r=1$ rep/min, $e=10\%$ (ver figura 3.11)

En un instante cualquiera al existir una desviación sostenida de 10% existe un error $e = E - P$ y la acción proporcional actúa:

$$S = (1/BP) (E - P) + 0.5 = (1/1) (0.1) + 0.5 = 0.6 = 60\% \quad \dots \quad \text{ec. (22)}$$

$$S = \text{corrección} + 50\% = 10\% + 50\% = 60\%$$

La acción del Control Proporcional corrige la abertura de la válvula en un 10% (punto A). Esta corrección no es suficiente ya que la variable E no regresa al punto de ajuste "P" (eje Y), entonces, se suma a la anterior la acción del reajuste automático:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{r}{BP} (E - P) = (1/1) (0.1) = 10\% \quad \dots \quad \text{ec. (23)}$$

La acción de Reajuste Automático, desliza la recta hacia la izquierda de la posición 1 a la posición 2, con una velocidad de reajuste:

$$r = 1 \text{ rep / min} = 10\% / \text{min}$$

Al cabo de un minuto la desviación se anula (E-P) por lo que $e = 0$ (punto "R"), el reajuste automático deja de actuar y la válvula tuvo una corrección total de 20% (el doble del efecto causado por la acción proporcional en un instante).

El reajuste automático ha repetido la acción correctiva debido al Control Proporcional en un minuto.

$$E = P, e = 0; S = C = 70\%$$

En este caso al cabo de un minuto, $S = 0.70 = 70\%$ pero "S" puede tener cualquier valor entre 0 y 100% con tal que $C=P$ y $e=0$. El eje de las "Y" coincide con el punto de ajuste "P" lo que cambio es el valor de la ordenada al origen.

Resumiendo se puede decir que el Control Proporcional con Reajuste Automático, se puede aplicar en procesos donde hay cambios grandes o de carga (variable manipulada), por ejemplo:

Las unidades en que se mide la acción de derivada son en unidades de tiempo, ya que su función es la de producir el tiempo de estabilización de la variable. Por ejemplo, cuando se dice que la Acción de Derivada tiene un ajuste de dos minutos, significa que la acción de derivada se anticipará dos minutos en su respuesta a la Acción Proporcional para controlar el proceso. Supongamos que tenemos un control con los siguientes ajustes: BP =100% y R = 1 min, si existe una desviación de:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{de}{dt} = 10\% \quad \dots \quad \text{ec. (24)}$$

(ver figura 3.12)

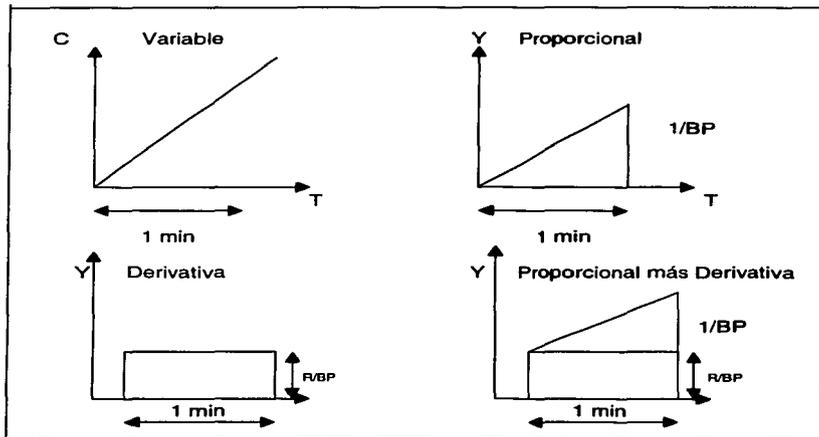


Figura 3.12. Interpretación de la Acción Derivativa.

El control automático corregirá 10% en un minuto por la Acción Proporcional, en cambio, por efecto de la Acción Derivada corregirá instantáneamente 10%, o sea, se adelanta un minuto a la acción correctiva de la banda proporcional. Al cabo de un minuto la corrección total de la válvula fue de 20%. 10% de la banda y 10% de la acción derivativa. En la figura 3.13 muestra la velocidad de cambio de una variable y la figura 3.14 muestra la respuesta del Control de Acción Derivativa.

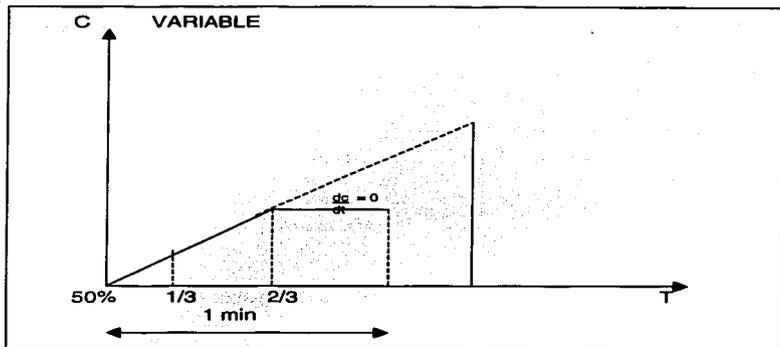


Figura 3.13. Velocidad de cambio de una variable.

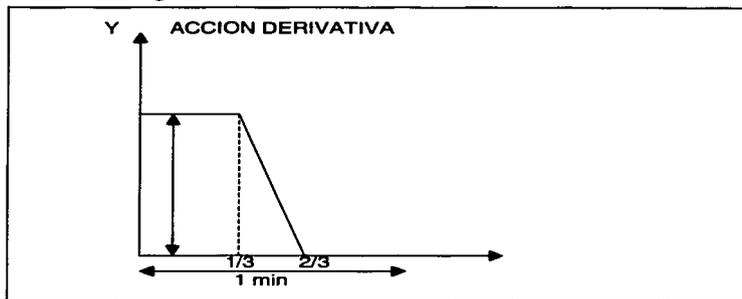


Figura 3.14. Respuesta del Control a una Acción Derivativa

En la figura 3.14 se ve la representación gráfica del comportamiento de la variable controlada (E); de 0 a 1/3 de minuto existe una velocidad de cambio de la variable, tipo rampa de 1/3 a 2/3 existe una razón de cambio del tipo parabólico y de 2/3 a 1 minuto la razón de cambio es constante. La Acción Derivativa actúa inmediatamente que siente una acción de cambio de la variable, dando por salida un escalón al tiempo de anticipación hasta un 1/3 minuto y de 1/3 a 2/3 minuto la

salida es una rampa como lo muestra la figura 3.14, y de 2/3 a 1 minuto la salida es cero.

Si existiera una desviación sostenida de la variable con respecto al punto de ajuste, esto lo corrige el modo integral.

La ecuación representativa del Control Derivativo es:

$$S = G T_d \frac{dE}{dt} + C \quad \dots \quad \text{ec. (25)}$$

donde T_d = adelanto en minutos.

$$S = \frac{T_d}{BP} \frac{de}{dt} + C \quad \dots \quad \text{ec. (26)}$$

derivando la ecuación 26, tenemos:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{T_d}{BP} \frac{de^2}{dt^2} + C \quad \dots \quad \text{ec. (27)}$$

Se observa que la velocidad de movimiento a la Acción Derivativa es:

- Directamente proporcional a T_D (anticipación en minutos).
- Directamente proporcional a la aceleración de cambio de la variable.
- Inversamente proporcional a BP.

F) CONTROL PROPORCIONAL CON ACCION INTEGRAL (REAJUSTE AUTOMATICO) Y ACCION DERIVATIVA.

Algunos procesos presentan atrasos en la determinación y en la transmisión de la variable controlada. Estos atrasos reciben el nombre genérico de **tiempos muertos**. Para compensar estos tiempos muertos es necesario que el controlador actúe inmediatamente que sienta un cambio en el error y que se anticipe al efecto que pudiera producir un cambio de carga en un proceso con tiempo muerto. Este tipo de control es el de Acción Derivativa.

El Control Proporcional más Integral más Derivativo o Control de Tres Modos es lo más sofisticado en controles retroalimentados.

En el Control de Tres Modos tenemos el más complejo Algoritmo de Control que es disponible en forma estándar. Proporciona rápida respuesta, ningún corrimiento y posee en el caso neumático, de tres perillas para ajustar. Requiere de un extenso y continuo ajuste para obtener la sintonía, ofrece un buen control cuando se sintoniza adecuadamente.

Las unidades en que se mide la acción derivativa es en unidades de tiempo ya que su función es de reducir el tiempo de estabilización de la variable cuando se dice que el control de acción derivativa tiene un ajuste de dos minutos significa que la derivada se sostuvo una situación en la variable controlada, dos minutos antes que si únicamente se hubiera empleado una acción proporcional para controlar el proceso. Es decir las unidades de acción derivativa están en función de la acción proporcional. La ecuación que representa los Tres Modos de Control es:

$$S = G e + G r \int_0^t e dt + G T_d \frac{de}{dt} + C \quad \dots \quad \text{ec. (28)}$$

donde:

T_d = Adelanto en minutos del valor de la corrección que efectuará la Acción Proporcional al cabo de un tiempo determinado debido a la velocidad de cambio de la variable: $\frac{de}{dt}$

Rescribiendo la ecuación 28 en función de las definiciones de G y e tenemos:

$$S = \frac{1}{BP} (E-P) + \frac{r}{BP} \int (E-P) dt + \frac{T_d}{BP} \frac{de}{dt} + C \quad \dots \quad \text{ec. (29)}$$

Analizando la tercera parte de la ecuación 29 se observa que la posición del Elemento Final de Control (válvula automática) debido a la Acción Derivativa es::

- a) Inversamente proporcional al ajuste de BP.
- b) Directamente proporcional a T_d (minutos de adelanto).
- c) Directamente proporcional a la velocidad de cambio de la variable (de/dt).

$$S = \frac{T_d}{BP} \frac{de}{dt} + C \quad \dots \quad \text{ec. (30)}$$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.3 APLICACION DE LOS MODOS DE CONTROL

VARIABLE	PROCESO	SISTEMA DE CONTROL
FLUJO	<ul style="list-style-type: none"> - Muy rápido. - La mayor parte de los retrasos están en los sistemas. - no lineal (cuadrático). - Ruidoso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcional-Reajuste automático. - Baja ganancia, reajuste rápido. - La derivada no ayuda.
PRESION (líquido)	<ul style="list-style-type: none"> - Rápido. - La mayor parte de los retrasos están en el proceso. - Lineal. - Ruidoso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcional-Reajuste automático. - Ganancia alrededor de 1 reajuste rápido. - La derivada no ayuda.
PRESION (gas)	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad simple. - Lineal sin ruido. - Proceso sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Controladores auto-operados o proporcionales con ganancia alta. - Reajuste automático, rara vez necesario. - La derivada no es necesaria.
PRESION (vapor)	<ul style="list-style-type: none"> - La dinámica es variable. - Lento comparado con otros procesos de presión. - Lineal sin ruido. 	<ul style="list-style-type: none"> - Controles de dos modos. - Los ajustes son variables.
NIVEL	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad simple. - Integrador. - Lineal. - El ruido es poco frecuente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Control de precisión, ganancia alta o proporcional. - Control promedial, proporcional de ganancia baja más reajuste o controles especializados.

Tabla 1. Aplicación de los Modos de Control

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPITULO

IV

CAPITULO IV

ESTABILIDAD DEL PROCESO

En los capítulos anteriores se mencionó que uno de los objetivos operacionales al diseñar un Sistema de Control es el mantener el proceso estable; siendo esta característica la más importante del comportamiento dinámico del sistema de control.

De ahí que:

Un sistema está en equilibrio si, en ausencia de cualquier perturbación o entrada, la salida se mantiene en el mismo estado. Un sistema de control lineal invariante en el tiempo, es estable si finalmente la salida retorna a su estado de equilibrio cuando el sistema es sometido a una perturbación. Un sistema de control lineal invariante en el tiempo, es inestable si continua indefinidamente una oscilación en la salida, o si la salida diverge sin límite de su estado de equilibrio cuando el sistema es sometido a una perturbación.

También se dice que un sistema es estable, cuando su respuesta se encuentra vinculada con todas las entradas, donde la entrada es función del tiempo, la cual siempre se encuentra dentro de ciertos límites en el transcurso. La figura 4.1 muestra lo que sería el comportamiento de las respuestas estables e inestables en el transcurso del tiempo para un proceso, después de haber sido perturbada.

El análisis de estabilidad de un sistema puede ser tratado de igual manera no importando si se trata de un proceso controlado o no controlado.

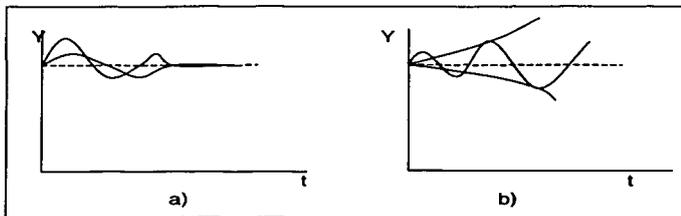


Figura 4.1. a) Respuesta de un sistema estable. b) Respuesta de un sistema inestable.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La estabilidad de un circuito abierto depende de la localización de los polos de la función de transferencia del mismo. La estabilidad de un circuito cerrado del proceso y un controlador feedback depende de la localización de los polos de la función global de transferencia, estos polos del circuito cerrado son diferentes de los polos del circuito abierto. Sin embargo, existe una relación entre ambas funciones.

Los criterios de estabilidad más simples se basan en la localización de los polos en el plano S . El plano S , es aquel que consta de un eje real y un eje imaginario (plano complejo). La localización de los polos de una función de transferencia da el primer criterio de estabilidad de un sistema:

Si la función de transferencia de un sistema dinámico tiene al menos un polo con parte real positiva, el sistema es inestable. Por lo tanto, todos los polos de la ecuación de transferencia deben localizarse del lado izquierdo del eje imaginario del plano complejo, para que el sistema sea estable.

Las características de estabilidad de la respuesta a circuito cerrado pueden ser determinadas por los polos de las funciones de transferencia G_{ap} y G_{carga} . Estos polos son comunes para ambas funciones de transferencia (porque el denominador es el mismo) y están dadas por la solución de la ecuación:

$$1 + G_p G_f G_c G_m = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (31)}$$

Esta ecuación es llamada la *ecuación característica* para un sistema a *circuito cerrado*.

Para el caso del *circuito abierto* se tiene que:

$$G_{oL} = G_p G_f G_c G_m \quad \dots \quad \text{ec. (32)}$$

La cual es llamada **la función de transferencia a circuito abierto**.

Puede notarse que las funciones de transferencia dependen únicamente de los elementos del circuito.

Si un sistema es estable o inestable, es una característica del sistema y no depende de la entrada. Los polos de la entrada o función excitadora, no afectan la característica de estabilidad del sistema, pero contribuyen solamente a los términos de respuesta estacionaria en la solución. De manera que se puede resolver el problema de estabilidad, eligiendo polos a circuito cerrado en el semiplano derecho de S , o inclusive en el eje $f\omega$. Matemáticamente los polos a circuito cerrado en el $f\omega$ han de producir oscilaciones, cuya amplitud ni crece ni decae con el tiempo, sin embargo, en los casos reales, el ruido presente y la amplitud de las oscilaciones puede aumentar a un ritmo determinado por el nivel

de potencia del ruido, por lo tanto, un sistema de control no debe tener polos a circuito abierto en el eje $f\omega$).

Cabe hacer notar que el hecho de que todos los polos estén localizados a la izquierda del eje imaginario no garantiza una respuesta satisfactoria, ya que si existen polos dominantes cercanos a este eje, la respuesta puede presentar excesivas oscilaciones o puede ser muy lenta.

Por lo tanto, para garantizar las características de la respuesta deseada (respuestas rápidas y bien amortiguadas) es necesario que los polos del sistema queden dentro de una zona determinada del plano complejo, como puede observarse en la figura 4.2.

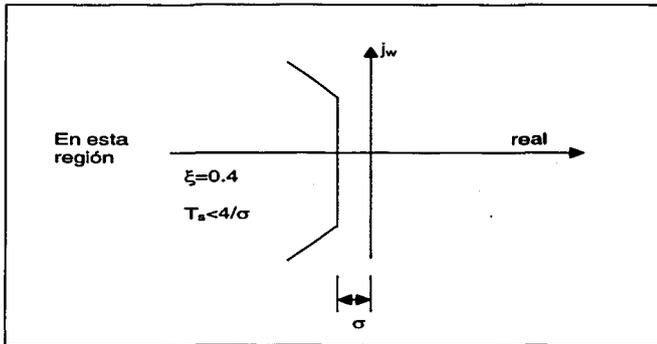


Figura 4.2. Región del plano complejo donde se cumplen las condiciones para una respuesta satisfactoria

4.1 CRITERIO DE ESTABILIDAD DE ROUTH-HURWITZ

Esta prueba de estabilidad está basada en un método puramente algebraico, el cual no requiere la evaluación de las raíces de la ecuación característica. Este únicamente requiere conocer si alguna de las raíces se encuentra a la derecha del eje imaginario del plano complejo.

El procedimiento de ROUTH-HURWITZ permite probar si alguna de las raíces se encuentra a la derecha del eje imaginario y entonces concluye rápidamente si el sistema es o no estable sin la necesidad de calcular las raíces.

Si el sistema propuesto se predice que es inestable, el diseñador busca de una manera, modificar éste para hacerlo estable. Esto será cierto sólo cuando se encuentren sistemas con configuración feedback, por lo que es conveniente tener un criterio disponible que dé una respuesta a la cuestión de estabilidad.

Criterios ligeramente diferentes se desarrollan en forma separada por HURWITZ en 1895 y por ROUTH en 1905, con el propósito de predecir la estabilidad de la rotación de un cuerpo alrededor de un eje dado. Sus criterios dan la misma información, recordando que las propiedades de un sistema lineal se determinan por las raíces de su ecuación característica, si alguna raíz cae en la parte derecha del plano complejo, el sistema es inestable.

Para iniciar la explicación se tiene que la ecuación característica puede ser expandida en un polinomio de la siguiente manera:

$$0 + G_p G_I G_c G_m = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (33)}$$

Este criterio se basa en si hay o no raíces positivas en la ecuación polinómica resultante de la ecuación característica, sin necesidad de resolverla. Este criterio de estabilidad se aplica a polinomios que tengan solamente un número finito de términos. Aplicando el criterio, se puede obtener directamente información respecto a la estabilidad a partir de los coeficientes de la ecuación característica.

El procedimiento denominado criterio de estabilidad de Routh es el siguiente:

- 1) La ecuación característica debe expresarse como:

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (34)}$$

Donde los coeficientes son cantidades reales. Se supone que $a_n \neq 0$; es decir, se ha quitado cualquier raíz cero.

- 2) Si cualquiera de los coeficientes es cero o negativo en la presencia de por lo menos un coeficiente positivo, hay una raíz o raíces que son imaginarias o que tienen partes reales positivas, por lo tanto, en tal caso el sistema no es estable. Si sólo interesa la estabilidad absoluta, no hay necesidad de llevar el procedimiento más adelante. Se hace notar que todos los coeficientes deben ser positivos. Esta es una condición necesaria, como puede verse en el razonamiento siguiente: un polinomio en S con coeficientes reales siempre puede ser descompuesto en factores lineales y cuadráticos, tales como $(s + a)$ y $(s^2 + bs + c)$, donde a , b y c son reales. Los factores lineales dan raíces reales y los factores cuadráticos dan raíces complejas del polinomio. El factor $(s^2 + bs + c)$ da raíces con partes reales negativas solamente si b y c son ambas positivas. Para que todas las raíces tengan partes reales negativas, deben ser positivas las constantes abc ,

etc., en todos los factores. El producto de cualquier cantidad de factores lineales y cuadráticos que contienen solamente coeficientes positivos siempre da un polinomio con coeficientes positivos. Es importante notar que la condición de que todos los coeficientes sean positivos no es suficiente para asegurar la estabilidad. La condición necesaria, pero no suficiente de estabilidad es que todos los coeficientes de la ecuación 34 estén presentes y que todos tengan signo positivo.

- 3) Si todos los coeficientes son positivos, agrupar los coeficientes del polinomio en filas y columnas de acuerdo con el siguiente esquema, conocido como Arreglo de Routh.

Fila	1	a_0	a_2	a_4	a_6	.	.	.
	2	a_1	a_3	a_5	a_7	.	.	.
	3	b_1	b_2	b_3	b_4	.	.	.
	4	c_1	c_2	c_3	c_4	.	.	.
	5	d_1	d_2	d_3	d_4	.	.	.

	n-1	e_1	e_2	e_3	e_4	.	.	.
	n	f_1	f_2	f_3	f_4	.	.	.

donde los coeficientes b_1, b_2, b_3 y b_4 , etc., son calculados de la siguiente manera:

$$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}$$

$$b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$$

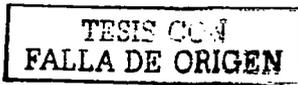
$$b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1}$$

.....

La evaluación de las b continua hasta que las restantes sean todas cero. Se sigue el mismo esquema multiplicando en forma cruzada los coeficientes de las filas para evaluar las c, d, e, etc. Es decir:

$$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1}$$



$$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1}$$

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1}$$

$$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1}$$

Este proceso continúa hasta haber completado la fila n-ésima. El conjunto completo de los coeficientes es triangular. Se hace notar que al desarrollar este conjunto se divide o multiplica un número positivo para simplificar el cálculo numérico subsiguiente sin alterar la conclusión con respecto a estabilidad.

El criterio de estabilidad de Routh establece que la cantidad de raíces de la ecuación 34 con partes reales positivas es igual al número de cambios de signo de los coeficientes de la primera columna del arreglo. Se hace notar que no necesitan conocerse los valores exactos de los términos de la primera columna; de hecho sólo interesan sus signos. La condición necesaria y suficiente para que todas las raíces de la ecuación 33 queden localizadas en el lado izquierdo del eje imaginario, del plano complejo, es que todos los coeficientes de esta ecuación sean positivos y que todos los términos de la primera columna tengan signo positivo.

CASOS ESPECIALES.

Si un término de la primera columna en cualquier fila es cero, pero los términos restantes no son cero o no hay término remanente, se reemplaza el término cero por un número positivo muy pequeño "v" y se calcula el resto del conjunto. Por ejemplo, sea el siguiente polinomio:

$$s^3 + 2s^2 + s + 2 = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (35)}$$

el conjunto de coeficientes es:

1	1	1
2	2	2
3	0≡v	
4	2	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Si el signo del coeficiente sobre el cero (v) es el mismo que el que está debajo de él, esto indica que existen un par de raíces imaginarias. En realidad el polinomio del ejemplo, tiene dos raíces imaginarias en $s = \pm f$.

Sin embargo, si el signo del coeficiente sobre el cero (v) es contrario al que está debajo de él, esto indica que hay un cambio de signo. Por ejemplo, para el polinomio

$$s^3 - 3s + 2 = (s - 1)^2 (s + 2) = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (36)}$$

el conjunto de coeficientes es

un cambio de signo	1	1	-3
	2	$0 \equiv v$	2
	3	$-3/2v$	
un cambio de signo	4	2	

Hay dos cambios de signo de los coeficientes de la primera columna. Esto coincide con el resultado correcto indicado por la forma en los factores de la ecuación polinómica.

Si todos los coeficientes calculados en una fila son cero, esto indica que hay raíces de igual valor radialmente opuestas en el plano S ; es decir, dos raíces reales con igual valor y signo opuesto y/o dos raíces imaginarias conjugadas. En tal caso, se puede continuar la evaluación del resto del conjunto, formando un polinomio auxiliar con los coeficientes de la última fila y usando los coeficientes de la derivada de este polinomio en la próxima fila. Esas raíces con igual valor y ubicadas en forma radialmente opuesta en el plano S , pueden ser halladas resolviendo el polinomio auxiliar que es siempre par. Para un polinomio auxiliar de grado n hay n pares de raíces iguales y opuestas. Por ejemplo, si se tiene la siguiente ecuación:

$$S^5 + 2s^4 + 24s^3 + 48s^2 - 25s - 50 = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (37)}$$

El arreglo de Routh es

1	1	24	-25	←	Polinomio auxiliar P(s)
2	2	48	-50		
3	0	0			

Los términos de la fila 3 son todos cero. Entonces se forma del polinomio auxiliar con los coeficientes de la fila 2, el polinomio auxiliar P(s) él tiene la forma:

$$P(s) = 2s^4 + 48s^2 - 50 \quad \dots \quad \text{ec. (38)}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Que indica que hay dos pares de raíces de igual magnitud y signo opuesto. Estos pares se obtienen resolviendo la ecuación polinómica auxiliar $P(s) = 0$. La derivada $P'(s)$ con respecto a s es:

$$\frac{dP(s)}{ds} = 8s^3 + 96s \quad \dots \quad \text{ec. (39)}$$

Se reemplazan los términos de la fila 3 por los coeficientes de la última ecuación, es decir, 8 y 96. Por lo que el arreglo queda de la siguiente manera:

1	1	24	-25
2	2	48	-50
3	8	96	
4	24	-50	
5	112.7	0	
6	-50		

Puede notarse un cambio de signo en la primera columna del nuevo arreglo. Por lo tanto, la ecuación original tiene una raíz con parte real positiva. Hallándolas en la ecuación polinómica auxiliar se tiene:

$$2s^4 + 48s^2 - 50 = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (40)}$$

de aquí se obtiene:

$$\begin{aligned} s^2 = 1 & & s^2 = -25 \\ \text{o} & & \\ s = \pm 1 & & s = \pm j5 \end{aligned}$$

Estos dos pares de raíces son parte de las raíces de la ecuación original. De hecho se puede escribir la ecuación original en forma de factores de la siguiente manera:

$$(s+1)(s-1)(s+j5)(s-j5)(s+2) = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (41)}$$

Claramente, la ecuación original tiene una raíz con parte real positiva.

El criterio de estabilidad de Routh es de utilidad limitada en el análisis de sistemas lineales de control, principalmente porque no sugiere cómo mejorar la estabilidad o cómo estabilizar un sistema inestable. Sin embargo, es posible determinar los efectos de modificación de uno o dos parámetros de un sistema examinando los valores que producen la inestabilidad. Por ejemplo, si se considera el sistema mostrado en la figura 4.3, se tiene que la función de transferencia a circuito cerrado es:

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

$$\frac{y(s)}{f(s)} = \frac{k}{s(s^2+s+1)(s+2) + k} \dots \text{ec. (42)}$$

Cuya ecuación característica es: $s(s^2+s+1)(s+2) + k = 0 \dots \text{ec. (43)}$

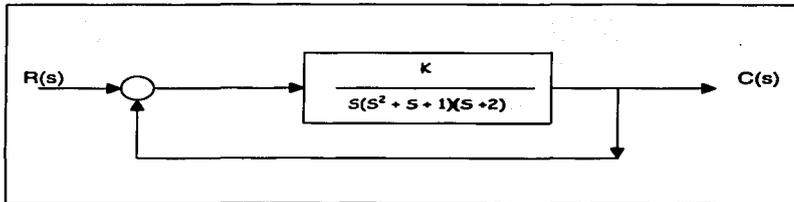


Figura 4.3. Sistema de Control

El arreglo de Routh es

1	1	3	k
2	3	2	0
3	7/3	k	
4	2-[9/7]k		

Para que el sistema sea estable k debe ser positiva, como deben ser todos los coeficientes de la primera columna. Por lo que:

$$[14/9] > k > 0$$

Cuando $k = 14/9$, el sistema se vuelve oscilatorio y matemáticamente la oscilación se mantiene en amplitud constante.

4.2 CRITERIO DE ESTABILIDAD DE ROOT LOCUS

W. R. Evans desarrolló un método simple para hallar las raíces de la ecuación característica y lo utilizó extensamente en ingeniería de control. Este método, denominado localización de raíces ROOT-LOCUS, consiste en un procedimiento por medio del cual se trazan las raíces de la ecuación característica para todos los valores de un determinado parámetro del sistema. De esta manera pueden ser ubicadas las raíces correspondientes a un determinado valor de parámetro. Es muy común que el parámetro sea la ganancia del controlador, pero puede ser cualquier otra variable de la función de transferencia.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La localización de raíces se considera como un análisis de ayuda, el efecto de la ganancia sobre la localización de los polos se muestra directamente, ya que las respuestas características en el dominio de la frecuencia a circuito cerrado se obtienen fácilmente; ya sea gráfica o analíticamente. Los residuos en los polos a circuito cerrado son disponibles, requiriendo proporcionar sólo unos cuantos cálculos simples por medio de una construcción gráfica. El tiempo requerido para que la respuesta transiente caiga a un nivel despreciable se indica directamente por medio de la distancia mínima a partir del eje imaginario de un polo (o par de polos en el caso de raíces conjugadas). Así el diagrama de localización de raíces es una herramienta útil e indicativa de las características de funcionamiento a circuito cerrado en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Para alcanzar un buen entendimiento de este criterio de estabilidad se consideran los siguientes aspectos:

Un diagrama de localización de raíces es una figura que muestra como las raíces de la ecuación característica varían conforme la ganancia de un controlador feedback varía de cero al infinito. La absisa es la parte real de la raíz y la ordenada la parte imaginaria.

EJEMPLO

Considerando el más simple de los sistemas, un sistema con retardo de primer orden, con Control Proporcional se tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_M B = (k_0 k_c / \tau_0 s + 1) \quad \dots \quad \text{ec. (44)}$$

Donde k_0 es la ganancia en régimen permanente del proceso a circuito abierto; τ_0 es la constante del tiempo del proceso a circuito abierto y k_c es la ganancia del controlador.

La ecuación característica del sistema es:

$$1 + G_M B = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (45)}$$

$$1 + (k_0 k_c / \tau_0 s + 1) = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (46)}$$

rearrreglando:

$$\tau_0 s + 1 k_0 k_c = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (47)}$$

resolviendo esta para s:

$$s = \frac{1 + k_0 k_c}{\tau_0} \quad \dots \quad \text{ec. (48)}$$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

lo que indica que sólo se tiene una raíz y la curva inicia en $s=-1/\tau_0$ cuando $k_c=0$, y se mueve a lo largo del eje real negativo conforme el valor de k_c . La figura 4.4 muestra la gráfica de este sistema.

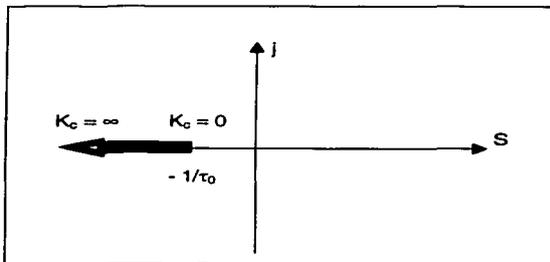


Figura 4.4. Diagrama de localización de Raíces para un Sistema de Primer Orden

Para un sistema de primer orden, las raíces a circuito cerrado siempre son reales, así que los sistemas nunca serán bajo amortiguados u oscilatorios. El coeficiente de amortiguamiento a circuito cerrado siempre será mayor que uno, y de acuerdo al diagrama siempre será estable este sistema.

Ahora considerando un sistema de segundo orden con un controlador proporcional. Supóngase la siguiente ecuación característica:

$$1 + \frac{1}{(s+1)(5s+1)} k_c = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (49)}$$

rearrreglando se tiene:

$$5s^2 + 6s + 1 + k_c = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (50)}$$

mediante la fórmula cuadrática se tienen las raíces:

$$s = -(3/5) \pm (1/5)(4-5k_c)^{1/2} \quad \dots \quad \text{ec. (51)}$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

La localización para varios valores de k_c son mostrados en la figura 4.5.

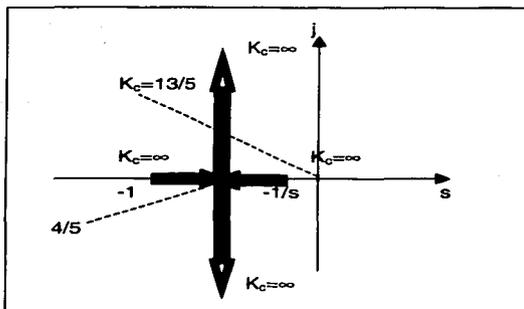


Figura 4.5. Sistema de Segundo Orden con Controlador Proporcional

Cuando k_c es cero las raíces son $s = -1/5$ y $s = -1$. Note que estos valores son los polos de la función de transferencia a circuito abierto, el diagrama de localización de raíces siempre inicia con los polos a circuito abierto.

Para k_c entre cero y $4/5$, las dos raíces son reales y están sobre el eje real negativo, por lo que el sistema a circuito cerrado está críticamente amortiguado para $k_c = 4/5$. Y para valores mayores de k_c , las raíces pueden ser complejas.

De los ejemplos anteriores puede concluirse que conforme aumenta el orden del sistema, la respuesta dinámica del mismo se vuelve más compleja. Los sistemas de primer orden nunca son bajo amortiguados y nunca podrán ser inestables a circuito cerrado para cualquier valor de ganancia. Los sistemas de segundo orden se hacen bajo amortiguados conforme la ganancia aumenta, pero nunca serán inestables. Los sistemas de tercer orden y mayores pueden hacerse inestables a circuito cerrado.

Una de las limitaciones básicas de la técnica de Root-Locus es el tiempo muerto, el cual no es manejado convenientemente. Es por ello que la aproximación de primer orden de Pade para el tiempo muerto es frecuentemente usada, pero no es muy exacta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$E^{Da} \cong \frac{1 - (1/2D)s}{1 + (1/2D)s} \quad \dots \quad \text{ec. (52)}$$

En virtud de la complejidad que resulta el manejar y encontrar las raíces de ecuaciones de transferencia de ordenes mayores de tres, el método de Root-Locus considera una forma gráfica muy sencilla de encontrar las raíces.

A continuación se describe este procedimiento.

CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE LOCALIZACIÓN DE RAICES (ROOT-LOCUS)

Las gráficas de localización de raíces son fáciles de generar para sistemas de primer orden, ya que las raíces pueden encontrarse analíticamente como funciones explícitas de la ganancia del controlador. Para sistemas de mayor orden el obtener las raíces es más complicado, para lo cual se han desarrollado muchas técnicas gráficas trazando las curvas de algunas. Entre las más importantes esta la que se describe a continuación, bajo las siguientes reglas establecidas:

- La localización de la raíz comienza en los polos ($k_c = 0$), de la función de transferencia a circuito abierto.
- La localización de las raíces termina en los ceros ($k_c = \infty$) de $B(s) G_M(s)$.
- El número de puntos es igual al orden del sistema (número de polos de $B(s) G_M(s)$).
- La parte más compleja de las curvas siempre aparece como pares conjugados complejos.
- El ángulo de las asíntotas de los puntos es igual a $\pm 180^\circ (n-m)$, cuando s tiende a ∞ , donde n es el número de polos y m el número de ceros de $B(s) G_M(s)$.

En el primer ejemplo $n-m=1$, así el número de asíntotas forman un ángulo de $\pm 180^\circ$ con el eje real. En el segundo ejemplo, $n-m=2$, así el ángulo es $\pm 90^\circ$. Las reglas mencionadas anteriormente son muy claras. Sin embargo la última de ellas proviene del hecho de que en un punto sobre la gráfica de las raíces, el número complejo s debe satisfacer la ecuación:

$$1 + G_M(s) B(s) = 0 \quad \dots \quad \text{ec. (53)}$$

$$G_M(s) B(s) = -1 + j0 \quad \dots \quad \text{ec. (54)}$$

Por lo tanto, el argumento de $B(s) G_M(s)$ en un gráfico de raíces debe ser siempre:

$$\text{Arg } G_M(s) B(s) = \text{Arc Tan } 0/1 = \pm \pi \quad \dots \quad \text{ec. (55)}$$

Ahora $B(s) G_M(s)$ es una relación de polinomios de orden m en el numerador y n -orden en el denominador.

$$G_M(s) B(s) = \frac{b_M s^m + b_{M-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_N s^N + a_{N-1} s^{N-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad \dots \quad \text{ec. (56)}$$

En la asíntota, s se hace muy grande, así que sólo los términos s^M y s^N permanecen significativos:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} [G_M(s) B(s)] = \frac{b_M s^M}{a_N s^N} = \frac{b_M / a_N}{s^{N-M}} \quad \dots \quad \text{ec. (57)}$$

Estableciendo a s en forma polar ($s = r e^{i\theta}$) da:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} [G_M(s) B(s)] = \frac{b_M / a_N}{r^{N-M} e^{i\theta(N-M)}} \quad \dots \quad \text{ec. (58)}$$

El ángulo o argumento de $B(s) G_M(s)$ es

$$\lim_{s \rightarrow \infty} [\text{Arg } G_M(s) B(s)] = - (N - M) \theta \quad \dots \quad \text{ec. (59)}$$

La ecuación también debe satisfacerse en la asíntota, por lo tanto:

$$(N - M) \theta = \pm \pi \quad \dots \quad \text{ec. (60)}$$

Las reglas mencionadas anteriormente son fáciles de recordar y pueden usarse para dar una idea de la forma general de la curva de la localización de raíces.

Estas reglas pueden ser también expresadas de la siguiente manera:

1. Siempre debe cumplirse que para sistemas reales $N \geq M$ donde N es el número de polos y M el número de ceros.
2. El número de ramificaciones es igual al número de polos a circuito abierto (N).
3. Las ramificaciones se inician en los polos a circuito abierto y terminan en los ceros a circuito abierto. La terminación de los $(N-M)$ polos ocurre hacia el infinito a lo largo de asíntotas.
4. Locus sobre el eje real. El eje real es parte del Root-Locus cuando la suma del número de polos y ceros a la derecha de un punto en el eje real es impar. Esto es necesario al considerar únicamente los polos y ceros reales en la aplicación de ésta regla, para los polos y ceros complejos, ya que estos siempre ocurren en pares conjugados y su efecto cancela el comprobar el criterio del ángulo para puntos sobre el eje real. Además, un polo de q -ésimo orden (o cero) puede ser contado q veces en la aplicación de la regla.
5. Asíntotas. Hay $(N-M)$ ramificaciones las cuales alcanzan (conforme $K \rightarrow \infty$) asíntoticamente $(N-M)$ líneas rectas, radiales al centro de gravedad de los polos y ceros de la función de transferencia a circuito abierto. El centro de gravedad está dado por:

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^N p_j - \sum_{i=1}^M z_i}{N - M} \quad \dots \quad \text{ec. (61)}$$

Estas líneas asíntotas forman ángulos de $\pi[(2k+1)/(N-M)]$ con el eje real y son, por lo tanto, igualmente espaciadas en ángulos de $2\pi/(N-M)$ cada una de la otra ($k=0,1,2,\dots, N-M-1$).

6. Punto de separación. El punto en el cual dos ramificaciones emergen de los polos adyacentes (o se mueven hacia los ceros) sobre el eje real, sé intersectan y se salen (o entran) del eje real es determinado por la solución de la ecuación:

$$\sum_{i=1}^M (1/s - z) = \sum_{j=1}^N (1/s - p) \quad \dots \quad \text{ec. (62)}$$

Esta ramificación entra o sale del eje real en ángulos de $\pm \pi/2$. Esta ecuación es resuelta por prueba y error al checar ésta para varios puntos de prueba, $s=s_0$, sobre el eje real entre los polos o ceros de interés. Para polos y ceros reales, el término en el denominador de ésta ecuación es obtenido por simple medición de la distancia a lo largo del eje real entre el punto de prueba y los polos y ceros. Si un par de polos complejos, $p_i = a_i \pm jb_i$, están presentes, hay que adicionar al lado derecho de la ecuación el término:

$$\frac{2(s - a)}{(s-a)^2 + b^2} \quad \dots \quad \text{ec. (63)}$$

Este término cuenta para ambos polos del par conjugado.

7. Angulo de desviación o acercamiento. Existen q ramificaciones emergiendo de cada q-ésimo polo a circuito abierto con ángulos determinados por

$$\theta = (1/v) [(2k+1)\pi + \sum \text{ang}(p_a - z_j) - \sum \text{ang}(p_a - p_j)] \quad \dots \quad \text{ec. (64)}$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, q-1$$

Donde p_a es un polo particular de orden q. Cada una de las M ramificaciones las cuales no terminan en asíntotas terminan en uno de los M ceros. Ellas pueden alcanzar sus ceros particulares en ángulos de:

$$\theta = (1/v) [(2k+1)\pi + \sum \text{ang}(z_b - p_i) - \sum \text{ang}(z_b - z_i)] \quad \dots \quad \text{ec. (65)}$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, v-1$$

Donde z_b es un cero particular d orden v. Para polos simples (o ceros) sobre el eje real el ángulo de desviación (o aproximación) puede ser π o 0.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

De una manera general se puede decir que el trazado de la localización está fundamentado completamente en el criterio del ángulo el cual es independiente de la ganancia (K), y después de establecer la localización, la ganancia para cualquier punto puede ser obtenida por criterio de magnitud.

Este método puede caracterizarse como un método puramente gráfico, sin embargo, si se cuenta con programas de computadora que pueden evaluar todas las raíces del polinomio de la ecuación característica en función de la ganancia, generalmente del controlador, el método puede ser muy versátil para el análisis de la estabilidad de un proceso determinado.

CAPITULO

V

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

CAPITULO V

ALGORITMO PID Y METODOS DE SINTONIA

El algoritmo de control PID (Proporcional-Integral –Derivativo) es usado para el control de casi todos los circuitos en los procesos industriales y es también la base de diversas estrategias y algoritmos de control avanzado.

Para que los circuitos de control funcionen apropiadamente, el circuito PID debe estar adecuadamente sintonizado; por varios años se han usado métodos estándar para sintonizar los circuitos, pero se deben reevaluar para usarse en los modernos sistemas de control digital.

Discutiremos métodos y criterios para sintonizar el controlador, así como el Algoritmo de Control PID, como funciona, las diferentes opciones, métodos de implementación y como estos afectan la operación y sintonía del controlador.

5.1 EL CIRCUITO DE CONTROL

Control básico de retroalimentación (feedback)

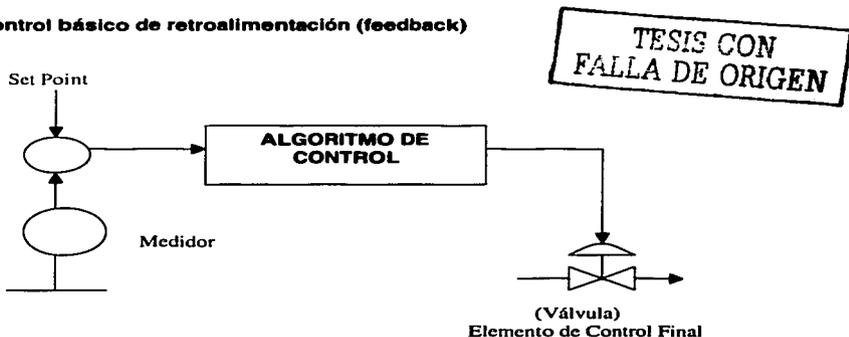


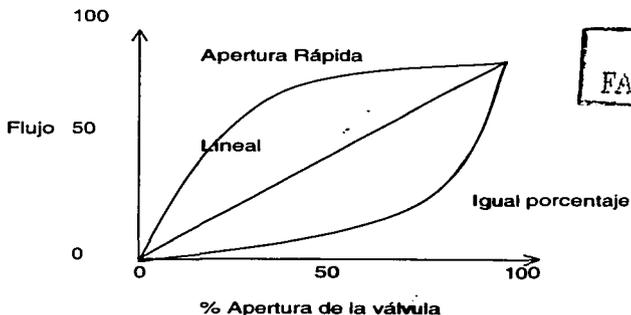
Fig. 5. 1. Control básico de retroalimentación

El sistema mide el proceso, lo compara con el punto fijo (Set Point) y entonces manipula la salida en la dirección a la cual **debe** moverse el proceso hacia el punto fijo.

Válvula lineal

Las válvulas normalmente son no lineales, esto es, el flujo a través de la válvula no es el mismo que la posición de la válvula. Existen varios tipos de válvulas:

- Lineales. La misma ganancia sin importar la posición de la válvula.
- Igual porcentaje. Poca ganancia cuando la válvula está semi cerrada. Alta ganancia cuando la válvula está semi abierta.
- Apertura rápida. Alta ganancia cuando la válvula está semi cerrada. Poca ganancia cuando la válvula está semi abierta.



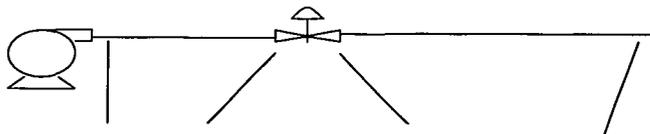
TRABAJE CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.2. Flujo Vs % de Apertura de la válvula

Como veremos más adelante, la ganancia del proceso y la válvula, son muy importantes para sintonizar el circuito. Si el controlador es sintonizado para un proceso de ganancia, puede no trabajar para otros procesos de ganancia.

Características instaladas: Válvula lineal

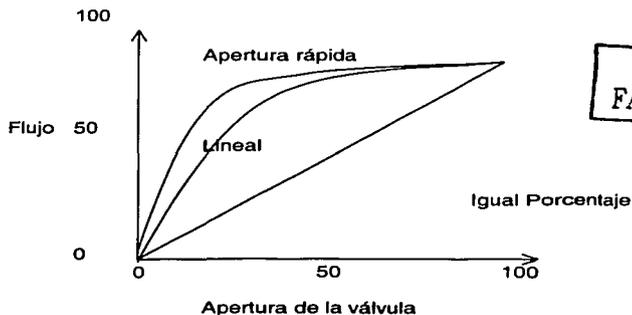
La curva de flujo vs. % de apertura de la válvula cambia debido a la pérdida de carga en la tubería.



Flujo Lento	100psig	90 psig	10psig	0psig
Flujo Rápido	100psig	60 psig	40psig	0psig

Fig. 5.3. Válvula Lineal: Características instaladas

A flujo lento, la pérdida de carga a través de la turbina es menor, dejando una presión diferencial más grande de la válvula. A flujo alto la pérdida de carga a través de la turbina es mayor, dejando una presión diferencial más pequeña a través de la válvula.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.4. Flujo Vs % de Apertura Lineal

El resultado es incrementar la no linealidad de la mayoría de las válvulas.

Válvula de apertura por falla

Normalmente las válvulas son: cierre por falla (aire para abrir) ó apertura por falla (aire para cerrar):

No importa la forma en que opera la válvula, el interés del usuario es saber y ajustar la posición de la válvula, no el valor de la señal.

Todos los controladores tienen algunos medios de indicar al controlador de salida, en términos de la posición de la válvula. Cuando el operador incrementa la salida como lo indica en el controlador, la válvula se abre.

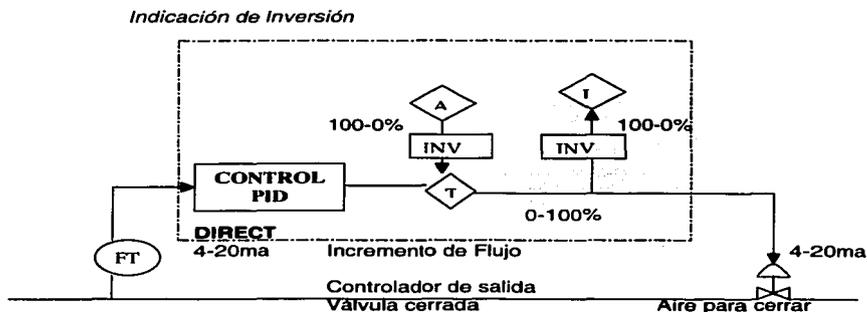


Fig. 5.5. Indicación de inversión

Control analógico

Cuando se utiliza aire para cerrar válvulas, la acción del controlador es cambiada y el ajuste del operador de salida y la indicación son invertidos:

- La indicación de salida es invertida.
- La acción del controlador toma en cuenta la acción de la válvula.
- El circuito de flujo actúa directamente.
- La mayoría de los controladores analiza y trabaja así.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Señal de inversion

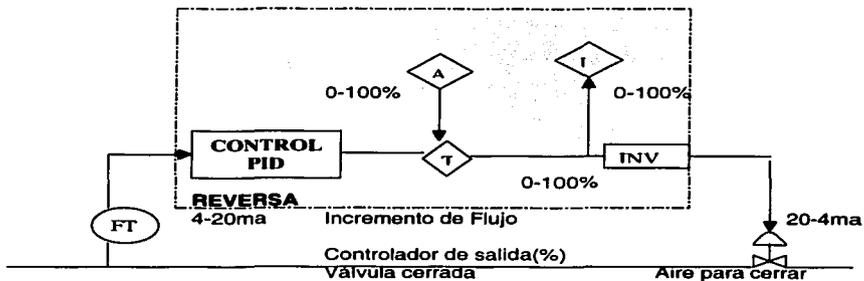


Fig. 5.6. Señal de inversión

Control digital

Cuando se utiliza aire para cerrar válvulas, la acción del controlador no cambia pero la señal de la válvula es invertida:

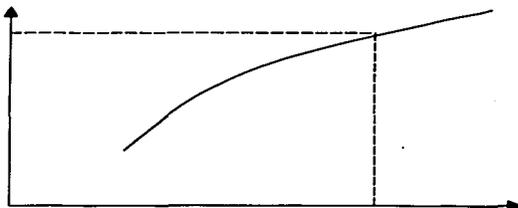
- La señal de salida es invertida.
- La acción del controlador ignora la acción de la válvula.
- El circuito de flujo actúa al contrario.
- Algunos sistemas de control distribuidos funcionan así.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. 2. EL PROCESO DE RESPUESTA AL CONTROLADOR

Relaciones a estado estable: Relación de cambio en válvula a cambio de medida

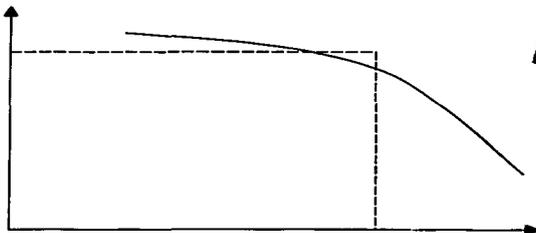
Variable medida



Salida
(Posición de la Válvula)

Fig. 5.7. Proceso de acción directa

Variable medida



Salida
(Posición de la Válvula)

Fig. 5.8. Proceso de acción inversa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Relaciones a estado estable: Cambio en carga

Variable medida

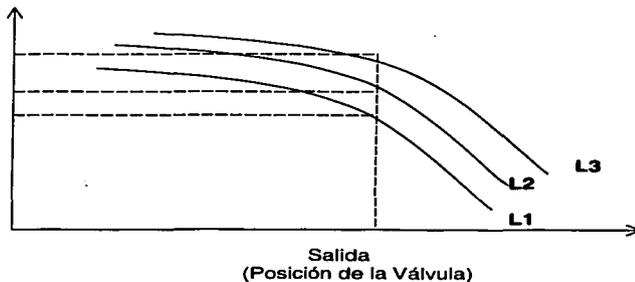


Fig. 5.9. Cambio de carga con salida constante

Variable medida

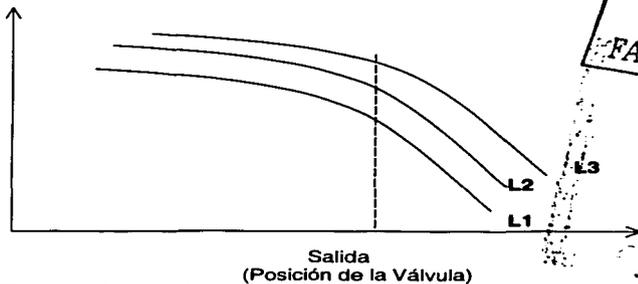


Fig. 5.10. Cambio de carga, manipulando la salida para mantener la medida del proceso constante

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cuando la carga varía, el valor del proceso cambia o la posición de la válvula debe cambiarse para compensar dicho cambio de carga.

Dinámica de Proceso: Retardo simple

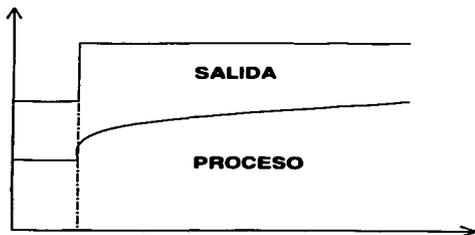
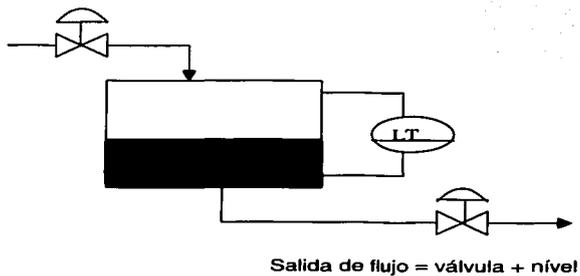


Fig. 5.11. Proceso solo con retardo



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dinámica al Proceso: Tiempo Muerto

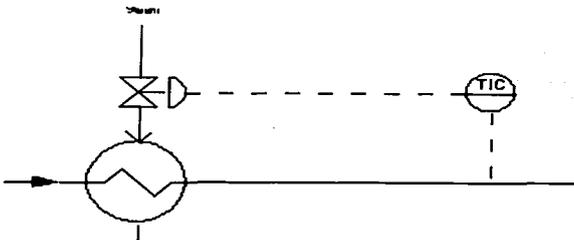


Fig. 5.12. Dinámica del proceso: Tiempo Muerto

El Tiempo muerto es la demora en el circuito, debido al tiempo que le lleva al material fluir de un punto a otro. También llamado Velocidad de Retraso por distancia.

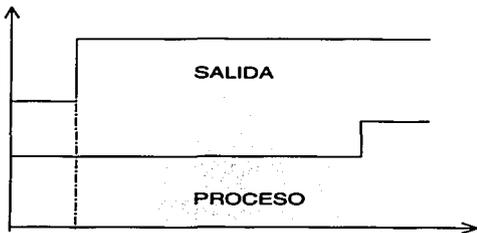


Fig. 5.13. Proceso con tiempo muerto puro

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

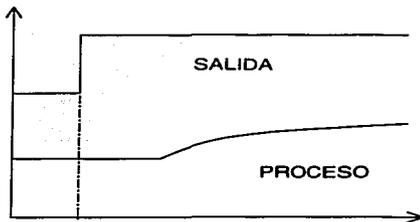


Fig. 5.14. Proceso con retardo y tiempo muerto.

La mayoría de los circuitos combina tiempo muerto y retraso.

Medida de la dinámica

La dinámica difiere de un circuito a otro. No obstante, resultan en una curva de respuesta como la siguiente:

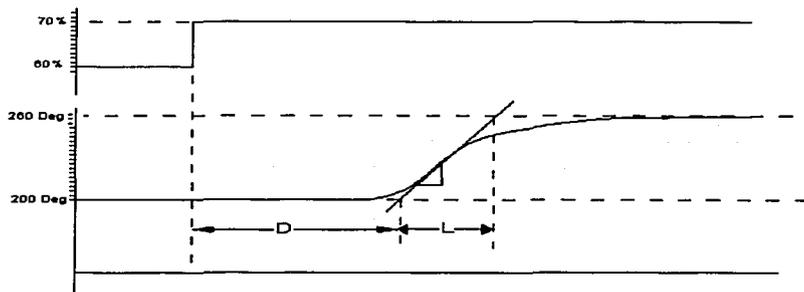


Fig. 5.15. Medida de la dinámica

L es el retraso más largo en el circuito de proceso y D es "Pseudo Tiempo Muerto", es decir, la suma del tiempo muerto y todos los retrasos diferentes del retraso más largo "L".

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Perturbaciones

Casi todos los procesos contienen Perturbaciones. Las Perturbaciones pueden entrar en cualquier parte del proceso. El efecto depende en que parte entra al circuito. La mayoría no se puede medir.

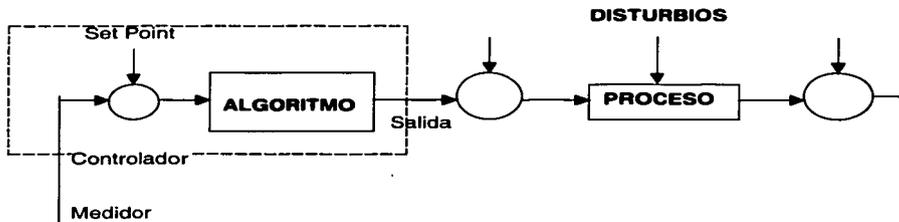


Fig. 5.16. Perturbaciones

5.3 EL ALGORITMO PID

Acción

Acción del proceso. Define la relación entre el cambio en la válvula y el cambio en la medición.

DIRECTO. El incremento en la posición de la válvula provoca un incremento en la medición.

INVERSO. El incremento en la posición de la válvula provoca una disminución en la medición.

Acción del controlador. Define la relación entre cambios en la medición variable y cambios en la salida del controlador.

DIRECTO. El incremento en la medición variable ocasiona un incremento en la salida.

INVERSO. El incremento en la medición variable ocasiona una disminución en la salida.

La acción del controlador debe ser lo contrario de la acción del proceso.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Manual/Automático

Modo Manual: El operador ajusta la salida para hacer funcionar la planta. Durante el arranque se utiliza este modo normalmente.

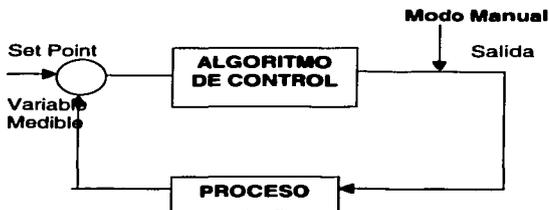


Fig. 5.17. Modo manual

Modo Automático: El algoritmo de control manipula la salida para mantener las mediciones del proceso en sus puntos fijos.

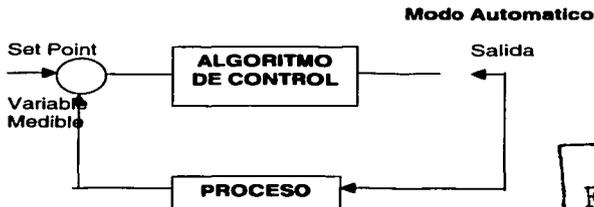


Fig. 5.18. Modo automático

Este debería ser el modo más común para la operación normal.

Conceptos clave.

El algoritmo de control PID no conoce la salida correcta para llevar al proceso al set point. Simplemente continua para llevar la salida en la dirección a la cual debería ir el proceso hacia el set point.

El Algoritmo debe retroalimentar (medición del proceso) para el funcionamiento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El algoritmo PID debe estar sintonizado para el circuito del proceso particular, sin dicha sintonización no será capaz de funcionar. Para ser capaz de sintonizar el circuito PID cada uno de los términos de la ecuación PID deben ser entendidos. La sintonía se basa en la dinámica de respuesta del proceso.

El algoritmo de control PID

El algoritmo de control PID consta de tres elementos:

- a) **Proporcional** - También conocido como Ganancia.
- b) **Integral** - También conocido como Restablecer Automático o simplemente Restablecer.
- c) **Derivativo** - También conocido como Porcentaje o Preacción.

El algoritmo normalmente está disponible en varias combinaciones de estos elementos que pueden ser:

Sólo Proporcional

Proporcional e Integral

Proporcional, Integral y Derivativo

Proporcional y Derivativo

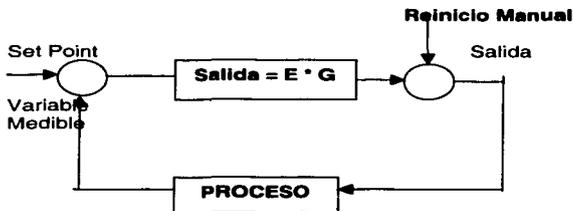
Examinaremos cada uno de los tres elementos:

Proporcional

$$E = \text{Medición} - \text{Setpoint (acción directa)} \dots \text{ ec. (66)}$$

$$E = \text{Setpoint} - \text{Medición (acción inversa)} \dots \text{ ec. (67)}$$

$$\text{Salida} = E * G + k \dots \text{ ec. (68)}$$



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.19. Proporcional

La salida es igual al Error por la Ganancia más el Restablecer Manual. Si el restablecer manual permanece constante, existe una relación fija entre el punto fijo, la medición y la salida.

El término Proporcional o Ganancia se puede calibrar en dos formas: Banda proporcional y ganancia

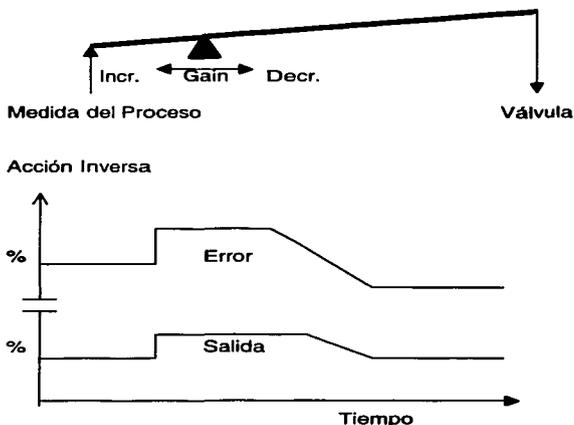
$$\text{Ganancia} = \text{Salida} / \text{Entrada} \dots \text{ec. (69)}$$

Incrementar la ganancia causaría que la salida se moviera más.

La banda proporcional es el porcentaje de cambio en la entrada, el cual resultaría en un 100% de cambio en la salida.

$$\text{Banda Proporcional} = 100/\text{Ganancia} \dots \text{ec. (70)}$$

Proporcional—Salida vs. Medición



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.20. Salida Vs Medición

El control proporcional sólo produce una compensación, sólo el ajuste del restablecer manual quita la compensación.

Proporcional-Compensación

La compensación puede reducirse incrementando la ganancia.

Salida

(Posición de la Válvula)

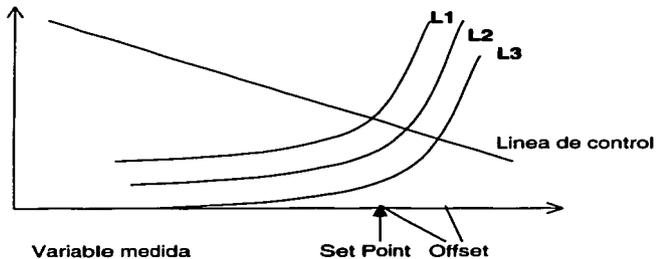


Fig. 5.21. Control proporcional con ganancia baja.

Salida

Posición de la válvula

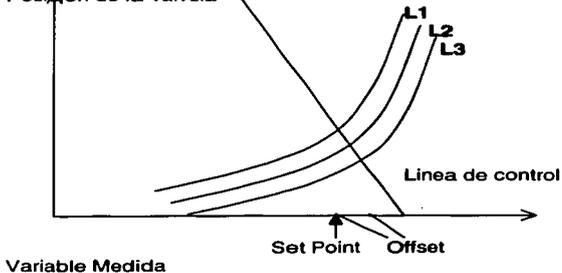


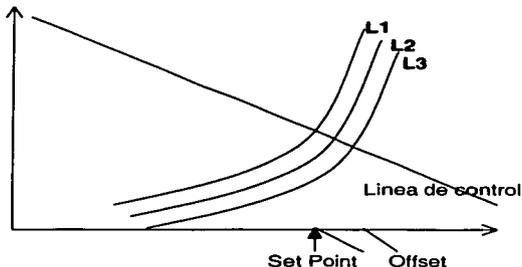
Fig. 5.22. Control proporcional con ganancia más alta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Proporcional—Reducir Compensación con Restablecer Manual

La compensación se puede eliminar cambiando a restablecer manual.

Salida
Posición de la válvula

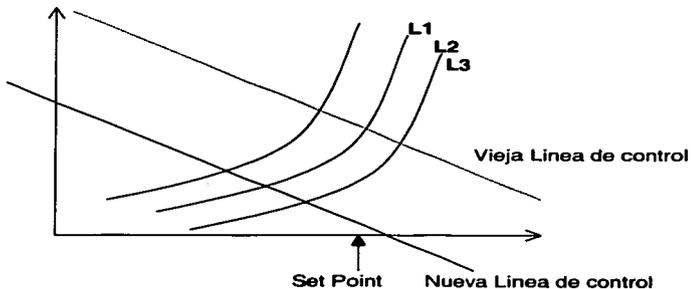


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Variable Medida

Fig. 5.22. Proporcional—Reducir Compensación con Restablecer Manual

Salida
Posición de la válvula



Variable Medida

Fig. 5.23. Control proporcional diferente restablecer manual.

Añadir Restablecer Automático

Con control proporcional solo, el operador restablece el controlador (para soltar la compensación) ajustando el restablecer manual:

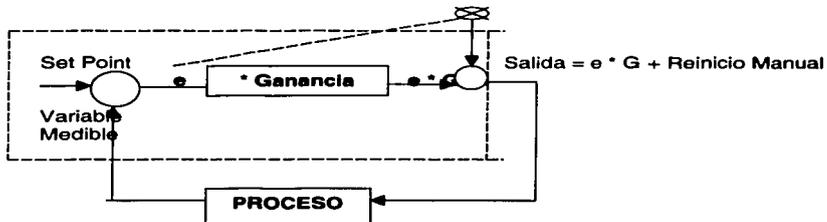


Fig. 5.24 Añadir Restablecer Automático

Este Restablecer Manual puede remplazarse por Restablecer Automático el cual continua para cambiar la salida siempre que exista cualquier error:

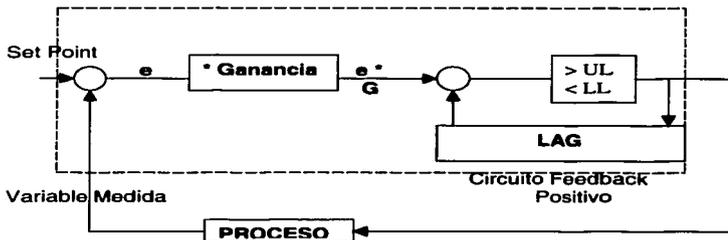


Fig. 5.25 Restablecer Automático

Esto es llamado Restablecer o Acción Integral. Note el uso del circuito de retroalimentación positiva para llevar a cabo la integración.

SEPARAR CON
FALLA DE ORIGEN

Restablecer o Modo Integral

Contribución del restablecer:

$$\text{salida} = g \sum K_r X \text{ integral de error} \quad \dots \quad \text{ec. (71)}$$

Donde g es la Ganancia y K_r es el Restablecer, determinado en repeticiones por minuto.

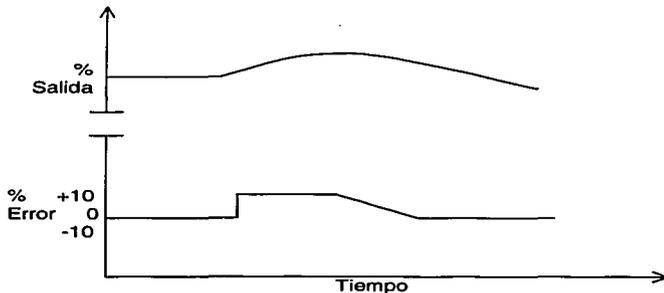


Fig. 5.26 Modo integral

Unidades usadas para establecer el integral o el restablecer.

Suponer un controlador con Proporcional e Integral.

Cálculo de las repeticiones: (los terminos ganancia y restablecer son usados en el controlador)

Con el error puesto en cero (medición de entrada = setpoint), realizar un cambio en la entrada y notar un cambio inmediato en la salida. La salida continuará cambiando (esta integrando el error). Notar el tiempo que le lleva a la salida debido a la acción integral, repetir el cambio inicial hecho por la acción de ganancia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

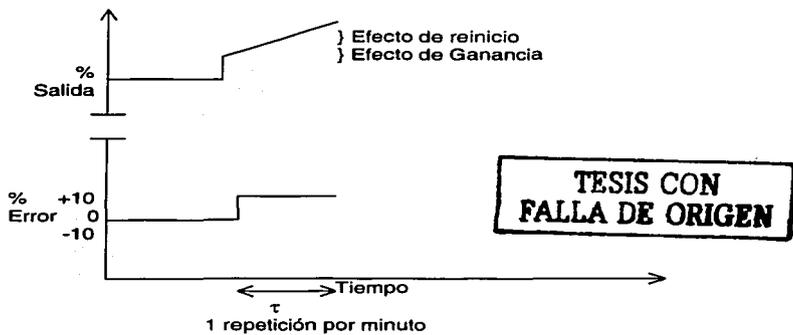


Fig. 5.27a. Modo integral

Algunos controles comerciales miden el restablecer en tiempo de repetición en minutos este es el tiempo que le toma al elemento de restablecer (o integral) repetir la acción del elemento proporcional; otros miden al restablecer en "repeticiones por minuto".

- Repeticiones por minuto es lo contrario de minutos de repetición (éste documento usará repeticiones por minuto).

Derivativo

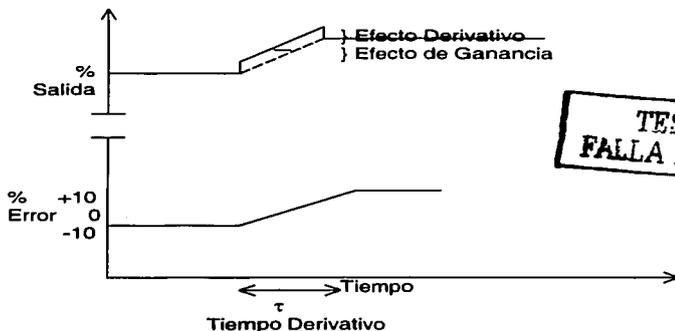
También conocido como Pre-Acción o porcentaje.

Contribución derivativa:

$$\text{Salida} = g \times K_d \times \frac{de}{dt} \quad \dots \quad \text{ec. (72)}$$

donde g es la ganancia y Kd es el Derivativo, establecido en minutos.

Respuesta del controlador con proporcional y derivativo:



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.28. Derivativo

La cantidad de tiempo que la acción derivativa avanza a la salida es conocida como "Tiempo Derivativo" medido en minutos.

Respuesta completa PID.

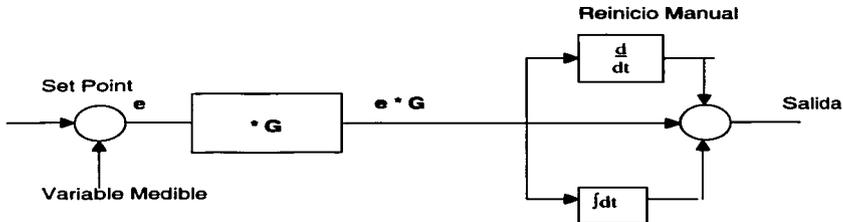


Fig. 5.29. Respuesta completa PID

$$\text{salida} = G(e + R + D)$$

... ec. (73)

donde:

G = Ganancia

R = Restablecer (repeticiones por minuto)

D = Derivativo (minutos)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5. 4 CONCEPTOS ADICIONALES PID

Algoritmo Interactivo o No interactivo.

"Interactivo" y "No interactivo" se refiere a la interacción entre los términos Restablecer y Derivativo. También conocido como Derivativo Serie o Paralelo.

Casi todos los controladores análogos son interactivos. Muchos controladores digitales son no interactivos y algunos son interactivos. La única diferencia está en la sintonización del controlador con el derivativo.

No-Interactivo (Paralelo):

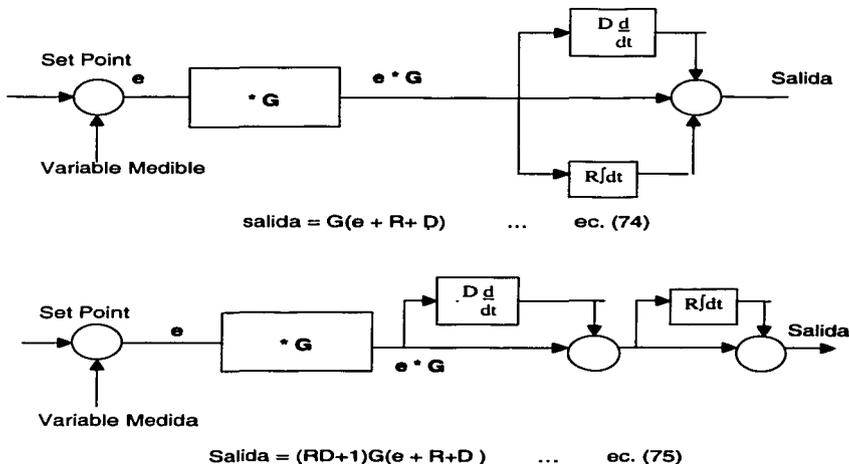


Fig. 5.30. No interactivo

Conversión entre interactivo y no-interactivo

Aplica solo a controladores de tres modos.

Para convertir de no-interactivo a interactivo:

$$G_n = G_i (1 + R_i D_i) \dots \text{ ec. (76)}$$

$$R_n = R_i / (1 + R_i D_i) \dots \text{ ec. (77)}$$

$$D_n = D_i / (1 + R_i D_i) \dots \text{ ec. (78)}$$

- En otras palabras, con un controlador no-interactivo la ganancia debería ser más alta, el porcentaje de restablecer más bajo y el derivativo más bajo que en un controlador interactivo.

Retroalimentación Externa

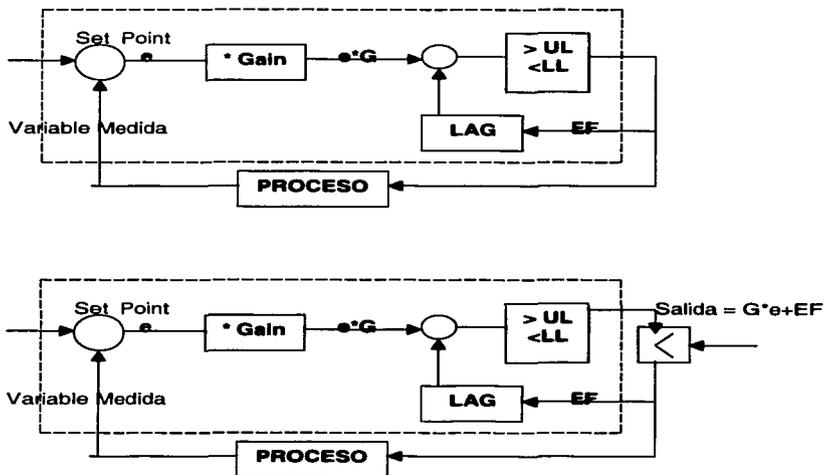


Fig. 5.31. Retroalimentación externa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Propiedades de Saturación.

Otra diferencia son las Propiedades de Saturación.
Ejm. Qué sucede cuando la salida ha estado en el límite superior o inferior.

Algoritmo Estándar. La salida permanece en el límite hasta que la medición atraviesa el setpoint.

Forma de velocidad integrada:

$$\text{salida} = \text{última salida} + \text{ganancia} \times (\text{error} - \text{ultimo error} + \text{restablecer} \times \text{error}) \\ \dots \quad \text{ec. (79)}$$

La salida saca del límite un tiempo de restablecer antes que la medición atraviese el setpoint.

- Para la mayoría de las aplicaciones no hay diferencia. Para algunos problemas de arranque, la "forma de velocidad integrada" funciona mejor.
- El estándar funciona mayor para aplicaciones de la relación ganancia alta/restablecer bajo.

5.5 OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR

Ganancia en lugar de error en el proceso

En aplicaciones con ganancia alta, cambiar un paso puede ocasionar un repentino y gran movimiento en la válvula.

- No tan severo como el efecto derivativo, pero no obstante puede estropear el proceso.
- Solución: dejar la acción de ganancia solamente en lugar del error.

Derivativo en lugar de error en el proceso

Un cambio de etapa en el setpoint ocasiona un error.

- El término derivativo actúa en el porcentaje de cambio del error.
- El porcentaje de cambio, de un cambio de etapa, es muy grande.
- El cambio de etapa por un operador del setpoint causaría un cambio muy grande en la salida, arruinando el proceso.
- Solución: dejar la acción derivativa solamente en lugar del error en el proceso.

5.6 SINTONIZACIÓN DEL CIRCUITO

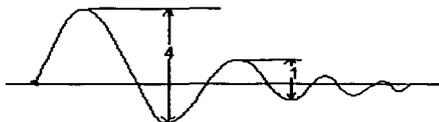
Criterios de sintonía o "Como saber cuando está sintonizado"

Métodos Elementales:

1. La planta no explotó.
2. Las mediciones del proceso permanecen lo suficientemente cercanas al setpoint.

Métodos informales

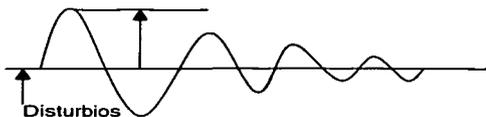
1. Relación óptima de decaimiento (1/4 de decaimiento de onda). Fig. 5.32.



2. Mínimo sobre disparo. Fig. 5.33.



3. Máximo rechazo de perturbación. Fig. 5.34.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La elección del método depende del lugar del circuito en el proceso y su relación con otros circuitos.

Criterio Matemático

Métodos matemáticos- minimización del índice (Fig. 5.35)



IAE - Integral de valor absoluto de error

ISE - Integral de error al cuadrado

ITAE - Integral del tiempo por valor absoluto del error

ITSE - Integral del tiempo por el error al cuadrado

• Estos métodos matemáticos se usan principalmente para propósitos académicos junto con simulaciones de proceso, en el estudio de los Algoritmos de Control.

Pruebas de sintonización en línea o el "método de adivina y sorpresa"

1. Meter un conjunto de constantes de sintonización de experiencia. Un conjunto conservador sería una ganancia de 1 o menos y un restablecer de menos de 0.1.
2. Colocar el circuito en automático con el proceso "alineado".
3. Realizar cambios de etapa (cerca del 5%) en el setpoint.
4. Comparar las respuestas con los diagramas y ajustar.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

Método de Sintonización de Ziegler Nichols : Porcentaje de reacción de circuito abierto

También conocido como "método de curva de reacción". El proceso debe estar "alineado"—no cambiando. Con el controlador en manual, la salida es cambiada en una cantidad pequeña. El proceso es monitoreado

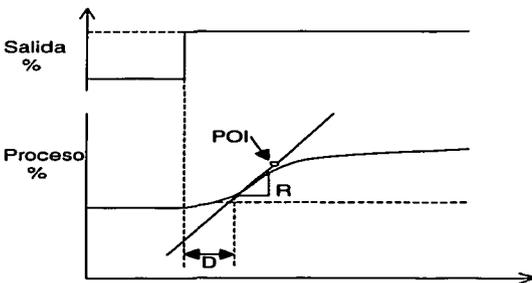


Fig. 5.36. Porcentaje de reacción de circuito abierto

Las siguientes mediciones son hechas de la curva de reacción:

X	%	Cambio de salida
R	%/min.	Porcentaje de cambio en el punto de inflexión (POI)
D	min.	Tiempo hasta la intersección de la línea tangente y el valor original del proceso

La ganancia, restablecer y el derivativo se calculan usando:

	Ganancia	Restablecer	Derivativo
P	X/DR	—	—
PI	$0.9X/DR$	$0.3/D$	—
PID	$1.2X/DR$	$0.5/D$	$0.5D$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La ganancia, restablecer y el derivativo se calculan usando:

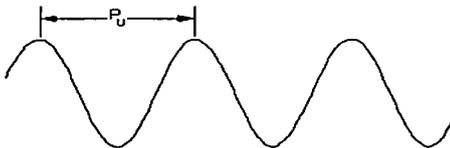
	Ganancia	Restablecer	Derivativo
P	L/GpD	—	—
PI	$0.9 L/GpD$	$0.3/D$	—
PID	$1.2 L/GpD$	$0.5/D$	$0.5D$

Método de sintonización de Ziegler Nichols: Circuito cerrado

Pasos:

1. Colocar el controlador en automático con ganancia baja, sin restablecer o derivativo.
 2. Incrementar la ganancia gradualmente, realizar pequeños cambios en el punto fijo hasta iniciar oscilaciones.
 3. Ajustar la ganancia para hacer que las oscilaciones continúen con una amplitud constante.
- Note la ganancia (última ganancia, G_u) y el período (último período, P_u).

La última ganancia, G_u , es la ganancia a la cual las oscilaciones continúan con una amplitud constante. Fig. 5.38.



TESIS CON
TALLA DE ORIGEN

La ganancia, restablecer y el derivativo se calculan usando:

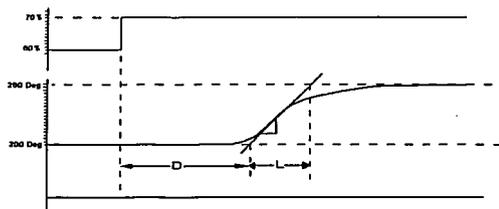
	Ganancia	Reset (Restablecer)	Derivativo
P	$0.5 G_U$	—	—
PI	$0.45 G_U$	$1.2/P_u$	—
PID	$0.6 G_U$	$2/P_u$	$P_u/8$

Controlabilidad de los procesos

La controlabilidad de un proceso depende de la ganancia a la cual puede ser usada.

La ganancia más alta:

- El rechazo más grande de perturbación y
- la respuesta más grande a cambios de punto fijo. Fig. 5.39.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El retardo predominante L se basa en el retardo más grande en el sistema. El retardo subordinado D se basa en el tiempo muerto y los demás retardos.

La ganancia máxima la cual puede usarse depende de la relación. De esto podemos sacar dos conclusiones:

- Disminuir el tiempo muerto incrementa la ganancia máxima y la controlabilidad.
- Incrementar la relación de el más grande y el segundo más grande retardo, incrementa la controlabilidad.

Flujo de Circuitos

Los circuitos de flujo son demasiado rápidos para usar los métodos estándar de análisis y sintonización.

Control Análogo vs. Control Digital:

- Algunos circuitos de flujo usan controladores análogos y se sintonizan con alta ganancia.
- Esto no trabajará con control digital

Con un controlador Análogo, el circuito de flujo tiene retardo predominante (L) de unos cuantos segundos y ningún retardo subordinado.

Con controlador Digital, el porcentaje de **examinación** del controlador puede considerarse tiempo muerto.

Aunque este tiempo muerto es pequeño, es lo suficientemente grande cuando se compara con L para forzar una ganancia baja.

Típica sintonización del circuito de flujo digital: **Ganancia = 0.5 a 0.7**

Reset (Restablecer)=15 a 20 repeticiones/min..
Sin derivativo.

CAPITULO

VI

CAPITULO VI

BASIC STAMP Y DESARROLLO DEL ALGORITMO DE CONTROL PID

6.1. BASIC STAMP, ARQUITECTURA Y TIPOS

Los Basic Stamp (BS) son pequeñas computadoras completamente programables en los pines de Entrada/salida (I/O) que pueden usarse para direccionarlos en la interface. Y con solo algunos componentes extra, estos pines I/O pueden ser conectados a aparatos tales como solenoides, relevadores y otros aparatos de alta corriente/voltage. Este es llamado Stamp simplemente porque estando cerrado es del tamaño de una estampa postal común.

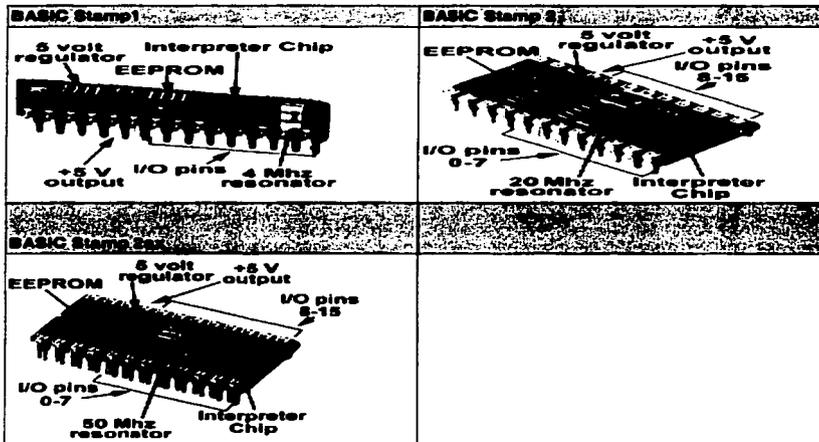
Los Basic Stamp están disponibles en varios paquetes, pero todas las versiones tienen el mismo diseño lógico, que consiste de un regulador de 5 volts, resonador, serial EEPROM e interpretador PBASIC (Parallax BASIC). Una memoria del programa PBASIC es almacenada desde el chip inteligente o interpretador. Este chip inteligente tiene las instrucciones en un tiempo y desarrollo de la operación apropiada en los pines de I/O o estructura interna dentro del interprete; es decir el PBASIC lee y ejecuta instrucciones almacenadas en el EEPROM. ¿Porque el programa PBASIC es almacenado en un EEPROM?; porque puede ser programado y reprogramado casi interminablemente.

El Basic Stamp está programado en una variante de BASIC llamado PBASIC, es muy similar al BASIC pero con algunas instrucciones extra como I/O. Estas instrucciones PBASIC son:

1. Pines de lectura y escritura
2. Medida y generación de pulsos
3. Botón interruptor
4. Cambiador de datos a partir de cambio de registros (solo el BSII)
5. Contadores de ciclos en pines (solo el BSII)
6. Envío y recepción de una serie de datos
7. Potenciómetros
8. Generación de frecuencia (solo el BSII)

El código PBASIC almacena información en el EEPROM del Basic Stamp. El EEPROM provee almacenamiento no volátil y retiene memoria aún sin corriente. El EEPROM usado en el BSI y BSII es garantía de función adecuada por 40 años y para 10000 ciclos de memoria; en el BSIIe y liix garantiza 1000000 ciclos por memoria.

Externamente, el necesita el primer borrador de la memoria, como muchos microcontroladores. Para programar el BS, sólo se conecta a una PC IBM o una computadora compatible (el Puerto Paralelo del Basic Stamp I y el Puerto Serial para el Basic Stamp II y Basic Stamp IISX), corre el software editor y descarga tu programa.



El Basic Stamp I tiene 8 pines I/O, permite 80-100 instrucciones y ejecuta un promedio de 2,000 instrucciones/seg. El Basic Stamp II tiene 16 pines I/O más dos pines seriales sincronizados, permite de 500-600 Instrucciones y ejecuta un promedio de 40,000 instrucciones/seg. El Basic Stamp IISX tiene el mismo número de pines que el Basic Stamp II, excepto que ejecuta 10,000 instrucciones/seg.

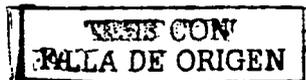
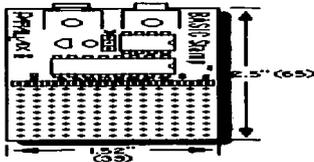
FALLA DE ORIGEN

6.2 TAMAÑOS Y PAQUETES

El Basic Stamp está disponible en 4 paquetes:

a) Basic stamp. Rev. D (*PCBOARD*)

La original "version D" es un completo equipo de cómputo, con un área de prototipo y sujetadores de batería. Funcionalmente equivalente al Basic Stamp I-C. Este Basic Stamp ha sido, desde 1992 un microcontrolador con un bajo costo a solo 34 dólares. Consume 2mA al correr. Trabaja de 0° a 70° C con un 70% arriba, sin condensación. Tiene 8 pines de I/O y ejecuta aproximadamente 2000 instrucciones por Segundo y requiere interface paralela para programar. Los pines de I/O están en forma digital. Sin embargo se puede usar algunos comandos y técnicas de entrada y salida con señales analógicas. La impedancia de entrada en los pines de I/O del BS es aproximadamente 1 meg ohm. Para reprogramar el BS simplemente reconectar a la computadora, correr el editor del BS y presionar ALT-R (software DOS) o CTRL-R (software windows).



b) *OEM BASIC STAMP I Y II.*

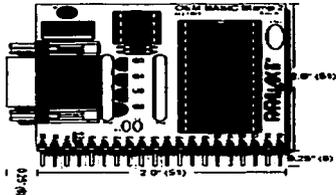
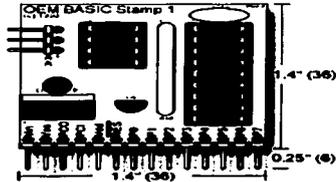
Diseñado por clientes que desean aprender a implementar el Basic Stamp en un diseño OEM usado con chips inteligentes. Estos Basic Stamp dobles son también una alternativa de bajo costo. Los módulos de entrada aceptan pines de 3 conexiones a un Puerto Paralelo (OEM BSI) o DB-9 con un Puerto Serial (OEM BSII) para programar.

Cada version incluye instrucciones de ensamble y reemplazamiento de partes con 3 cursos que muestran el diseño de PCB. Trabajan de -40° a 85°C con rangos de -40° a 125°C. El BSII tiene 16 pines de I/O, 2 dedicados a Puerto serial (1 entrada y 1 salida) y ejecuta aproximadamente 4000 instrucciones por segundo y requiere interface serial para programar.

El BSII tiene dos veces el número de pines de I/O, dos veces la velocidad de ejecución, cinco veces el espacio de la memoria, un Puerto serial y cinco veces la resolución que el BSI.

El BSI tiene 256 bytes de almacén de programación suficientes para 80-100 líneas en código PBASIC.

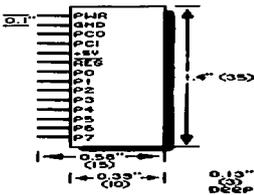
El BSII tiene 1048 bytes de almacén de programación suficientes para 500-600 líneas en código PBASIC.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

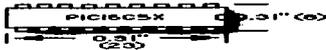
c) Basic Stamp I-IC y Basic Stamp II-IC (*SURFACE MOUNT*)

El Basic Stamp I-IC consume 8mA al corer (costo = 34 dólares), Basic Stamp II-IC consume 20mA al corer (costo = 49 dólares) y el Basic Stamp II-SX consume 65mA al corer (costo = 59 dólares) tienen módulos de 14 o 24 pin utilizando componentes de *surface mount* para obtener un paquete lo más pequeño posible. Estos modulares del Basic Stamp corresponden a "carriers boards" los cuales proveen la usual área del prototipo y los sujetadores de batería, si es necesario.



d) BSIIsx (CHIP)

El chip interpretador del Basic Stamp puede ser enchufado separada, íntegra o directamente dentro de la producción del producto. Nuestro Basic Stamp interpreta esta programación dentro de un microcontrolador PIC o SX. Usando este paquete necesitas un EEPROM, resonador y algunos componentes pasivos. El BSIIsx tiene 16 pines de I/O, 2 dedicados a Puerto serial (1 entrada y 1 salida) y ejecuta aproximadamente 10000 instrucciones por Segundo y requiere interface serial para programar. El BSIIsx ejecuta 2.5 veces más rápido que el BSII y tiene 8 veces el espacio de memoria y 2.5 veces la resolución. El BSIIsx tiene 16384 bytes de almacén de programación suficientes para 8 páginas más 2048 bytes en código PBASIC.

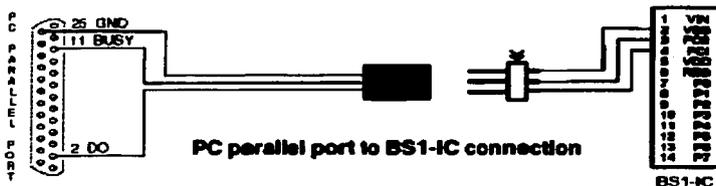


TECNOLOGIA CON FALLA DE ORIGEN

6.3 CONEXION DEL BASIC STAMP A UNA PC

El Basic Stamp I se conecta al Puerto Paralelo de la PC. Se puede enchufar el cable (#800-00001) de Parallax o construirlo tú mismo.

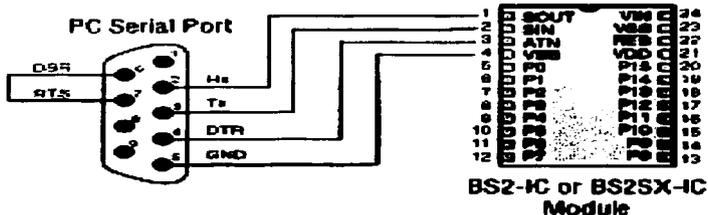
PC Puerto Paralelo	BS1 IC
pin 25 (GND)	pin 2 (VSS)
pin 11 (PC in)	pin 3 (PCO)
pin 2 (PC out)	pin 4 (PCI)



El Basic Stamp II y IISX se conectan en el Puerto Serial de tu PC; se puede enchufar un cable serial (#800-00003). El Puerto Serial de los pines (DSR) y 7 pines (RTS) pueden ser conectados en el Puerto de Detección Automático.

PC Puerto Serial	BS2 IC or BS2SX IC
pin 2 (RX)	pin 1 (SOUT)
pin 3 (TX)	pin 2 (SIN)
pin 4 (DTR)	pin 3 (ATN)

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



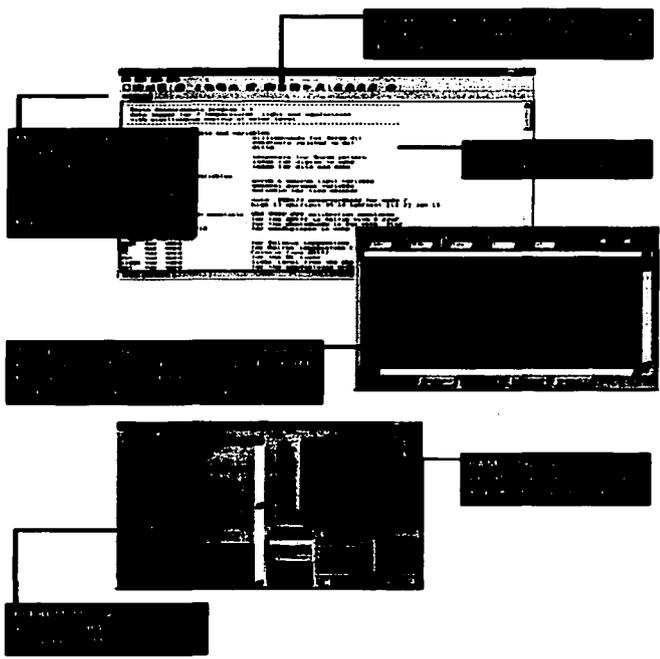
Connect DSR and RTS for automatic port detection.

6.4 DESCARGANDO EL PROGRAMA USANDO WINDOWS 95/98/NT 4.0 SOFTWARE EDITOR

El Basic Stamp está programado con un DOS (Basic Stamp I, II y IISX) o Windows 95/98/NT 4.0 (Basic Stamp II y IISX) editor. Los programas están escritos y descargados para el Basic Stamp en el editor.

Cuando la descarga está completa, el programa corre automáticamente en tu Basic Stamp. El editor es usado para checar la sintaxis de tu programa, muestra los recursos de la memoria del Basic Stamp disponible y el debug de tu programa. Al insertar un comando "debug" en tu programa; tu puedes ver los valores de las variables en la pantalla de tu PC o en un programa terminal.

TRABAJA CON
FALCA DE ORIGEN



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

6.5 BUSCANDO EL BASIC STAMP CORRECTO

Modelo	BASIC STAMP	BASIC STAMP II	BASIC STAMP II-X
Precio (cant.1)	\$34	\$49	\$59
Resumen	Ideal para proyectos con limitaciones de espacio. Sólo programación en DOS.	El BS más popular, ampliamente usado en educación, aplicaciones industriales y como hobby. Programado en DOS y en windows.	Con 2.5x de velocidad y 8x de memoria mayor que BS2-IC, éste es una gran solución si necesitas más potencia que un BS2-IC.
Líneas I/O	8	16, plus 1 de entrada y 1 de salida	16, plus 1 de entrada y 1 de salida
EEPROM (Programa & Datos)	256 bytes	2048 bytes	16 K bytes (8 programs x 2K bytes ea.)
RAM (Variables)	7 palabras registrables; todos son bytes direccionables, dos son bits direccionables	16 palabras registrables; todos son bytes , nibbles y bits direccionables	16 palabras registrables; todos son bytes, nibbles and bits direccionables con 64 Bytes plus (1 para programas ID y 63 en uso)
Max. Long. Programa	~80 instrucciones	~500 instrucciones	~4,000 instrucciones
Velocidad	4-MHz	20-MHz	50-MHz
Velocidad de ejecución del programa	2000 instrucciones/seg.	4000 instrucciones/seg.	10,000 Instrucciones/seg.
Requerimientos del sistema	2 mA de corriente, 20 uA en estado de reposo	7 mA de corriente, 50 uA en estado de reposo	60 mA de corriente, 200 uA en estado de reposo
Condiciones de operación	0° a 70° C (32° a 158° F) - normal, -40° a 85° C (-40° a 185° F)	0° a 70° C (32° a 158° F) - normal, -40° a 85° C (-40° a 185° F) - industrial version (BS21-IC), 70% sin humedad	0° a 70° C (32° a 158° F) - normal, -40° a 85° C (-40° a 185° F)
Velocidad Serial I/O	TTL serial @ 300 - 2400 baud (I/O pins)	TTL y RS-232 serial @ 300 - 50K baud (I/O pins o Puerto serial) (0 - 19200 baud con control de flujo)	TTL y RS-232 serial @ 305 - 115.2K baud (I/O pins o Puerto serial) (0 - 19200 baud con control de flujo)
Empaque	PC board (Ver. D), 14-pin modulo SIP (BS1-IC)	24-pin modulo DIP	24-pin modulo DIP
Procesador	PIC16C56	PIC16C57	SX28AC
PC Programación Interface	Puerto Paralelo	Puerto Serial	Puerto Serial
Instrucciones I/O	BUTTON DEBUG HIGH INPUT LOW	BUTTON COUNT DEBUG DTMFOUT FREQOUT	BUTTON COUNT DEBUG DTMFOUT FREQOUT

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

OUTPUT POT PULSIN PULSOUT PWM REVERSE SERIN SEROUT SOUND TOGGLE	HIGH INPUT LOW OUTPUT PULSIN PULSOUT PWM RCTIME REVERSE SERIN SEROUT SHIFTIN TOGGLE XOUT	HIGH INPUT LOW OUTPUT PULSIN PULSOUT PWM RCTIME REVERSE SERIN SEROUT SHIFTIN TOGGLE XOUT
--	---	---

Comparando microcontroladores programables, el BS es el más fácil de usar por que es muy simple, pero poderoso, la estructura del lenguaje y método para descargar. Además la comparación de programación BASIC es mucho más sencilla que en C o Pascal.

El BASIC STAMP es un microcontrolador, no una PC miniatura, es decir, no tiene gráficos, disco duro o memoria RAM, por lo que no puede ser programado en VISUAL BASIC o QBASIC solo PBASIC el cual ha sido diseñado especialmente para explotar todas las capacidades de los Basic Stamps.

PBASIC (Parallax Basic) es una forma híbrida del lenguaje de programación BASIC. Existen 3 versiones de PBASIC: PBASICI para BSI, PBASICII para BSII y PBASICIIsx para BSIIsx.

6.6 DESCRIPCION DEL ALGORITMO PID PARA EL MICROCONTROLADOR BASIC STAMP

Este programa implementa un algoritmo PID en programación BASIC:

Ayuda a realizar una simulación

REM Constantes

\$sim

REM Variables

REM Regulador

Dim modo Auto como Bit

REM Salida no regulada

Dim Valor manual como Single

REM Punto de referencia -Setpoint-

Dim Sp como Single

REM Valor del proceso

Dim Pv como Single

REM Salida PID

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

```

Dim Cv como Single
REM Primer reconocimiento
Dim Primera ejecución como Byte
REM Diferencia inicial
Dim Error inicial como Single
REM Tmp para random
Dim A como Single
REM Tmp para random
Dim B como Single

REM Inicio de Programa
REM Corrida permanente elegida
Modo Auto = 1
REM Corrida permanente del algoritmo de ajuste

Primera ejecución = 0
REM Salida sin regulador = on
Valor manual = 40
REM Valor dirigido hacia
Sp = 37

Cyclic:
REM Inicia la ejecución del programa
REM PID debe correr determinísticamente
REM tiempo dividido
Espera 50 ms
REM Llamado algoritmo PID

Gosub regulador
REM Llamado simulador de circuito cerrado
Gosub object
Go to Cyclic
REM Fin de la ejecución del programa

REM Subrutinas
Object
REM Inicio de la simulación del circuito regulador
REM Usando función lineal
 $Pv = Pv + Cv$ 
REM Cuando  $PV = SP$  entonces realiza
If  $Pv = Sp$  Then
REM Random SP salta
 $A = Rnd(100)$ 
 $Sp = 1 * A$ 
End If
Return

```

Regulador
REM Inicio del regulador PID
REM Constantes
REM Factor proporcional
Const Kp = .85
REM Factor de Integración
Const Ki = .67
REM Factor de Derivación
Const Kd = .15
REM Variables
REM Punto de ajuste -setpoint-
Dim Sp como Single
REM Valor del proceso
Dim Pv como Single
REM Salida PID

Dim Cv como Single
REM Inicio del primer reconocimiento
Dim Primera ejecución como Byte
REM Diferencia inicial
Dim Error inicial como Single
REM Ultimo PV
Dim Final pv como Single
REM Ultimo SP
Dim Final sp como Single
REM Sumar el valor de error
Dim Suma error como Single

REM Derivando delta PV
Dim D_pv como Single
REM Diferencia entre SP y PV
Dim Error como Single
REM Parte proporcional calculada
Dim Pterm como Single
REM Parte integral calculada
Dim Iterm como Single
REM Parte derivada calculada
Dim Dterm como Single

REM Codigo
If Auto_mode = 1 Then
REM Modo del regulador
Error = Sp - Pv
Suma Error = Suma Error + Error
REM Parte integrada CV
Iterm = Ki * Suma Error
REM Inicio de primera vez

```
If Primera ejecución < 2 Then
If Primera ejecución = 0 Then
Suma Error = Valor manual / Ki
Primera ejecución = 1
Error Inicial = Error
End If
```

```
Pterm = 0
Dterm = 0
If Error inicial > 0 y Error < 0 Then
Primera ejecución = 2
Final_pv = PV
End If
Final_sp = SP
```

```
REM Cálculo normal del circuito
Else
```

```
D_pv = Final_pv - PV
```

```
Final_pv = PV
```

```
REM Parte Derivada CV
```

```
Dterm = Kd * D_pv
```

```
If Sp = Final_sp Then
```

```
REM Circuito normal cuando el setpoint no cambio
```

```
REM Parte Proporcional CV
```

```
Pterm = Kp * Error
```

```
REM Circuito normal cuando el setpoint cambio
```

```
Else
```

```
Pterm = 0
```

```
Dterm = 0
```

```
If Sp > Final_Sp y Pv > Sp Then
```

```
Final sp = Sp
```

```
Final pv = PV
```

```
End If
```

```
REM Enf de SP cambio separado
```

```
End If
```

```
REM Enf de primera vez de separación de corrida
```

```
End If
```

```
REM Sumando
```

```
Cv = Pterm + Iterm
```

```
REM Términos calculados
```

```
Cv = Cv + Dterm
```

```
Modo forzado
```

```
REM Cuando corra en forma sin regulador
```

```
Else
```

```
REM Ajuste de salida a un valor predefinido
```

```
Cv = Valor manual
```

```
REM Reinicio si es contrario
Primera ejecución = 0
End If
Return
```

CONCLUSIONES

La variación de las condiciones de operación provocada por un disturbio debe ser corregida mediante el accionamiento de los dispositivos de control previstos para minimizar su efecto en el producto terminado. Para lograr el control de estas variables (presión, temperatura...) se requieren de sensores y aparatos óptimos para minimizar los disturbios que afecten un determinado proceso y poder manipularlos, uno de estos aparatos son los Microcontroladores *Basic Stamp*, los cuales tienen una gran eficiencia en su resolución y, tomando en cuenta su bajo costo y facilidad en su programación, resulta, en gran medida, uno de los microcontroladores de mejor opción.

El Microcontrolador *Basic Stamp* es, en la actualidad, uno de los dispositivos más usados en diversas áreas, como en la Industria Química, Electrónica, Video y Robótica, entre otras. Tomando en cuenta sus diferentes alternativas en modelos y su facilidad de programación, el microcontrolador (programado en lenguaje BASIC) permite manipular las variables del proceso utilizando los Modos de Control; en particular, este microcontrolador utiliza el modo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para controlar el proceso.

El resultado de controlar y minimizar los disturbios en el proceso se verá reflejado principalmente en los siguientes aspectos:

1. **Económico.** Estos se pueden asociar con cualquier variable de proceso en los blancos dictados para la optimización o la minimización dinámica en la función de costos de operación.
2. **Seguridad y medio ambiente.** Algunas variables de proceso no deben de violar barreras especificadas por razones de seguridad del personal o del equipo o a causa de regulaciones ambientales.
3. **Equipo.** El sistema de control no debe operar en las limitaciones físicas de las salidas del sistema dentro del equipo.
4. **Calidad del producto.** Se deben satisfacer especificaciones del consumidor o del producto.

BIBLIOGRAFIA

1. Luyben, W. L. "Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers", ed. McGraw-Hill; 1990.
2. Marlin, T. E. "Process Control, Designing Process and Control Systems for Dynamic Performance", ed. McGraw-Hill, 1995.
3. Perry, R. H. "Manual del Ingeniero Químico", ed. McGraw-Hill, 1992.
4. Ogata, K. "Ingeniería de Control Moderna", ed. Prentice-Hall Hispanoamericana, 2da. Edición, 1993.
5. Phillips, C. L. "Feedback Control Systems", ed. Prentice-Hall, 3ra edición, 1996.
6. Grantham, W. J. "Modern Control Systems Analysis and Design", ed. John Wiley and sons, 1993.
7. Dutton, K. "The Art of Control Engineering" ed. Addison wesley, 1997.
8. Hostetter, G. H. "Sistemas de Control", ed. McGraw-Hill, 1990.
9. Kuo, B. C. "Sistemas de Control Automático", ed. Prentice-Hall, 7a. edición, 1996.
10. Manual de Control Industrial. Versión 1.0. Parallax. Inc. 1999.
11. John A. Shaw. "PID Algorithms and Tuning Methods", Manual: Process Control Solutions..
12. Gomez González Angel. "Prolog como lenguaje en el desarrollo de un sistema experto en dinámica y control de procesos dinámicos". Tesis 1991
13. Zamora Plata Antonio. "Análisis comparativo entre el control feedback y el control en cascada". Tesis 1993.
14. Franco Hernández Aurora, "Instrumentación y control de un calentador a fuego directo en la planta hidrosulfuradora de naftas en Tula, Hidalgo. Tesis 1992.
15. "Basic Stamp FAQ. Frequently Asked Questions and Answer". Internet Parallax 2000.
16. "About de Basic Stamp", Internet Parallax 1997.