

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



AUTOSINTONIZACION DE LAZOS DE  
CONTROL PID EN CONTROLADORES  
PROGRAMABLES

POR  
DAVID CAVADA HERNANDEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.  
AGOSTO, 1998





1020123649

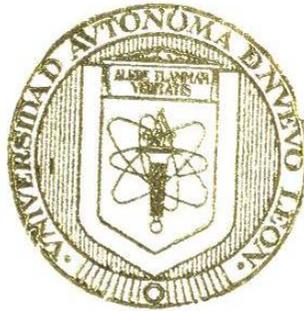
0119-59360

TM  
ZS853  
-M2  
FINE  
1998  
C38



FONDO  
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



AUTOSINTONIZACION DE LAZOS DE  
CONTROL PID EN CONTROLADORES  
PROGRAMABLES

POR  
DAVID CAVADA HERNANDEZ

TESIS

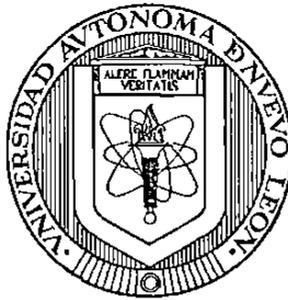
EN OPCION AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA. N. L.  
AGOSTO, 1998

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



AUTOSINTONIZACION DE LAZOS DE CONTROL PID  
EN CONTROLADORES PROGRAMABLES

POR

DAVID CAVADA HERNANDEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

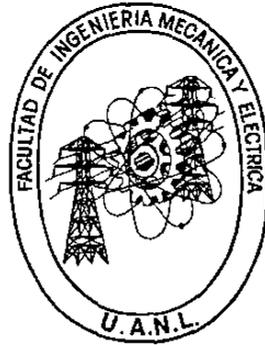
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.

AGOSTO DE 1998

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



AUTOSINTONIZACION DE LAZOS DE CONTROL PID  
EN CONTROLADORES PROGRAMABLES

POR

DAVID CAVADA HERNANDEZ

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA

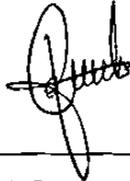
SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.

AGOSTO DE 1998

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis "Autosintonización de Lazos de Control PID en Controladores Programables" realizada por el Ing. David Cavada Hernández sea aceptada como opción para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Electrónica.

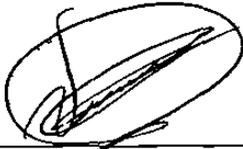
El Comité de Tesis



---

M.C. Luis Manuel Camacho Velázquez

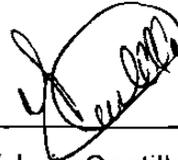
Asesor



---

M.C. Roberto Villarreal Garza

Coasesor



---

M.C. José Luis Castillo Ocañas

Coasesor



---

Vo. Bo.

M.C. Roberto Villarreal Garza

Subdirector de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N.L., a 12 de Agosto de 1998.

# CONTENIDO

|                           | Página                                      |    |
|---------------------------|---|----|
| Prólogo                   | i   |    |
| Síntesis                  | iii   |    |
| Justificación de la tesis | iii   |    |
| Objetivo de la tesis      | iv  |    |
| Planteamiento             | v   |    |
| Metodología               | v   |    |
| Organización de la tesis  | vi  |    |
| <br>                      |   |    |
| Capítulo 1                | El control automático                       |    |
| <br>                      |   |    |
| 1.1                       | Introducción                                | 1  |
| 1.2                       | Modos de control                            | 2  |
| 1.2.1                     | Control de dos posiciones                   | 3  |
| 1.2.2                     | Control proporcional, integral y derivativo | 4  |
| 1.2.2.1                   | Control proporcional                        | 6  |
| 1.2.2.2                   | Control integral                            | 8  |
| 1.2.2.3                   | Control derivativo                          | 10 |
| 1.2.2.4                   | Control PID                                 | 11 |
| 1.3                       | Tendencias en control automático            | 15 |

## Capítulo 2 El controlador lógico programable (PLC)

|       |                                       |    |
|-------|---------------------------------------|----|
| 2.1   | Introducción                          | 17 |
| 2.2   | Componentes de los PLC                | 19 |
| 2.2.1 | Unidad central de procesamiento (CPU) | 20 |
| 2.2.2 | La fuente de poder                    | 24 |
| 2.2.3 | La base ( <i>Rack</i> )               | 26 |
| 2.2.4 | Interfaces de entrada/salida          | 28 |
| 2.3   | Programación                          | 32 |
| 2.3.1 | Programación en diagramas de escalera | 34 |
| 2.3.2 | La función PID                        | 36 |

## Capítulo 3 Métodos de sintonización y autosintonización en controladores PID

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.1     | Introducción   | 41 |
| 3.2     | Sintonización, autosintonización y control adaptivo          | 42 |
| 3.3     | Respuesta a la frecuencia de los sistemas de control         | 44 |
| 3.4     | Métodos de sintonización manual                              | 46 |
| 3.4.1   | Método de reacción del proceso                               | 46 |
| 3.4.2   | Método del período último                                    | 50 |
| 3.5     | Método del relevador   | 52 |
| 3.5.1   | Consideraciones prácticas en la implementación del relevador | 56 |
| 3.6     | Autosintonización en controladores de procesos industriales  | 58 |
| 3.6.1   | Aplicación del método de reacción del proceso                | 59 |
| 3.6.1.1 | Controladores Micro DCI de Fisher & Porter®                  | 59 |
| 3.6.1.2 | Controlador DPR900 de Fisher®                                | 60 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.6.1.3 | Controladores 2003 y el 2004 de LFE® y el 2000 de West Instruments®     | 60 |
| 3.6.1.4 | Controladores DICON SM y dTRON de JUMO® Process Controls                | 61 |
| 3.6.1.5 | Controladores EXACT de Foxboro®   | 62 |
| 3.6.2   | Método de reconocimiento del patrón de respuesta                        | 62 |
| 3.6.2.1 | Controladores EXACT de Foxboro® y West®                                 | 62 |
| 3.6.3   | Minimización de la integral del error absoluto (IAE)                    | 65 |
| 3.6.3.1 | Sistema de control distribuido Loop Tune II del TDC 3000X de Honeywell® | 65 |
| 3.6.4   | Modelos matemáticos   | 66 |
| 3.6.4.1 | Controlador Electromax V de Leeds & Northrup®                           | 66 |
| 3.6.4.2 | Controlador 6355 de Turnbull Control Systems®                           | 69 |

## Capítulo 4 Implementación del proceso de autosintonización

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.1     | Introducción  | 71 |
| 4.2     | Descripción de la planta                              | 72 |
| 4.3     | Operación del proceso                                 | 73 |
| 4.4     | El proceso de autosintonización                       | 74 |
| 4.5     | Procedimiento para la autosintonización               | 76 |
| 4.6     | Experimentación                                       | 79 |
| 4.6.1   | Experimentos con el relevador                         | 79 |
| 4.6.1.1 | Efecto del ruido                                      | 79 |
| 4.6.1.2 | Efecto del cambio de la banda diferencial             | 81 |
| 4.6.1.3 | Efecto del cambio de la amplitud                      | 84 |
| 4.6.2   | Experimentos de autosintonización del controlador PID | 88 |
| 4.6.2.1 | Controladores PID IND y PID ISA                       | 89 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.6.2.2 | Controladores PID y PI                                  | 91 |
| 4.6.2.3 | Efecto del cambio de la amplitud del relevador          | 92 |
| 4.6.2.4 | Efecto del cambio de la banda diferencial del relevador | 94 |

## Conclusiones

|   |     |
|---|-----|
| Experimentos con el relevador                 | 98  |
| Experimentos con el controlador PID           | 98  |
| Conclusiones del proceso de autosintonización | 103 |

## Bibliografía

## Anexos

- A. Especificaciones del controlador programable
- B. Funciones para programación del PLC
- C. Programa para la autosintonización

## Lista de figuras

- 1.1 Control de dos posiciones
- 1.2 Efecto de la brecha diferencial en el control de dos posiciones
- 1.3 Componentes de un sistema de control de lazo cerrado
- 1.4 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado
- 1.5 Relación entre la ganancia y la banda proporcional
- 1.6 Ganancia en la acción integral
- 1.7 Ganancia en la acción derivativa ( $T_d$ )
- 1.8 Controlador PID con filtro tipo retraso de primer orden
- 2.1 Estructura básica del PLC
- 2.2 Operaciones realizadas por el PLC durante el barrido
- 2.3 PLC con bases de expansión
- 2.4 PLC con base remota y módulos autosoportados
- 2.5a Diagrama de bloques del módulo de entradas discretas de VCA
- 2.5b Circuito típico del módulo de entradas discretas de VCA.
- 2.6a Diagrama de bloques del módulo de salidas discretas de VCA
- 2.6b Circuito típico del módulo de salidas discretas de VCA
- 2.7 Ejemplo de una ventana de programación
- 2.8 Algoritmo PID de términos independientes
- 2.9 Algoritmo PID estándar de la ISA
- 2.10 Bloque de la función PID
- 3.1 Amortiguamiento con un cuarto de la amplitud
- 3.2 Criterio de respuesta de área mínima bajo la curva
- 3.3 Curva de Nyquist
- 3.4 Curva de reacción del proceso
- 3.5 Diagrama de bloques del control por medio de relevador
- 3.6 Oscilación de la variable controlada bajo la acción del relevador

- 3.7 Oscilación de la variable controlada al incrementar la ganancia proporcional
- 3.8 Efecto del ruido en el relevador
- 3.9 Efecto de modificar la amplitud en el relevador
- 3.10 Procedimiento de sintonización en controladores marca JUMO, LFE y WEST®
- 3.11 Reconocimiento del patrón de respuesta
- 3.12 Cambios en el valor de referencia para obtener un modelo matemático del sistema de control
- 4.1 Elementos que forman parte del sistema de control
- 4.2 Relevador con ruido en la medición
- 4.3 Relevador con reductor de ruido
- 4.4 Relevador con banda diferencial de 400
- 4.5 Relevador con banda diferencial de 800
- 4.6 Relevador con banda diferencial de 1200
- 4.7 Relevador con banda diferencial de 2000
- 4.8 Relevador con amplitud de 8000 a 24000
- 4.9 Relevador con amplitud de 12000 a 20000
- 4.10 Relevador con amplitud de 0 a 16000
- 4.11 Relevador con amplitud de 14000 a 18000
- 4.12 Relevador con amplitud de 16000 a 32000
- 4.13 Respuesta del controlador PID IND
- 4.14 Respuesta del controlador PID ISA
- 4.15 Respuesta del controlador PI ISA
- 4.16 Respuesta del controlador PID
- 4.17 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando un relevador con amplitud de 8000 a 18000

- 4.18 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando un relevador con amplitud de 0 a 32000
- 4.19 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando un relevador con amplitud de 11000 a 15000
- 4.20 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando una banda diferencia de 400 en el relevador
- 4.21 Respuesta del controlador PI autosintonizado usando una banda diferencia de 1600 en el relevador

## Tablas

- 2.1 Ejemplos de dispositivos de entrada/salida
- 2.2 Registros usados en la función PID
- 2.3 Descripción de los registros usados en la función PID
- 3.1 Ejemplos de controladores industriales con autosintonización
- 3.2 Comparación entre los métodos de reconocimiento del patrón de respuesta y del relevador
- 4.1 Resultados de los experimentos con el relevador
- 4.2 Resultados de los experimentos de autosintonización del controlador PID

## PRÓLOGO

Nos ha tocado vivir un época de grandes cambios tecnológicos. Éstos han tenido gran impacto en el control automático. En este campo ha sido de gran importancia la aparición, a fines de la década de 1960, de los Controladores Lógicos Programables (PLC's) ya que en la actualidad son usados en prácticamente todas las industrias.

El generar el mejoramiento en la tecnología significa grandes desafíos a los ingenieros. La aplicación de estos nuevos desarrollos tecnológicos implica, por lo menos, la necesidad de una actualización permanente. Del aceptar los retos que se nos presentan y del logro de resultados positivos se derivan grandes satisfacciones.

A Dios debemos todo lo que somos y agradezco el que, en ésta área de mi desarrollo profesional me haya permitido, en 1983, desarrollar la lógica del primer sistema de control con PLC's realizado por una compañía de ingeniería en Nuevo León; el haber iniciado en 1990, junto con el Ing Rodolfo Castillo, los cursos de PLC's en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U. A. N. L.; el que, en 1993, el Dr. Edgar Sánchez me haya planteado otro nuevo reto, el de lograr la sintonización automática de un controlador PID usando la funciones de programación disponibles en los PLC's y que al fin haya logrado llegar a la meta trazada.

El gran atractivo de lograr la autosintonización de la función PID de los Controladores Lógicos Programables fue que en esa fecha, aunque existían controladores PID con autosintonización, esta función no se había integrado en los PLC's.

No hubiera sido posible realizar este proyecto sin el apoyo de gran cantidad de personas: de mi familia que con su amor y comprensión me impulsaron a seguir adelante, de mis profesores y compañeros que compartieron conmigo sus experiencias y conocimientos, de mis alumnos de quienes tanto he aprendido, así como de todas las personas de la sociedad que contribuyen para lograr mejorar la preparación de quienes estudiamos en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Finalmente creo que es conveniente mencionar que es muy alentador que en la actualidad las autoridades educativas y los directivos de empresas otorguen un mayor reconocimiento a la importancia que tiene el desarrollo tecnológico y la investigación, como factor primordial en el desarrollo de nuestro país.

## Síntesis

En esta tesis se desarrolla la implementación de un método de autosintonización de controladores PID en Controladores Lógicos Programables (*Programmable Logic Controllers*). Se aplica el método del relevador, propuesto por K.J.Aström y T. Hägglund, y se utiliza el lenguaje de programación de diagramas de escalera con aritmética de números enteros.

## Justificación de la tesis

Los controladores lógicos programables fueron usados inicialmente para la sustitución de relevadores. A medida que se desarrollaron microprocesadores más poderosos y éstos se usaron en la fabricación de los PLC's fue posible agregar funciones cada vez más complejas. Actualmente estas funciones incluyen, entre otras, operaciones matemáticas, trigonométricas, exponenciales, manejo de datos y algoritmos de control PID. Además tienen la posibilidad de programarse en lenguajes de alto nivel como Basic o C, lo que les permite realizar funciones adicionales programadas por el usuario. Algunos de los PLC's fabricados a principios de la década de 1990 están basados en microprocesadores tan poderosos como el 80486 de Intel.

La facilidad de aplicación de los PLC's, su flexibilidad para usarse en diferentes procesos, la confiabilidad en su operación, el poco mantenimiento necesario y su, relativamente, bajo costo les han abierto las puertas para su utilización en la industria y en la actualidad son usados en la mayoría de los procesos en que se requiere controlar secuencias. Si adicionalmente se requiere controlar algunas variables analógicas puede resultar conveniente

hacerlo con este tipo de dispositivos ya que en casi todos ellos se incluye la función de control PID.

El control PID se ha usado desde los años 30 y se sigue haciendo hasta la fecha, aun cuando los elementos empleados en la fabricación de los controladores han cambiado de mecánicos (neumáticos) a bulbos, transistores, circuitos integrados y microprocesadores.

Sin embargo, el principal problema en la aplicación del control PID ha sido su adecuada sintonización, sobre todo cuando las condiciones de operación del proceso cambian con cierta frecuencia o éste es fuertemente no lineal. Actualmente para resolver éste problema se han incorporado métodos de autosintonización en casi todos los controladores de uso industrial, pero esto no se ha hecho en los PLC.

## Objetivo de la Tesis

El objetivo de la presente tesis es el desarrollar un procedimiento simple, confiable y con aplicación práctica, para la autosintonización de Controladores Lógicos Programables que realizan el control de variables analógicas basados en los modos de control proporcional, integral y derivativo (PID). Se pretende que éste trabajo sea de utilidad a los estudiantes del control automático y de las personas que lo aplican en su trabajo diario.

La decisión de desarrollar esta tesis se fundamenta en el hecho de que los PLC's son cada vez más utilizados en la industria para el control de variables analógicas y que en éstos no se incluye la función de

autosintonización, por lo que tienen que ser sintonizados por procedimientos manuales que consumen gran cantidad de tiempo y resultan de mayor riesgo.

## Planteamiento

Para lograr la autosintonización se aplicará el método del relevador propuesto por K. Aström T. y Hägglund, ya que se considera un método seguro para el proceso (a la variable controlada se le produce una oscilación alrededor del valor deseado) y requiere menor procesamiento de información que otros procedimientos. Lo anterior permite que el proceso de autosintonización pueda ser desarrollado utilizando el lenguaje más común en los controladores programables, los diagramas de escalera, a pesar de las limitaciones que esta programación presenta por la cantidad reducida de funciones disponibles y porque solo maneja números enteros.

## Metodología

Para el desarrollo del proceso de autosintonización se cuenta con una planta física con todos los elementos necesarios para medir y controlar el nivel en un tanque. El control se hará con un PLC que entre sus funciones incluye la del control PID. En el desarrollo de la presente tesis se establecerán las bases teóricas que la sustentan y se demostrará la viabilidad de su aplicación práctica usando equipo como el empleado en la industria y en condiciones similares a las encontradas en ese ambiente. Los resultados del proceso de autosintonización se presentarán en gráficas del comportamiento en el tiempo de la variable controlada, porque se considera la mejor forma de visualizar los resultados obtenidos, ya que el problema básico del control es el valor de las variables en el tiempo.

## Organización de la tesis

En la elaboración de la presente tesis se trata de abordar desde una perspectiva práctica e integral la problemática de la sintonización y autosintonización de los controladores PID. En el capítulo 1 se analizan los fundamentos teóricos del control PID, se explica la acción de cada uno de ellos y como el ajuste de sus ganancias afecta la variable controlada y se comentan las tendencias en el control automático. El capítulo 2 incluye una descripción de la operación del PLC y de cada uno de sus componentes principales, se aborda la programación en diagramas de escalera y se detalla la función PID así como los registros que ésta utiliza. En el capítulo 3 se describen en detalle los métodos de sintonización, se revisan los procedimientos de autosintonización para diferentes controladores de uso industrial y se explica el método del relevador. El capítulo 4 contiene la descripción del proceso y el desarrollo del programa para la autosintonización, se expone el procedimiento de autosintonización, el desarrollo de los experimentos, el efecto de los cambios en la banda diferencial y la amplitud del relevador, así como los resultados obtenidos. Finalmente se presentan las conclusiones.

Con los resultados obtenidos se demuestra que es posible lograr la autosintonización del controlador PID en el PLC usando el método del relevador, pero se considera conveniente realizar más experimentos con retardos de tiempo mayores a los empleados además de extender las pruebas a las diferentes variables encontradas en el control de procesos industriales.

# CAPÍTULO 1

## EL CONTROL AUTOMÁTICO

### 1.1 Introducción

Los sistemas de control automático han jugado un papel muy importante en el desarrollo de las plantas industriales que, sin ellos, no podrían mantener la producción con la calidad, seguridad y en la cantidad que hoy lo hacen.

En la actualidad existen plantas industriales que solo requieren para su operación de unas cuantas personas que supervisen sus procesos de producción, los cuales se realizan automáticamente bajo el control de sistemas computarizados. Estos sistemas efectúan el control directo de las variables, ajustan los parámetros de acuerdo a las condiciones de operación, informan a los operadores de las condiciones anormales de la planta y aún sugieren las acciones de corrección en caso de falla.

El desarrollo de los sistemas de control automático se ha logrado en poco tiempo ya que podemos considerar que éste se inició, como conocimiento estructurado, en la década de 1920. Algunos de los hechos más relevantes en el desarrollo de sistemas de control automático son:

El primer sistema de control automático significativo fue el regulador de velocidad de James Watt para las máquinas de vapor, en el siglo XVIII. En 1922 Minorsky trabajó en controladores automáticos de dirección de barcos y mostró como determinar su estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. En 1932 Nyquist desarrolló un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de un lazo cerrado en base a la respuesta de lazo abierto a una entrada senoidal en régimen permanente. En 1934 Hazen diseñó servomecanismos capaces de seguir con exactitud una entrada variable. En la década de los 40 se desarrollaron los métodos de respuesta a la frecuencia y lugar de las raíces para el diseño de sistemas de control. Hacia 1960 con el uso de computadoras digitales se hizo posible el análisis de sistemas complejos en el dominio del tiempo usando variables de estado.

Los desarrollos recientes en la teoría de control están enfocados a sistemas de control complejos con capacidad de adaptación y aprendizaje, que consideran los procesos modelados por ecuaciones diferenciales no lineales. Al mismo tiempo se desarrolla intensamente la aplicación de sistemas de control basados en el conocimiento práctico de los operadores.

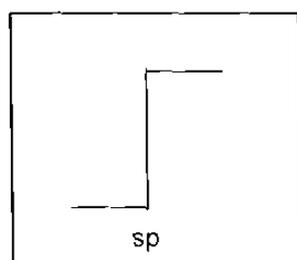
## 1.2 Modos de control

El modo de control se refiere a la manera en que el dispositivo de control determina la señal de salida o señal de corrección. Los modos de control más utilizados en el control automático industrial son el control de dos posiciones (*on-off*), el control proporcional, el proporcional+integral y el proporcional+integral+derivativo. A continuación se describe cada uno de ellos.

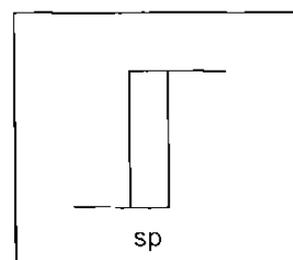
### 1.2.1 Control de dos posiciones (*on-off*)

En este modo de control, como su nombre lo indica, la salida del dispositivo de control solo puede tener cualquiera de dos posiciones, encendido o apagado, máximo o mínimo. Es el modo de control más simple y más económico. Es muy utilizado en aparatos domésticos y en la industria cuando no se requiere mantener un control muy exacto de la variable controlada.

El control de dos posiciones es un modo de control no continuo. Cuando la variable controlada sobrepasa el valor deseado (*set point*) la salida del controlador cambia al máximo, para valores inferiores al valor deseado la salida será el mínimo. Este comportamiento se muestra en la figura 1.1.a. Generalmente estos dispositivos de control presentan una banda diferencial o banda muerta, ya sea por las características propias del dispositivo o producida a propósito. En la figura 1.1.b. se muestra la acción de un controlador de dos posiciones con banda diferencial.



a) sin banda diferencial



b) con banda diferencial

Fig. 1.1 Control de dos posiciones

En los casos mostrados en la figura 1.1 se dice que el controlador es de acción directa porque la salida del controlador aumenta al aumentar el valor de

la variable controlada. Cuando la salida del controlador disminuye al aumentar la variable controlada se le llama controlador de acción inversa.

El control de dos posiciones produce una oscilación permanente de la variable controlada, alrededor del valor deseado, cuya frecuencia depende de la dinámica del proceso. La banda diferencial en el dispositivo de control reduce la frecuencia pero incrementa la amplitud de la oscilación de la variable controlada, como puede apreciarse en la figura 1.2.

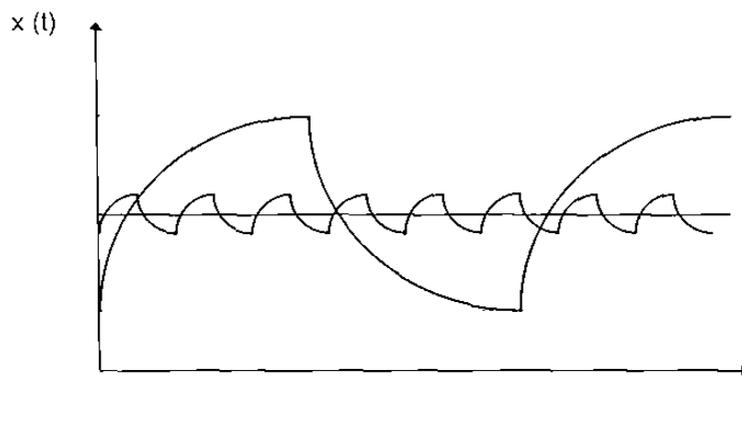


Fig. 1.2 Efecto de la brecha diferencial en el control de dos posiciones

### 1.2.2 Control proporcional, integral, y derivativo

Para efectuar el control de variables analógicas en procesos industriales se usan principalmente los sistemas de control de lazo cerrado. En este tipo de sistemas la variable a controlar se mide y se compara con el valor de referencia, se determina la diferencia y por medio de un algoritmo de control se calcula la señal de corrección apropiada que se envía al elemento final de control, para que actúe sobre el proceso y así mantenga la variable controlada en el valor deseado.

En la figura 1.3 se muestran los componentes de un sistema de control de lazo cerrado; su representación en diagrama de bloques se muestra en la figura 1.4.

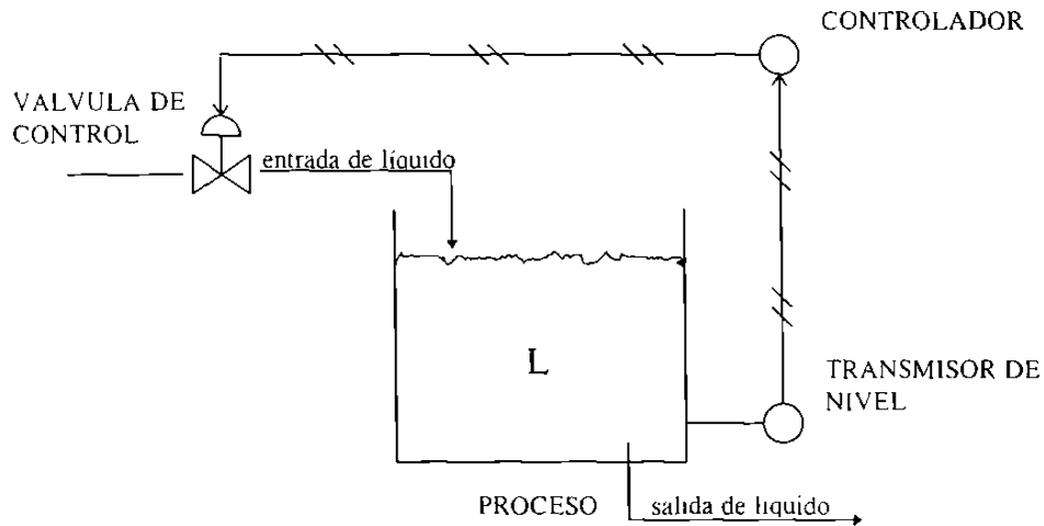


Fig. 1.3 Componentes de un sistema de control de lazo cerrado.

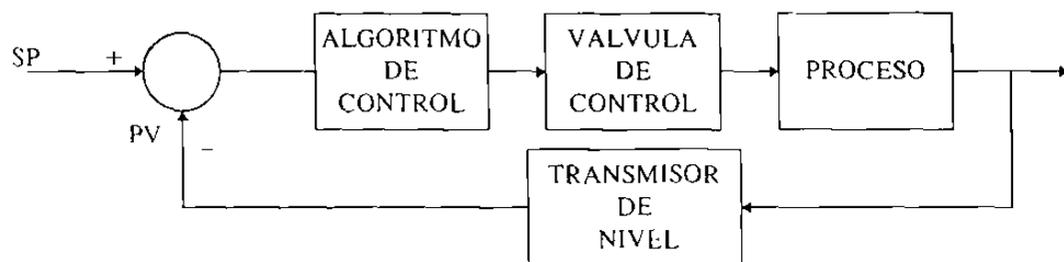


Fig. 1.4 Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado

Aunque los componentes de los controladores han cambiado de neumáticos a bulbos, transistores, circuitos integrados y a microprocesadores, la ecuación que más se utiliza para determinar la señal de salida aún se basa en las acciones de control proporcional, integral y derivativa.

### 1.2.2.1 Control proporcional

En un controlador de acción proporcional la señal de salida se obtiene multiplicando el valor del error por la ganancia proporcional. El controlador proporcional es básicamente un amplificador con ganancia ajustable. La salida del controlador está dada por la ecuación:

$$M(t) = K_c e(t) + B \quad (1.1)$$

donde:

- $M$  salida del controlador
- $K_c$  ganancia del modo proporcional
- $e$  error (diferencia entre el valor medido y el valor deseado)
- $B$  factor de ajuste (*Bias*)

El valor del factor de ajuste sirve para que el controlador tenga una señal de salida, que mantenga el sistema en equilibrio, cuando el error es cero.

En los controladores de uso industrial la ganancia de modo proporcional no se expresa directamente, sino como banda proporcional. Ésta se define como el porcentaje en que debe que cambiar el error para que la salida del controlador cambie el 100 %, como se muestra en la figura 1.5

La relación entre ganancia y banda proporcional es

$$K_c = 100 / BP \quad (1.2)$$

donde:

$BP$  banda proporcional expresada en %

$K_c$  ganancia de acción proporcional

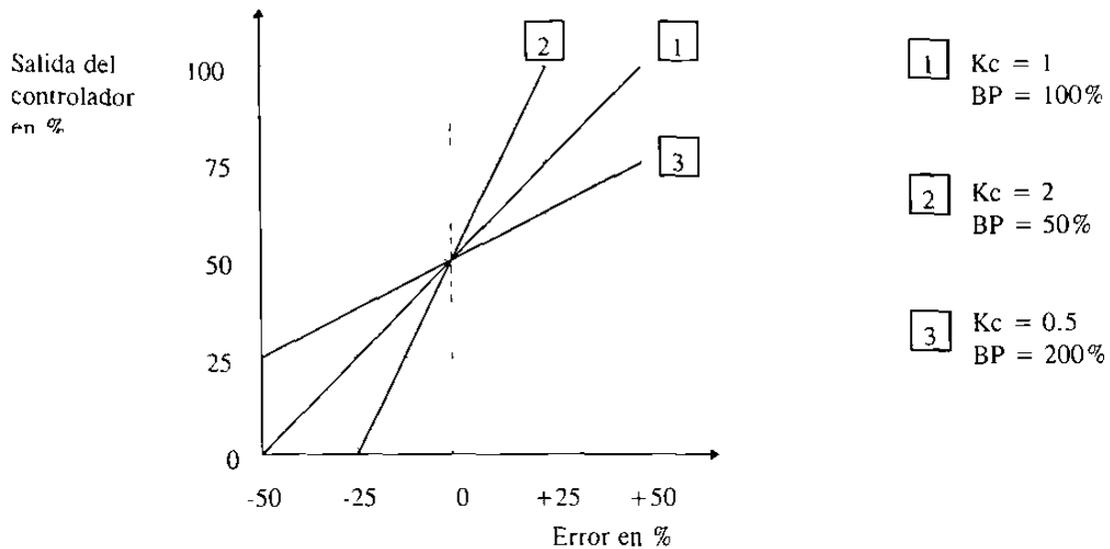


Fig. 1.5 Relación entre la ganancia y la banda proporcional

La acción proporcional responde inmediatamente al producirse el error, pero tiene la desventaja que cuando existe un cambio en la carga del sistema se presenta un error de estado estable como puede determinarse del siguiente ejemplo:

Considere un lazo de control de nivel como el de la figura 1.3. Suponga que la salida del controlador es 50%, que se tiene una válvula lineal con flujo máximo de 400 gpm, que no existe error, y que el sistema se encuentra en equilibrio. En estas condiciones la válvula está abierta al 50%, el flujo de entrada es de 200 gpm y el flujo de salida debe ser igual al flujo de entrada, es decir 200 gpm. Cuando por alguna razón el flujo de salida cambia, por ejemplo

a 300 gpm, la salida del controlador debe cambiar hasta que el sistema se estabilice nuevamente. El nivel se estabilizará nuevamente cuando el flujo de entrada sea igual al de salida, es decir 300 gpm, para lo cual es necesario que la apertura de la válvula sea 75% y salida del controlador de 75%; este nuevo valor solo se logra si existe un error en el sistema, de acuerdo a la ecuación (1.1).

### 1.2.2.2 Control Integral

En la acción integral la rapidez de cambio de la salida del controlador es proporcional al error; esto es

$$dM / dt = K_i e \quad (1.3)$$

o integrando la ecuación anterior queda:

$$M = K_i \int e dt \quad (1.4)$$

donde:

- $M$  salida del controlador
- $K_i$  ganancia de acción integral
- $e$  error
- $t$  tiempo

En los controladores de uso industrial la ganancia de la acción integral se expresa como repeticiones por minuto (  $K_i$  ) o bien como minutos por repetición, también conocido como tiempo de integración ( $T_i$ ). Fácilmente se puede llegar a la conclusión de que la relación entre las dos formas de expresar la ganancia de la acción integral es una relación inversa, por lo que debe tenerse mucho cuidado cuando se ajusta esta ganancia para no hacer el ajuste contrario al que se desea. La expresión matemática para dicha relación es

$$T_i = 1/K_i \quad (1.5)$$

donde:

- $K_i$  ganancia del modo integral, en repeticiones por minuto  
 $T_i$  ganancia del modo integral o tiempo de integración en minutos por repetición

El término repeticiones por minuto significa la cantidad de veces que la acción integral repite la acción proporcional. El tiempo de integración se considera como el tiempo necesario para que la contribución de la acción integral sea igual a la contribución de la acción proporcional. En la figura 1.6 se ilustran estos términos.

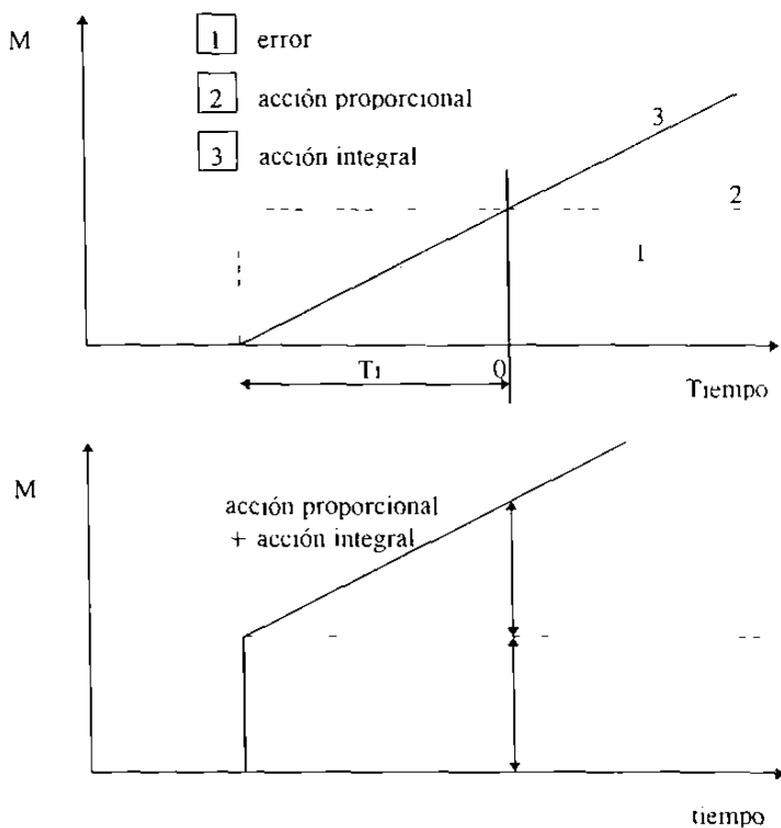


Fig. 1.6 Ganancia en la acción integral

La acción integral no es una acción inmediata; se incrementa conforme transcurre el tiempo. La rapidez con que se incrementa depende de la magnitud del error y de la ganancia. En esta acción de control la salida del controlador se mantiene cuando el error se hace cero, por lo que tiene la ventaja de que elimina el error de estado estable que se presenta en el modo proporcional

### 1.2.2.3 Control derivativo

En un controlador con acción derivativa la salida depende de la rapidez de cambio del error. Expresado matemáticamente

$$M = K_d \, de/dt \quad (1.6)$$

donde:

$M$             *salida del controlador*

$K_d$            *ganancia de acción derivativa*

$de/dt$         *derivada del error respecto al tiempo*

En los controladores de uso industrial la ganancia de acción derivativa ( $K_d$ ) se expresa normalmente como tiempo derivativo ( $T_d$ ) y su relación es:

$$K_d = T_d \quad (1.6)$$

El tiempo derivativo ( $T_d$ ) se considera como el tiempo que la respuesta de la acción proporcional "adelanta" al error debido a la acción derivativa como se muestra en la figura 1.7.

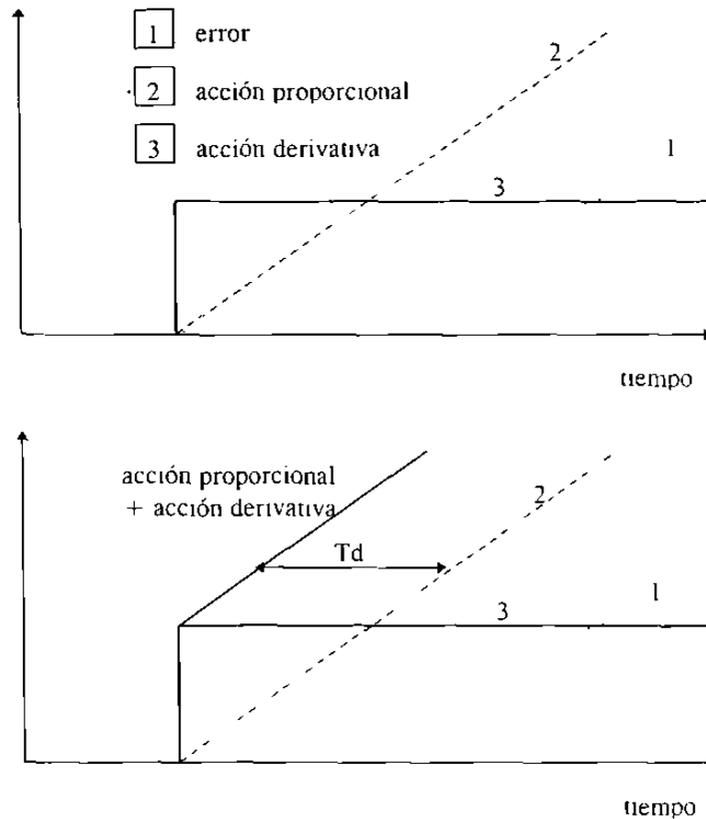


Fig. 1.7 Ganancia en la acción derivativa ( $T_d$ )

Esta acción de control tiene la desventaja de que no actúa ( $M = 0$ ) cuando el error es constante por lo que siempre se usa en combinación con otra(s) acciones de control

#### 1.2.2.4 Control PID

Las acciones básicas de control, proporcional integral y derivativa, normalmente se combinan para aprovechar sus ventajas y eliminar las

desventajas que individualmente pudieran presentar, logrando un mejor funcionamiento del sistema de control.

Los modos de control más utilizados son:

- proporcional
- integral
- proporcional + integral
- proporcional + derivativo
- proporcional + integral + derivativo

La ecuación PID, que combina las tres acciones básicas de control es:

$$M = Kce + Ki \int edt + Kd \frac{de}{dt} \quad (1.7)$$

Sin embargo, la ecuación anterior no siempre se aplica en la forma completa (PID) y en muchas ocasiones se modifica en su aplicación práctica. En la forma clásica en que se aplica la ecuación PID la ganancia de acción proporcional afecta a las ganancias de las acciones integral y derivativa como se indica en la siguiente ecuación:

$$M = Kc \left( e + \frac{1}{Ti} \int edt + Td \frac{de}{dt} \right) \quad (1.8)$$

Si se usa la ecuación anterior, cuando se hagan cambios rápidos en el valor deseado (*set point*) se presentaran picos en la salida del controlador. Éstos picos se deben a la respuesta del modo derivativo a los cambios rápidos en el error, pero son indeseables porque producen cambios bruscos en el elemento final de control y una sobre-reacción del proceso.

Una de las razones para agregar el modo derivativo en el controlador es para que actúe inmediatamente que se detecte un cambio en el error sin esperar a que éste tenga un valor considerable (“adelanta” el error). Este propósito se cumple si la acción derivativa se aplica sobre el error o sobre la variable de proceso cuando se encuentra en el valor deseado (*set point*). Cuando se obtiene la derivada de la variable controlada en lugar de hacerlo sobre el error, se evitan los picos que se producen en la salida del controlador al hacer cambios en el valor de referencia. En este caso la ecuación queda:

$$M = K_c \left( e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (19)$$

Existen otros controladores en que las acciones proporcional y derivativa se aplican a la medición y solo la acción integral se aplica al error. Esto reduce aún más los cambios bruscos en la salida del controlador cuando se modifica el valor de referencia, pero la variable controlada tardará más tiempo en llegar al valor que se desea mantener.

En los controladores que incluyen la acción de control integral si, por alguna razón, el error se mantiene con el mismo signo durante cierto tiempo el valor calculado de la salida del controlador se puede incrementar más allá del valor de saturación. La condición anterior se podría presentar, por ejemplo, cuando se tiene un convertidor de salida digital/analógico de 10 bits (0 a 1024) para una salida de 4 a 20 mA y el microprocesador maneja datos de 16 bits (0 a 65536). Cuando el valor calculado es mayor que el valor de saturación y el error invierte su signo, el controlador empleará un tiempo para disminuir el valor calculado al valor de saturación. Durante todo ese tiempo la salida del controlador y por lo tanto la posición del actuador no cambian, afectando negativamente la respuesta del sistema de control.

Al hecho de que el valor calculado de la salida del controlador supere el valor de saturación de la interfase de salida se le llama *wind up* y solo se presenta en el modo integral. Las modificaciones que se hacen en los controladores para evitar que el valor calculado vaya más allá del valor de saturación se les llama *anti-reset wind up*.

Como ya se mencionó en el punto 1.2.2.3 la acción de control derivativa responde a la rapidez de cambio del error o de la variable de proceso, y por lo tanto, en señales de medición que presenten ruido se tendrán una amplificación de éste, o variaciones frecuentes en la salida del controlador. Por esta razón, no es recomendable que se use la acción derivativa en lazos de control con ruido excesivo, sin embargo, en condiciones de ruido moderado si se usa un filtro para atenuarlo es posible usar el control derivativo. Generalmente el filtro que se utiliza es un filtro representado matemáticamente por un retraso de primer orden. Para controladores analógicos, la constante de tiempo del filtro usualmente se hace proporcional al tiempo derivativo que es ajustado por el operador y se relacionan por:

$$T_f = \alpha T_d \quad (1.10)$$

donde  $\alpha$  normalmente tiene un valor de 0.1

En la figura 1.8. se muestra el diagrama de bloques de un filtro de primer orden aplicado al modo derivativo del controlador.

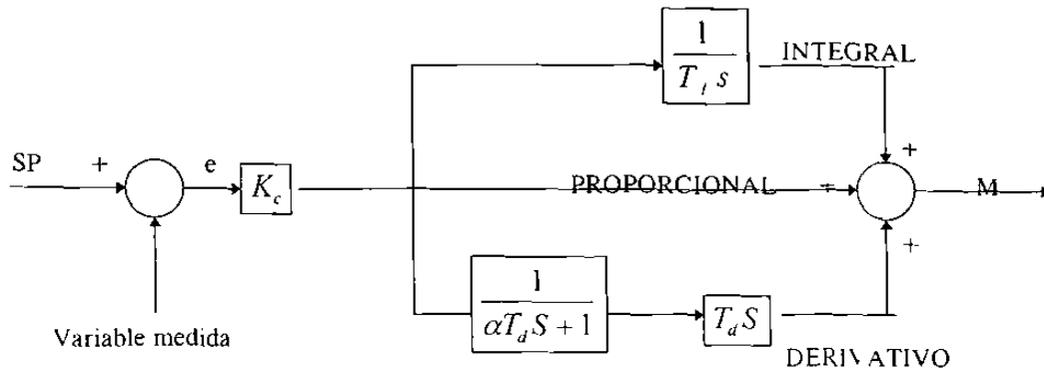


Fig. 1.8 Controlador PID con filtro tipo retraso de primer orden.

### 1.3 Tendencias en control automático

Hasta hace pocos años el desarrollo de sistemas de control se había basado en algoritmos. Para obtener sistemas de control prácticos y flexibles en aplicaciones de procesos no lineales es esencial agregar otros elementos como lógica, secuenciamiento, razonamiento, aprendizaje y heurística. Las metodologías más populares son los sistemas expertos, las redes neuronales y la lógica difusa (*fuzzy logic*).

Los sistemas expertos incorporan el conocimiento, acerca del diseño de sistemas de control y operaciones prácticas, para automatizar las tareas de control que son comúnmente realizadas por ingenieros en control con mucha experiencia.

Las redes neuronales pueden ser visualizadas como arquitecturas para procesamiento masivo en paralelo y pueden ser usadas con éxito en problemas de reconocimiento y clasificación de patrones. Recientemente ha tenido gran interés su aplicación en sistemas de control con no linealidades significativas

El control con lógica difusa se puede considerar como un forma de control basada en el conocimiento que no requiere un modelo matemático preciso del proceso que se desea controlar. Solo se necesita el conocimiento práctico de los operadores con experiencia para formar un juego de reglas de control.

En general, podríamos decir que para el diseño de sistemas de control se pueden seguir, de acuerdo al sistema, los siguientes métodos:

PID, Predictor de Smith o Localización de Polos, para sistemas lineales invariantes en el tiempo. Control Adaptivo para sistemas lineales ligeramente variables en el tiempo. Redes Neuronales (*Neural networks*), para sistemas no lineales y Lógica Difusa (*Fuzzy logic*) para sistemas no lineales sin necesidad de un modelo matemático preciso del proceso.

Actualmente en el área del control de procesos industriales se desarrolla un gran esfuerzo enfocado a lograr cada vez mejores sistemas de sintonización automática para controladores PID.

# CAPÍTULO 2

## EL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

### 2.1 Introducción

Los Controladores Lógicos Programables (PLC), desde su desarrollo a finales de la década de los 60, se han convertido en parte integral de la automatización de los sistemas de control. Se desarrollaron para la industria automotriz, pero rápidamente fueron aceptados por virtualmente todas las industrias. Conforme creció su aceptación también se incrementó la demanda de nuevas funciones, más memoria y mayor cantidad de entradas/salidas. Esto dio lugar a que más fabricantes produjeran continuamente nuevos modelos con mejores características y se agregaran otras opciones. A partir de la sustitución de relevadores las funciones que realizan los PLC se han

incrementado, para hacer además, manejo y adquisición de datos, control PID de variables analógicas, control de posición en ejes, etc.

Para el desarrollo de este proyecto se usó un PLC Serie 90-30 Modelo 331 de GE Fanuc. La Serie 90-30 forma parte de una familia de PLC llamada Serie 90 que fueron introducidos al mercado al inicio de 1989 con el Serie 90-70 que es de mayor capacidad. En 1990 se lanzaron al mercado los PLC Serie 90-30. Inicialmente se ofrecieron los modelos 311 y 331 a los cuales se han agregado el 313, 321, 341 y un microPLC que se puso a la venta en Septiembre de 1994. Los PLC Serie 90-30 están basados en el microprocesador 80188 de Intel. En su fabricación se utiliza tecnología avanzada, como montaje en superficie y multicapa de línea fina.

Las características mínimas indispensables en un PLC para la aplicación del proceso de autosintonización desarrollado son:

- *interfaces de entradas y salidas analógicas*, para comunicar al PLC con los dispositivos de campo.
- *función PID*, para realizar el control de la variable deseada y en la cual los parámetros de sintonización se calcularán de manera automática.
- *capacidad de manipulación de datos*, para mover, borrar, acumular, etc. datos a ó en los registros adecuados
- *operaciones aritméticas*, que permitan hacer los cálculos de los valores necesarios para la sintonización automática

Todas estas características están presentes en el PLC serie 90-30 modelo 331 aún cuando podría representar cierta dificultad el hecho de que solo maneja datos enteros y sus funciones de programación no son tan poderosas como las que existen en lenguajes de alto nivel, limitación que, por otra parte, existe en todos los PLC.

## 2.2 Componentes de los PLC

Existen gran cantidad de PLC de diferente capacidad, de diversas marcas y modelos comerciales, pero todos son similares en su construcción y funcionamiento. Son de construcción modular, excepto los muy pequeños que caben en la palma de la mano y tienen todos sus componentes integrados en una sola unidad. Sus componentes principales son:

- La unidad central de procesamiento (CPU)
- Fuente de poder
- Base ("Rack")
- Interfases de Entrada/Salida
  - Discretas
  - Analógicas
- Módulos especiales de Entrada/Salida
- Módulos de comunicación
- Dispositivo de programación

En la figura 2.1 se muestra, en un diagrama de bloques, la estructura básica de un PLC.

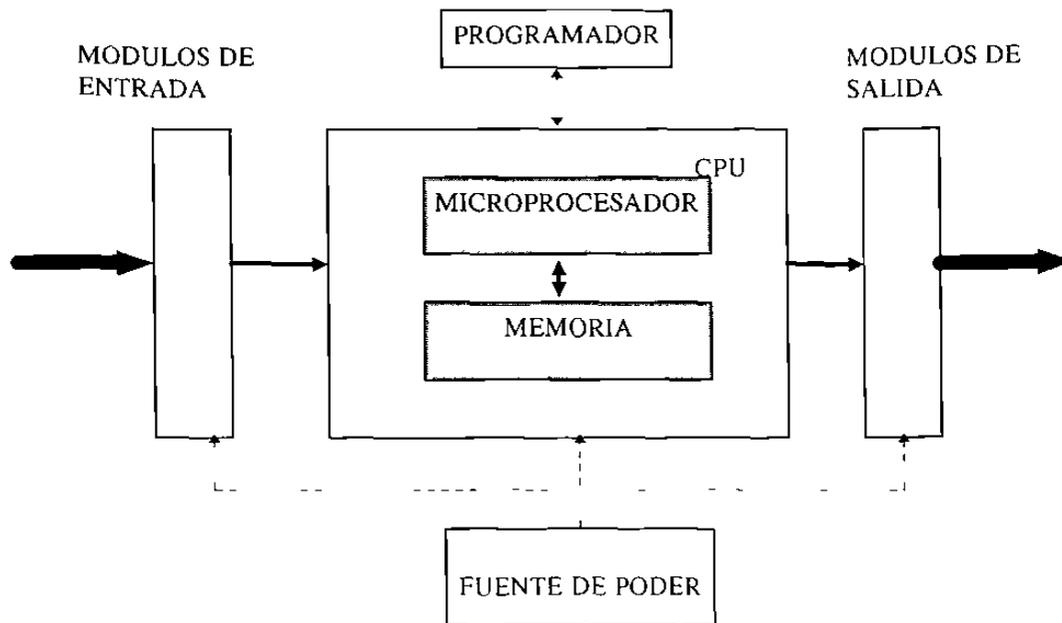


Fig. 2.1 Estructura básica del PLC

### 2.2.1 Unidad Central de Procesamiento (CPU )

La CPU consiste básicamente de uno o más microprocesadores y la unidad de memoria.

El microprocesador tiene como función principal coordinar la operación de todo el sistema, procesar la información, determinar las acciones que permiten el control del proceso y dirigir la comunicación con los dispositivos periféricos. Para llevar a cabo su función el microprocesador ejecuta los programas guardados en la memoria. Éstos son el programa ejecutivo y el programa del usuario.

El programa ejecutivo es el conjunto de instrucciones para dirigir la operación total del sistema del PLC y el programa del usuario contiene las instrucciones necesarias para realizar las acciones específicas de control de una máquina o proceso.

Cuando el PLC se encuentra en operación, en la CPU se realizan las siguientes funciones: Lectura y almacenamiento de los datos de entrada, solución al programa del usuario, envío de información o señales de control a los dispositivos de campo, comunicación con dispositivos de programación y otros equipos periféricos así como labores de diagnóstico. Todas estas funciones se ejecutan en el orden en que se indica en la figura 2.2, y tan rápido como es posible, mientras el PLC esté en operación. Al tiempo que tarda en llevarlas a cabo se le llama tiempo de barrido (*sweep time*)

La rapidez con que funcionan los PLC se especifica por el tiempo que tarda en resolver cada 1K (1024) palabras de un programa de lógica de relevación. Los valores típicos se encuentran en el rango de 0.4 ms a 18 ms. Para lograr los tiempos de ejecución menores se emplean co-procesadores. En este tipo de sistemas el microprocesador principal se encarga de dirigir la operación del sistema y el co-procesador realiza las funciones lógicas en forma paralela.

La memoria sirve para almacenar los programas que son ejecutados por el microprocesador. Además de dichos programas, en la memoria se guarda información de datos de entrada, datos de salida, estado del sistema, etc. La información almacenada puede estar representada por bits (1 ó 0) si se refiere a datos discretos, en bytes o palabras (una serie de bits y no uno solo) si se refiere a instrucciones o valores numéricos.

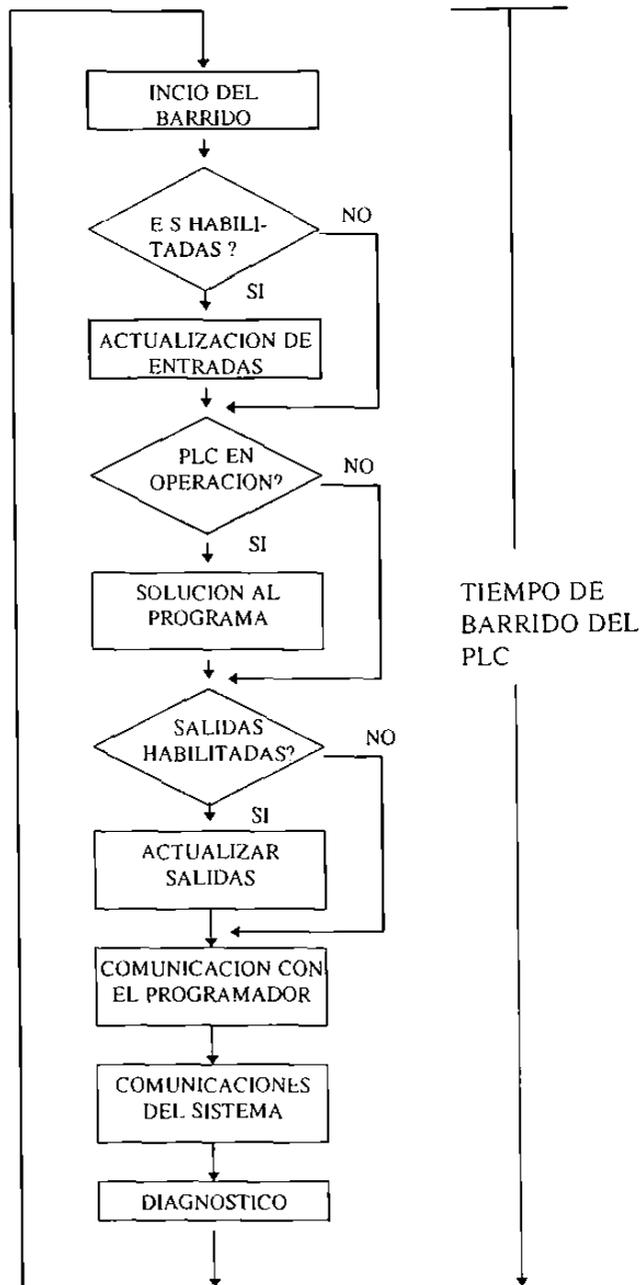


Fig. 2.2 Operaciones realizadas por el PLC durante el barrido

La memoria del PLC se divide de la siguiente forma:

- 1) *Memoria del sistema.* Guarda el programa ejecutivo que contiene las instrucciones para la operación de todo el sistema del PLC.
  
- 2) *Memoria de aplicación.* Se le llama así porque guarda la información relacionada con una aplicación particular. Esta parte de la memoria se subdivide en:
  - a) *Memoria del usuario.* Es la parte de la memoria reservada para almacenar el programa desarrollado por el usuario para el control del proceso.
  
  - b) *Tabla de datos de entrada.* Guarda la información que representa el estado de los dispositivos discretos conectados al PLC. La información se almacena en bits.
  
  - c) *Tabla de datos de salida.* Almacena los valores discretos, obtenidos al resolver la lógica en el programa. La información se almacena en bits.
  
  - d) *Tabla de estado del sistema.* El resultado del diagnóstico del sistema se guarda en esta parte de la memoria. La información está en bits.
  
  - e) *Tabla de registros.* Almacena información de valores numéricos resultado de la ejecución del programa. En esta sección de memoria los datos se almacenan como palabras.

- f) *Tabla de entradas analógicas.* Como su nombre lo indica, almacena la información que recibe el PLC de dispositivos analógicos externos. La información es almacenada como palabras.
  
- g) *Tabla de salidas analógicas.* Aquí se guarda la información que es enviada a los dispositivos analógicos conectado al PLC como indicadores y válvulas de control. La información es almacenada como palabras.

La capacidad de memoria de los PLC es una de las especificaciones que se consideran como más importantes cuando se hace la selección de éste, ya que determina la cantidad de instrucciones de que puede estar formado el programa de control. En la información que proporcionan los fabricantes normalmente se indica la cantidad de memoria disponible para el programa del usuario y ésta es muy variable, desde 1K palabras para algunos de los más pequeños hasta 256K palabras para los de mayor tamaño

### 2.2.2 La fuente de poder

La fuente de poder recibe alimentación de 120 ó 240 VCA y proporciona voltaje regulado de corriente directa en los niveles adecuados para la operación de los diferentes componentes del PLC. En algunos la fuente de poder contiene el puerto de comunicación para conectarse al programador y además la batería de respaldo para mantener la información almacenada en la memoria en caso de que el PLC se desconecte de la fuente de alimentación de corriente alterna o exista una falla en el suministro de energía.

La fuente de alimentación se diseña para proporcionar energía a todos los módulos que forman parte del PLC. Sin embargo, no todos consumen la misma cantidad de energía. Si el sistema contiene gran cantidad de módulos, y éstos son de los que consumen más energía para funcionar, es posible que la capacidad de la fuente no sea suficiente. En este caso se produce un funcionamiento errático del PLC y puede ser que no se detecte como una falla por el sistema de diagnóstico. La posibilidad de sobrecargar la fuente de poder debe evitarse, por lo que se recomienda que al diseñar el sistema se haga una verificación de la potencia que requiere. Los fabricantes de PLC's proporcionan información de la energía necesaria para cada tipo de módulo. A continuación se muestra un ejemplo para determinar la capacidad de la fuente de poder:

| Componente                           | Potencia (mW) /<br>módulo | Cantidad de<br>módulos | Potencia por tipo<br>de módulo |
|--------------------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Base                                 | 3 850                     | 1                      | 3 850                          |
| CPU                                  | 1 625                     | 1                      | 1 625                          |
| Programador portátil                 | 850                       | 1                      | 850                            |
| Salida analógica                     | 2 400                     | 2                      | 4 800                          |
| Entrada analógica                    | 1 000                     | 1                      | 1 000                          |
| Contador alta velocidad              | 950                       | 1                      | 950                            |
| Entrada discreta 24 VCD (16 puntos)  | 2 400                     | 2                      | 4 800                          |
| Salida discreta 24 VCD (16 puntos)   | 2 400                     | 2                      | 4 800                          |
| Entrada discreta 124 VCA (16 puntos) | 450                       | 1                      | 450                            |
| Salida discreta 120 VCa (16 puntos)  | 1 100                     | 1                      | 1 100                          |
| Potencia total =                     |                           |                        | 24 225 mW                      |

De acuerdo al ejemplo anterior, suponiendo que se tengan fuentes de poder de 30 y 50 Watts, la fuente de 30 Watts tiene capacidad suficiente y puede ser utilizada.

### 2.2.3 La Base ("Rack")

Es la parte que sirve para colocar los demás componentes del PLC. A través de la base se proporciona la energía eléctrica necesaria para la operación de los diferentes módulos y se permite la comunicación de éstos con la CPU. En algunos PLC's, como el modelo 311 de GE Fanuc, la CPU se encuentra colocada en la tarjeta de la base para permitir un módulo adicional de entradas o salidas en el espacio no utilizado por la CPU.

La diferencia principal que se encuentra en las bases de los PLC's es la cantidad de tarjetas que pueden aceptar. Generalmente se tienen bases para 5, 8 o 10 módulos y solo es posible colocar módulos de la misma marca y modelo.

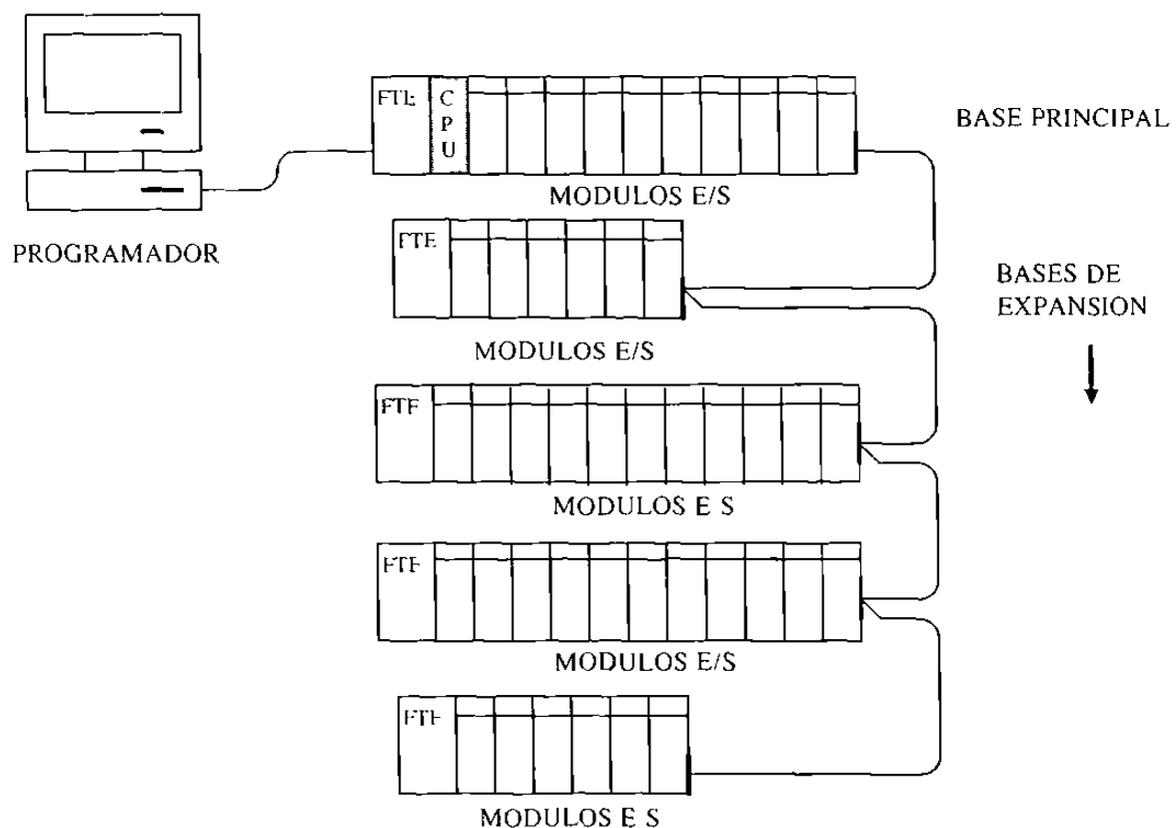


Fig. 2.3 PLC con bases de expansión

Para incrementar la capacidad de entradas y salidas conectadas a un CPU se usan bases de expansión o bases remotas. Éstas se conectan a la base que contiene la CPU, llamada base principal, por medio de un cable; no requieren módulos especiales para comunicación. La distancia máxima que se permite entre la base principal y la última base de expansión es, normalmente de 15 metros. En la figura 2.3 se muestra un sistema con bases de expansión.

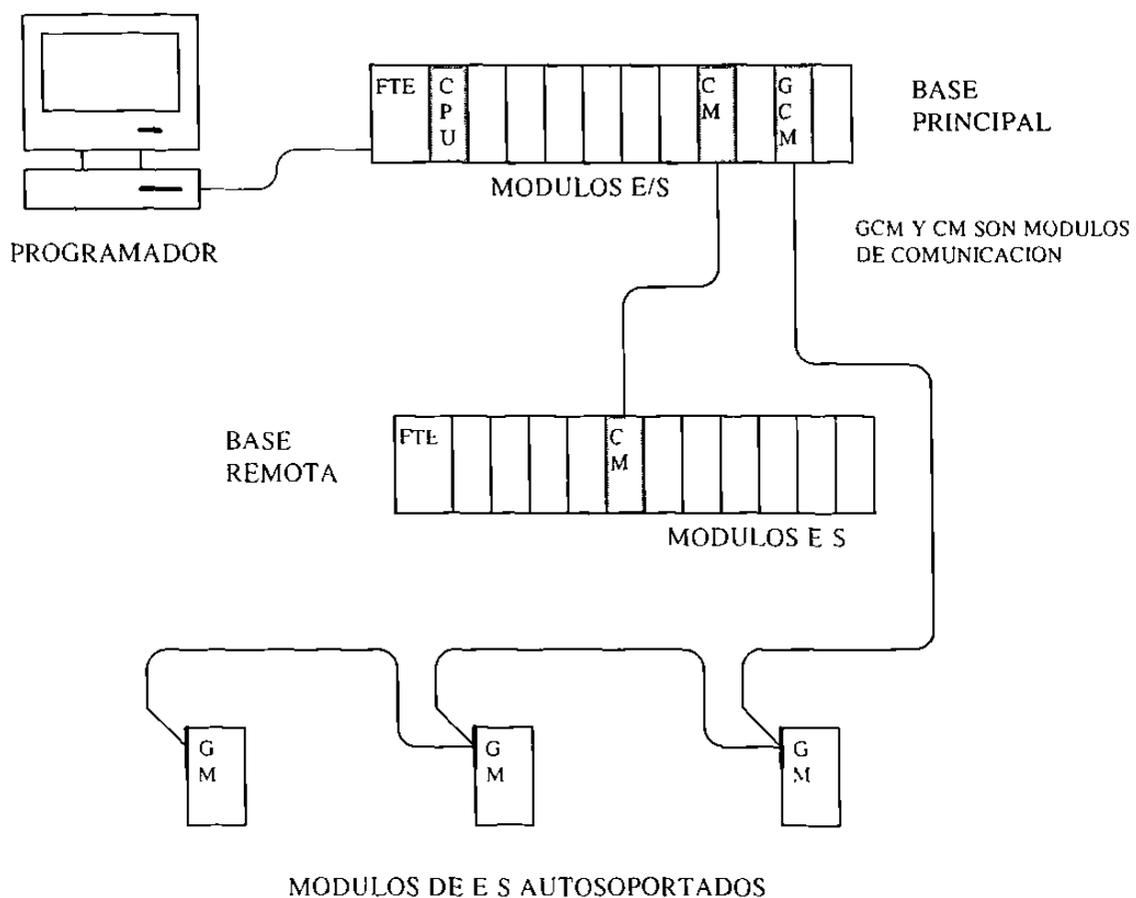


Fig. 2.4 PLC con Base remota y módulos autosoportados

Las bases remotas, como las de expansión, no contienen CPU solo módulos de entrada/salida, pero éstas si requieren de módulos de comunicación para poder enviar y recibir información, uno en base principal y otro en la base remota. La distancia máxima entre una base principal y una

base remota puede ser de 1000 metros o más dependiendo del PLC. En la figura 2.4 se muestra un sistema con bases remotas.

#### 2.2.4 Interfaces de Entrada/Salida

Las interfaces del PLC son tarjetas o módulos electrónicos. Las de entrada reciben las señales de los dispositivos de campo, las acondicionan y las envían a la memoria para que sean procesadas por la CPU; las de salida reciben los datos procesados por la CPU, las convierten a una forma adecuada para operar los dispositivos de campo y las envían a éstos

Los módulos de entrada/salida se pueden clasificar, de acuerdo a la señal que manejan en:

- *De señales discretas.* Manejan señales que sólo pueden tener dos estado o valores (on-off, mín-máx). Estas señales son representadas internamente por un bit, 0 ó 1.
- *De señales analógicas.* Manejan señales que pueden adquirir cualquier valor dentro de un rango determinado y el cambio de uno a otro valor lo hace pasando por todos los valores intermedios. Estas señales se representan internamente por un valor en binario (palabras).

Los módulos de señales discretas generalmente tienen 8 ó 16 puntos de entrada, aunque en algunos casos es posible encontrar con 12 ó hasta 32 entradas o salidas. Los módulos de señales analógicas manejan menor cantidad de entradas o salidas que los módulos de señales discretas. Es común encontrar módulos con 4 entradas y módulos con 2 salidas.

En las figuras 2.5a y 2.5b se muestra el diagrama de bloques y un circuito típico de un módulo de entradas discretas y en las figuras 2.6a y 2.6b se muestra el diagrama de bloques y el circuito típico de un módulo de salidas discretas. Nótese que en ambos módulos la conexión del exterior al interior del módulo se hacen por un acoplamiento óptico, no existen elementos físicos que los conecten

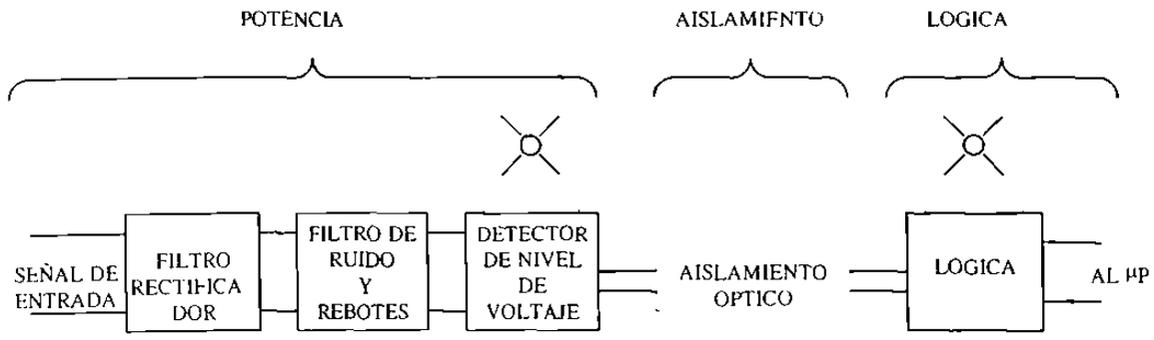


Fig 2 5a Diagrama de bloques del módulo de entradas discretas de VCA

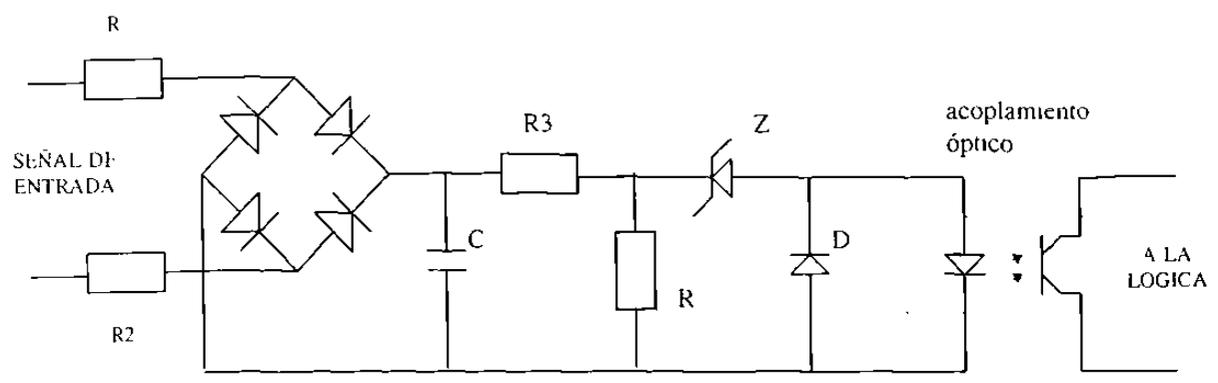


Fig. 2 5b Circuito típico del módulo de entradas discretas de VCA.

En las figuras 2.5a y 2.5b se muestra el diagrama de bloques y un circuito típico de un módulo de entradas discretas y en las figuras 2.6a y 2.6b se muestra el diagrama de bloques y el circuito típico de un módulo de salidas discretas. Nótese que en ambos módulos la conexión del exterior al interior del módulo se hacen por un acoplamiento óptico, no existen elementos físicos que los conecten.

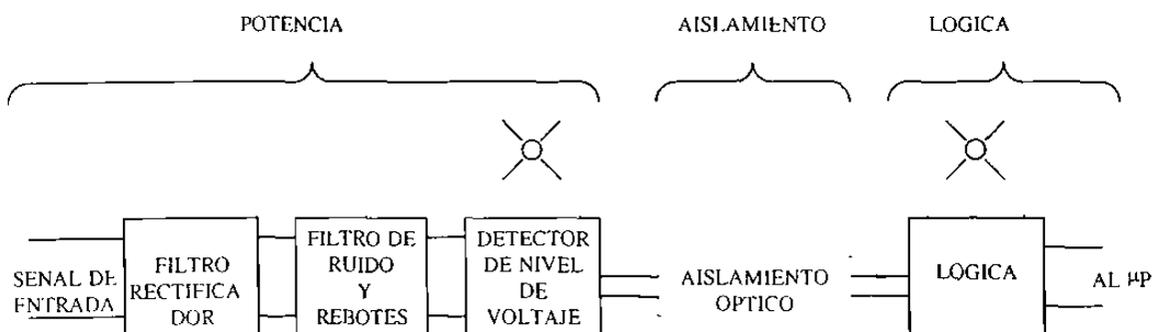


Fig 2.5a Diagrama de bloques del módulo de entradas discretas de VCA

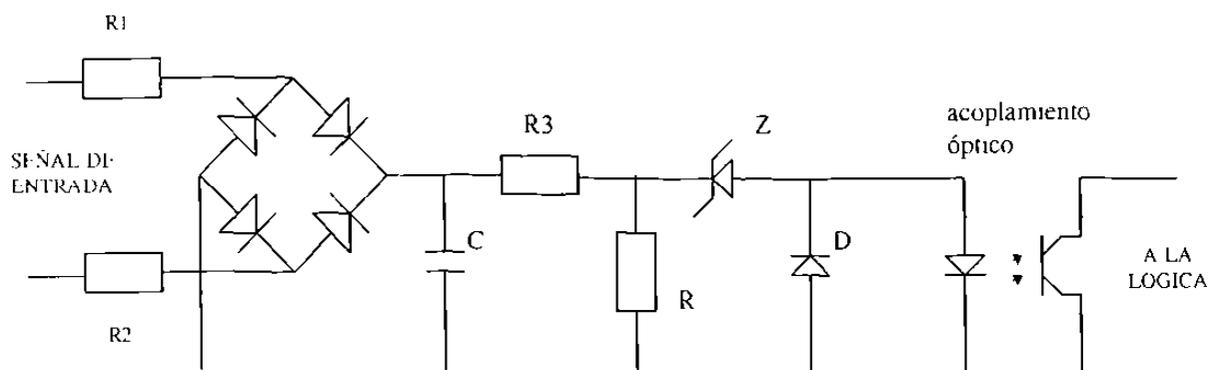


Fig. 2.5b Circuito típico del módulo de entradas discretas de VCA.

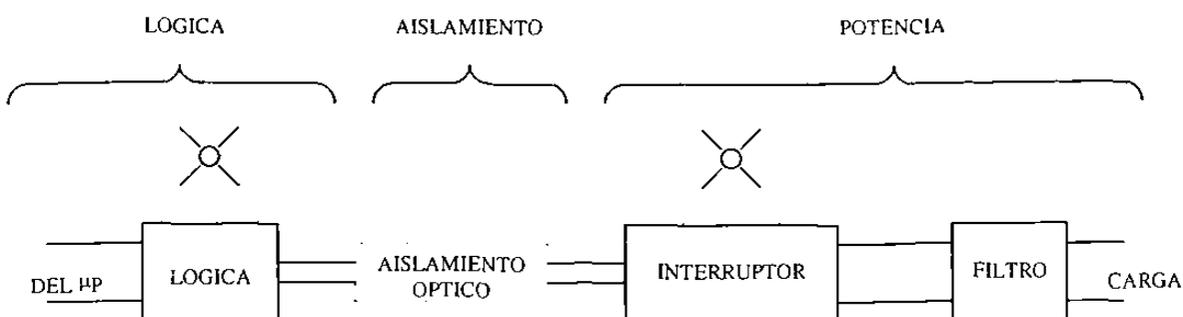


Fig. 2.6a Diagrama de bloques del módulo de salidas discretas de VCA

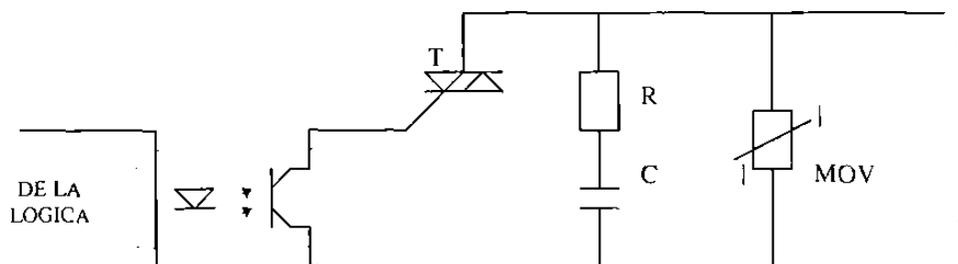


Fig. 2.6b Circuito típico de un módulo de salidas discretas de VCA

Los módulos de entrada o salida se conectan a muy diversos dispositivos que manejan diferentes niveles de señal. En la tabla 2.1 se indican los tipos de señal y algunos de los dispositivos más comunes.

Además de los módulos mencionados en el párrafo anterior, existen otros que manejan señales que no son consideradas como estándar o bien que ejecutan alguna otra función. A éstos se les llama módulos especiales

Tabla 2.1 Ejemplo de dispositivos de entrada/salida

| Módulo:  | Señal:     | Dispositivos:   |
|----------|------------|---|
| entradas | discretas  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• botones pulsadores</li> <li>• selectores</li> <li>• interruptores</li> </ul>   |
|          | analógicas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• transmisores de:               <ul style="list-style-type: none"> <li>presión</li> <li>temperatura</li> <li>flujo</li> <li>nivel</li> <li>ph</li> <li>velocidad, etc.</li> </ul> </li> </ul> |
| salidas  | discretas  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• motores</li> <li>• válvulas solenoides</li> <li>• luces indicadoras</li> </ul>   |
|          | analógicas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• válvulas de control</li> <li>• controles de velocidad</li> </ul>   |

Algunos de los conocidos como módulos especiales son:

- *Módulos de entradas especiales*, que pueden recibir directamente las señales de muy bajo voltaje generadas por los termopares.

- *Módulos contadores rápidos* que reciben señales discretas de alta frecuencia que no pueden ser captadas por los módulos normales de entradas discretas.
- *Módulos de comunicación*, se usan para transferir información entre bases locales y remotas, de PLC's a PLC's e incluso para comunicar PLC's con otros dispositivos en redes como la Ethernet.
- *Módulos de entrada/salida auto-soportados* que pueden colocarse a una distancia considerable de la base que contiene la CPU. Tienen como ventajas principales el poderse colocar muy cerca de los equipos de campo y su comunicación con la CPU se hace a través de un solo cable coaxial o un simple par trenzado. Estos módulos especiales tienen su propio microprocesador. En la figura 2.4 se muestran formando parte de un sistema de PLC.

## 2.3 Programación

La programación de los PLC significa almacenar en la memoria de éste las instrucciones necesarias para que lleve a cabo, automáticamente, la operación del proceso que se desea controlar.

Existen diferentes lenguajes para la programación de los PLC's. Algunos son.

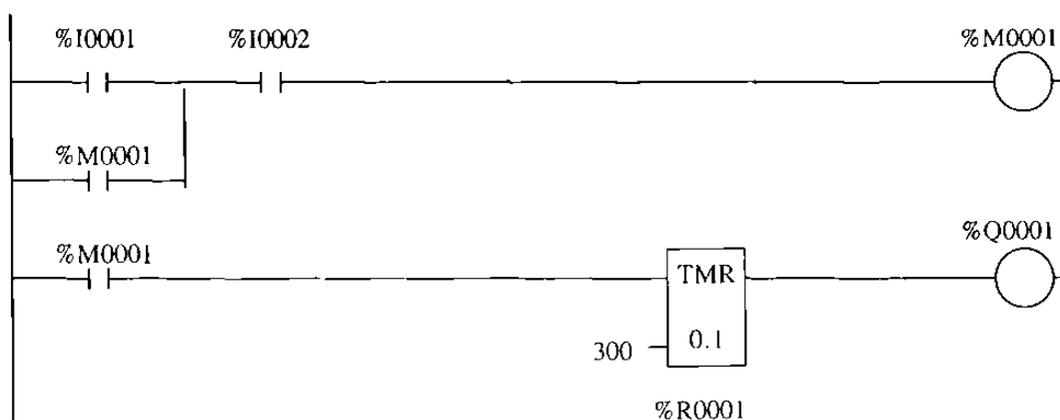
- Diagramas de Escalera
- Listado de Instrucciones
- Lenguaje Natural

A manera de ejemplo se muestra como quedaría el programa, en cada uno de los lenguajes mencionados, para el proceso descrito a continuación:

Se desea que un motor funcione con un retraso de 30 segundos después de oprimir el botón de arranque y que se detenga inmediatamente al oprimir el botón de paro. Los botones son de operación momentánea, normalmente abierto para el arranque y normalmente cerrado para el paro .

*Programa en diagrama de escalera:*

(PLC 90-30, GE Fanuc)



*Programa en listado de instrucciones:*

(PLC Serie 1, GE Fanuc)

|         |   |                                       |
|---------|---|---------------------------------------|
| STR 010 | ┘ | 'si se cierra botón de arranque (010) |
| OR 357  | ┘ | ' o bobina 357 está energizada        |
| AND 011 | ┘ | ' y botón de paro (011) está cerrado  |

|               |   |
|---------------|---|
| OUT 357 ↓     | ' se energiza bobina 357.                             |
| STR 357 ↓     | ' si bobina 357 está energizada                       |
| TMR 600 ↓     | ' iniciar conteo temporizador 600                     |
| 30 ↓          | 'después de 30 segundos energizar salida temporizador |
| STR TMR 600 ↓ | 'si salida temporizador está energizada               |
| OUT 021 ↓     | 'energizar salida motor (021).                        |

Nota: los comentarios se agregan como explicación pero no forman parte del programa.

*Programa en lenguaje natural:*

"El motor arranca 30 segundos después que se oprime el botón de arranque, al oprimir el botón de paro el motor se detiene inmediatamente"

### 2.3.1 Programación en diagramas de escalera

Los primeros PLC's tenían como aplicación la sustitución de relevadores por lo que resulta comprensible que el lenguaje que inicialmente utilizado fuesen los diagramas de relevación (de escalera). En la actualidad continúa siendo el más empleado.

Como se puede observar en el ejemplo de la sección 2.3, el programa en diagrama de escalera se hace formando líneas de lógica con contactos normalmente abiertos o cerrados, bobinas, temporizadores, contadores y bloques que representan funciones. Los contactos se conectan en serie o en

paralelo para formar las funciones lógicas "Y" y "O" respectivamente. La función lógica "NO" está representada por un contacto normalmente cerrado. Cuando una línea de lógica es verdadera se energizan las bobinas o se ejecutan las funciones programadas al final de dicha línea.

Cada elemento conectado o programado en el PLC tiene un número de referencia (dirección de memoria) para indicar donde se guarda la información de su estado. Una de las ventajas del PLC es que en el programa estos números de referencia se pueden usar cuantas veces sea necesario; la única limitación es la cantidad de memoria disponible.

Los paquetes de programación (software) normalmente están organizados en base a ventanas. Por ejemplo: si queremos programar un contacto seleccionamos la función de relevación y aparecen contactos abiertos, cerrados, bobinas, etc. y simplemente escogemos el elemento que queremos programar y lo insertamos en el programa.

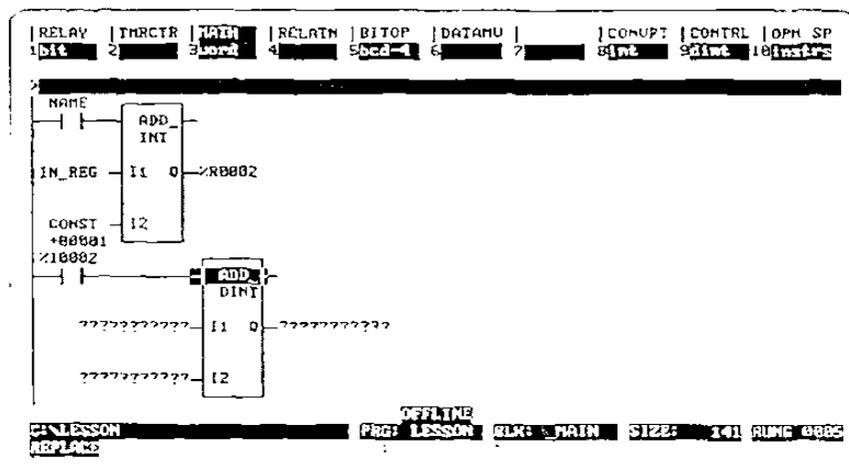


Fig. 2.7 Ejemplo de una ventana de programación

Para las funciones se procede de la misma manera; por ejemplo: si se desea programar una suma se selecciona la ventana de funciones matemáticas y de las que se muestran ( suma, resta, división, multiplicación, etc.) se escoge la operación deseada y se inserta en el programa (ver figura 2.7). Para completar el elemento o función programada se le agregan los números de referencia o registros donde se guarda la información.

### 2.3.2 La función PID

En el PLC Serie 90-30 GE Fanuc la función de control PID se tiene en dos formas:

En el algoritmo de control de términos independientes (PIDIND) la ganancia de cada uno de los términos, proporcional, integral y derivativo, se pueden ajustar de forma independiente, como se muestra en la figura 2.8

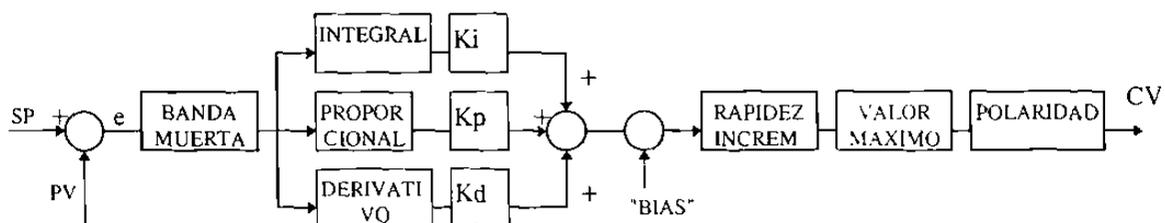


Fig. 2.8 Algoritmo PID de términos independientes

En el algoritmo de control estándar de la ISA (PIDISA) la ganancia proporcional afecta los términos integral y derivativo, aunque éstos pueden ajustarse de manera individual como se muestra en la figura 2.9

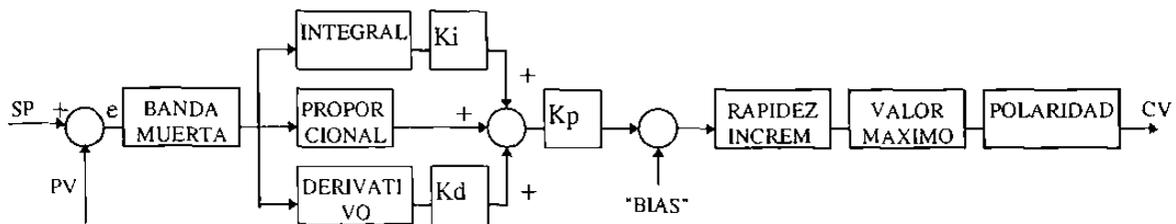


Fig. 2.9 Algoritmo PID estándar de la ISA

En el software de programación la función PID se encuentra dentro de las funciones de control. El bloque PID tiene seis líneas de entrada (ver figura 2.10).

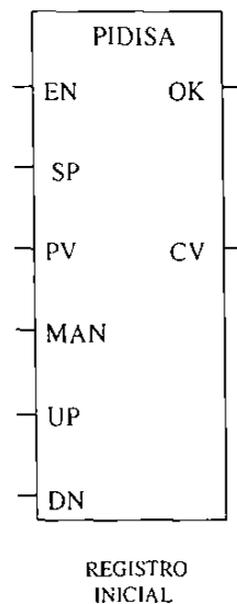


Fig. 2.10 Bloque de la función PID

La entrada de lógica Booleana para habilitar el PID (EN), un registro para el valor de referencia (SP), un registro para el valor de la variable de proceso (PV), una entrada de lógica Booleana para seleccionar el modo de control

automático/manual (MAN), una entrada para incrementar el valor de la salida en manual (UP) y una entrada para disminuir el valor de la salida (DN). El valor de la salida se almacena en (CV). Cuando la función PID se ejecuta satisfactoriamente, se energiza la salida (OK). El bloque tiene en la parte inferior espacio para anotar la primera dirección de los cuarenta registros consecutivos asociados con la función.

Para analizar la ejecución de la lógica en un programa normalmente se usa el concepto de "flujo de energía" que se realiza a través de los contactos que se encuentran cerrados. Al energizarse una bobina todos los contactos que tienen el mismo número de referencia cambian de estado. Los que estaban abiertos se cierran y los que estaban cerrados se abren. Cuando una función recibe energía entonces es ejecutada.

La operación del PID se realiza de la siguiente manera:

Cuando fluye energía a EN y no se tiene energizado MAN se ejecuta la función PID en modo automático resolviendo la ecuación PID de acuerdo a los valores de SP, PV y los parámetros del controlador. El resultado se almacena en CV.

Cuando fluye energía a EN y se energiza MAN el bloque de control opera en forma manual. La salida CV mantiene su valor y puede ser incrementado si se energiza UP o se reduce al energizar la entrada DN.

Los parámetros que se almacenan en los registros de la función PID se indican en la tabla 2.2 y en la tabla 2.3 se encuentra la descripción de cada uno.

Tabla 2.2 Registros usados en la función PID

|    |                               |
|----|-------------------------------|
| 1  | Número de lazo                |
| 2  | Algoritmo                     |
| 3  | Periodo de muestreo           |
| 4  | Banda muerta +                |
| 5  | Banda muerta -                |
| 6  | Ganancia proporcional         |
| 7  | Tiempo derivativo             |
| 8  | Ganancia integral             |
| 9  | Ajuste manual                 |
| 10 | Límite superior               |
| 11 | Límite inferior               |
| 12 | Tiempo mínimo cambio 0 a 100% |
| 13 | Configuración                 |
| 14 | Comando Manual                |
| 15 | Palabra de control            |
| 16 | SP interno                    |
| 17 | CV interno                    |
| 18 | PV interno                    |
| 19 | Salida                        |
| 20 | Término diferencial           |
| 21 | Término integral              |
| 22 | Término integral              |
| 23 | Término de tiempo mínimo      |
| 24 | Reloj                         |
| 25 |                               |
| 26 |                               |
| 27 | Residuo                       |
| 28 | Rango mínimo para SP y PV     |
| 29 | Rango máximo para SP y PV     |
| 30 | Reservado para uso interno    |
| •  |                               |
| 35 |                               |
| 36 | Reservado para uso externo    |
| •  |                               |
| 40 |                               |

Tabla 2.3 Descripción de los registros usados en la función PID

| <b>Registro</b> | <b>Descripción</b>   |
|-----------------|--|
| 1               | El número de lazo que identifica cada uno de los lazos de control PID.   |
| 2               | El algoritmo de control de la ISA se identifica con el número 1 y el algoritmo de control independiente se identifica con el número 2.   |
| 3               | El periodo de muestreo indica el tiempo entre ejecuciones de la función PID.   |
| 4               | La banda muerta + indica el valor máximo sobre el valor de referencia en que el error es considerado como cero   |
| 5               | La banda muerta - indica el valor mínimo abajo del valor de referencia en que el error es considerado como cero  |
| 6               | Ganancia proporcional en centésimas de segundo   |
| 7               | Ganancia derivativa en centésimas de segundo .   |
| 8               | Ganancia integral en repeticiones por minuto.  |
| 9               | Valor del ajuste manual en unidades de conteo.   |
| 10              | Valor límite superior de la salida del controlador en unidades de conteo.  |
| 11              | Valor límite inferior de la salida del controlador en unidades de conteo.  |
| 12              | Tiempo mínimo que tarda en cambiar CV del 0 a 100% en segundos.  |
| 13              | Palabra de configuración:<br>bit 1 = 0 SP-PV      bit 1 = 1 PV-SP<br>bit 2 = 0 CV+      bit 2 = 1 CV-<br>bit 3 = 0 de/dt      bit 3 = 1 dPV/dt   |
| 14              | Comando manual define la salida cuando el PID está en manual.  |
| 15              | Palabra de control con la siguiente estructura:<br>bit 1 = control desde la interfase de operador<br>bit 2 = Automático/ Manual<br>bit 3 = Habilitar PID<br>bit 4 = Incrementar<br>bit 5 = Decrementar |
| 16              | SP interno, representa el valor de referencia de entrada al bloque de función.   |
| 17              | CV interno, representa la salida del controlador del bloque de función   |
| 18              | PV interno, representa la entrada de la variable de proceso al bloque de función   |
| 19              | Salida del controlador antes de considerar la inversión si así se especificó.  |
| 20              | Término diferencial . Uso interno  |
| 21              | Término derivativo. Uso interno  |
| 22              | Término integral Uso interno   |
| 23              | Término de tiempo mínimo. Uso interno  |
| 24 a 26         | Reloj. Uso interno   |
| 27              | Residuo. Uso interno   |
| 28              | Rango mínimo para SP y PV. Usados en el indicador.   |
| 29              | Rango máximo para SP y PV. Usados en el indicador  |
| 30 a 35         | Reservado para uso interno por GE Fanuc.   |
| 36 a 40         | Reservado para uso externo por GE Fanuc.   |

## **CAPÍTULO 3**

# **MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN Y AUTOSINTONIZACIÓN EN CONTROLADORES**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se hace una revisión de algunos de los métodos más comunes para la sintonización y autosintonización de controladores disponibles comercialmente para uso industrial. En la descripción de cada método no se pretende hacer un análisis exhaustivo, sino proporcionar una idea general del procedimiento que se lleva a cabo en su aplicación. Es conveniente mencionar que, aunque gran parte de la información relacionada con los métodos de autosintonización expuestos es del dominio público, existe información

confidencial que es propiedad intelectual de las marcas comerciales mencionadas.

### 3.2 Sintonización, autosintonización y control adaptivo

La ecuación que representa el control PID se ha aplicado desde la década de los 30 pero, aún en la actualidad, la dificultad principal en su aplicación es su adecuada sintonización. Sintonizar un controlador PID significa ajustar la ganancia de cada una de las acciones de control, proporcional, integral y derivativa, para obtener una respuesta aceptable de la variable de proceso.

La sintonización de los controladores se realiza en ciertas condiciones de operación del proceso y la respuesta del lazo de control debe ser la que se considera adecuada. Sin embargo, si las condiciones de operación cambian, la acción de corrección en el lazo también cambia. Podría hacerse muy lenta y el error tardaría demasiado tiempo en eliminarse, o muy rápida y el proceso tendería a convertirse en inestable. En esta situación es conveniente hacer una modificación a las ganancias del controlador. Hacerlo por alguno de los procedimientos manuales no es práctico si las condiciones del proceso cambian frecuentemente. Afortunadamente en la actualidad a la mayoría de los controladores, fabricados a base de microprocesadores, se les ha integrado la capacidad de ajustar automáticamente las ganancias de sintonización.

Si la sintonización automática se efectúa cuando lo solicite el operador se le llama autosintonización y si se hace de manera continua de acuerdo a las condiciones del proceso se le llama control adaptivo. En ambos casos el método de sintonización es ejecutado por el mismo controlador.

La capacidad de sintonización automática de los controladores se logra combinando una forma de determinar la dinámica del proceso con un método para calcular los parámetros del controlador. En varios de los controladores autosintonizados encontrados actualmente se realiza un paso previo o pre-sintonización.

Para considerar que un sistema de control está sintonizado apropiadamente debemos tomar en cuenta el proceso. Algunos procesos no aceptan que la variable controlada sobrepase el valor deseado por lo que su respuesta debe ser sobreamortiguada o con amortiguamiento crítico. La mayoría de los procesos aceptan cierto sobrepaso del valor deseado lo que permite un sistema subamortiguado. En este tipo de sistemas generalmente se considera una respuesta como aceptable si el amortiguamiento es de  $1/4$  de la amplitud; es decir, cada ciclo la amplitud se reduce a  $1/4$  de su valor anterior. (ver figura 3.1).

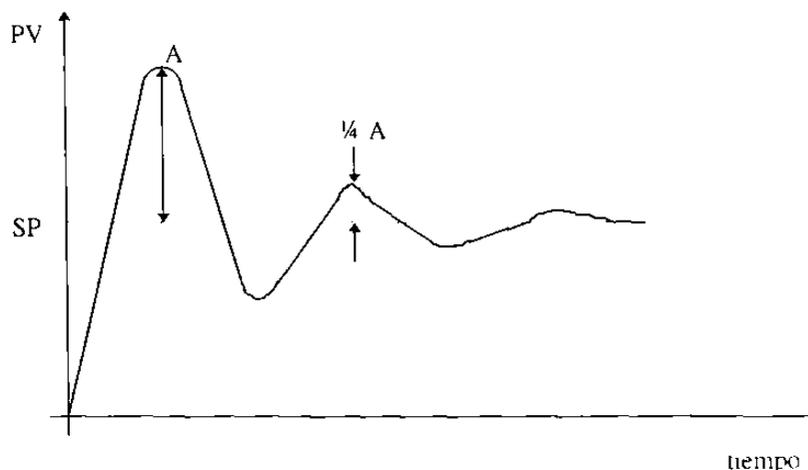


Fig. 3.1 Amortiguamiento con un cuarto de la amplitud.

Otro criterio para considerar que un lazo de control está sintonizado apropiadamente es el conocido como área mínima bajo la curva. En este caso

se determina el área que forma la gráfica del comportamiento de la variable y el valor deseado y buscando obtener el valor mínimo, de ahí su nombre. Ver figura 3.2.

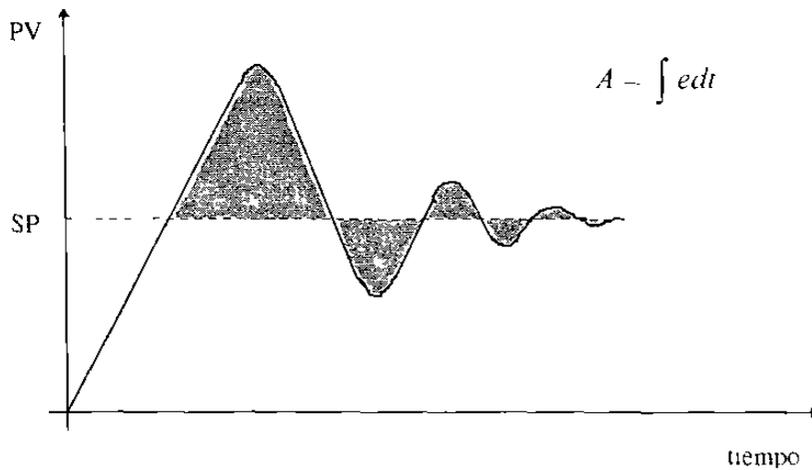


Fig. 3.2 Criterio de respuesta de área mínima bajo la curva.

En la práctica el criterio más usado es el de amortiguamiento de 1/4 de la amplitud porque es el más fácil de determinar

### 3.3 Respuesta a la frecuencia de los sistemas de control

En un sistema lineal estable, si la señal de entrada es una señal senoidal, la salida será una señal senoidal con la misma frecuencia que la señal de entrada; solo la fase y la amplitud podrían ser diferentes. Esto significa que, en este sistema la relación entre la entrada y la salida puede ser descrita por dos números: el cociente entre la magnitud de la salida y la entrada ( $a$ ), y por la fase entre ambas ( $\varphi$ ). Es necesario conocer los valores de  $a$  y de  $\varphi$  para todas las frecuencias de la señal senoidal de entrada. Resulta conveniente expresar  $a$  y  $\varphi$  como la magnitud y el ángulo de un número complejo.

$$G(j\omega) = a(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (3.1)$$

A la función  $G(j\omega)$  se le llama función de la respuesta en frecuencia del sistema. La función  $a(\omega) = |G(j\omega)|$  se conoce como función de la amplitud y a la función  $\varphi(\omega) = \arg(G(j\omega))$  se le llama función de fase.

El número complejo  $G(j\omega)$  se puede representar por un vector de magnitud  $a(\omega)$  que forma un ángulo  $\varphi(\omega)$  con el eje de las  $x$  (ver figura 3.3). Cuando la frecuencia de la señal de entrada va de cero a infinito, la punta del vector describe una curva en el plano, que es llamada curva de frecuencia o curva de Nyquist.

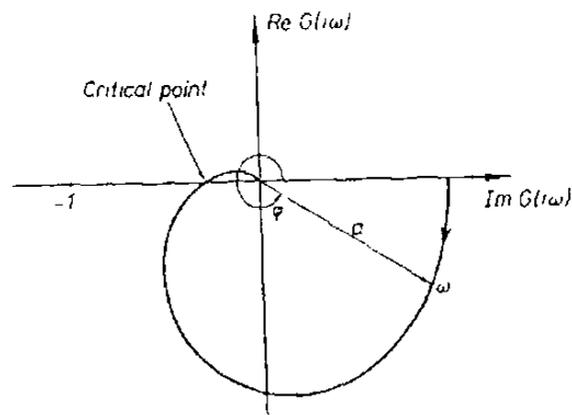


Fig. 3.3 Curva de Nyquist.

La curva de Nyquist da una descripción completa del sistema. Variando la frecuencia de la señal senoidal de entrada se puede obtener la curva de Nyquist, pero puede consumir mucho tiempo. Normalmente, es suficiente conocer solo partes de la curva. Es de particular interés la parte cercana a la más baja frecuencia donde  $G(j\omega)$  tiene una fase de  $-180^\circ$ , llamada la frecuencia

de cruce ( $w_c$ ). El punto correspondiente en la curva de Nyquist se le llama punto crítico. El valor de  $G(jw)$  es el utilizado por algunos métodos de sintonización.

Dos de los métodos para determinar los puntos de interés en la curva de Nyquist son: el método del período último de Ziegler y Nichols y el método del relevador.

### 3.4 Métodos de sintonización manual

Una de los principales problemas en la aplicación de los controladores PID es su adecuada sintonización. Los procedimientos manuales más comunes son: Prueba y error, método de reacción del proceso y método del período último.

El método de prueba y error consiste en ajustar las ganancias de acuerdo a la experiencia del operador y observar la respuesta del lazo de control. Este procedimiento se repite hasta obtener una respuesta satisfactoria.

Los métodos de reacción del proceso y del período último se describen a continuación.

#### 3.4.1 Método de Reacción del Proceso

Desde que el método conocido actualmente como de reacción del proceso fue presentado por Ziegler y Nichols, al Comité de Instrumentos y Reguladores Industriales de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) en diciembre de 1941, se convirtió en uno de los métodos más usados

en la práctica para determinar los parámetros de sintonización de los controladores PID.

Este método, aplicado en los procesos autorregulados, consiste básicamente en abrir el lazo de control para que no ocurra ninguna acción de control, es decir, que no haya retroalimentación. Cuando el sistema se estabilice se introduce una pequeña perturbación en escalón, en el elemento final de control. Éste cambio deberá ser lo más pequeño posible pero con la magnitud suficiente para hacer las mediciones necesarias. Deberán registrarse los valores de la variable controlada desde el momento que se introduce la perturbación. La gráfica típica de la variable controlada contra tiempo se muestra en la figura 3.4, donde la perturbación fue aplicada en  $t = 0$ . La variación de la salida controlada y el cambio en el elemento final de control se expresa en porcentaje del rango. Se traza, en la gráfica, una línea (línea punteada) tangente al punto de inflexión de la curva. Tomando como referencia los puntos donde la línea tangente cruza los valores máximo y mínimo de la variable controlada se determinan los valores de  $L$  y  $T$ .  $L$  representa el retardo de tiempo y  $T$  el tiempo de reacción del proceso.

Con los valores anteriores se calcula:

$$N = \frac{\Delta C_p}{T} \quad (3.2)$$

donde:

|              |                                |
|--------------|--------------------------------|
| N            | rapidez de reacción en %/min   |
| $\Delta C_p$ | cambio de la variable en %     |
| T            | tiempo de reacción del proceso |

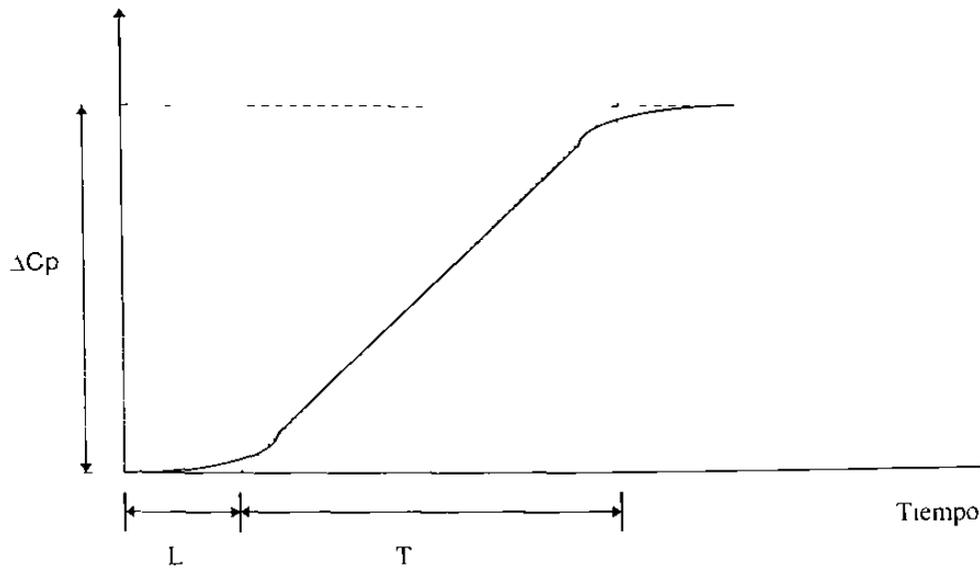


Fig. 3.4 Curva de reacción del proceso

Para obtener los valores de sintonización se utilizan las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols para cada modo de control

Para control Proporcional

$$K_p = \frac{\Delta P}{NL} \quad (3.3)$$

Para control Proporcional+Integral

$$K_p = 0.9 \frac{\Delta P}{NL} \quad (3.4)$$

$$T_i = 3.33L \quad (3.5)$$

Para control Proporcional+Integral+Derivativo

$$K_p = 1.2 \frac{\Delta P}{NL} \quad (3.6)$$

$$T_i = 2L \quad (3.7)$$

$$T_d = 0.5L \quad (3.8)$$

En la actualidad este método se ejecuta de manera automática en los controladores autosintonizados casi siempre como un proceso de pre-sintonización. Al iniciarse la autosintonización, por ejemplo cuando el operador oprime un botón, el controlador realiza de manera automática los siguientes pasos:

- Se abre el lazo de control (cambiando a operación manual).
- Se produce un cambio en escalón en la salida del controlador en una cantidad determinada (algunas veces especificada por el operador).
- Se registra el cambio en la variable controlada
- Se obtiene un modelo matemático que representa la respuesta en el tiempo de la variable controlada. El modelo puede ser tan simple como un retraso de primer orden y tiempo muerto
- De acuerdo al retraso de tiempo y al tiempo muerto se calculan los parámetros del controlador PID utilizando las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols.

- Algunos controladores muestran los valores calculados para que el operador decida su aplicación y otros modifican automáticamente los parámetros del controlador PID.

Entre las ventajas de este método para la sintonización automática está su simplicidad, puesto que para su aplicación solo requiere que el operador fije la magnitud del cambio en escalón y en algunas ocasiones ni esto es necesario, como se puede apreciar en los procedimientos descritos en el punto 3.6 para algunos controladores disponibles comercialmente

Las desventajas de este método son:

- El ruido o cambios en la carga mientras se efectúa la prueba pueden modificar el resultado.
- El modelo matemático del proceso no es muy preciso.
- Es muy sensible a los errores al determinar el tiempo muerto.

### 3.4.2 Método del período último

Este método que fue desarrollado por Ziegler y Nichols junto con el método de reacción del proceso, propuesto por ellos mismos, son los más comunes en la práctica para la sintonización de controladores

En general, el método consiste en hacer oscilar la variable de proceso con amplitud constante y de los valores de período de la oscilación y ganancia proporcional del controlador se calculan las ganancias para sintonización. Este método, combinado con un control de dos posiciones o relevador, se tomará

como base para desarrollar la autosintonización de los controladores PID en el presente proyecto.

Para realizar la sintonización por medio de este método se sigue el procedimiento que se describe a continuación:

Inicialmente la ganancia de la acción integral y derivativa debe fijarse en el mínimo o cero si es posible. La variable de proceso debe estar en condición estable. Sin abrir el lazo de control, la ganancia de modo proporcional se establece en un valor bajo mientras se introducen pequeñas perturbaciones en el sistema y se observa la respuesta de la variable controlada. Si no se observa respuesta o ésta no presenta oscilaciones, se incrementa en una pequeña cantidad la ganancia proporcional y nuevamente se introduce una perturbación. El paso anterior se repite hasta lograr que la variable controlada presente una oscilación de amplitud constante. Cuando esto suceda, se toman los valores del periodo de la oscilación ( $T_u$ ) y la ganancia del modo proporcional que lo produjo ( $K_u$ ), llamados periodo y ganancia últimos, respectivamente. Los valores de las ganancias de cada una de las acciones de control se calculan de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Proporcional

$$K_p = 0.5 K_u \quad (3.9)$$

Proporcional+Integral

$$K_p = 0.45 K_u \quad (3.10)$$

$$T_i = T / 2 \quad (3.11)$$

### Proporcional+Integral+Derivativo

$$K_c = 0.6 K_u \quad (3.12)$$

$$T_i = T/2 \quad (3.13)$$

$$T_d = T/8 \quad (3.14)$$

El método del período último está basado en un experimento simple y en el cual el proceso mismo es utilizado para determinar los valores de los parámetros que sirven para calcular las ganancias de sintonización. Sin embargo, este método presenta en su aplicación práctica algunas dificultades. Una de ellas es el llevar y mantener la variable de proceso a una oscilación de amplitud constante, porque los procesos industriales son relativamente lentos y es conveniente observar varios ciclos para determinar si la amplitud no cambia, lo que consume mucho tiempo y atención del operador. Además es un alto riesgo el trabajar en el límite de estabilidad, ya que el sistema fácilmente puede hacerse inestable y crear problemas en el proceso.

### 3.5 Método del relevador

Como se menciona en el punto 3.4.2 el método del periodo último de Ziegler y Nichols es muy usado en la práctica para determinar los valores de sintonización en los controladores PID. Tiene la ventaja de que su aplicación es muy simple, pero difícilmente puede ser automatizado por el tiempo que se emplea en el procedimiento de sintonización y por el riesgo que representa el mantener la oscilación de la variable controlada con amplitud constante, es decir, en el límite de estabilidad.

Sin embargo, existe una forma indirecta de automatizar este método para sintonizar los controladores PID; usando un relevador (controlador de dos posiciones). El uso de un relevador para hacer oscilar la variable controlada con una amplitud constante y de ahí calcular los valores de las ganancias PID fue propuesto por Karl Johan Aström y Tore Häggglund en 1983 y patentado en 1985.

El método del relevador presenta, entre otras, las ventajas de que su implementación es muy simple, que la variable controlada se lleva muy rápido a oscilar alrededor del valor deseado y que la amplitud constante de la oscilación puede ser fácilmente controlada (ver figura 3.9); a diferencia del método del período último, donde se consume un tiempo considerable para hacer oscilar la variable controlada con amplitud constante y además la amplitud de ésta no puede ser controlada, porque si se modifica la ganancia proporcional, la oscilación se vuelve amortiguada o, lo que es peor, inestable

El diagrama de bloques de un sistema de control que usa un relevador para autosintonización se puede ver en la figura 3.5.

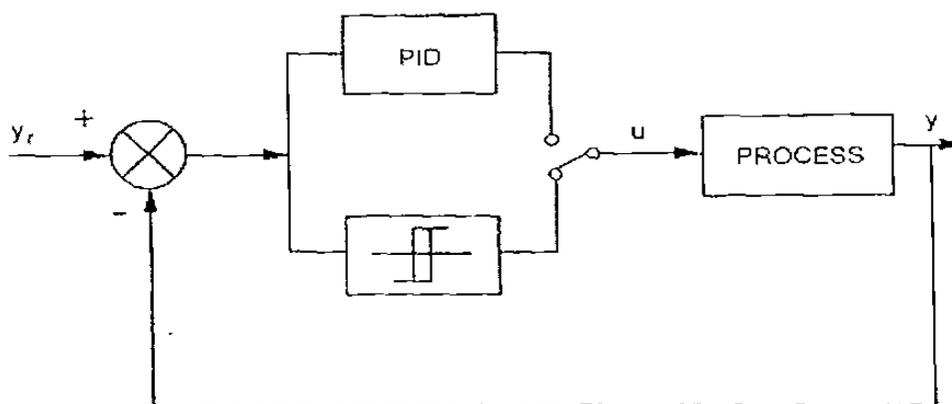


Fig. 3.5 Diagrama de bloques del control por medio de relevador

El principio de operación del relevador es muy sencillo. Como se explicó en el control de dos posiciones (sección 1.2.1) la salida del controlador solo puede ser máxima o mínima de acuerdo al valor de la entrada y al valor de referencia. En un relevador con acción inversa, cuando el valor de la variable sobrepasa el valor de referencia la salida del controlador es mínima, cuando el valor de la variable es menor que el valor de referencia la salida del controlador es máxima. Ésta operación produce una oscilación, con amplitud constante, de la variable controlada alrededor del valor de referencia. En la figura 3.6 se puede ver la oscilación que presenta la variable de proceso cuando es controlada por la acción del relevador. Observe la similitud de la respuesta que se logra al aumentar la ganancia de modo proporcional hasta obtener una respuesta de amplitud constante, como se muestra en la figura 3.7.

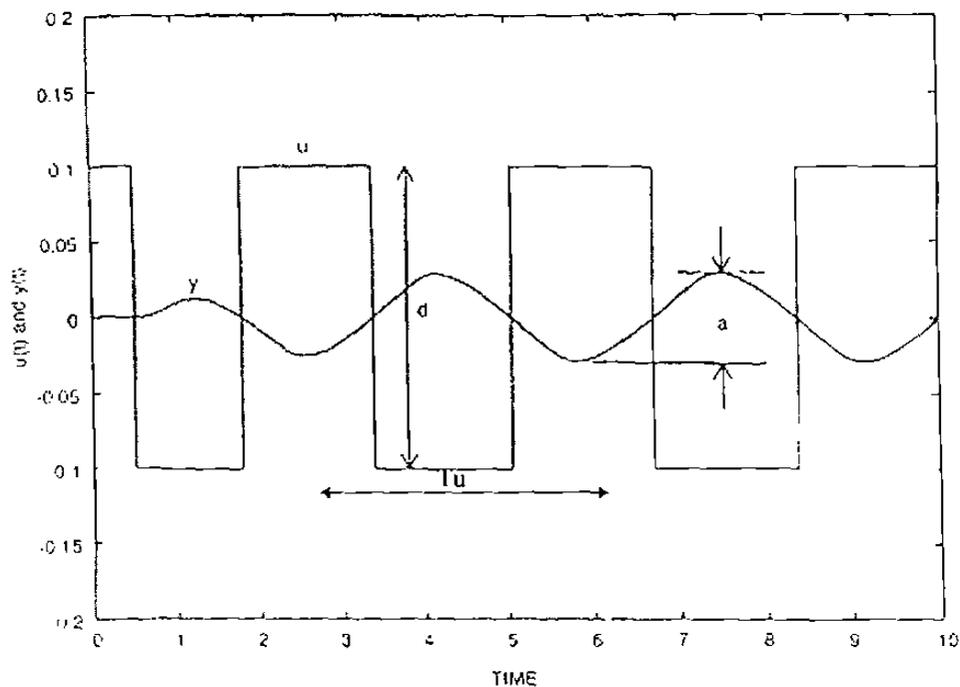


Fig. 3.6 Oscilación de la variable controlada bajo la acción del relevador

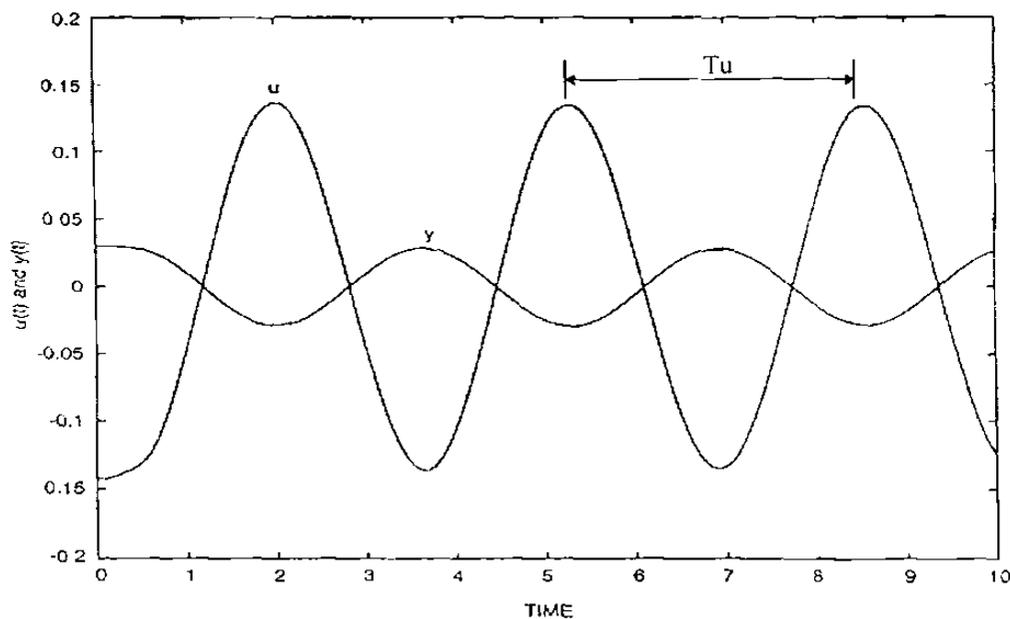


Fig. 3.7 Oscilación de la variable controlada al incrementar la ganancia proporcional

Para poder aplicar las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols en el cálculo de las ganancias de sintonización, es necesario determinar el período y ganancia últimos. El período último,  $T_u$ , es simplemente el período de la oscilación en las gráficas de las figuras 3.6 y 3.7. La ganancia última,  $K_u$ , es la ganancia proporcional para lograr la respuesta de la figura 3.7. Otra forma de obtener la ganancia última es dividir la magnitud de la señal de control entre el valor de la variable controlada, ya que el producto de la ganancia del controlador y la ganancia dinámica del proceso deben ser la unidad para la frecuencia última. De la misma manera, cuando se emplea el relevador, la ganancia última puede ser calculada de

$$K_u = \frac{d}{a} \quad (3.15)$$

Donde:

- d        amplitud del relevador  
 a        amplitud de la oscilación

Si consideramos las primera armónica en relevador y la oscilación de la variable de proceso, se puede obtener un valor más preciso, con la siguiente ecuación

$$Ku = \frac{4d}{\pi a} \quad (3.16)$$

### 3.5.1 Consideraciones prácticas en la implementación del relevador

Para la implementación práctica del método del relevador se debe considerar: el efecto del ruido en la oscilación del relevador, el ajuste de la amplitud del relevador y las perturbaciones durante el experimento.

El ruido en la señal de medición puede hacer que la salida del relevador cambie su estado. En la figura 3.8 se ilustra este efecto. En la práctica, para que esta situación no ocurra se introduce una banda diferencial en el relevador (histéresis). En la segunda parte de la figura 3.8 se puede observar el efecto benéfico de introducir la banda diferencial. Cuando se usa la banda diferencial la fórmula 3.16 cambia a la 3.17.

$$Ku = \frac{4d}{\pi \sqrt{a^2 - \varepsilon^2}} \quad (3.17)$$

Donde:

- $\varepsilon$  banda diferencial del relevador.

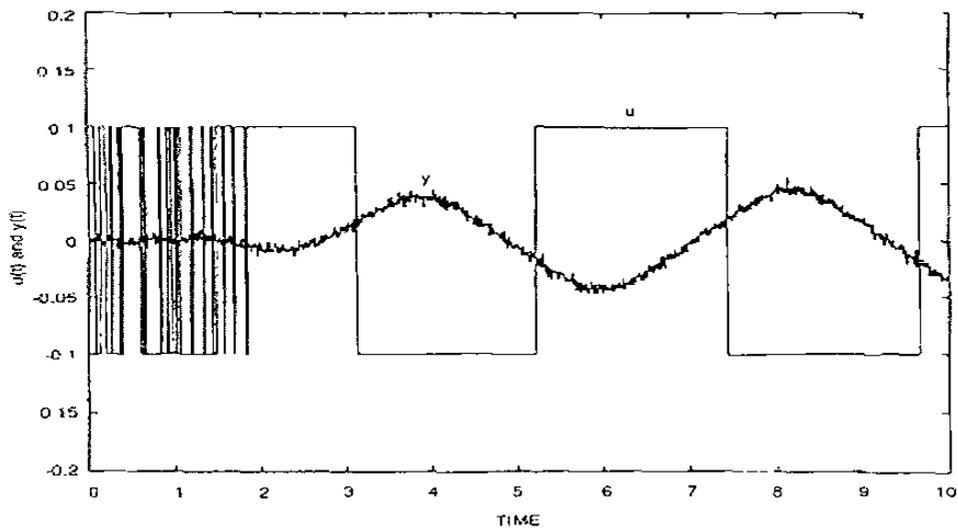


Fig. 3.8 Efecto del ruido en el relevador

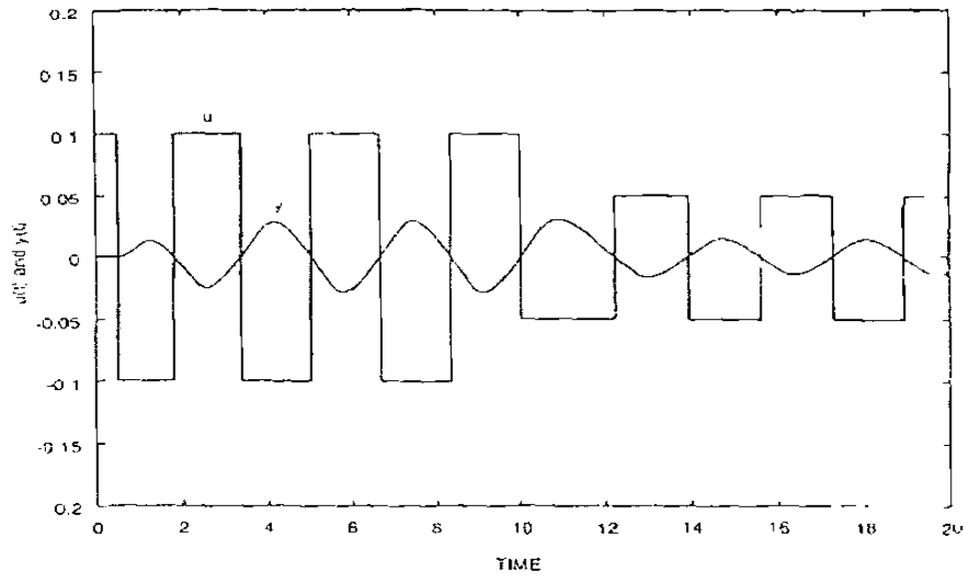


Fig. 3.9 Efecto de modificar la amplitud en el relevador

### 3.6 Autosintonización en controladores de procesos industriales

Los controladores con autosintonización han aparecido recientemente. Una de las razones es que el desarrollo de la electrónica ha hecho posible incorporar los programas para autosintonización a un costo razonable. Con la combinación de procedimientos para determinar las características dinámicas de los procesos y métodos para calcular los parámetros de sintonización del controlador PID, ha sido posible la integración de la función de autosintonización en los controladores actuales. En la tabla 3.1 se indican algunos controladores disponibles actualmente con autosintonización.

Tabla 3.1 Ejemplos de controladores industriales con autosintonización

| Fabricante              | Modelo       | Método de autosintonización |
|-------------------------|--------------|-----------------------------|
| Bailey Control          | CLCO4        | Reacción del proceso        |
| Control Techniques      | Expert       | Rampa                       |
| Fisher Controls         | DPR900       | Relevador                   |
|                         | DPR910       | Relevador                   |
| Foxboro                 | Exact        | Reacción del proceso        |
| Fuji                    | CC-5:PNA 3   | Reacción del proceso        |
| Hartmann & Braun        | Protronic P  | Reacción del proceso        |
|                         | Digitric P   | Reacción del proceso        |
| Honeywell               | UDC 6000     | Reacción del proceso        |
| Satt Control            | ECA 40       | Relevador                   |
|                         | ECA 400      | Relevador                   |
| Siemens                 | SIPART DR22  | Reacción del proceso        |
| Toshiba                 | TOSDIC-215D  | PRBS                        |
|                         | EC300        | PRBS                        |
| Turnbull Control System | TCS 6355     | Reacción del proceso        |
| Yokogawa                | SLPC-171,172 | Reacción del proceso        |
|                         | SLPC-181,182 | Reacción del proceso        |

Fuente: Adaptive Control, Hang, Lee y Ho.

### 3.6.1 Aplicación del método de reacción del proceso

El método de reacción del proceso descrito en la sección 3.4.1 se utiliza por los controladores actuales, fabricados a base de microprocesadores, para automatizar su proceso de sintonización, algunas veces como un procedimiento de pre-sintonización. A continuación se describe, de manera general los procesos de autosintonización realizados en algunos de dichos controladores.

#### 3.6.1.1 Controladores Micro-DCI de Fisher & Porter®

El método de reacción del proceso se aplica, con ligeras modificaciones, en la autosintonización de los controladores Micro-DCI de Fisher & Porter®. En estos controladores primero se produce un cambio en escalón en la señal de control para hacer que el valor de la variable controlada se modifique y determinar la constante de tiempo y el tiempo muerto del proceso. Posteriormente se elimina el cambio en escalón y se permite que la variable controlada se estabilice; luego se aplica otro cambio en escalón con una duración de 2.5 veces el valor de la suma de la constante de tiempo y el tiempo muerto estimados en el paso anterior. Con esta segunda prueba se determina la ganancia del sistema. Al cancelar el segundo escalón se obtiene un estimado final del tiempo muerto y la constante de tiempo del proceso y a partir de estos valores se calculan los valores para los parámetros del controlador usando las fórmulas de Ziegler y Nichols.

### 3.6.1.2 Controlador DPR900 de Fisher®

En el controlador DPR900 de Fisher® se utiliza el mismo procedimiento de autosintonización anterior pero combinado con una sintonización de ganancia programada. En este caso el operador inicia el procedimiento de autosintonización cuando el controlador opera en tres regiones diferentes, de manera que se obtienen tres juegos de parámetros de sintonización que se almacenan en forma de tabla en la memoria del controlador. Cada juego de valores se aplica al PID según la región en que se esté operando. Las regiones se determinan de acuerdo al valor de una variable seleccionada por el operador. La variable puede ser el valor de referencia, la variable de proceso, el error, la salida del controlador o alguna otra variable medida. Este método es mejor que usar un valor único de parámetros de sintonización para todas las condiciones de operación.

### 3.6.1.3 Controladores 2003 y el 2004 de LFE® y el 2000 de West Instruments®

Otros controladores inician el procedimiento de autosintonización cuando se efectúan cambios en el valor de referencia para evitar perturbaciones adicionales en el proceso. Los controladores 2003 y el 2004 de LFE® y el 2000 de West Instruments® usan este procedimiento. Cuando el operador cambia el valor de referencia el controlador cambia la señal de control (salida del controlador) al 100% y la disminuye a cero cuando la variable controlada llega al 50% del nuevo valor de referencia. Entonces se registran los cambios en la variable controlada para determinar su comportamiento dinámico (ver fig. 3.10). Los valores de sintonización se calculan, de acuerdo a las características

de la respuesta, con las fórmulas propuestas por Ziegler y Nichols para la respuesta rápida o lenta según la preferencia del operador.

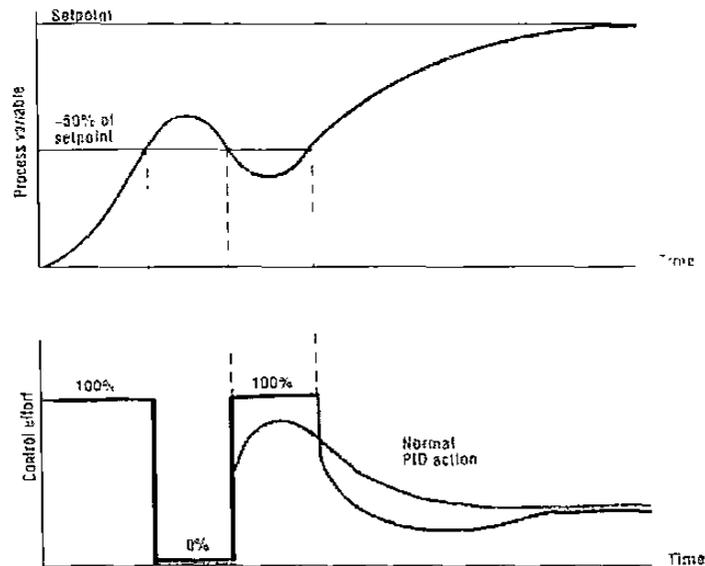


Fig. 3.10 Procedimiento de sintonización en controladores marca JUMO, LFE y West (Fuente: Vance J. Vandoren, Control Engineering, Ago De 1993)

#### 3.6.1.4 Controladores DICON SM y dTRON de JUMO® Process Controls

Los controladores DICON SM y dTRON de JUMO® Process Controls efectúan el procedimiento descrito en el párrafo anterior dos veces durante el cambio del valor de referencia (ver Fig. 3.10).

### 3.6.1.5 Controladores EXACT de Foxboro®

Algunos controladores como el EXACT de Foxboro® utilizan el método de reacción del proceso para calcular los valores iniciales de los parámetros del controlador PID, es decir como pre-sintonización, y posteriormente aplican otro método, como el de reconocimiento del patrón de respuesta, para hacer el ajuste fino de la sintonización.

## 3.6.2 Método de reconocimiento del patrón de respuesta

En este método se analiza la respuesta y se compara con un patrón preestablecido para determinar los parámetros de sintonización del controlador.

### 3.6.2.1 Controladores EXACT de Foxboro® y West®

La técnica de reconocimiento del patrón de respuesta es utilizada por el controlador EXACT (*EXpert Adaptive Controller Tuner*) de Foxboro® anunciado en octubre de 1984.

Como se mencionó en párrafos anteriores en este controlador se usa un método de respuesta de lazo abierto a una entrada en escalón como procedimiento de pre-sintonización y la autosintonización (ajuste fino) se hace por medio del reconocimiento del patrón de respuesta (ver figura 3.11).

Inicialmente se establece una banda de valores alrededor del valor de referencia. La autosintonización se activa cuando la variable de proceso sale de esta banda. El patrón de respuesta está caracterizado por tres picos sucesivos

del error de la variable de proceso, y se mide el período entre el primer y tercer pico. Cuando se han determinado los picos se calcula la razón de amortiguamiento (DMP) y la razón de sobrepaso (OVR) con las ecuaciones:

$$\text{DMP} = (P3 - P1) / (P1 - P3) \quad (3.18)$$

$$\text{OVR} = - (P2 / P1) \quad (3.19)$$

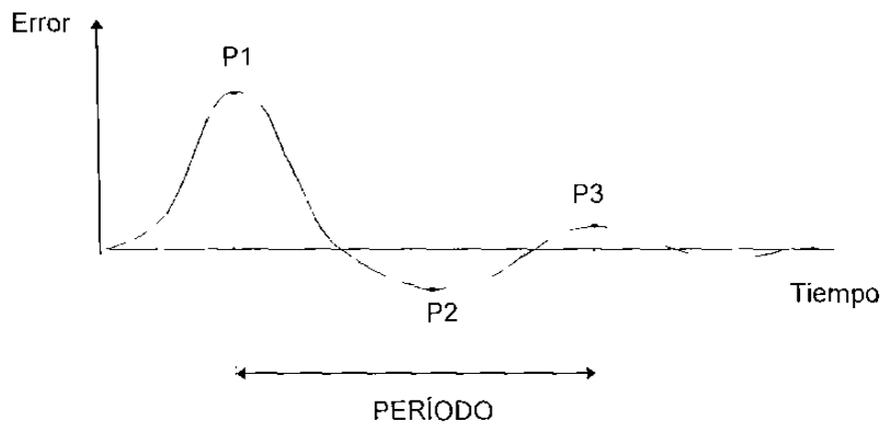


Fig. 3.11 Reconocimiento del patrón de respuesta

Se determina la relación que esté más cercana a los valores fijados y de la diferencia se calculan factores de multiplicación que se aplican a los valores actuales de sintonización para obtener los nuevos valores. El período de oscilación se usa para ajustar las ganancias del modo integral y derivativo. Los ajustes se hacen en base a reglas heurísticas y no en base a un procedimiento matemático formal.

Los controladores West® inicializan los parámetros del PID en el arranque con el procedimiento de reacción del proceso y posteriormente