

69
207



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**INTEGRACION DE UN SISTEMA DE
CONTROL AUTOMATICO EN UNA
PLANTA PILOTO DE TIPO INDUSTRIAL**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA ELECTRICA ELECTRONICA
P R E S E N T A
ALVARO GAMEZ ESTRADA

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ricardo Garibay Jiménez



MEXICO, D. F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1994



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedico esta Tesis a mis Padres, cuya obra fué mi formación tanto personal como profesional.

Agradezco al Ingeniero Ricardo Garibay Jiménez su apoyo y sus enseñanzas.

INDICE

Pág

Objetivo.....	2
Temario.....	3
1.- Introducción y planteamiento del problema.....	5
2.- Descripción del proceso (planta piloto de tipo industrial).....	7
2.1.- Descripción del proceso.....	9
Lista de equipo e instrumentos.....	9
2.2.-Descripción de los esquemas de control.....	13
3.- Instrumentos de medición y control instalados en la planta.....	24
3.1.- Descripción de los instrumentos - principio de operación.....	25
3.1.1.- Placa de orificio.....	25
3.1.2.- Rotámetro.....	29
3.1.3.- Transmisor de presión "inteligente" LD301 de Smar.....	31
3.1.4.- Controlador.....	59
3.1.5.- Controlador de tipo ajuste de corriente 420 C.A.T. de Leeds and Northrup...	64
3.1.6.- Interruptores de nivel.....	76
3.2.-Calibración.....	77
4.- Actuadores instalados en la planta.....	83
4.1.- Descripción y principio de operación.....	85

	Pág
4.1.1.- Actuador de diafragma.....	85
4.1.2.- Válvulas de control.....	88
4.1.3.- Actuadores y válvulas solenoides.....	92
4.1.4.- Convertidor corriente - presión.....	95
4.2.- Aplicación y operación de los actuadores.....	99
5.- Lazos cerrados de control.....	106
5.1.- Control On/Off.....	110
5.2.-Control Proporcional - Integral.....	113
5.3.- Lazos Compuestos.....	115
5.3.1.-Control en cascada.....	115
5.3.2.- Control de relación.....	120
5.3.3.- Control de rango (escala) dividido.....	124
6.- Operación global del sistema en modo automático.....	136
6.1.- Botonera de la planta piloto de tipo industrial.....	136
6.2.- Sintonización de lazos cerrados de control.....	144
6.3.- Operación de los lazos de control en modo automático.....	149
7.- Resultados y conclusiones.....	161
Bibliografía.....	165

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO EN UNA

PLANTA PILOTO DE TIPO INDUSTRIAL

ÁLVARO GÁMEZ ESTRADA

OBJETIVO:

A partir de la planta piloto de tipo industrial de que se dispone en los laboratorios de Ingeniería de Control, se propone desarrollar la ingeniería y las interfases que hagan posible incorporar un sistema de control automático dedicado al manejo de la planta. Se introducirán esquemas de control de lazo cerrado empleándose dispositivos de control analógico, observando los aspectos operativos más importantes:

-Secuencias de arranque, paro y de protección.

-Sintonización de lazos cerrados.

TEMARIO.

- 1.- Introducción y planteamiento del problema.
- 2.- Descripción del proceso (planta piloto de tipo industrial).
 - 2.1.- Descripción del proceso.
 - 2.2.- Descripción de los esquemas de control.
- 3.- Instrumentos de medición y control instalados en la planta.
 - 3.1.- Descripción de los instrumentos - principio de operación.
 - 3.1.1.- Placa de orificio.
 - 3.1.2.- Rotámetro.
 - 3.1.3.- Transmisor de presión "inteligente" LD301 de Smar.
 - 3.1.4.- Controlador.
 - 3.1.5.- Controlador de tipo ajuste de corriente 420 C.A.T. de Leeds and Northrup.
 - 3.1.6.- Interruptores de nivel.
 - 3.2.- Calibración
- 4.- Actuadores instalados en la planta.
 - 4.1.- Descripción y principio de operación.
 - 4.1.1.- Actuador de diafragma.
 - 4.1.2.- Válvulas de control.
 - 4.1.3.- Actuadores y válvulas solenoides.
 - 4.1.4.- Convertidor corriente - presión.
 - 4.2.- Aplicación y operación de los actuadores.
- 5.- Lazos cerrados de control.

- 5.1.- Control On/Off.
- 5.2.-Control Proporcional - Integral.
- 5.3.- Lazos Compuestos.
 - 5.3.1.-Control en cascada.
 - 5.3.2.- Control de relación.
 - 5.3.3.- Control de rango (escala) dividido.
- 6.- Operación global del sistema en modo automático.
 - 6.1.- Botonera de la planta.
 - 6.2.- Sintonización de lazos cerrados de control.
 - 6.3.- Operación de los lazos de control en modo automático.
- 7.- Resultados y conclusiones.

1.- INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, en los laboratorios de Control del Departamento de Ingeniería de control se dispone de una planta piloto de tipo industrial, que tiene como uno de sus objetivos que el alumno comprenda y aplique los conceptos que intervienen en el control de las variables de un proceso industrial: elementos primarios de medición, transmisores, controladores (proporcional, proporcional-integral, proporcional-integral-derivativo) y elementos finales de control. Para esto se desarrollarán prácticas que le permitan al alumno analizar el comportamiento real de las variables presión, temperatura, flujo y nivel, y realizar las siguientes actividades:

- Calibración de transmisores.
- Medición de las variables de proceso.
- Configuración de lazos de control.
- Operación de controladores.
- Sintonización de controladores.
- Prueba de algoritmos de control
- Prueba de prototipos de control (hardware y software)

Previamente, es necesario trabajar en la integración del sistema, de tal forma que el proceso junto con los instrumentos de medición y actuación sean interconectados a dispositivos de control de lazo cerrado (controladores analógicos). El objetivo del

presente trabajo consiste en describir los diversos componentes del sistema, las actividades de integración que se requieren para realizar el funcionamiento automático y establecer el procedimiento de puesta en servicio. Para el control automático de la planta, se utilizarán componentes discretos de electrónica y controladores de estado sólido del tipo de ajuste de corriente. Las señales de la planta, vía transmisores, serán enviadas hacia estos módulos para su procesamiento.

La puesta en funcionamiento de esta planta con su sistema de automatización dará a los laboratorios de Control la posibilidad de que los alumnos de los mismos tengan acceso a un proceso cercano a lo que hay en la industria. Por medio de las prácticas de laboratorio debidamente diseñadas, las brigadas de alumnos manejarán la planta utilizando los conocimientos vistos en teoría, practicando en condiciones parecidas a las reales, dado que el equipo no es simulado. Con esto, los alumnos confirmarán la importancia que tienen el control y la automatización de equipos para una aplicación específica. También, a partir de esta idea, conocerán cómo se pueden implementar sistemas más complejos comprendiendo el funcionamiento de un equipo automatizado básico, que puede interrelacionarse con otros semejantes para realizar procesos complejos (por ejemplo, de producción) hasta llegar a la automatización completa de toda una planta industrial.

2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO (PLANTA PILOTO DE TIPO INDUSTRIAL).

Por su diseño, la planta piloto está construida con el material y equipo de proceso necesario para que el alumno pueda evaluar sus prototipos de controladores (tanto en hardware como en software). Incluye los elementos primarios de medición, transmisores, bombas, válvulas neumáticas de control (actuadores y elementos finales de control), válvulas de bloqueo, válvulas solenoides, botoneras, gabinete para montaje de instrumentos de control, convertidores, recipientes y tubería. Las válvulas solenoides y las bombas tienen una botonera para operar en los modos manual, apagado y automático. El diseño de la planta comprende el empleo de agua y aire como fluidos de proceso y con rangos de operación dinámicos.

Rangos de operación.

Flujo: 0 - 20 GPM ($0.0757 \frac{m^3}{min}$).

Fluido: Agua.

Presión: 0 - 14 psig (96.53 kPa).

Nivel: 0 - 30 pulgadas de agua (0 - 76.2 cm de agua).

Temperatura: Ambiente, hasta 60 °C (ambiente, hasta 333.15 K).

Requerimientos.

Energía eléctrica: 120 V A.C.

Aire: Suministro a 50 psig (344.75 kPa).

Agua: Reposición.

Dimensiones aproximadas : 1.70 m x 1.70 m x 1.70 m (ancho x alto x profundidad)

Peso aproximado: 100 kg

La planta posee en su construcción válvulas neumáticas de control, posicionadores e instrumentación electrónica compatible con los estándares de la industria, con lo cual el alumno realizará prácticas en el campo del control automático de procesos empleando equipos y conceptos actualizados.

Cabe aclarar que, como todos los instrumentos de la planta piloto utilizan unidades del sistema inglés, dicho sistema será el utilizado en el presente trabajo.

Modos de control:

On/off.

Proporcional.

Proporcional-integral.

Proporcional-integral-derivativo.

Estrategias de control compuesto aplicables:

Control en cascada.

Control de relación.

Control de rango dividido.

2.1.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

La descripción del proceso comprende la lista de equipo e instrumentos y las estrategias o esquemas de control utilizados en la planta piloto.

LISTA DE EQUIPO E INSTRUMENTOS:

Identificación	Descripción	Marca/Modelo
BA-01	Bomba centrífuga de 1 HP trifásica	Weg/D56J0692
BA-02	Bomba centrífuga de ½ HP trifásica	Weg/C56J0592
FA-01	Recipiente de carga abierto, de acero inoxidable.	
FA-02	Recipiente de carga cerrado, de acero inoxidable.	
PV-01 ó FV-01	Válvula de presión para control.	Badgermeter/ 9001GCW36SV1A09236
PV-02 ó FV-02	Válvula de presión para control.	Badgermeter/ 9001GCW36SV3A09236
PY-01 ó FY-01	Convertidor corriente-presión.	Fisher/646FM
PY-02 ó FY-02	Convertidor corriente-presión.	Fisher/646FM

Identificación	Descripción	Marca/modelo
S	Actuador solenoide.	MAC/PME111CAAA
SV	Válvula solenoide (2 partes)	MAC/912APM111CA Whitey /135SR
PI-01	Manómetro de Bourdon	Surex
PI-02	Manómetro de Bourdon	Surex
Medición de flujo que consta de:		
FE-01	Placa de orificio (D = 1", 150#, d = 0.735", inox. 316).	
FT-01	Transmisor de presión.	Smar/LD301
Medición de flujo que consta de:		
FE-02	Placa de orificio (D = 1", 150#, d = 0.735", inox. 316).	
FT-02	Transmisor de presión.	Smar/LD301
LT-01	Transmisor de nivel compuesto por:	
	Transmisor de presión	Smar/LD301
FI-01	Indicador de flujo	Fischer y Porter/10A3657S
V-01 a V-17	Válvula de bloqueo.	Worcester/466T

Nota: Los dispositivos PT-01, PY-03, PV-03, TE-01, TE-02 ,TE-03 y TY-01 son para uso futuro; también lo es un calentador eléctrico para agua mencionado en el control PID, párrafos adelante. Solamente se hace mención de dicho equipo, que es opcional para la ampliación de la planta piloto, mostrada completa en la figura 1. Para

ésto, en la figura 8 se muestra la planta recién adquirida sin dicho equipo opcional, que se acoplará posteriormente.

CONFIGURACIÓN DE LA PLANTA PARA USO FUTURO.

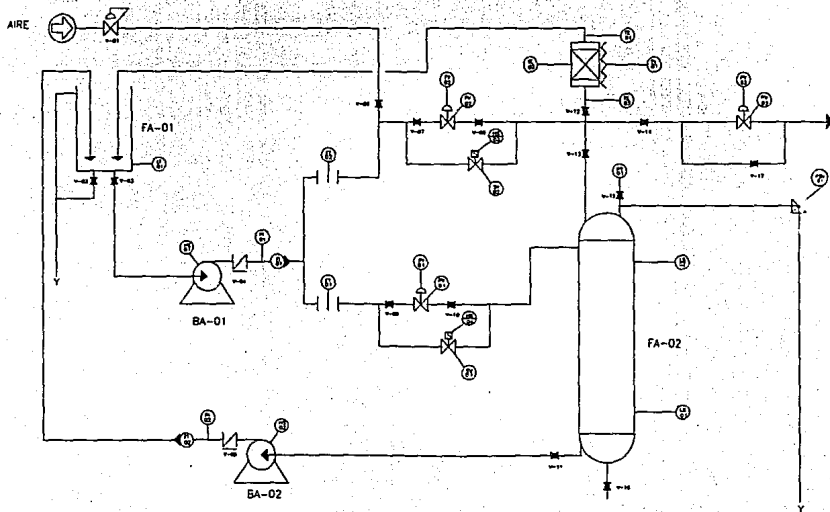


Fig. 1.- Diagrama completo de la planta piloto de tipo Industrial.

La planta consta de 2 recipientes de carga FA-01 y FA-02; inicialmente se llena el recipiente FA-01 con agua que se mantiene en recirculación constante a través de las bombas BA-01 y BA-02 y mediante la alineación y bloqueo de las válvulas de bola V-1 a V-17 se pueden establecer las siguientes estrategias de control:

2.2.- DESCRIPCIÓN DE LOS ESQUEMAS DE CONTROL.

Esquema de control On/Off. En la figura 2 se muestra el diagrama de la parte de la planta que es empleada para el estudio de este modo de control, el resto de la misma ha sido bloqueada a través de las válvulas correspondientes. El proceso es el siguiente:

A partir del recipiente FA-01, previamente lleno de agua, la bomba BA-01 succiona el líquido, que es enviado a un flujo constante con la válvula FV-01 abierta al recipiente FA-02; este recipiente tiene instalados interruptores de nivel bajo (LS-01) y alto (LS-02); cuando el agua rebasa el nivel alto, el interruptor LS-02 se activa y arranca la bomba BA-02, que drena al recipiente FA-02. Al rebasar su nivel inferior se activa el interruptor LS-01 y se desactiva LS-02, apagando la bomba BA-02 y recirculando con ello el agua (ya que BA-01 no deja de funcionar) y así sucesivamente, apagando y encendiendo a BA-02. El flujo de BA-01 puede ser medido empleando el transmisor de flujo FT-01 y una perturbación adicional puede ser incluido al sistema activando la válvula solenoide SV-01 a diferentes intervalos de tiempo. Para esta condición las válvulas V-09 y V-10 deben estar abiertas. El control se logra por medio de un sistema de relevadores que se explicará en el tema 5.

Recordando la definición de control On/Off, este tipo de control tiene sólo 2 posiciones fijas, por lo común prendido y apagado (de ahí su nombre), para el caso de la bomba BA-02 dichas posiciones son las de los interruptores de nivel LS-01 y LS-02 que son los sensores o medidores del control; la misma bomba a su vez es el actuador de dicho sistema de control. El indicador de flujo FI-01 y el transmisor de flujo FT-01 deben indicar la misma lectura, con el objeto de verificar que el transmisor efectivamente mande la lectura correcta de flujo al controlador; lo mismo ocurre para FI-02 y FT-02.

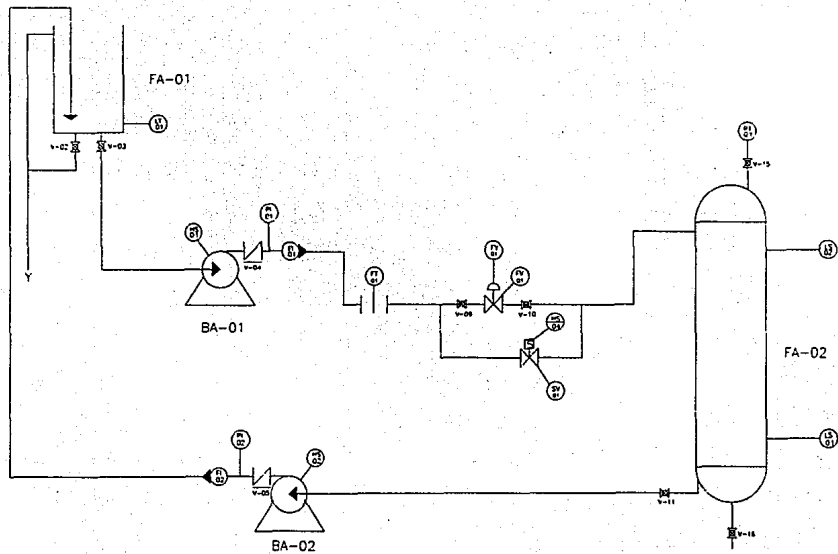


Fig. 2.- Diagrama del sistema de control On/Off.

Esquema de control Proporcional Integral (PI). En la figura 3 se muestra el diagrama del sistema en donde se mantiene el control on/off como disturbio del sistema, pero se implementa un control de flujo (proporcional ó proporcional integral) para mantener el flujo constante de agua que va al recipiente FA-02, manipulando como elemento final de control la válvula FV-01.

Esquema de control Proporcional Integral Derivativo (PID). En la figura 4 se muestra el diagrama del sistema que es empleado para la implementar este control. El flujo proveniente de BA-01 es desviado para que circule a través de un calentador eléctrico, el cual está diseñado para tener tiempos de atraso en la respuesta considerables. Con ésto, en el lazo de control de temperatura configurado es empleada la acción derivativa, que complementa al control proporcional integral de temperatura conectado a dicho calentador. Las perturbaciones del sistema son provocados por la válvula solenoide SV-02.

Esquema de control en cascada. La figura 5, en donde se emplea el mismo sistema de la figura 3, pero en este caso se configura un control en cascada flujo/nivel en donde el control esclavo es un control local de flujo de agua que va a FA-02, recibiendo como punto de ajuste la señal de salida del control del nivel del recipiente FA-01.

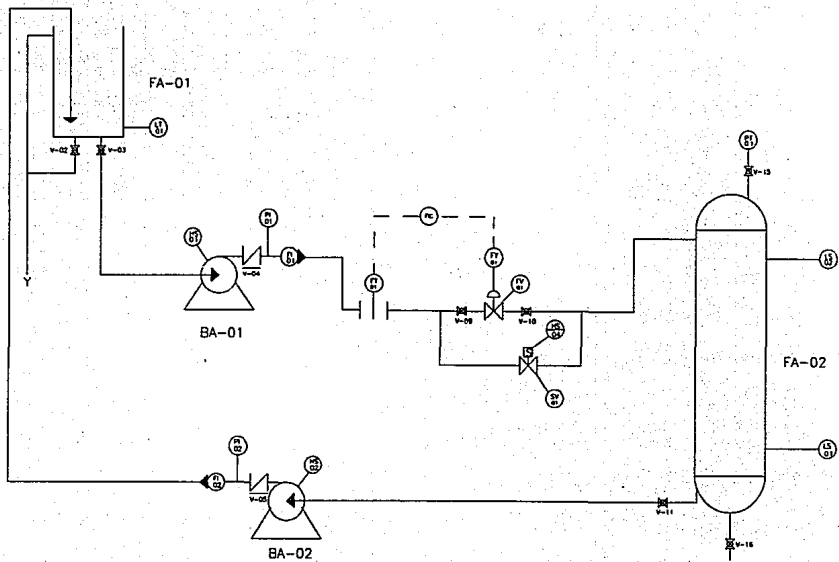


Fig. 3 - Diagrama del sistema de control proporcional Integral (PI).

CONFIGURACIÓN PARA USO FUTURO.

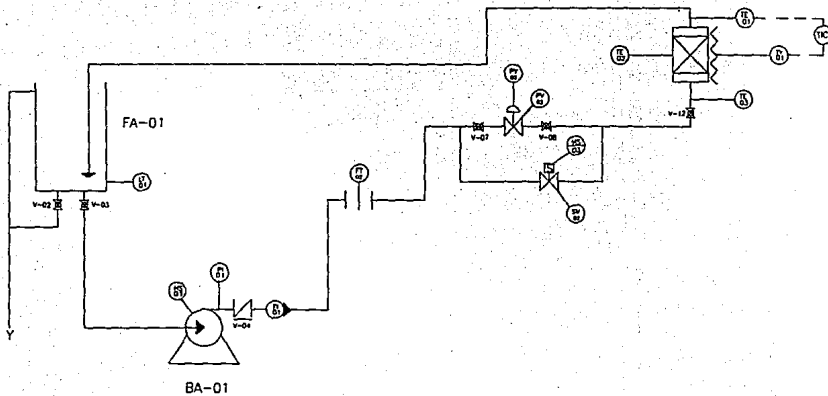


Fig. 4.- Diagrama del sistema de control Proporcional Integral Derivativo (PID).

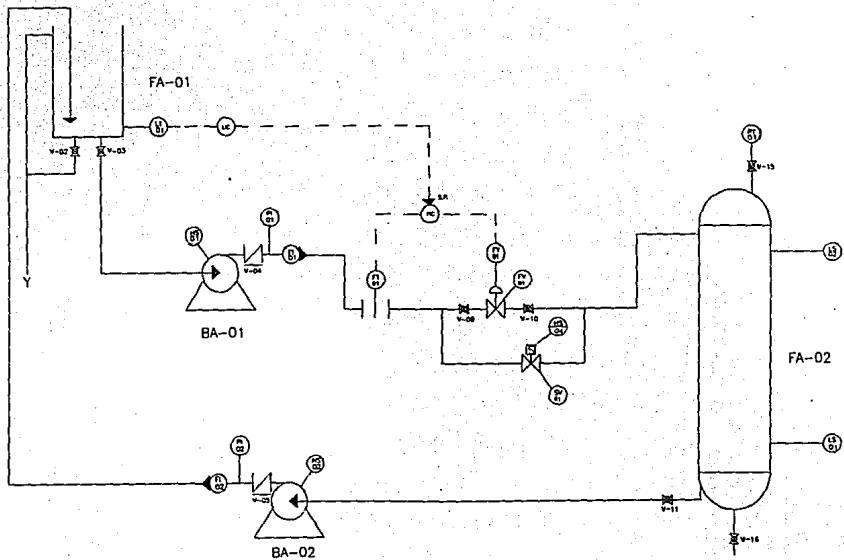


Fig. 5.- Diagrama del sistema de control en cascada.

Esquema de control de relación. En la figura 6 se muestra la parte de la planta que se utiliza para implementar dicho sistema; el flujo proveniente de BA-01 es dividido en dos partes, el controlador de relación de flujo (FFC) recibe la señal del transmisor FT-01 como variable independiente y hace la corrección necesaria de su salida sobre la válvula FV-02 para mantener la relación de flujo establecida con respecto a FT-02. Las perturbaciones de este sistema son provocados por las válvulas solenoides SV-01 y SV-02.

Esquema de control de rango dividido. Para implementar el estudio de este sistema de control, se emplea la parte de la planta mostrada en la figura 7, implementando primero el sistema de control on/off que actúa como perturbación del sistema. Una corriente de aire es suministrada al recipiente FA-02 a través de la válvula FV-02 para mantener en él una presión constante; el exceso de presión será desfogado a través de la válvula PV-02. Ambas válvulas operan como elementos finales de control de un controlador (de presión) de rango dividido. Disturbios adicionales al sistema pueden ser incluidos accionando la válvula solenoide SV-02.

El trabajo que se desarrolla no incluye los esquemas PID, de relación y de rango dividido. La figura 8 presenta la configuración de la planta piloto al ser recibida en el Departamento de control; ésta se ampliará a futuro para los sistemas de control no incluidos.

CONFIGURACIÓN PARA USO FUTURO.

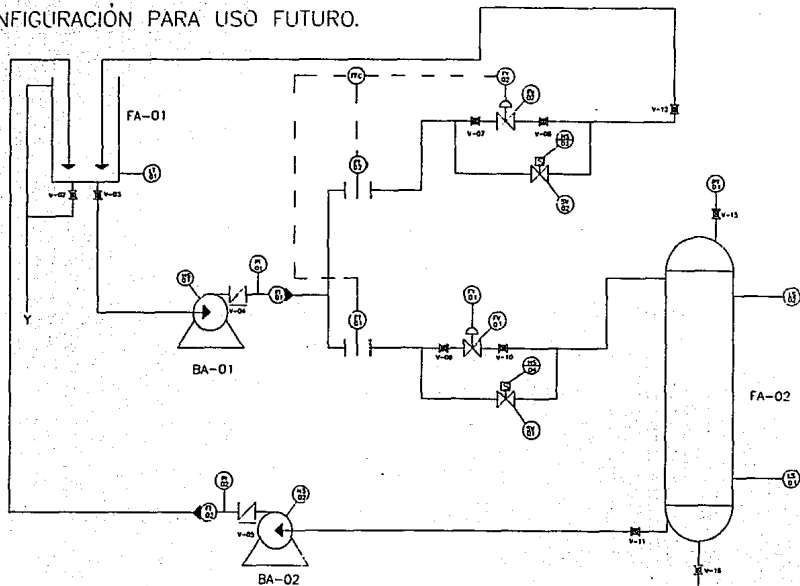


Fig. 6.- Diagrama del sistema de control de relación.

CONFIGURACIÓN PARA USO FUTURO.

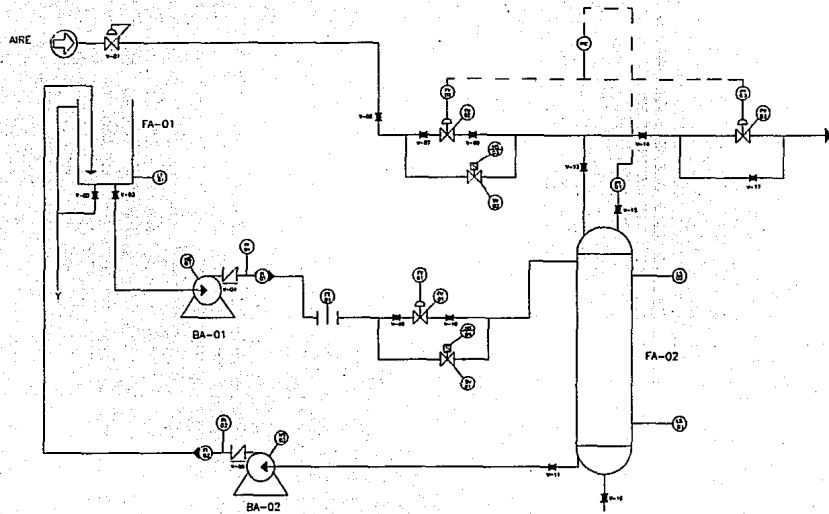


Fig. 7.-Sistema para el control de rango dividido.

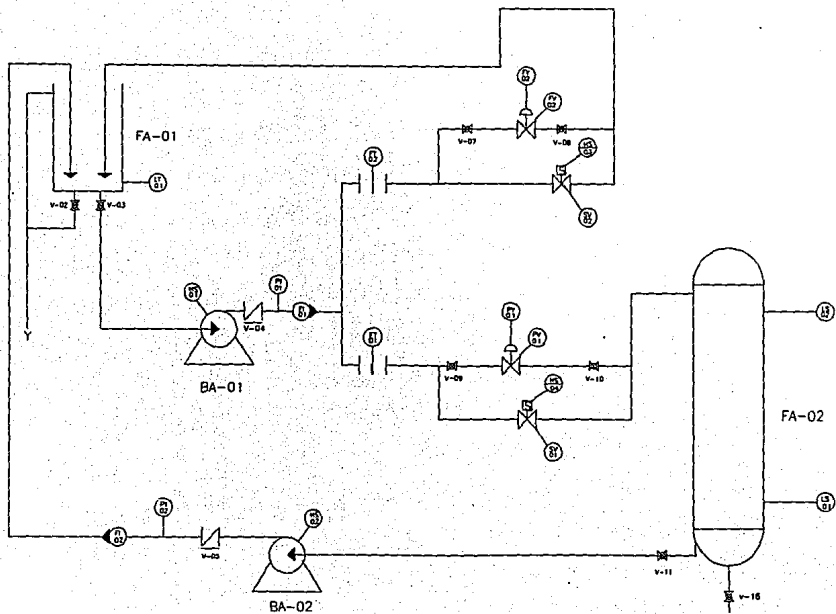


Fig. 8-Configuración de la planta piloto al ser adquirida.

3.- INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL INSTALADOS EN LA PLANTA.

Para gasto o flujo: se utilizan 2 rotámetros y 2 placas de orificio; cada placa de orificio incluye un transmisor "inteligente" de presión que mide la presión diferencial de la placa, para determinar el flujo a medir. El flujo se establece mediante 2 válvulas de control para los controladores electrónicos y 2 válvulas solenoides, éstas controladas desde la botonera de la planta. Para los 2 actuadores que varían el flujo en ambas ramas de la planta hay 2 convertidores presión-corriente que los comunican con sus respectivos controladores electrónicos usados precisamente para el gasto o flujo.

Para nivel: se utiliza un transmisor de nivel en el tanque abierto, que es en realidad un transmisor "inteligente" de presión diferencial que determina el nivel del agua dentro del tanque midiendo la presión que produce el líquido. Para el tanque cerrado hay 2 interruptores de nivel, bajo y alto respectivamente, que se activan cuando el agua alcanza uno de estos niveles y se pueden comunicar con alguna de las bombas (actuadores); su función se ve en el tipo de control ON/OFF.

Hay 2 indicadores que son manómetros (tubos) de Bourdon que indican la presión de carga de las bombas.

Para control de procesos se utilizan controladores electrónicos 420 CAT de Leeds and Northrup.

3.1.- DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS - PRINCIPIO DE OPERACIÓN.

A continuación se expondrán uno por uno los instrumentos utilizados en la planta piloto, con sus características y funcionamiento.

3.1.1.- PLACA DE ORIFICIO.

Es el elemento primario de medición de flujo que consiste en una placa de metal delgada con un orificio, instalada transversalmente en un tramo recto (donde se desea medir) de una tubería por medio de conexiones llamadas bridas; en la tubería se colocan unas tomas de presión antes y después de la placa para efectuar la medición por medio de otro dispositivo, que mide la presión diferencial y la relaciona con el flujo por medio de una ecuación que se verá más adelante. Sus especificaciones son:

- El orificio de la placa generalmente es del orden de entre 20 y 70 % del diámetro (D) de la tubería. El diámetro de la placa de orificio es ligeramente mayor que el de la tubería, por lo que se le puede llamar D' . Esto se ve en la figura 9.
- El espesor de la placa no debe ser mayor de $d/8$, $D/50$ o $(D-d)/8$ donde d es el diámetro del orificio.

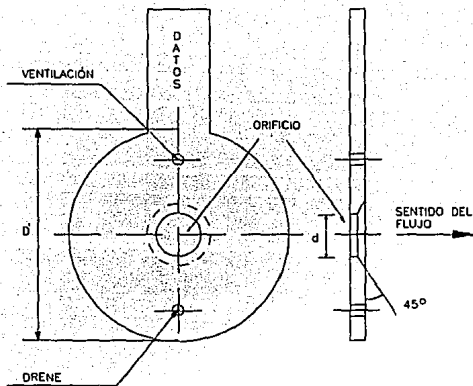


Fig. 9.- Placa de orificio.

La instalación se hace considerando una distancia de $20 D$ antes de la placa y a otra distancia de $5 D$ después, con respecto a cualquier dispositivo que provoque turbulencias. Para la localización de las tomas de presión se recomienda hacer la conexión sobre cada una de las bridas a ambos lados de la placa; se ubica la toma de alta presión sobre la tubería a una distancia D antes de la placa y la de baja presión una distancia $D/2$ delante del orificio de la placa.

La placa de orificio puede llevar una pequeña perforación adicional, superior para ventear gases cuando se trabaja con líquidos o inferior para drenar líquidos cuando se trabaja con gases. Aunque trabajan con agua, las placas de la planta piloto no

necesitan orificio adicional para funcionar. Además son del tipo de orificio concéntrico, dado que el agua con que trabajan no es un fluido sucio ni con partículas en suspensión. La placa tiene una lengüeta de datos, que son: identificación, material, régimen, línea y diámetro interior; en las placas utilizadas los datos se grabaron como: 1" 150# INOX 316 d = 0.735. Con esto, identificación: ninguna, material: acero inoxidable 316, régimen: 150 libras de presión, línea: tubería de 1", diámetro del orificio: 0.735".

El funcionamiento de las placas es muy simple: Al atravesar el fluido la placa, se presenta una diferencia de presiones en el flujo antes y después de la misma, por lo cual se instalan las tomas de presión diferencial en dichos lugares por la tubería. En el caso de la planta piloto, dichas tomas se conectan con las de un transmisor de presión "inteligente", y se programa a este dispositivo para que dé la lectura de acuerdo con las unidades de gasto en base a la ecuación de funcionamiento de la placa:

$$Q = \frac{K}{(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}} \sqrt{2g/\rho (\Delta p)}$$

donde K es el coeficiente de flujo, que depende del número de Reynolds y de la relación de diámetros, β es una constante propia de la placa, determinada por el diámetro interior D de la tubería y el diámetro d del orificio, por lo que $\beta = d/D$; g es la constante de gravedad, ρ es la densidad del fluido, y Δp es la presión diferencial; β en las placas de orificio de la planta piloto vale 0.735, de acuerdo a los datos D = 1" y d = 0.735", grabados en su lengüeta; en la práctica se recomienda que $0.25 < \beta < 0.90$, siendo dicha β adecuada.

Debido al desconocimiento de la constante K, se modificó la ecuación anterior como:

$$Q = \frac{K}{(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}} \sqrt{2g/\rho} \sqrt{\Delta p}$$

simplificando:

$$Q = K' \sqrt{\Delta p}; \quad K' = \frac{K}{(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}}} \sqrt{2g/\rho}$$

porque Q y ΔP pueden obtenerse experimentalmente con la planta funcionando, usando un rotámetro y un transmisor, asumiendo que sus calibraciones y lecturas son correctas.

En base a ellas se obtuvieron los siguientes datos de calibración (para ésto, la válvula de control FV-01 debe estar completamente abierta, y la válvula solenoide SV-01 debe estar cerrada): Q = 15.3 galones por minuto en el rotámetro FI-01 y $\Delta P = 94.6$ pulgadas de agua en el transmisor FT-01, el cual está conectado a una de las placas de orificio; con estos datos la constante $K' = Q/\sqrt{\Delta p} = 1.57078$. También se determinó experimentalmente que el mayor gasto en la planta era de 22.21 GPM abriendo por completo las válvulas FV-01 y SV-01. Como la planta piloto tiene 2 ramas, en cada una de ellas hay una placa de orificio con su correspondiente transmisor.

3.1.2 .- ROTÁMETRO.

Es un medidor de flujo o gasto del tipo de área variable. Consiste de un tubo de vidrio que posee una ligera conicidad, contiene un flotador de dimensiones específicas que se mueve libremente y obstrucciona el flujo; la entrada para éste es por el extremo superior del dispositivo, y de acuerdo a la conicidad del tubo, la sección de mayor área de la misma se localiza precisamente en la parte superior. Al cruzar el flujo al rotámetro, el flotador ocupa una posición vertical determinada por el equilibrio de fuerzas actuantes sobre él: su propio peso que es la fuerza descendente, se contrarresta por la fuerza de flotación que el fluido ejerce sobre su cuerpo sumergido, y por la fuerza de arrastre producida por el fluido a la velocidad para dicho flujo. Al aumentar la velocidad de flujo, el flotador es desplazado hacia la parte superior donde el área es mayor y el incremento de velocidad se traduce en cambio de posición del flotador, para la cual se alcanza otra vez el equilibrio de fuerzas, para esto se mantiene invariable la caída de presión puesto que el área de conducción del tubo es más grande. Para cualquier cambio en la velocidad de flujo el flotador baja o sube hasta equilibrarse y ocupar una posición, que corresponde a un valor determinado de la velocidad de flujo. Como la caída de presión es constante, el gasto es proporcional al área de conducción. El tubo del medidor tiene una escala lineal calibrada en unidades de flujo o gasto, por lo que

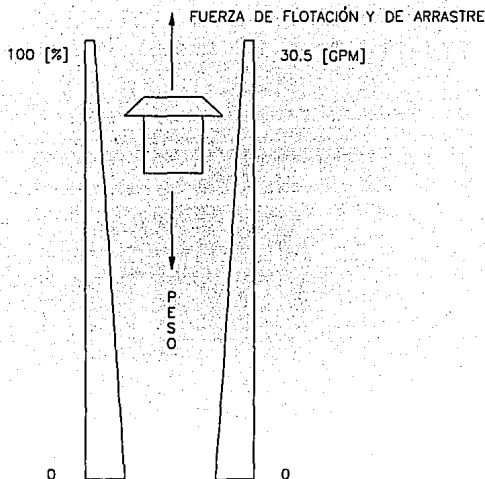


Fig. 10.- rotámetro.

simplemente la medición se obtiene por medio de la posición del flotador con respecto a la escala. La planta dispone de 2 rotámetros, uno antes de cada placa de orificio, con el objeto de verificar la correcta lectura del flujo, ambos están graduados en una escala de galones por minuto (0 a 30.5 GPM) y en otra que indica el porcentaje de flujo máximo (0 a 100 %). Típicamente la exactitud de los rotámetros es de 2% de la escala y con calibración especial se llega a 1%. Los rotámetros de la planta piloto son calibrados de fábrica al 1%. Con la leyenda "SPGR" se indica la gravedad específica del fluido donde se va a efectuar la medición; en el caso de los rotámetros utilizados dicha leyenda dice: SPGR 1.0, lo que indica que son para medir gasto en agua. La figura 10 muestra un esquema del rotámetro que permite ver la sencillez de su construcción, y las escalas antes mencionadas que manejan los de la planta.

3.1.3.- TRANSMISOR DE PRESIÓN INTELIGENTE LD301 DE SMAR.

Es un transmisor de 2 hilos diseñado para aplicaciones de control de procesos, genera una señal estándar de corriente de 4 a 20 mA proporcional o caracterizada a la presión diferencial que se le aplique. Dicha señal se transmite por un par de alambres torcidos a través de largas distancias, limitadas por la resistencia de los alambres y la carga del transmisor. Se proporciona también en el transmisor comunicación digital para calibración y monitoreo remotos, sobreponiendo la señal digital al mismo par de alambres que mandan la señal estándar de corriente. El LD301 utiliza como principio de medición la técnica de sensado por capacitancia, mejorada por electrónica basada en microprocesadores.

El transmisor consiste de 2 partes principales: una celda de variación de capacitancia (sensor) y el circuito electrónico.

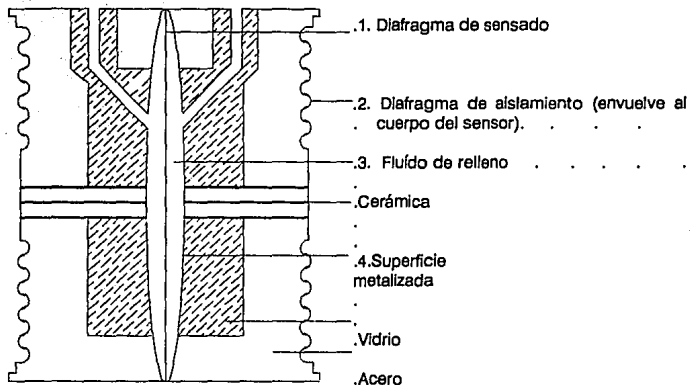


Fig. 11.- Sensor del LD301 (Celda de variación de capacitancia).

Sensor. Es mostrado en la figura 11; el diafragma de sensado (1) se localiza en el centro de la celda de capacitancia; éste se desvía por efecto de la diferencia entre las presiones aplicadas a los lados izquierdo y derecho del sensor; las presiones son directamente aplicadas a los diafragmas aislantes (2), que como su nombre indica proporcionan aislamiento y resistencia contra la corrosión por fluido de proceso; esto se aprecia con más detalle en la figura 12. La presión es transmitida al diafragma de sensado a través del fluido de relleno (3). El diafragma de sensado es también una placa - capacitor móvil, y las 2 superficies metalizadas (4) son placas fijas; con esto, la desviación del diafragma provoca una variación en las capacitancias entre las placas

fijas y la placa móvil antes mencionadas. En la figura 12 se tiene el esquema de funcionamiento del sensor, donde:

P1 y P2 son las presiones aplicadas y $P1 \geq P2$.

CH = Capacitancia (alta) entre la placa fija en el lado de P1 y el diafragma sensor.

CL = Capacitancia (baja) entre el plato fijo en el lado de P2 y el diafragma sensor.

d = Distancia entre las placas fijas de CH y CL, respectivamente.

Δd = Desviación del diafragma sensor debido a la presión diferencial $\Delta P = P1 - P2$.

Sabiendo que la capacitancia de un capacitor con placas planas paralelas puede ser expresada como una función del área de placa (A) y distancia (d) entre placas, se determina como:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

Donde ϵ = constante dieléctrica del medio entre las placas del capacitor.

CH y CL deben ser consideradas como capacitancias de placas paralelas y planas con áreas idénticas, entonces:

$$CH = \frac{\epsilon A}{\frac{d}{2} + \Delta d} \quad \text{y} \quad CL = \frac{\epsilon A}{\frac{d}{2} - \Delta d}$$

No obstante, la presión diferencial ΔP aplicada a la celda capacitiva no debe desviar el diafragma sensor más allá de $d/4$. Es posible asumir que ΔP es proporcional a Δd , esto es:

$$\Delta P \propto \Delta d$$

Desarrollando la expresión $(C_L - C_H)/(C_L + C_H)$ resulta que:

$$\frac{C_L - C_H}{C_L + C_H} = \frac{2\Delta d}{d}$$

Como la distancia d entre las placas fijas C_H y C_L es constante, la expresión $(C_L - C_H)/(C_L + C_H)$ es proporcional a Δd y, por lo tanto, a la presión diferencial medida.

Con esto se concluye que la celda capacitiva es un sensor de presión formada por 2 capacitores ("alto" y "bajo", en la figura 12) cuyas capacitancias varían de acuerdo con la presión diferencial aplicada.

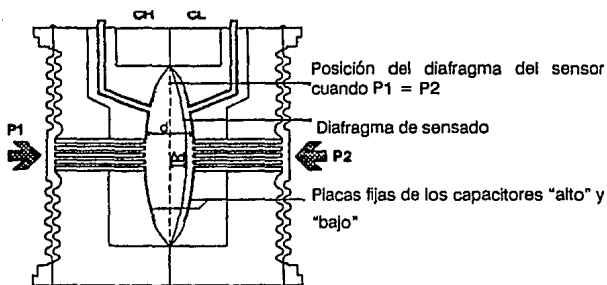


Fig. 12.- Esquema del funcionamiento del sensor.

Circuito electrónico. Mide la variación de la capacitancia entre las placas fijas y móviles del sensor y genera una señal de 4 a 20 mA que puede ser proporcional a la presión diferencial aplicada o caracterizada como una función especial a ella; la figura 13 muestra su diagrama de bloques. Sus partes son las siguientes:

Oscilador, que genera una frecuencia en función de la capacitancias del sensor.

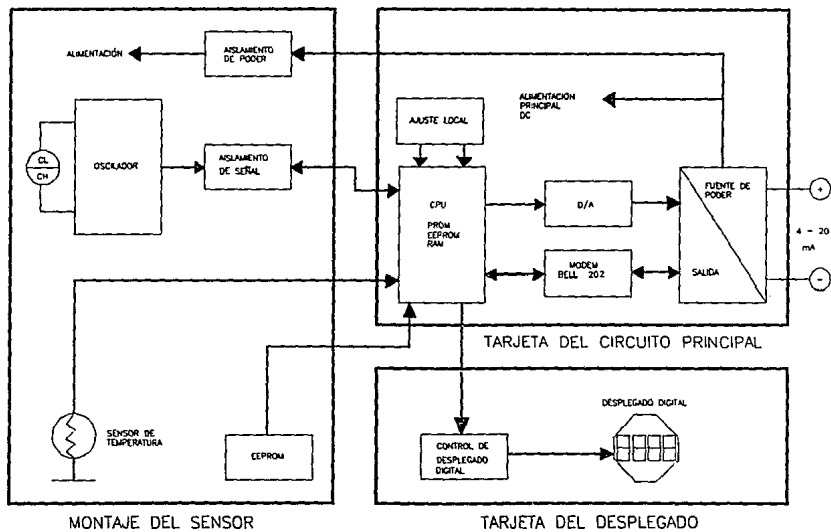


Fig. 13.- Diagrama de bloques del transmisor LD301.

Aislador de señal, aquí la señal del oscilador es transferida a través de un transformador y las señales de control del CPU se transfieren a través de optoacopladores.

CPU (unidad central de procesamiento, siglas en inglés), que es la parte inteligente del transmisor, responsable de la dirección y operación de los otros bloques del circuito, linealización y comunicación, su programa se almacena en una memoria PROM interna; para almacenamiento temporal de datos hay también una memoria RAM interna cuyos datos se borran si se quita la alimentación al transmisor. además de esto contiene otra memoria EEPROM no volátil donde los datos se pueden guardar al ser almacenados. Dichos datos pueden ser calibración, configuración o identificación.

Otra EEPROM se localiza dentro del montaje del sensor y contiene datos pertenecientes a las características de los sensores a diferentes presiones y temperaturas. Esto está dado por el fabricante para cada sensor.

Convertidor D/A (digital analógico), que convierte los datos del CPU a una señal analógica con 12 bits de resolución.

Salida, controla la corriente en la línea que alimenta a los transmisores; actúa como una carga resistiva variable cuyo valor depende de el voltaje del convertidor D/A.

Modem, que modula y demodula las señales de comunicación en la línea de corriente; un "1" se representa por 1200 Hz y un "0" se representa con 2200 Hz. La señal de frecuencia es simétrica y no afecta el nivel de la señal de 4-20 mA.

Fuente de poder, toma potencia de la línea de realimentación interna (ver el diagrama de bloques) para accionar la circuitería del transmisor, limitada la corriente a 3.9 mA. No debe confundirse con la alimentación DC principal para todo el dispositivo.

Aislamiento de poder, que aísla la alimentación a la sección de entrada, se logra convirtiendo la alimentación de DC principal en una fuente de AC de alta frecuencia y separándola con un transformador.

Control de desplegado, recibe datos del CPU para visualizar la información en el desplegado (display) de cristal líquido, comandando las señales de control de sus segmentos.

Ajuste local. Dos interruptores que son activados magnéticamente pueden ser activados por su herramienta magnética sin contacto mecánico o eléctrico.

Con los datos anteriores, se simplifica la comprensión del funcionamiento del transmisor. Después de que el sensor envía la información de la presión diferencial vía sus capacitancias, el oscilador manda una frecuencia como función de ellas, cuya señal

se envía por medio de un transformador en el aislador de señales al CPU. Este dispositivo procesa dicha señal mediante la información de la EEPROM externa y el algoritmo programado en el mismo CPU, de aquí la información ya digitalizada y procesada se manda a un convertidor D/A que la vuelve de nuevo analógica y finalmente se va al bloque de salida, bajo supervisión a todo el instrumento de los bloques correspondientes (aislamiento de poder, desplegado digital, modem, etc) que la convierte en la señal estándar de 4-20 mA utilizada en sistemas de control con la señal digital de comunicación montada en ella.

El sensor de temperatura es para compensar las variaciones de temperatura, con ayuda del CPU.

Software y descripción funcional. Su diagrama de bloques se muestra en las figuras 14a y 14b; se divide en las siguientes partes:

Caracterización de fábrica, que calcula la presión real de las capacitancias y las lecturas de temperatura obtenidas del sensor correspondiente, usando los datos de caracterización almacenados en la EEPROM del montaje del sensor mencionado anteriormente.

Filtro digital, que es del tipo paso-bajas, con constante de tiempo ajustable; se usa para alisar (damping) las señales con interferencia.

Caracterización del cliente, aquí los puntos de ajuste para caracterización (P1 y P5 en la figura 14a) se pueden usar para complementar la caracterización original de los transmisores.

Ajuste de presión, Los valores obtenidos por ajuste de presión a valor cero y ajuste de presión a valor superior se usan para corregir al transmisor por la desviación de período largo o el cambio de la lectura del valor cero o del valor superior debidos a la instalación o a una sobrepresión.

Escalamiento, para poner los valores de presión correspondientes a la salida de 4-20 mA en el modo de transmisor o la variable de proceso de 0 a 100 % en el modo de control PID. En el modo transmisor, el valor inferior es el punto que corresponde a 4 mA y el valor superior es el punto correspondiente a 20 mA; para control PID el inferior es 0% y el superior es 100%

Función, aquí dependiendo de la aplicación, la salida del transmisor tiene las siguientes características según la presión aplicada: lineal para presión absoluta, diferencial y medición de nivel, raíz cuadrada para medición de flujo con presión diferencial y raíz cuadrada de la tercera o quinta potencia para flujo en canales abiertos.

Linealización de cliente, relaciona la salida con la entrada según la una tabla de búsqueda de 2 a 16 puntos, la salida es calculada por la interpolación de tales puntos.

Los puntos se dan en la función de puntos de tabla (TABLE POINTS) en porciento de la escala (Xi) y en porciento de la salida (Yi); se usa esto para linealizar, por ejemplo, una medida de nivel o para corregir un número de Reynolds variable.

Punto de ajuste. Se ajusta en la función INDIC. y se puede activar el seguimiento del mismo con la función correspondiente en el transmisor (SP-TRACKING).

PID, esta función es para el transmisor trabajando como controlador. La acción directa o inversa se define en la función ACTION.

Auto/manual. En el modo manual la variable medida para la función como controlador se ajusta para la escala desde el límite bajo al alto en la función INDIC., aquí la opción de prendido (POWER-ON) se usa para determinar en qué modo el controlador se pone al prenderlo.

Límites, este bloque se asegura de que la variable medida no va más allá de los límites establecidos en las funciones nivel bajo y nivel alto, se asegura de que la razón de cambio en modo controlador no se exceda de un valor puesto en la función correspondiente (OUT-CHG/S).

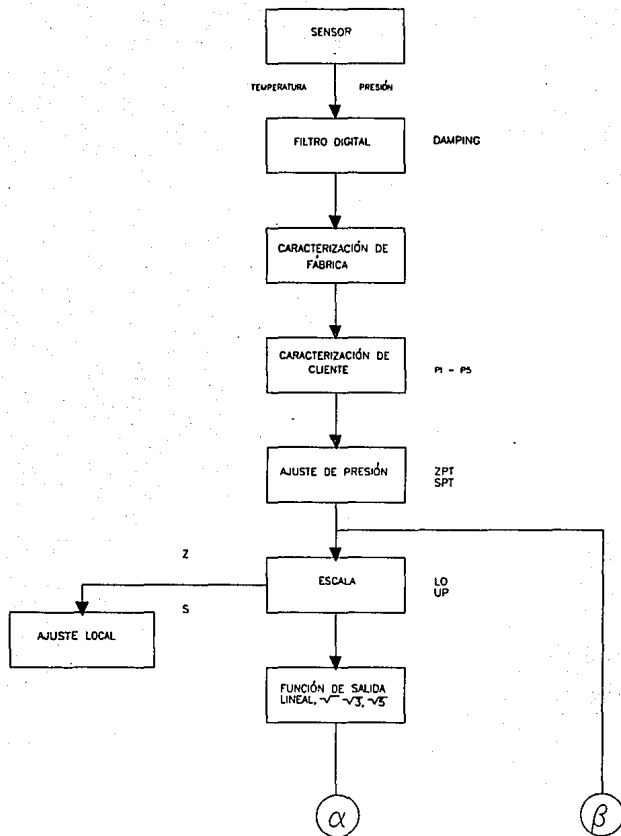


Fig. 14a .- Diagrama de bloques del árbol de software del transmisor LD301.

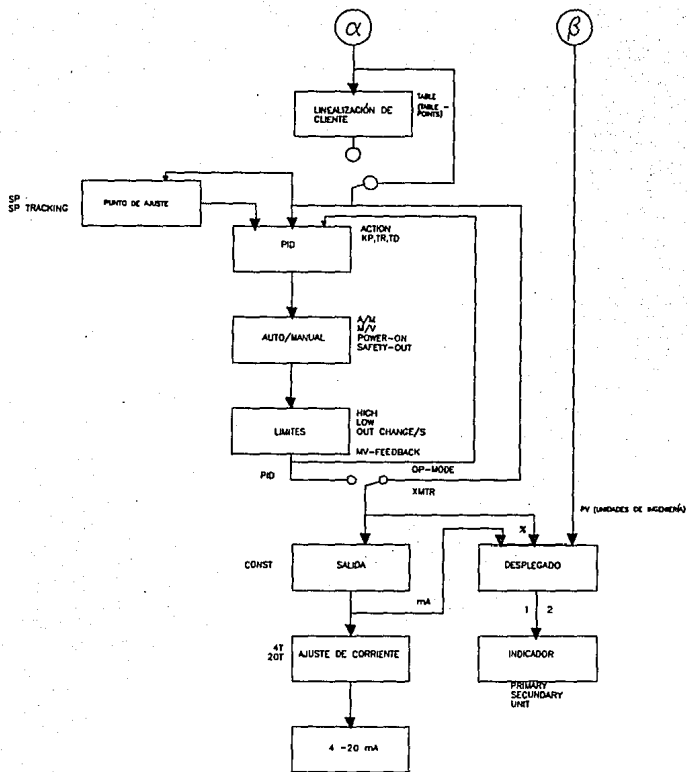


Fig. 14b.- Diagrama de bloques del árbol de software del transmisor LD301.

Salida, que calcula la corriente proporcional a la variable de proceso o variable manipulada a ser transmitida a la salida de 4-20 mA dependiendo de la configuración en la función modo de operación (OP-MODE); también involucra la función de corriente constante configurada en la función salida (OUTPUT).

Ajuste de corriente. El ajuste de 4 y el de 20 mA se usan para que la corriente de transmisor actúe de acuerdo con una corriente estándar.

Desplegado. Puede alternar arriba de 2 indicaciones como está configurado en la función correspondiente; las unidades para ingeniería para la variable de proceso se pueden seleccionar en la función UNIT.

Programación. Se realiza en la terminal de mano que es un accesorio adicional del transmisor, cuya carátula se muestra en la figura 15.

Este dispositivo tiene su propio software que consta de identificación de transmisor y datos de especificación, reescalamiento remoto sin usar una fuente de presión de referencia, funciones de salida para flujo (raíces cuadradas vistas anteriormente), función especial de salida según una curva configurable de 16 puntos, ajuste de corriente constante de 3.9 a 21 mA para pruebas de lazo, monitoreo de la presión en unidades de ingeniería, % y mA, monitoreo de controlador para punto de ajuste, variable de proceso, variable manipulada y estado automático/manual, ajuste de

parámetros de controlador, diagnóstico y determinación de fallas en el procesador (CPU) o en el transmisor. La terminal de mano se conecta en paralelo con las terminales de salida del transmisor funcionando, (+) con (+) y (-) con (-), estando el transmisor formando parte de un lazo de control. Sin embargo, para la calibración el transmisor debe ser conectado en serie con una fuente de 24 V D.C. y una resistencia de 250 Ω , misma que se requiere como carga mínima para el correcto funcionamiento de la terminal de mano, que se conecta en este caso también en paralelo con las terminales de salida del transmisor, (+) con (+) y (-) con (-).

La terminal jamás deberá conectarse en paralelo con ningún otro dispositivo, por ejemplo la fuente de 24 V D.C., puesto que no funcionará.

Antes de conectar la terminal, se debe verificar que su interfase de comunicación esté debidamente acoplado a ella, y que no esté baja su batería.

Las operaciones efectuadas en la terminal no interrumpen las mediciones del transmisor y la terminal puede ser conectada hasta a más de 2 km del transmisor; módulos opcionales de memoria permiten almacenar datos de varios transmisores.

Datapack es el módulo donde el software de configuración del transmisor para esta terminal está almacenada, está marcada con el nombre del transmisor y se inserta en la ranura B de la terminal (ver figura); en la ranura C se insertan otros módulos

datapack o rampack para almacenamiento u otro tipo de configuración, también se puede almacenar información en la memoria RAM de la terminal.

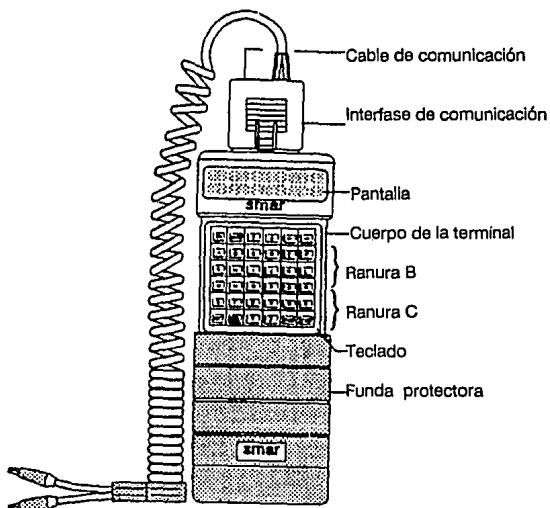


Fig. 15.- Carátula de la terminal de mano del transmisor LD301.

El teclado es muy sencillo. Cada tecla tiene doble función, los niveles de función están en y abajo de la misma tecla y son:

ON, que se usa para prender la terminal o para retornar al nivel anterior de decisión en el menú, para ésto el desplegado muestra el menú disponible. Las FLECHAS son para mover el cursor en el desplegado de la terminal. SHIFT se usa para acceder al nivel de función que se indica abajo de cada tecla apretándose la tecla y SHIFT simultáneamente. DEL es para borrar errores. SPACE es para espacios entre caracteres y finalmente EXE es para confirmar o ejecutar una acción y completar una entrada. Las demás teclas son alfanuméricas.

La figura 16 muestra el árbol de programación de la terminal, cuya estructura muestra 3 niveles (menús) principales de funciones, en el nivel principal más bajo del árbol cada bloque-función tiene sus propias subfunciones (submenús). La programación entonces comienza con el nivel-bloque más alto en el árbol, LD301; para ir a los otros niveles y funciones se utiliza la tecla EXE, que en la figura su flecha indica que se va de un nivel superior a uno inferior en el árbol; en cada nivel EXE sirve para seleccionar una función, y al llegar al nivel inferior del árbol, EXE también selecciona cada subfunción de cada función, que se desee. Para regresar a otro nivel superior o al inicio del árbol, se utiliza la tecla ON, que en la figura su flecha indica que se va de un nivel inferior a otro superior. Las 4 flechas simbolizan las direcciones en las que se mueve el cursor en pantalla para seleccionar una función.

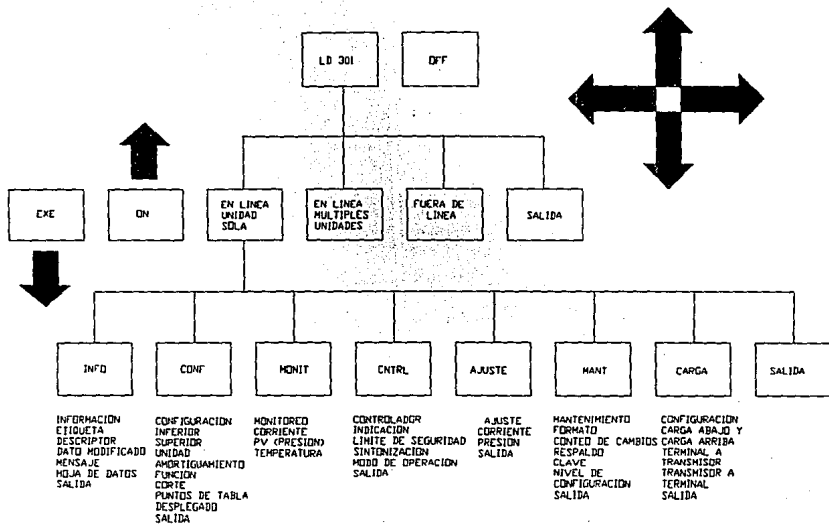


Fig. 16.- Árbol de programación del LD301.

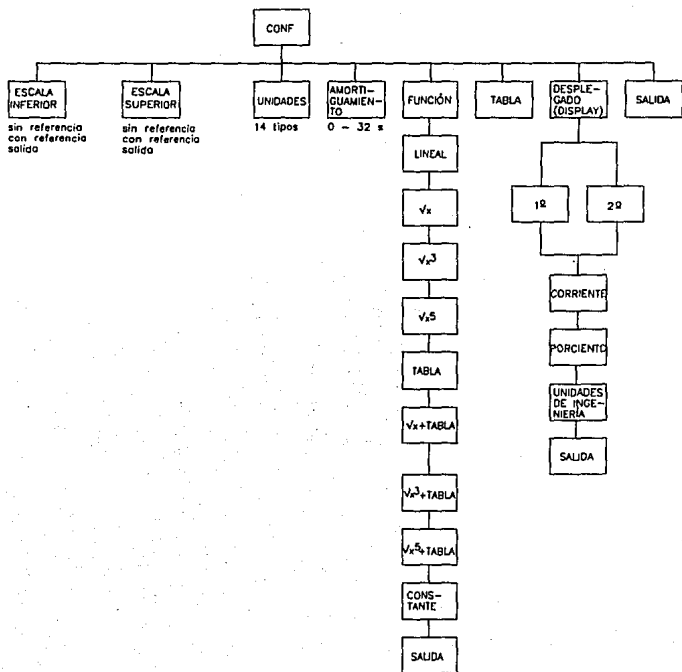


Fig. 17.- Árbol de configuración de LD301.

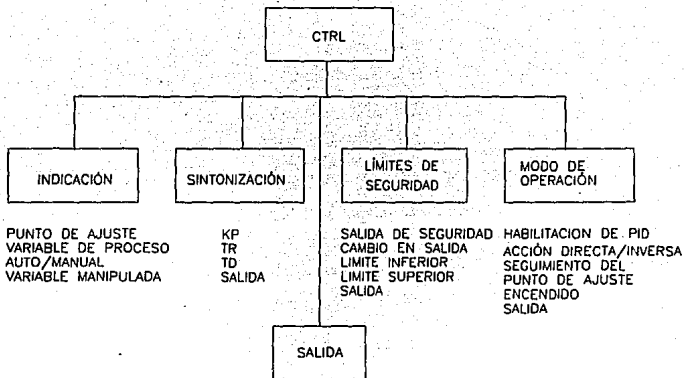


Fig. 18.- Árbol de control del LD301.

Las más importantes funciones del último nivel inferior son CONF (configuración) , cuyo árbol se muestra en la figura 17, y CNTRL (control) que tiene también su árbol correspondiente mostrado en la figura 18. Configuración define las escalas superior e inferior del rango de trabajo deseado para el transmisor con o sin referencia; posibilita escoger 14 tipos de unidades de lectura de presión: pulgadas de agua, pulgadas de mercurio, pies de agua, milímetros de agua, milímetros de mercurio, libras sobre pulgada cuadrada, bars, milibars, gramos sobre centímetro cuadrado, kilogramos sobre centímetro cuadrado, Pascales, kiloPascales, Torr (@ 0 grados Celsius), y atmósferas.

También se pueden seleccionar las funciones para lectura de presión y flujo con **FUNCIÓN**, y los puntos de tabla (16 pares) en la función **TABLA (TABLE)** mencionada anteriormente. Finalmente hay 2 subfunciones, una para manejo de amortiguamiento y otra para los desplegados (displays). Por otra parte es importante la función **AJUSTE (TRIM)**, que posibilita el ajuste tanto de presión como de corriente en el transmisor. La figura del árbol de configuración utiliza a las teclas de **CURSOR**, **ON** y **EXE**, de la misma forma que en el árbol de programación.

En la función **CNTRL** (control) se habilita el transmisor para que trabaje como un controlador electrónico, la importancia de **CNTRL** radica en la subfunción **MODO DE OPERACIÓN (OP MODE)** donde en su subfunción **ENCENDIDO (Power ON)** se puede cambiar de modo controlador a modo transmisor y viceversa.

Para trabajar con el dispositivo en el modo transmisor, se conecta la terminal de mano al transmisor como ya se indicó anteriormente, se activa y se hacen las siguientes operaciones en el teclado:

- La pantalla muestra las leyendas "LD301" y "Off". Por medio de las teclas **FLECHAS** se lleva al cursor abajo de "LD301" y se oprime la tecla **EXE**.
- Después de lo anterior, aparecen 3 leyendas en la pantalla, se pone el cursor abajo de la que dice "On line single unit" para indicar que se está trabajando con un solo transmisor, y se oprime **EXE**.

- Ahora en la pantalla aparece el menú con las funciones del transmisor; se pone el cursor abajo de la función CNTRL (CONTROL) y se oprime EXE.

-Hecho lo anterior aparece el submenú de la función CNTRL en la pantalla, y se pone el cursor abajo de la leyenda "Op mode", que precisamente es el modo de operación y se oprime EXE.

- La pantalla muestra 2 indicaciones, una de las cuales dice: "PID module is on" (módulo PID encendido) se pone el cursor bajo ella y se oprime EXE; la terminal pregunta entonces "PID is on, turn it off?" (PID encendido, se apaga?) y se le contesta que sí oprimiendo Y. Con ésto el dispositivo funciona como un transmisor de presión para los transmisores de flujo y el de nivel. Las demás subfunciones de CNTRL son para caracterizar al dispositivo como controlador, que es del tipo PID. Todo esto se ve en la figura 18, para el árbol de control; la función de las teclas ON, EXE y CURSOR son las mismas del árbol de programación.

Caben destacar algunas **funciones importantes** que utiliza el transmisor típicamente para su funcionamiento:

Reescalamiento: es cambiar los valores de presión relacionados con 4 mA y 20 mA. Hay 3 métodos para lograrlo: con referencia, sin referencia (utilizando para éstos la terminal de mano) y con los ajustes opcionales de cero y span localizados en el cuerpo del transmisor. De fábrica cada sensor de transmisor se caracteriza para una respectiva escala de presión y variación de temperatura, así como de datos almacenados en la EEPROM del sensor; la caracterización posibilita al circuito a correlacionar cada medida

de presión y temperatura de funcionamiento con la lectura de presión correspondiente; con esto el transmisor da la señal de 4-20 mA de acuerdo a la escala de presión.

Sin referencia: con la terminal de mano se escoge en el menú la función CONF, se oprime EXE y la pantalla muestra la escala con unos valores inferior y superior; se pone el cursor en el inferior (Lo), se oprime EXE y la pantalla indica "Lower Range adjust" (ajuste del valor inferior de la escala) y pregunta si se quiere cambiar, se le indica con el teclado que sí (Y) y la pantalla entonces muestra las opciones "Without reference" y "with reference" (sin referencia y con referencia) se escoge la opción de sin referencia, luego se oprime EXE y la pantalla muestra los límites mínimo y máximo de la escala, para luego preguntar por el valor inferior deseado para la misma. Se teclea el dato y se oprime EXE (si un valor elegido se pasa de cualquiera de los límites del transmisor para la escala la terminal indica un mensaje de alarma y el valor no es aceptado); después la pantalla vuelve a mostrar los valores de la escala con el valor inferior tecleado y un valor superior, ahora para meter el valor superior deseado, se pone el cursor en el valor superior mostrado (Up), se oprime EXE y la pantalla indica "Upper range adjust" (ajuste del valor superior de la escala) y pregunta si se quiere cambiar, se contesta que sí y a partir de ésto se repite el mismo procedimiento que se hizo con el valor inferior. Al terminar, la pantalla muestra la escala deseada. El transmisor genera la señal de 4 a 20 mA cuando la presión varía del valor inferior al valor superior de la misma.

Con referencia: se escoge la función CONF y se repiten los primeros pasos del caso anterior hasta llegar al Juste del valor inferior, se escoge la opción "con referencia" y se oprime EXE, para ésto se aplica una presión al transmisor (presión en línea) cuyo valor se le asigna al punto de 4 mA, ya que la pantalla indica que se haga y se esperen unos segundos para la estabilización; hecho esto la terminal pregunta si se pone la presión que se aplicó como el valor inferior y se le indica que sí (Y), luego la pantalla muestra de nuevo la escala con el valor inferior de presión que fué aplicado. Ahora para el valor superior de escala, se pone el cursor en (Up), y se oprime EXE; para meter dicho dato se hace exactamente lo mismo que se hizo para con el valor inferior, con la diferencia de que ahora se aplica al transmisor la presión deseada correspondiente al punto de 20 mA.

Usando los ajustes de cero y span: primero se habilitan los ajustes colocando la conexión movable (Jumper) localizada en la parte superior de la tarjeta electrónica del transmisor en la posición derecha (ya que dicha conexión está en la posición izquierda); para localizar los hoyos de los ajustes se desatornilla la placa de datos del transmisor, localizada en la parte superior, y se rota en sentido de las manecillas del reloj. Para ajustar el cero, se aplica al transmisor una presión con el valor inferior deseado para la escala; se espera la estabilización y se inserta una herramienta magnética (Incluída en el equipo) en el hoyo de ajuste de cero, se esperan 2 segundos, el transmisor debe de indicar 4 mA y se quita la herramienta. Para el ajuste del span se aplica la presión del valor superior deseado para la escala al transmisor, se espera la estabilización y se

inserta la herramienta magnética en el hoyo del span; se esperan 2 s para que el transmisor deba indicar 20 mA; finalmente se quita la herramienta.

Ajuste de presión. Se hace con la terminal de mano. Primero debe hacerse el ajuste de cero y luego el de presión superior. Este ajuste se utiliza para igualar la presión leída con la presión aplicada.

Ajuste de la presión a cero. Se selecciona la función TRIM y la opción "pressure", se iguala la presión en ambas tomas del transmisor y se espera la estabilización (con el objeto de tener presión diferencial cero) y se oprime EXE; la pantalla indica "zero press trim" (ajuste de presión cero) y también que se quite la presión del sensor (transmisor); se quita y la pantalla indica que se esperen 15 segundos, transcurrido este tiempo la pantalla indica una lectura de presión cero y pregunta si está correcta, si no es el caso se le tecléa a la terminal que no (N) y el circuito del transmisor internamente cambia a un valor entre cero y la lectura anteriormente indicada; se repite la misma pregunta y se hace la aproximación sucesiva hasta que la lectura llegue muy cerca de cero, entonces se responde al instrumento que sí.

Para más exactitud de la lectura digital se recomienda calibrar el ajuste de presión superior con el mismo valor superior de la escala. Se le aplica la presión con dicho valor; con las teclas del cursor y EXE se escoge la función TRIM, la opción "pressure" y en ella la opción "upper pressure" (presión superior); el transmisor da una lectura para

la presión superior y pregunta si es correcta, si no, se le indica que no y el instrumento pide el valor correcto de la presión indicada. El instrumento hace la misma pregunta y se le indica ahora que sí (Y).

En ambos casos, obviamente, hay otros instrumentos acoplados al transmisor indicando la lectura de las presiones que son aplicadas. Esto se aplica también para el reescalamiento con referencia y utilizando los ajustes de cero y span mencionados anteriormente.

Ajuste de corriente. Se conecta un amperímetro al transmisor, se escoge la función TRIM, luego se escoge "current" (corriente) y "4 mA"; la terminal indica que se conecte el amperímetro y pregunta si la lectura de éste es correcta, se contesta que no si es el caso, se oprime EXE y la terminal ahora pregunta el valor de la corriente medida; se teclea el dato y se oprime EXE. La terminal pregunta otra vez si la lectura del amperímetro es de 4 mA, y si no es el caso se repite el proceso hasta que dicha lectura sea correcta y entonces se le contesta que sí. Luego se escoge la opción de 20 mA y el proceso para este caso es el mismo.

Puntos de tabla. Aunque ya se comentó acerca de ellos, conviene profundizar un poco más; si la opción TABLE (tabla) se escoge en la terminal, la salida seguirá a una curva dada en la opción TABLE POINTS (puntos de tabla). En caso de desear tener los 4 a 20 mA proporcionales al volumen o masa de un fluido dentro de un tanque, se debe

transformar la medida de nivel en volumen (o en masa) usando la siguiente tabla de ligado para el tanque:

Nivel[%]	Volumen[%]
-10	-1.25
0	0
10	7.25
20	15.25
30	25.70
40	38.90
50	50
.	.
.	.
.	.
100	110
110	106

Tabla 1.- Equivalencias de los porcentajes de nivel con respecto a porcentajes de volumen para la función de puntos de tabla (TABLE POINTS).

Para ésto se debe seleccionar la opción "TABLE POINTS" y modificar los valores establecidos (por default) por los valores de la tabla de ligado convertidos en el porcentaje de la escala completa (arriba de 16 puntos). Es bueno practicar haciendo que la tabla se extienda más allá de la escala de operación normal.

Función: La opción FUNCTION (función) se usa para linealizar la presión medida a flujo o volumen. Las siguientes funciones son disponibles y posibilitan la combinación de \sqrt{x} , $\sqrt{x^3}$ o $\sqrt{x^5}$ y la tabla, por si se necesita.

Raíz cuadrada. En el menú de pantalla aparece como SQRT; si se considera la entrada de presión x variando entre 0 y 100 % del span, la salida de raíz cuadrada es $10\sqrt{x}$, esta función tiene un punto de corte ajustable; tras este punto la salida es lineal con la presión diferencial, el punto mínimo de corte es de 4% de span y el máximo es de 100%. Las otras funciones se definen así:

Raíz cuadrada de la tercera potencia (SQRT**3): su salida es $0.1\sqrt{x^3}$.

Raíz cuadrada de la quinta potencia(SQRT**5): su salida es $0.001\sqrt{x^5}$.

Tabla (TABLE): la salida sigue a una curva dada por 16 puntos, los cuales están en la opción TABLE POINTS. Las funciones antes mencionadas se pueden combinar con la tabla.

Constante (CONSTANT): Esta función genera una corriente constante entre 3.9 y 21 mA para la verificación de lazo en el funcionamiento de transmisor.

Lineal: es la función con la que trabajan normalmente los transmisores cuando miden presión.

3.1.4.- CONTROLADOR

Para una planta piloto de tipo industrial se requiere de elementos de control automáticos también de tipo industrial. El controlador industrial debe recibir una señal de proceso, que generalmente es de potencia baja, y debe amplificarla a un nivel lo suficientemente alto, para que la salida del mismo controlador active algún dispositivo de potencia, como por ejemplo un motor eléctrico o una válvula.

Los controladores industriales usan típicamente fluidos a presión (aire o aceite) o más comúnmente señales eléctricas como fuentes de potencia, por lo que dependiendo del tipo de energía utilizada para su funcionamiento, pueden ser electrónicos (de estado sólido), neumáticos o hidráulicos. Las características de la planta y condiciones de funcionamiento, seguridad, costos, etc. determinan el tipo de control que se debe utilizar. El control industrial es un módulo acoplable cuya estructura es muy sencilla, consta de un detector de error (comparador) y un amplificador para la señal de error; para éste el detector de error compara una entrada de referencia, que es el punto de ajuste o de regulación del controlador convertido a una señal manejable que puede ser eléctrica, un desplazamiento o una presión, con otra, que es la variable de salida del sistema controlado, que debe de pasar por un elemento de medición, que la convierte en otra variable o señal adecuada (señal de realimentación) para poder compararse con la referencia en el detector de error; para éste debe de ser del mismo tipo de la señal de referencia y poder compararse. La señal de error es amplificada y da lugar a la señal de control, que debe pasar por un dispositivo llamado actuador, que modifica la

entrada a la planta; el actuador también se puede llamar "elemento final de control", pero generalmente en sistemas de control más complejos, el actuador es el dispositivo que antecede al elemento final de control (ver figura 19).

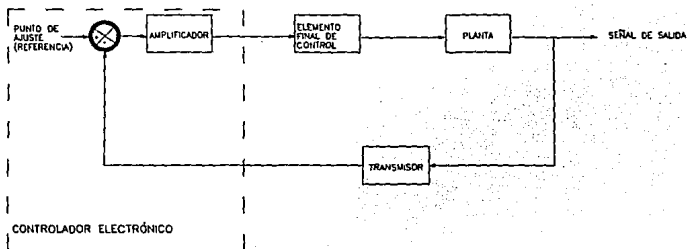


Fig. 19.- Diagrama de bloques simplificado de un sistema de control de un solo lazo.

El controlador más práctico que se utiliza en cualquier aplicación es el control proporcional integral derivativo (PID), ya que reúne las ventajas de de cada una de las 3 acciones de control.

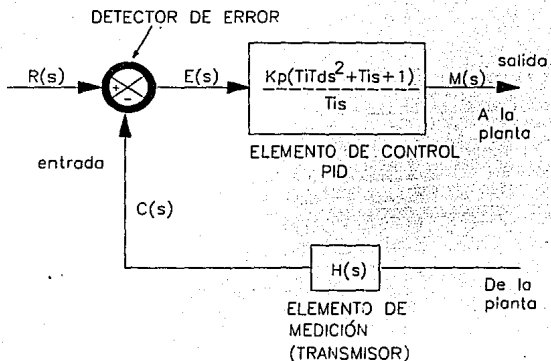


Fig. 20.- Diagrama de bloques del control automático P.I.D.

Su ecuación es:

$$m(t) = K_p \theta(t) + K_p T_d \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \theta(\tau) d\tau$$

Y la función de transferencia, aplicando a dicha ecuación la transformada de Laplace, es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Esta ecuación se muestra desarrollada en el bloque del elemento de control en la figura 20. En ella $R(s)$ es el punto de ajuste, $C(s)$ la variable controlada o de entrada, $M(s)$ la variable manipulada o salida del controlador y $E(s)$ la señal de error actuante.

En ambas ecuaciones, K_p es la sensibilidad proporcional o ganancia; el control proporcional solo es simplemente un amplificador. T_d es el tiempo derivativo, intervalo de tiempo en que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional; la acción de control derivativa se llama también control de velocidad, y es cuando el valor de la salida del control es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. Este tipo de acción tiene la característica de ser anticipadora a alguna que ya haya tenido lugar, de hecho el control derivativo es sólo efectivo durante períodos transitorios y su acción nunca se puede tener sola. Finalmente T_i es el tiempo integral, cuya inversa es la frecuencia de reposición, el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control, por eso dicha frecuencia se mide en repeticiones por minuto. En la acción de control integral, la salida del controlador varía proporcionalmente a la señal de error; K_p , T_d y T_i son regulables todas.

Si $e(t)$ es una rampa unitaria en el tiempo, la salida del control sería como en la siguiente figura:

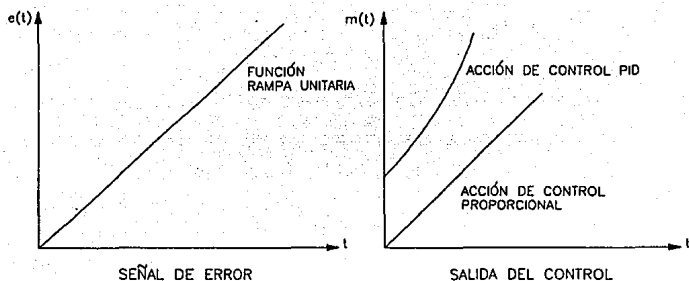


Fig. 21.- Salida del controlador P.I.D. en respuesta a una señal de error tipo rampa unitaria.

En la respuesta se ven las características de cada tipo de control juntas en una sola: la constante del proporcional, la anticipación del derivativo, y la pendiente del integral; con esto se observa que el control PID es el más rápido.

El elemento de medición afecta a la variable de salida debido a sus características estáticas y dinámicas; determina la función de transferencia del lazo de realimentación, por lo que es importante para el comportamiento total del sistema de control a implementar. Para que su función de transferencia se simplifique a una constante, sus constantes de tiempo deben de ser despreciablemente pequeñas en comparación con las demás del sistema de control, de lo contrario su función de transferencia y análisis se pueden volver más complejos. Para la planta piloto se eligieron controladores electrónicos de estado sólido como el el descrito a continuación.

3.1.5 .- CONTROLADOR DE TIPO AJUSTE DE CORRIENTE 420 C. A. T.

(Current-Adjusting Type) DE LEEDS AND NORTHRUP

El controlador del tipo de ajuste de corriente es un controlador de estado sólido de propósito general. Funciona de manera confiable en los sistemas de control donde la regulación final de la entrada de la planta es una función continua de nivel de corriente. Su señal de entrada normal es generada por un transmisor que sensa una variable controlada en la planta; su salida se utiliza para ajustar los elementos finales de control, que influyen en la planta a ser controlada; pueden ser convertidores electroneumáticos con válvulas posicionadas por aire, amplificadores magnéticos y reactores saturables así como paquetes de potencia de rectificadores controlados de silicio.

Este controlador está disponible con dos tipos de amplificadores; El controlador de proceso lento con 3 acciones de control diseñado para procesos estables con respuesta lenta, donde la acción de velocidad puede ser sumada a una acción de control de reestablecimiento - mas proporcional para compensar por algún retraso registrado en la planta, y el controlador para procesos rápidos, donde la respuesta es demasiado rápida para la acción de velocidad a ser usada y donde puede ser necesario un filtrado pasobajas para reducir la acción de control innecesaria debida a fluctuaciones en la señal de variable controlada.

Diagrama de bloques. Mostrado en la figura 22, comprende las siguientes partes:

-Transmisor, que es un elemento externo que convierte una señal de información para control de la planta (por ejemplo presión) a una señal eléctrica que pueda procesar el controlador y que se aplica a la entrada de éste. Este transmisor puede ser llamado también transductor.

-Circuito de punto de ajuste, para establecer un voltaje de referencia con el que se compara el voltaje proporcionado por el transmisor; cuando la variable controlada se desvía el punto de ajuste, se produce un voltaje (señal) de error.

-Ajustes del panel de control, para agregar funciones ajustables de ganancia proporcional, reestablecimiento y velocidad o retraso para los voltajes de realimentación y de error. El voltaje de realimentación se deriva de la corriente de salida del controlador.

-Amplificador comparador, que compara los voltajes modificados de error y realimentación, y suministra un voltaje de salida proporcional al voltaje diferencial.

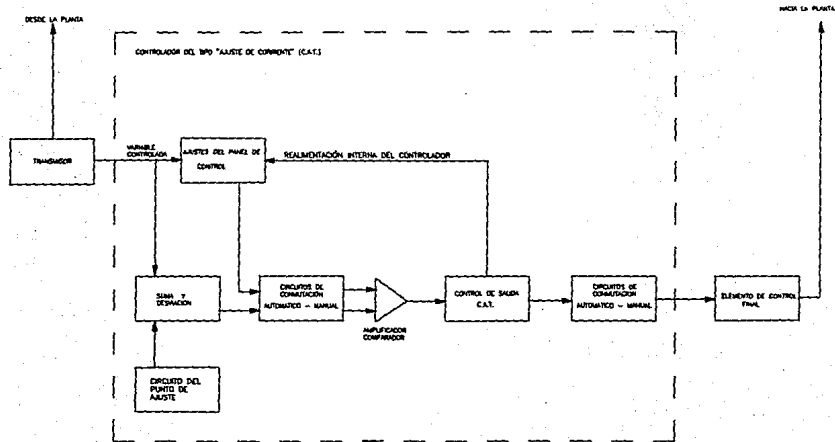


Fig. 22.- Diagrama de bloques del controlador 420 CAT

-Control de salida de tipo ajuste de corriente, para proporcionar y mantener una salida de corriente a un nivel de operación constante en la ausencia de voltaje proveniente del amplificador y para variar la corriente de salida según la polaridad y amplitud de la señal de salida del amplificador.

-Circuitos de conmutación automático-manual, que transfieren el sistema de control sin distorsión entre los modos automático y manual y permiten el ajuste manual de la posición del elemento de control final (externo) en el modo manual.

Funcionamiento: el controlador externamente consiste de un chasis y una caja montada en panel; el chasis puede tener dos posiciones en su caja: completamente metida en ella durante la operación normal o bien, parcialmente descubierto para mostrar los controles del panel de al lado. Asimismo, el chasis está conectado a las terminales externas de la caja por medio de un cable plano flexible.

El chasis tiene a su vez cuatro partes interconectadas:

- Panel frontal, (figura 23) que está restringido a la descripción de un controlador estándar con entrada para variable controlada negativa, la cual se conecta para acción de control estándar. Su medidor de desviación (arriba, en la figura 23) indica qué tan desviada está la variable controlada, del punto de ajuste. La desviación del medidor hacia la izquierda indica que el proceso está abajo del punto de

ajuste, mientras que la desviación del instrumento hacia la derecha indica que el proceso anda arriba del punto de ajuste.

El cuadrante calibrado abajo del medidor de desviación es la puesta de punto de ajuste; las líneas dibujadas desde el medidor de desviación hacia la periferia de la puesta de punto de ajuste son la referencia para leer el medidor de desviación en términos de $\pm 15\%$ de la escala de punto de ajuste.

El medidor de salida mide la corriente de salida del controlador, la cual también es la corriente de entrada del elemento final de control; finalmente, la escala de 1 a 100% (abajo del cuadrante) representa el rango de la salida de corriente del controlador.

Abajo de los indicadores antes mencionados, hay 3 botones de transferencia automática manual:

El auto-botón interruptor, que al ser oprimido (hasta que se atora y prende su luz) el sistema es transferido al modo de control automático, en este modo cuando la corriente de salida aumenta en respuesta a la disminución de la variable controlada, el medidor de salida se mueve hacia la derecha, y cuando la corriente de salida disminuye en respuesta al aumento de la variable controlada, el medidor de

salida se mueve entonces hacia la izquierda; este botón se utiliza para control en malla cerrada.

Los botones interruptores manuales, que al ser oprimidos, alguno de los dos, liberan al auto-botón interruptor y apagan su luz, transfiriendo con esto al sistema controlado al modo de control manual. Cuando el botón manual rojo se oprime, la corriente de salida aumenta; cuando el botón manual amarillo se oprime, la corriente de salida disminuye. Estos botones no tienen luz de indicación y sólo se deben apretar uno a la vez; dichos botones son para el control en malla abierta.

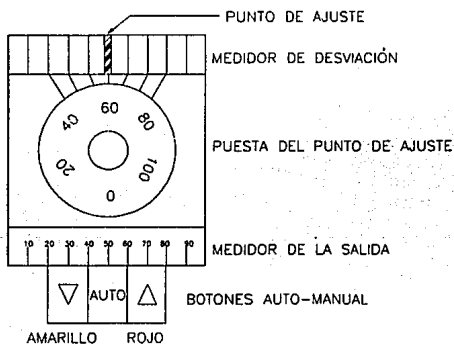


Fig. 23.- Panel frontal.

- Panel de control (figura 24), que comprende los ajustes del controlador en las perillas correspondientes; dichos ajustes son:

Acción proporcional, que mueve el elemento de control final en proporción al cambio en la variable controlada; la perilla de ganancia proporcional está calibrada en : el cambio en por ciento en la salida dividido entre el cambio en por ciento de la variable controlada (o en el punto de ajuste), donde el 100% de cambio de la salida comienza desde 0-4 mA ; esto corresponde, por ejemplo, a una apertura completa de una válvula neumática, y el 100% del cambio de variable controlada es la escala total para el transmisor. Poniendo una ganancia proporcional de 2, un 25% de cambio en la variable controlada causa un 50% de cambio en posición de una válvula.

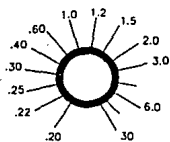
Acción de reestablecimiento, que es una acción integral que corrige la posición de los elementos finales de control (válvulas, por ejemplo) a una velocidad proporcional a la desviación de la variable controlada con respecto al punto de ajuste; para ésto la perilla de reestablecimiento ajusta la razón de velocidad de integración y desviación en términos de repeticiones por minuto; esta acción se detiene al estar el sistema en punto de ajuste.

Acción de velocidad, que proporciona movimiento de válvula relacionada con la velocidad de cambio de la variable controlada (de ahí su nombre), la cual ayuda o se opone a la acción proporcional según la dirección del cambio; el establecimiento de la perilla de velocidad determina la reducción de tiempo en minutos, requerido para alcanzar una salida dada con acción proporcional y de velocidad, comparado con el tiempo requerido con acción proporcional sola, cuando la señal de variable controlada

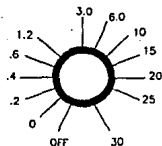
está cambiando a velocidad constante. La perilla de calibración es también la constante de tiempo RC en minutos del circuito de velocidad, multiplicado por la ganancia de velocidad.

Retraso, es un filtro ajustable paso bajas para la señal de error del controlador, la constante de tiempo RC del filtro se ajusta de 0 a 30 segundos. Al incrementar este retraso, más fluctuaciones son filtradas de la señal de error y tiempo de retraso más grande se introduce en los cambios de la señal, lo que tiende a degradar la acción de control, por lo que debe de ser usado sólo cuando una señal de variable controlada con ruido produzca excesivas fluctuaciones en la corriente de salida.

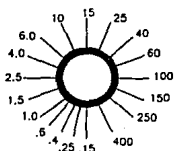
Acción de aproximación, usada en procesos complicados, para minimizar sobredisparos durante el encendido, cuando la variable controlada requiere de un tiempo considerable para alcanzar el punto de ajuste; sin esta acción, la unidad de manejo de válvulas de algún equipo podría no moverse de su posición completamente abierta hasta que la variable controlada haya alcanzado el punto de ajuste; con esto la inercia del proceso causaría que la variable controlada se incrementara abajo del punto de ajuste y se sobredisparara. La acción de proporción hace que la unidad correspondiente mueva la válvula hasta su posición de "cerrada" antes que la variable controlada alcance el punto de ajuste, por ejemplo, esta acción compensa a la variable controlada y al elemento final de control, respecto al punto de ajuste.



GANANCIA PROPORCIONAL



RETRASO EN SEGUNDOS



REESTABLECIMIENTO, REPETICIONES/MINUTO

Fig. 24.- Panel de control.

En su parte trasera, el controlador tiene una tablilla de terminales donde se manejan señales tanto de entrada como de salida, realimentación, blindaje y alimentación; la figura 25 contiene el diagrama de conexiones del mismo.

Dicha tablilla de terminales está a su vez conectada a una tarjeta interna llamada tarjeta de servicio, que determina modos de operación internos del controlador, moviéndole ciertos "puentes" (alambres de conexión).

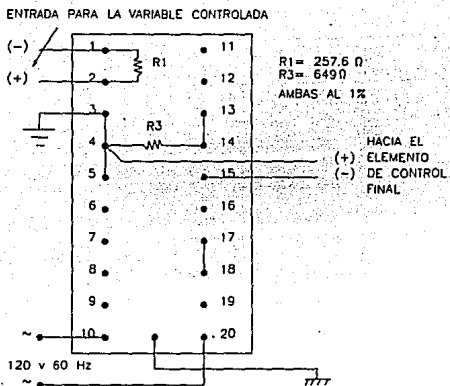


Fig. 25.- Conexiones típicas de la tablilla de terminales para acción de control estándar

Los números en la tablilla de terminales (figura 25) indican :

- 1 y 2 - Entrada para la variable controlada.
- 3 - Tierra del chasis.
- 4 - Común para la señal.
- 5 - Switch auto - manual remoto.
- 6 - Invertir entrada.
- 7 - No invertir la entrada.
- 8 - Salida.
- (6, 7 y 8 son conexiones del amplificador auxiliar interno).

9 - Sin conexión interna.

10 - Vivo de la alimentación.

11 - Señal del punto de ajuste

12 - + 16 Volts.

13 - (+) Salida del controlador.

14 - Realimentación.

15 - (-) Salida del controlador.

(4 (+) y 15 (-) constituyen la salida hacia el elemento final).

16 - Salida de señal de amplificador revertido.

17 - Señal al circuito de salida.

18 - Salida de señal de amplificador estándar.

19 - Sin conexión interna.

20 - Neutro de la alimentación.

(Entre las conexiones 10 y 20 existe la conexión para la tierra física de la caja).

Las terminales 2 y 4 están conectados entre sí internamente, por lo que el común de la señal debe ser puesto a tierra en un solo punto; Las conexiones mostradas son para señal negativa estándar, para este modo de operación, en la tarjeta de servicio los puentes deben de conectarse: A-C y D-F.

Los siguientes diagramas muestran el lazo típico de control usado en la industria; el primero es un diagrama muy simplificado, como se muestra en los manuales de

controladores, a manera de armado o implementación, y el segundo es el mismo diagrama pero más completo y formal, como aparece en los textos de teoría de control.

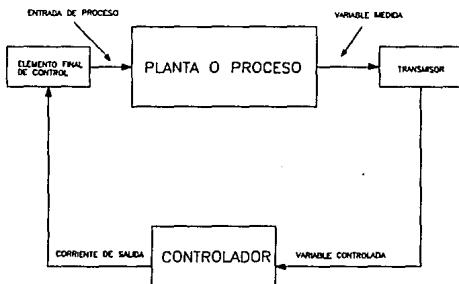


Fig. 26.- Diagrama de bloques simplificado del lazo de control del 420 CAT.

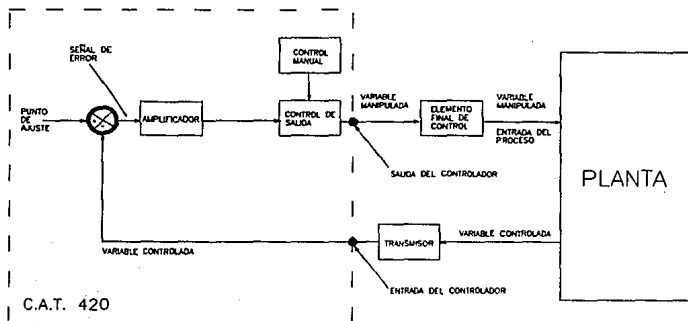


Fig. 27.- Diagrama de bloques completo del lazo de control del 420 CAT.

3.1.6.- INTERRUPTORES DE NIVEL

Los interruptores de nivel son unos electrodos que consisten en unas varillas metálicas, una larga y la otra corta, las cuales se conectan a un sistema de relevadores que son activados al tocar el agua (en este caso utilizada como fluido de trabajo) ambas varillas; el metal del cual están hechas está definido de acuerdo a la conductividad del fluido que se maneja y de acuerdo también a la corrosión provocada por éste. Como ya se mencionó en el tema 2, los interruptores dependen del nivel de agua en el tanque cerrado FA-02, por lo que las varillas se localizan precisamente dentro de él, como se ve en la figura 28, que muestra el esquema de ellos. Al estar el agua en el nivel inferior del tanque, sólo toca a la varilla larga (LS-01) y la bobina de los relevadores está sin energía; para esto, los relevadores están uno normalmente cerrado y 2 normalmente abiertos, uno de los abiertos se usa para el alambrado del mismo sistema de los interruptores, y los restantes para cualquier aplicación; por otra parte, la bobina de los relevadores es alimentada a través de un transformador; estos 2 dispositivos también forman parte del alambrado del sistema. El funcionamiento comienza cuando el agua llega al nivel superior por medio del bombeo de agua externa, en este caso del otro tanque, FA-01 y toca a la varilla corta (LS-02); por medio de la conductividad del agua se energiza la bobina y cambian de estado los relevadores, ahora uno abierto y los otros 2 cerrados. Para las aplicaciones se utilizan dos relevadores con diferentes estados entre sí. Al bajar el nivel de agua, por medio de bombeo para drenar al tanque FA-02, deja de haber contacto entre las varillas y por lo tanto se desenergiza la bobina, regresando los relevadores a su estado original. En el caso de la planta piloto, la

aplicación para los relevadores es el control On/Off, por lo que se dará una explicación más detallada en el tema 5 del funcionamiento de los interruptores de nivel (conjunto varillas - agua - relevadores) para ese caso en particular.

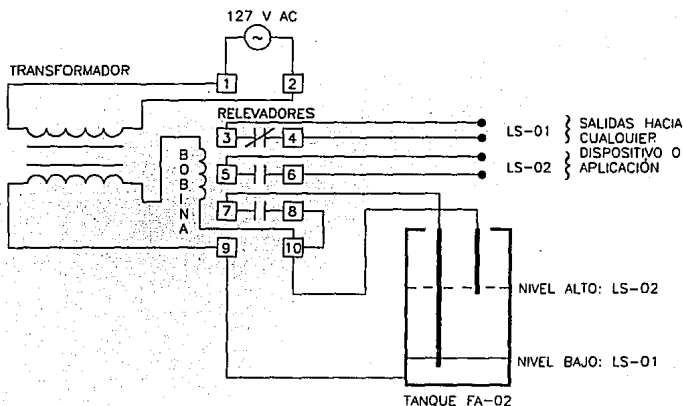


Fig. 28.- Esquema del sistema de los Interruptores de nivel.

3.2.- CALIBRACIÓN

A continuación se describe la calibración con respecto a la planta piloto de cada uno de los instrumentos mencionados anteriormente:

Rotámetros: la calibración fue hecha de fábrica con una exactitud de 1 %, por lo que no se hizo una calibración posterior.

Placas de orificio: la calibración de cada una con respecto a su parámetros mecánicos obviamente se hizo de fábrica; sin embargo se hizo una calibración posterior con respecto al transmisor que llevan conectado cada una para que diera la lectura de flujo a partir de la presión diferencial dada por ellas.

Transmisores “Inteligentes” de presión: al ser adquirida la planta, los transmisores ya venían calibrados de fabrica de acuerdo a los datos de ajuste de presión (con o sin referencia) mencionados anteriormente, que se encuentran en el manual del dispositivo. Se puede calibrar la presión con respecto a lo que se va a medir (flujo o nivel) y con respecto a los límites para la escala de presión. La calibración posterior que se hizo fue la adaptación de la función para medir flujo. Es importante recordar, que cuando se calibra el transmisor, éste debe de conectarse en serie con una resistencia de 250 Ω y una fuente de 24 V DC para una operación apropiada de la terminal de mano, cuyos conectores tipo caimán se conectan en paralelo con las terminales de salida del transmisor, (+) con (+) y (-) con (-) para ésta y cualquier situación en la que sea necesario conectar la terminal de mano.

Con la terminal de mano se escoge en el menú mostrado la función “ON LINE SINGLE UNIT” (en línea, unidad sola) se aplica EXE (ejecutar) y se muestra otro menú,

que es el de las funciones principales, se escoge "CONF" (configuración) se aplica EXE, y aparece otro menú más que muestra las subfunciones de configuración, ahora se escoge "FUNCTION", que define la función de salida de los transmisores; aplicando EXE se muestra su correspondiente menú donde se debe escoger SQRT (raíz cuadrada). Como ya se mencionó anteriormente, esta función convierte la presión diferencial medida (en este caso de las placas de orificio) Δp en una presión de salida igual a $10\sqrt{\Delta p}$; para ésto se ajusta en la misma función su punto de corte en 100% de la escala en el mismo menú de la función. El objetivo es aplicar la medición a la fórmula antes vista:

$$Q = K' \sqrt{\Delta p}$$

K' anteriormente se había definido de acuerdo a la lectura lineal de presión (lectura normal de transmisor) y la lectura de gasto del rotámetro. Ahora K' debe adaptarse a la función $\text{sqrt} = 10\sqrt{\Delta p}$:

$$Q = K'' 10\sqrt{\Delta p}$$

Haciendo otra medición experimental (otra vez con PV-01 completamente abierta y SV-01 cerrada), dado el desconocimiento del parámetro K en la ecuación original al describir la placa de orificio, se mide el gasto Q [GPM] en el rotámetro y la lectura de función raíz cuadrada en el transmisor FT-01, por lo que:

$$K = Q / 10\sqrt{\Delta p}$$

Con ello se determina la constante completa para adaptarla a la lectura directa de cada transmisor conectado a su respectiva placa de orificio. Sin embargo, no es posible programar la constante en la terminal para que los transmisores indiquen la misma medición directa de flujo que dan los rotámetros, pese a las características del software de las terminales de los transmisores, por lo que fué una deficiencia notable encontrada en su programación.

Los tubos de Bourdon fueron, igual que los rotámetros, calibrados de fábrica. No fueron descritos anteriormente, ya que tienen muy poca relevancia en el funcionamiento de la planta; su función es verificar la presencia de flujo midiendo la presión de descarga de las bombas.

Controladores: aunque pueden ser calibrados de fábrica, se hizo una calibración de la salida de corriente; de fábrica se ajusta de 21.6 mA para una carga de 500 ohms. Lo que se hizo es que diera la corriente máxima de 20 mA para dicha carga.

Para la calibración se debe de conectar a la salida del controlador encendido un amperímetro en serie con la carga (en este caso un potenciómetro metálico adaptado a

500 ohms medidos); para ésto no se debe de poner corriente o voltaje a la entrada del controlador. Después se rota un tornillo de ajuste, localizado en el centro de la perilla de ganancia proporcional en el panel de control, en sentido de las manecillas del reloj, hasta que tope; se oprime el botón rojo del panel frontal con el objeto de aumentar la corriente hasta que llegue a una corriente límite (que va más allá de los 20 mA) luego se rota el tornillo de ajuste en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que la corriente de la carga medida en el amperímetro descienda a menos de 20 mA. Se oprime otra vez el botón rojo y ahora la corriente aumenta hasta poco más de 20 mA; finalmente se aprieta el botón amarillo del panel frontal para reducir la corriente medida hasta los 20 mA. En la parte superior del controlador se debe localizar un trimpot de ajuste que se localiza en un hoyo solo; se debe de ajustar con un desatornillador de relojero hasta que en el medidor de salida se indique 100 para que dicha indicación concuerde con la corriente máxima de 20 mA ajustada.

Para checar el funcionamiento del controlador, se apaga después de lo anterior y luego se prende; con la carga de 500 ohms se utiliza entonces al controlador en manual como sigue: originalmente debe leerse cero en el medidor de salida, y al apretar el botón rojo debe aumentar la corriente hasta donde se desee o hasta 100 y no pasar de ahí. Al apretar el botón amarillo la corriente debe bajar, y si se desea, hasta cero.

Después de su calibración anterior, se conectó a la salida del controlador un convertidor corriente - presión de la planta y éste respondió con el controlador en

manual; Para la salida de corriente de 100 % o 20 mA, abrió el actuador normalmente cerrado conectado al convertidor escogido, y para la salida de 0% o 4 mA cerró. Se debe notar sin embargo, que durante la calibración del controlador debió estar como carga el convertidor corriente - presión, pero como puede dañarse si se le aplican más de 20 mA, se optó por la carga de 500 ohms, asumiéndola como una carga estándar indicada por el manual del controlador utilizado.

Interruptores de nivel: No necesitaron calibración ni prueba puesto que se puede determinar que están funcionando por medio de una lámpara piloto que poseen cada uno. No se mencionaron las lámparas piloto en la descripción correspondiente, puesto que es una función opcional dada por el fabricante. Aunque no existieran las lámparas, se podría medir el voltaje de la salida de cada interruptor, que puede ser de 24V DC o cero. La única aplicación de los interruptores es el sistema de control On/Off, cuya explicación se verá en el tema 5; en ese caso si hay prueba de los interruptores de nivel con respecto al funcionamiento de dicho sistema de control.

4.- ACTUADORES INSTALADOS EN LA PLANTA.

Los medios de actuación son los componentes del lazo de control que ejecutan las acciones correctivas mandadas por el controlador, son el actuador y el elemento final de control, que en algunos casos pueden ser lo mismo.

El actuador es el elemento del lazo de control que establece la actividad que el elemento final de control lleva a cabo sobre algún componente del proceso controlado. El actuador puede ser energizado externamente, o puede tomar la señal del controlador como fuente de energía; la señal de control puede ser hidráulica, neumática o eléctrica, siendo éstas son las más comunes en la industria; el tipo de señal depende de la tecnología del controlador. La selección del actuador depende, como se va a ver más adelante, de las características del elemento final de control, que en el caso de la planta son las válvulas utilizadas; también son importantes el tipo de controlador y el tipo de energía utilizados.

El elemento final de control es el dispositivo que al último actúa sobre un material o energía del proceso para corregir o mantener el valor de la variable controlada. En general el elemento final de control no es activado por la señal que viene del controlador, ya que ésta es de baja potencia, por lo que se usa el actuador como interfase entre el controlador y el elemento final de control. El actuador al recibir la señal de control establece, de acuerdo a ella, la actividad que el elemento final de control

efectúa sobre los componentes del proceso. Para el control de flujo, en ambas ramas de la planta piloto, el actuador se compone de 2 actuadores en cascada, que son: un convertidor corriente - presión y un actuador de diafragma; el elemento final de control es una válvula de globo acoplada al actuador de diafragma; de hecho puede considerarse al conjunto formado por esta válvula y al actuador de diafragma como el elemento final de control. El procedimiento de actuación es muy simple: la señal de corriente de la salida del controlador llega al convertidor para volverse señal de presión, que entra luego al actuador de diafragma y determina la apertura de la válvula.

La operación de los actuadores se mejora a través del dispositivo llamado posicionador o servomecanismo de posición, que asegura la posición establecida por el actuador, evitando errores de histéresis, fricciones o no linealidades del elemento final de control, un buen ejemplo es una válvula cualquiera. El posicionador posibilita una acción rápida y precisa, ya que reduce el tiempo de respuesta del actuador. Otra característica muy importante es que puede convertir la señal de control de eléctrica a neumática, por ejemplo, y puede amplificar la potencia aplicada al actuador. Para éste su funcionamiento consiste en recibir primero la señal de control y compararla contra la medida de la posición real en elemento final de control; en base a la comparación establece la potencia que debe aplicarse al actuador para asegurar que dicha posición sea la requerida por la señal de control. Se puede decir que el posicionador es un sistema sencillo de control para el actuador.

La planta dispone de los tipos de actuadores que se muestran en la figura 8: convertidores corriente-presión (FY-01 y FY-02), actuadores de diafragma (FV-01 y FV-02) y actuadores solenoides (S).

Los elementos finales de control (mostrados también en la figura 8) son: válvulas de globo conectadas a los actuadores de diafragma mencionados en el párrafo anterior, actuadores y válvulas solenoides (SV-01 y SV-02), y finalmente los motores de las bombas (BA-01 y BA-02).

4.1.- DESCRIPCIÓN Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Para esta parte se expondrán las características y funcionamiento de actuadores, válvulas, dispositivos solenoides y convertidores utilizados por la planta piloto.

4.1.1.- ACTUADOR DE DIAFRAGMA.

La figura 29 muestra un esquema sencillo de este dispositivo con sus partes que se mencionan adelante; se utiliza porque es el que más fácilmente se acopla a las válvulas de globo, utilizadas en la planta, además puede desarrollar fuerzas relativamente grandes, y lo mejor de todo es que puede usarse un controlador electrónico con él a través de un convertidor electroneumático, el cual también está disponible. El diafragma del actuador se fabrica de un material flexible que típicamente es neofreno reforzado con fibra de vidrio; se aloja en una caja sellada de aluminio o

acero inoxidable, que es dividida en 2 secciones por el diafragma. En una sección actúa el aire alimentado externamente, que es la señal de presión, y en la otra el resorte de oposición. La sección donde entra el aire puede ser la superior o la inferior y el resorte siempre está en la sección contraria. En el caso de la planta se dispone de las dos; para el actuador normalmente abierto el aire entra por arriba, y para el normalmente cerrado el aire entra por abajo. El término "normalmente" indica el estado del actuador ante la ausencia de señal de presión aplicada; "cerrado o abierto" se refiere al estado de la válvula acoplada al actuador.

De acuerdo a lo anterior, dependiendo de cual sea la sección donde entra la señal neumática, será la acción del actuador, ya sea directa o inversa; la acción directa ocurre cuando a mayor presión la válvula conectada cierra, en la inversa a mayor presión la válvula abre. La señal de control neumática (aire a presión) está típicamente en el rango de 3 a 15 psig y se introduce en la caja para que actúe sobre el diafragma generando una fuerza proporcional a la presión aplicada y al área efectiva del mismo. La fuerza, al ser transmitida al tapón de la válvula que tiene acoplada (a través del vástago), se equilibra con la fuerza que ejerce el resorte de oposición, también llamado rango; éste determina la posición de la válvula. El área efectiva de los diafragmas varía de acuerdo a la fuerza requerida para mover el tapón de la válvula; los valores van desde 50.0 a 283.0 pulgadas cuadradas. La fuerza máxima sobre el vástago va de 1500 a 12000 libras. El tamaño de las válvulas utilizadas para estos actuadores varía desde 1/4 hasta 10 pulgadas; los actuadores de mayor tamaño las utilizan de 12 o de 16 pulgadas.

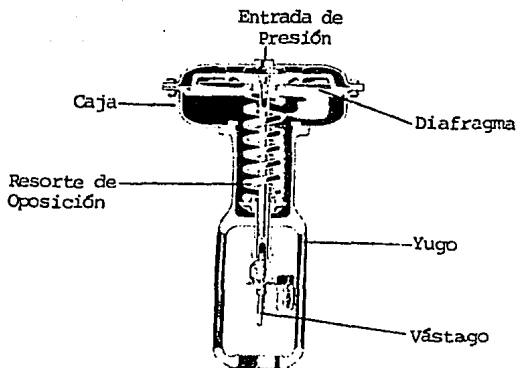


Fig. 29.- Actuador de diafragma.

La forma más completa de un actuador de diafragma, es el que dispone de un posicionador, la función de éste es asegurar la posición deseada del vástago. La señal de control llega antes a este dispositivo para compararse con la medida de la posición del vástago y producir la señal de presión que se aplica al diafragma del actuador. Los actuadores de la planta piloto no tienen dicho dispositivo, que es utilizado en procesos de control más exigentes.

4.1.2.- VÁLVULAS DE CONTROL.

La planta piloto utiliza válvulas de globo y válvulas solenoides. En la figura 30 se muestra un esquema con las partes principales de una válvula de control de tipo globo, utilizada en la planta. El funcionamiento comienza con el flujo que pasa por el cuerpo de la válvula circulando a través de una abertura variable que está formada por un elemento móvil llamado tapón y uno fijo llamado asiento; el tapón es posicionado por el actuador desde fuera de la válvula mediante el vástago, que está unido al tapón y sale de la válvula a través del bonete (ver figura). Algunas de las características más importantes de las válvulas de control de cualquier tipo son:

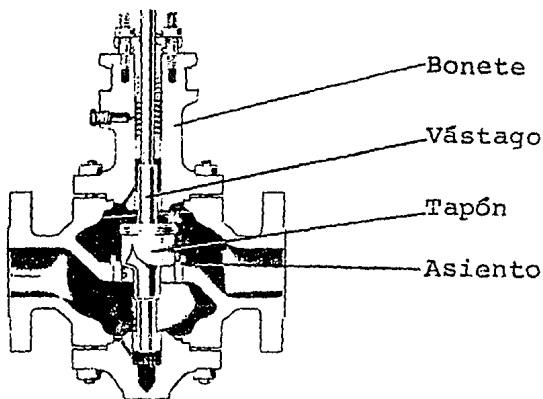


Fig. 30.- Válvula de globo.

-Las partes móviles internas disponen de guías rígidas alineadas con precisión, por lo que no existe movimiento ocioso.

- El vástago es capaz de operar en condiciones de alta presión y temperatura con el mínimo de fricción.

- Los interiores de las válvulas de control pueden soportar altas velocidades de fluido y turbulencias por largos períodos de tiempo.

Las características más usuales de las válvulas de control son:

Apertura rápida, que posibilita grandes flujos aunque el tapón se haya desplazado muy poco a partir de su posición de cierre; su relación es aproximadamente lineal hasta un 25% de apertura con una alta pendiente en su curva de transferencia, esto es lo que determina los flujos grandes para aperturas pequeñas; por ejemplo, para una apertura de 40% el flujo a través de la válvula alcanza el 70% de su máximo. Esta característica se emplea por lo general en sistemas de control ON-OFF.

Característica lineal, que establece una relación directamente proporcional entre el porcentaje de apertura y el flujo a través de la válvula.

Característica de igual porcentaje. En ésta la variación de flujo con respecto a una variación de apertura es proporcional al flujo que se conduce en el momento del cambio; para un flujo pequeño un incremento de apertura determina un incremento

pequeño de flujo, para un flujo grande con el mismo incremento de apertura, el incremento de flujo es grande. Con esto se concluye que para incrementos iguales de apertura hay cambios iguales en proporción al flujo.

Se debe seleccionar la válvula de acuerdo a las características anteriores y al sistema de control utilizado, para ésto se hacen las siguientes consideraciones:

La característica efectiva de la válvula debe ser tal que el lazo de control presente una misma estabilidad durante toda la carrera del vástago. El comportamiento de las características lineal y de igual porcentaje es muy similar para cambios de carga para la válvula de hasta 3 a 1. Casi toda válvula instaladas en líneas de descarga de bombas o en serie con otros equipos tienen una característica instalada que difiere de la inherente; para este caso la válvula de igual porcentaje tiende a ser lineal y la lineal tiende a ser de apertura rápida; con estos datos, la de igual porcentaje en tal caso es la que se debe seleccionar. Para los sistemas de control sencillos que permiten usar altas ganancias en el controlador, la característica de la válvula no se toma en cuenta. La característica de igual porcentaje es la más utilizada; la lineal se emplea si las variaciones de la caída de presión son pequeñas, aunque la selección de tamaño es difícil. La característica de apertura rápida, como ya se mencionó, se usa generalmente en sistemas de control de 2 posiciones.

El tipo de válvula que se debe emplear está determinado por las condiciones de servicio y de aplicación; para los sistemas de control, las recomendaciones, que aunque son superficiales son las siguientes, tomando en cuenta que que la característica óptima es determinada por el análisis dinámico y completo del proceso:

Para control ON-OFF la característica recomendada es la apertura rápida, y para los sistemas de control proporcional las recomendadas son la lineal y la de igual porcentaje, dependiendo la selección de las características del proceso. Para los sistemas de control de nivel se puede utilizar la lineal a menos que la caída de presión decrezca hasta 20% de caída máxima, si éste es el caso, se utiliza la de igual porcentaje. Para sistemas de flujo, si el rango de operación es muy amplio, se recomienda usar la lineal; si el rango es pequeño, pero con aumentos de en la caída de presión al disminuir la carga, se recomienda la de igual porcentaje.

Las válvulas de control se clasifican en 4 tipos que son: tipo globo, tipo mariposa, tipo bola y de diafragma. En este trabajo se describirán las de tipo globo, que son las que utiliza la planta.

Las válvulas tipo globo se llaman así debido a la forma de su cuerpo; son de vástago deslizante y configuración que puede ser en línea o en ángulo. Este tipo de válvulas se constituyen fundamentalmente por el cuerpo, que da cabida al fluido y soporte al asiento , y por un tapón de movimiento longitudinal que limita al flujo al

cerrarse sobre el asiento; la pareja asiento - tapón es conocida como puerto. Las válvulas pueden ser de puerto sencillo o de doble puerto; las válvulas de la planta son de puerto sencillo como puede verse en la figura 30. Este tipo de válvulas se emplean cuando es necesario un cierre hermético, pero por haber desbalance de fuerzas sobre el tapón, requieren de un actuador poderoso; por esta razón se eligieron actuadores de diafragma para este tipo de válvulas en la planta. En cuanto a las características de válvulas anteriormente mencionadas, la forma del tapón determina la característica; viendo el tapón en la figura 30 se puede ver su forma, que corresponde a la característica lineal; para las otras, la forma del tapón es completamente diferente.

Respecto al tamaño las hay desde 1/2" hasta 8", bridadas o roscadas; la planta utiliza éstas últimas. La instalación puede ser roscada desde 1/4" hasta 2" NPT bridada y soldable, dependiendo de las especificaciones de tubería; en el caso de la planta son roscadas, para tubería de 1". Las válvulas de globo son las que más se utilizan, y se emplean para manejar fluidos limpios como gas, vapor o agua; el fabricante de la planta tomó en cuenta tanto el uso de agua en la planta como las características recomendadas para todos los sistemas de control que se van a exponer en este trabajo, y se eligió la válvula de globo debido a su flexibilidad y a su característica lineal.

4.1.3.- ACTUADORES Y VÁLVULAS SOLENOIDES.

La válvula - actuador solenoide consiste básicamente de un electromagneto y un inducido móvil (núcleo de hierro dulce), que es mecánicamente acoplado al

dispositivo que se va a posicionar, generalmente un vástago de válvula, palanca o válvula piloto. Los dispositivos solenoides generalmente proporcionan sólo operación en 2 posiciones, pero los dispositivos solenoides modulados están disponibles para servicio de regulación. El funcionamiento del dispositivo solenoide más sencillo comienza cuando el electromagneto es energizado y jala al núcleo de hierro dulce; esta acción abre una válvula normalmente cerrada y cierra una válvula normalmente abierta. Dichas válvulas son usadas ampliamente en la industria para servicios de corte de emergencia y como válvulas piloto en sistemas de control. Muchas válvulas solenoides son del tipo desempaqueado, con la porción del actuador integrado al cuerpo de la válvula; cuerpos de válvula de 3 o 4 vías son a menudo usadas con actuadores solenoides para agregar más versatilidad al sistema de control. En el caso de la planta hay 2 actuadores - válvulas solenoides, que además utilizan aire comprimido para funcionar; en ellas el tapón de la válvula está en posición perpendicular a la tubería, para el estado de válvula normalmente cerrada, por lo que debe ponerse en posición paralela para la apertura; en la botonera de la planta, para cada actuador - válvula hay 2 botones, uno para alinear y otro para bloquear. De acuerdo a lo anterior, se necesita 1 magneto que abre una pequeña válvula normalmente cerrada para que el aire comprimido o señal neumática actúe sobre el vástago del tapón de la válvula solenoide para alinearla y efectuar la apertura; por otra parte se necesita un resorte para regresarla a su posición original, que es la de bloqueo; para ésto, mientras actúan el magneto junto con el aire comprimido, el resorte ofrece resistencia, pero hay un equilibrio entre sus fuerzas durante la apertura. Al desactivar el magneto, se corta el

suministro de aire comprimido y sólo queda la fuerza del resorte, la cual regresa rápidamente al tapón de la válvula a la posición original y se expulsa el aire residual en ella por medio de una pequeña válvula de desfogue; por esta razón, se oye un golpe en el momento del cierre o bloqueo. La figura 31 es el esquema del actuador - válvula descrito, con la válvula de aire (suministro para funcionamiento) y la válvula para el flujo de agua; el conjunto se muestra en la posición de bloqueo, con la posición de "alinear" del tapón de la válvula de flujo, indicada en línea punteada.

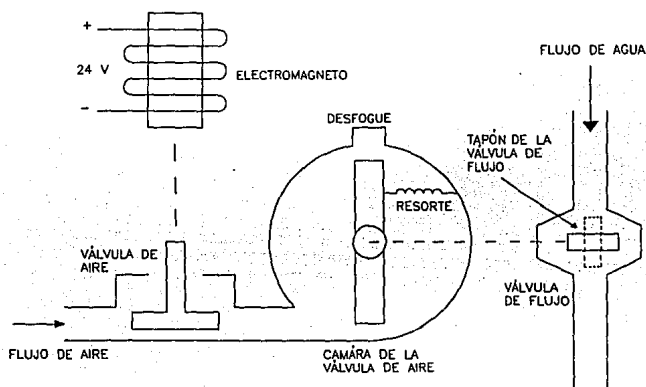


Fig. 31.- Esquema del tipo de válvula solenoide utilizada en la planta.

4.1.4.- CONVERTIDOR CORRIENTE - PRESIÓN.

Como ya se dijo anteriormente, este dispositivo sirve de interfase entre el controlador electrónico, que maneja a la salida una señal eléctrica de corriente, y el actuador de diafragma, que usa en su entrada una señal neumática. Maneja de 4 a 20 mA en corriente, y de 3 a 15 psi en presión, por lo que está dentro de los estándares de control. Cabe aclarar que otros controladores dan a la salida una señal de voltaje, y para éstos existen convertidores voltaje-presión. En la figura 32 se muestra el esquema del convertidor corriente-presión de tipo comercial, en él se puede observar la barra de balance soportada cerca de su centro por el pivote de resortes cruzados; en uno de los extremos de la barra se localiza la bobina de operación, la cual está suspendida en el campo del magneto permanente. La corriente de salida del controlador llega al convertidor a través de la bobina y causa una fuerza que tiende a girar la barra sobre el pivote en el sentido de las manecillas del reloj; a esta fuerza se opone otra, que es la ejercida por la salida de presión del convertidor a través del fuelle de realimentación; dicha fuerza trata de girar la barra en sentido opuesto a las manecillas del reloj. Por otra parte hay una tercera fuerza ejercida a su vez por un resorte ajustable (no mostrado en la figura 32), fuerza que puede estar en el sentido de las manecillas del reloj o en contra, y permite el ajuste de cero. Cuando estas tres fuerzas rotacionales están en equilibrio, no hay giro de la barra de balance; el convertidor alcanza esta condición automáticamente, manteniéndose la presión de salida (indicada en la figura 32 por un asterisco) en una relación fija con respecto a la entrada de corriente. Para detectar y corregir cualquier posible desbalance, la alimentación de aire a 20 psi llega a través de

una restricción, pasando por una tobera, la cual tiene una apertura mucho mayor que la apertura de la restricción. La parte final de la barra sirve como deflector para controlar el flujo de aire de la tobera, si el deflector se acerca a la tobera se reduce el flujo de aire y se incrementa la presión; si el deflector se aleja de la tobera, la presión baja. Si por ejemplo la presión en el fuelle de realimentación es demasiado baja, la barra gira en el sentido de las manecillas del reloj y se incrementa la presión en la tobera; en la misma figura también se puede ver que esta presión se aplica en el diafragma superior del dispositivo; ambos diafragmas están acoplados mecánicamente y son controlados por un par de válvulas de bola, indicadas en la figura como "Válvulas". Los incrementos de la presión provocan que ambos diafragmas se deflecten hacia abajo y abran la válvula de bola inferior, con esto se incrementa la salida y la presión de realimentación hasta que se equilibra el sistema. El área del diafragma superior es el doble del área del inferior, ya que en el equilibrio la presión de salida es dos veces mayor que la presión de la tobera; con esto, los diafragmas y la válvula de bola trabajan como un amplificador neumático. La alta capacidad de la válvula de bola permite cambios rápidos en la presión de salida; si ésta es demasiado alta en relación con la entrada de corriente, la barra se aleja de la tobera, decreciendo su presión y deflectando los diafragmas hacia arriba, esto abre la válvula de bola superior y se elimina el aire en exceso hacia la atmósfera, decrecentándose la salida de presión y lográndose otra vez el equilibrio. Se puede tener acción inversa en este tipo de convertidores; esto quiere decir que la presión de salida disminuya a incrementos de corriente de entrada. El dispositivo hace esto si se ajusta el resorte de cero para tener máxima salida a mínima

corriente de entrada, y si se invierte el sentido de la corriente en la bobina de entrada, invirtiendo también el sentido de la fuerza magnetomotriz, de acuerdo a la suma o resta de los campos de la bobina y del magneto permanente.

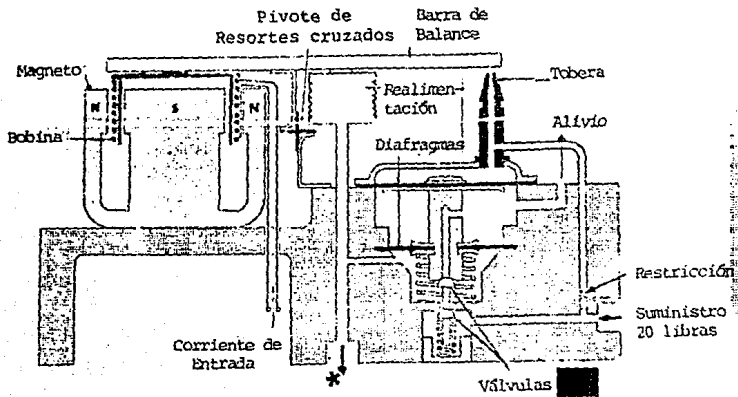


Fig. 32. - Esquema del convertidor corriente - presión (convertidor (P)).

4.2 .- APLICACIÓN Y OPERACIÓN DE LOS ACTUADORES.

En el caso de la planta piloto hay dos actuadores de diafragma, uno con acción inversa y otro con acción directa, acoplados a sus correspondientes convertidores.

Respecto a la calibración, dichos convertidores fueron calibrados por el fabricante de la planta de acuerdo a las características de los actuadores a los cuales fueron acoplados; la única calibración extra que se hizo fue de los controladores, para que dieran la corriente correcta de 4 a 20 mA requerida por los convertidores; de acuerdo a sus datos de placa, una corriente arriba de 20 mA puede dañarlos; con esto la corriente que entra a ellos debe ser cuidadosamente calibrada. Tanto los actuadores de diafragma como las válvulas de control acopladas a ellos, fueron calibrados de fábrica, por lo que no se hizo ninguna calibración extra para ellos.

Después de confirmar la calibración de todos los dispositivos antes mencionados, se comenzó con la primera prueba preliminar referente a los actuadores, con un sencillo sistema de control a malla abierta de flujo en la planta piloto; para esto se utilizaron los transmisores de presión FT-01 y FT-02 que miden el gasto o flujo Q, a través de las 2 placas de orificio en ambas ramas de la misma. Como actuadores se utilizaron las válvulas de control (con sus respectivos actuadores de diafragma) FV-01 y FV-02 con sus convertidores corriente-presión PY-01 y PY-02; estos dispositivos modifican el flujo en la planta dependiendo de la apertura de las válvulas. Finalmente se utilizó un controlador electrónico 420 CAT para completar el sistema. Las consideraciones de

funcionamiento de los dispositivos fueron las siguientes: la válvula FV-01 cierra sin alimentación de aire y/o corriente (normalmente cerrada); FV-02 abre sin alimentación de aire y/o corriente (normalmente abierta). En FV-01 su apertura de acuerdo a su convertidor de corriente- presión FY-01 es:

4 mA a 3 psig : cerrada (0% de apertura)

8 mA a 6 psig : 25 % de apertura

12 mA a 9 psig : 50 % de apertura

20 mA a 15 psig: 100% de apertura.

De lo anterior se concluye que a 4 mA (3 psig) es completamente cerrada y a 20 mA (15 psig) es completamente abierta; lo que quiere decir que el actuador de esta válvula tiene acción inversa. Para FV-02 es al contrario: a 4 mA (3 psig) es completamente abierta y a 20 mA (15 psig) es completamente cerrada; por lo tanto, la acción de su actuador es directa.

Antes de poner el sistema de control se probaron los actuadores para variar el gasto manualmente; como fuente de corriente para los convertidores se utilizó un calibrador, el cual posee 4 memorias de corriente en las cuales se programaron las corrientes de 4, 8, 12 y 20 mA, de manera que al apretar su tecla correspondiente a cada una, eran obtenidas. Fue necesario cargar el calibrador con su fuente especial unos minutos y luego ponerlo a trabajar, definiendo con las teclas correspondientes

cada corriente deseada con una función de incremento - decremento para luego almacenar una corriente en cada memoria. Previamente, se alimentaron de aire ambas válvulas de control y se activaron los transmisores configurándolos con su terminal de mano en el modo de transmisor para que indicaran tanto el flujo como la variación de corriente en ellos; la figura 33 muestra la implementación de dicha prueba. En ella, el transmisor se representa como una fuente de corriente y el sentido de ésta debe de ser el indicado; la polaridad de la resistencia es sólo una referencia para guiarse en la botonera-tablero de la planta al alambrear. Es importante señalar que la última conexión a ser alambreada de cualquier circuito de la planta es el del polo positivo de la fuente de voltaje de 24 V (encerrado en la figura), para evitar daños a los transmisores y demás equipo; por la misma razón es la primera conexión que se desconecta. Al aplicar una por una las corrientes programadas en el calibrador a los convertidores, se podía ver cómo variaba la apertura de las válvulas y cómo los transmisores en sus desplegados (displays), indicaban la variación de flujo y corriente; para comprobar que sus lecturas de corriente eran correctas se conectó un amperímetro al transmisor, mostrado también en la figura 33, el cual indicó efectivamente las mismas lecturas de corriente que el transmisor.

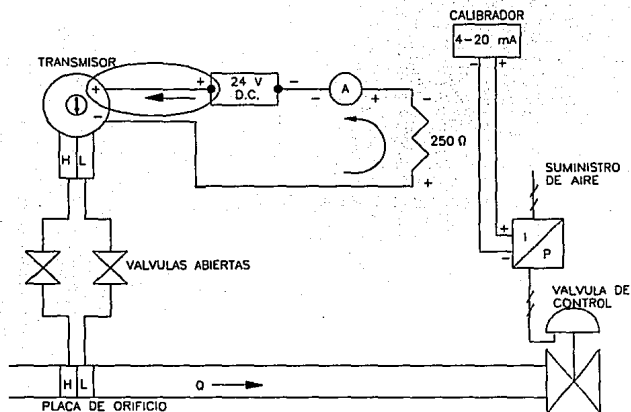


Fig. 33.- Prueba de los convertidores, actuadores y válvulas FY-01, FY-02, FV-01 y FV-02.

Después de la prueba anterior se conectó el controlador electrónico, con el objetivo de controlar el flujo en una rama de la planta, tal y como se muestra en la figura 34, que indica las polaridades y sentidos de corriente (I) adecuadas para su funcionamiento. En este caso se utilizó la rama de la planta donde recircula el agua del tanque abierto, la cual tiene su transmisor y actuador; dicha rama fue aislada del resto de la planta con las válvulas correspondientes. Primero se puso a funcionar al controlador en modo manual (malla abierta) oprimiendo sus teclas de incremento-decremento de corriente de salida; se podía ver en su medidor de salida el aumento y disminución de la corriente de la salida que llegaba al convertidor y cómo

movía la válvula (actuador), indicándose flujo y corriente variables en el transmisor; después de esto, se procedió a dejar una sola salida de corriente con la teclas de manual, y se dejó a la planta trabajar en malla abierta unos minutos; para ello se fijó un punto de ajuste arbitrario con el dial del controlador, y se visualizó en su medidor de desviación. Para definir un punto de ajuste en el medidor de desviación del controlador, forzosamente tiene que haber un transmisor conectado a su entrada, de otra manera el medidor de desviación no responde; en ese caso su aguja se defleca a la izquierda. El controlador puede dar corriente en su salida a una carga o a un actuador, sin necesidad de la presencia de un transmisor. Para la puesta en automático de los controladores no se necesitó calibración alguna, sin embargo para los sistemas de control a malla cerrada se deben hacer ciertas consideraciones que se verán en el tema 5.

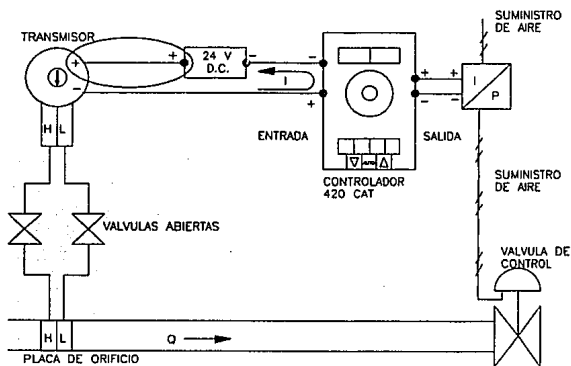


Fig. 34.- Prueba para el lazo de control en malla abierta (modo manual).

Para las válvulas solenoides, la única prueba que se hizo fue alinearlas y bloquearlas con sus respectivos botones en la botonera de la planta; el único requisito para hacerlas funcionar es que tengan su provisión de aire, y obviamente una señal de 24 V DC que energice sus electromagnetos; su aplicación, como ya se comentó al principio de este trabajo, es actuar como perturbaciones en los lazos de control.

Una aclaración importante, es que las conexiones entre válvulas - actuadores, válvulas solenoides, interruptores, transmisores y controladores, se hacen por medio de conectores banana- banana, ya que en la botonera de la planta cada uno de estos dispositivos posee entradas para este tipo de conectores. En la botonera, arriba de cada par de entradas, está grabado el nombre del dispositivo correspondiente, al cual se van a realizar la conexión. El propósito de ello es que los alumnos o profesores puedan implementar fácilmente tanto las pruebas antes mencionadas como los diferentes lazos de control tratados en este trabajo. Aunado a esto, existen los interruptores local/remoto, uno para cada bomba y uno para cada válvula solenoide; la función local es para arranque - paro de bombas o para alinear - bloquear las válvulas solenoides, por medio de botones, uno para cada función, y un par para cada bomba y válvula. Remoto es precisamente para activar a dichos dispositivos por medio de una señal de 24 V DC proveniente de una fuente externa o de los interruptores de nivel, cuyos relevadores se pueden conectar a la fuente de 24 V dc de la planta. De hecho, los arrancadores de las bombas necesitan precisamente una señal de tales

características para activarse. La aplicación de lo anterior se verá en los siguientes temas.

5.- LAZOS CERRADOS DE CONTROL.

Para empezar con los lazos de control, la siguiente tabla muestra la acción de control recomendada de acuerdo a las características del proceso a controlar.

Número de capacidades	Velocidad de reacción	Constante de tiempo	Tiempo muerto	Cambios de carga		Acción de control recomendada
				tamaño	velocidad	
una	lenta	moderada o grande	pequeño	moderado	lenta	On/Off
una	rápida	pequeña	pequeño	cualquiera	lenta moderada	Integral
múltiple	lenta/moderada	moderada	pequeño	pequeño	moderada	Proporcional
múltiple	moderada	cualquiera	pequeño	pequeño	ninguna	Proporcional-Derivativa
múltiple	cualquiera	cualquiera	pequeño/moderado	grande	lenta/moderada	Proporcional-Integral
múltiple	cualquiera	cualquiera	pequeño	grande	rápida	PID
cualquiera	rápida	pequeña o casi cero	pequeño/moderado	cualquiera	cualquiera	Pi con B.P. ancha y TI rápida

Tabla 2.- Acciones de control recomendadas según las características del proceso a controlar.

Acción directa o inversa. Dependiendo de la acción de los convertidores, actuadores y las válvulas ya descritos anteriormente en el tema 4, los incrementos en la variable controlada pueden requerir que la salida del controlador (variable manipulada) aumente o disminuya. Todo controlador puede ser configurado para acción directa o inversa; acción directa es cuando el controlador detecta un aumento de señal del punto de ajuste y la variable controlada proveniente del transmisor, por lo que su salida se

incrementa. Para el caso de acción inversa, el aumento del punto de ajuste y la variable controlada provoca que la salida del controlador se decremente. Para determinar cuál es la acción correcta a elegir, se debe analizar al lazo de control, empezando por determinar las acciones del convertidor, actuador y elemento final de control con el proceso a controlar. El siguiente análisis es un ejemplo:

Supóngase un sistema de control a malla cerrada con un controlador de flujo y su respectivo transmisor en la planta piloto; el actuador-válvula disponible es FV-02, cuya acción es directa (a mayor presión aplicada a su actuador, la válvula aumenta el cierre); supóngase también que se requiere de un flujo mayor en el sistema, por lo que se aumenta el punto de ajuste. Para que el error en el controlador sea cero también debe de aumentar la variable controlada $c(t)$, que precisamente es el flujo; para cumplir con ésto, la válvula tiene que aumentar su apertura. Para aumentar la apertura, debido a la acción directa del actuador, la presión de aire comprimido o señal neumática que llega a él tiene que disminuir. Como la señal neumática proviene del convertidor corriente-presión (I/P) FY-02, la corriente de salida del controlador que llega a él lógicamente debe disminuir. Se concluye que si, al aumentar el punto de ajuste y la variable controlada debe disminuir la salida del controlador; la acción de éste debe ser inversa. La figura 35 es el diagrama de la explicación anterior.

Es importante hacer notar que, para trabajar con acción inversa se deben hacer ciertas modificaciones al controlador. Para el caso de los controladores utilizados en la

planta, en la figura 25 se muestra el diagrama de conexiones típicas en la tablilla de terminales; dichas conexiones son para el caso de acción directa, por lo que se deben de cambiar algunas al ser necesaria la acción inversa en el controlador; para ésto debe de verse precisamente el diagrama de la figura 25 como referencia:

1. Se mueve el puente (conexión) de las terminales 13-14 a las terminales 14-15.
2. Se mueve el puente de las terminales 17-18 a las terminales 16-17.
3. Se mueven los cables de conexión a la carga (salida) de las terminales 4 (+) y 15 (-) a las terminales 13 (+) y 4 (-).

Como sólo se presentan en este tema los lazos cerrados de control para la planta, lo referente a sintonización se verá más adelante, en el tema 6, que se refiere a la operación en modo automático. Los lazos cerrados de control se describirán a continuación, partiendo de los más sencillos.

La teoría anterior es importante para el correcto funcionamiento de cualquier lazo de control, tanto simple como compuesto; en seguida se expondrán cada uno de los lazos simples utilizados en la planta piloto.

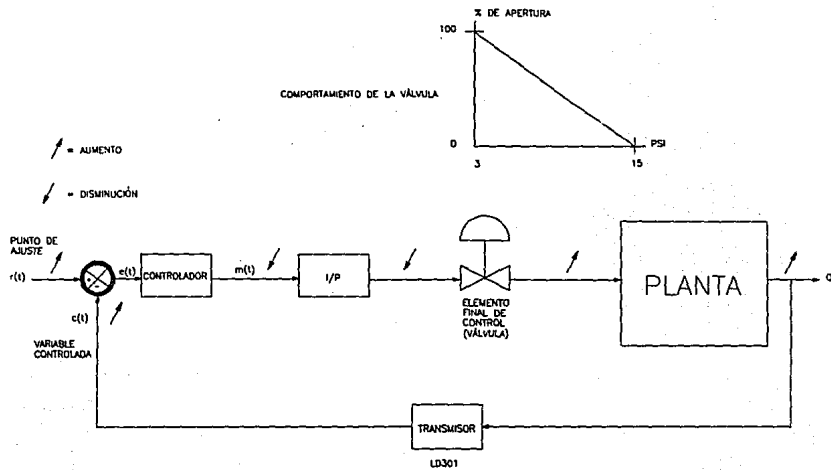


Fig. 35. - Ejemplo de un análisis de lazo para determinar la acción de un controlador

5.1.- CONTROL ON/OFF.

El control On/Off utilizado es de la marca Warrick controls; su principio de funcionamiento es a base de relevadores conectados a los interruptores de nivel, LS-02 (alto) y LS-01 (bajo) en el tanque cerrado FA-02; cada interruptor consiste en un electrodo de acero inoxidable 316, ya que según la tabla de electrodos y materiales de este tipo de controles por relevador, es buen conductor para agua clorada potable, fluido que precisamente utiliza la planta; ambos electrodos tienen una referencia a tierra que es el cuerpo metálico del tanque, y son accionados por la conductividad del fluido, que es de 200 mMhos/cm de nivel, valor indicado en la tabla antes mencionada. La figura 36 muestra un esquema de la implementación física del control On/Off en la planta. El principio de funcionamiento de la estructura electrodos - relevadores comienza por el estado inicial de los relevadores antes de energizarse su bobina (la cual se alimenta por medio de un transformador), uno normalmente cerrado y dos normalmente abiertos; para esto se utiliza un relevador normalmente abierto y el otro normalmente cerrado, a los cuales se les conecta externamente (en la botonera de la planta) como carga los arrancadores de las bombas, por medio de conectores tipo banana. Observando la figura 36, se intuye que la condición inicial es el nivel bajo de agua en el tanque cerrado FA-02, con los relevadores en su estado normal, por su bobina todavía sin energía.

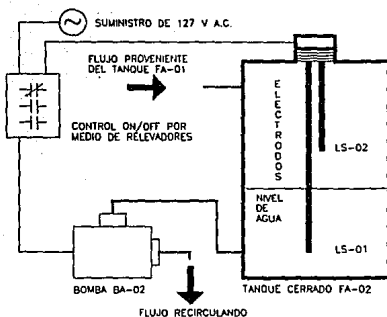


Fig. 36.- Implementación física del control On/Off.

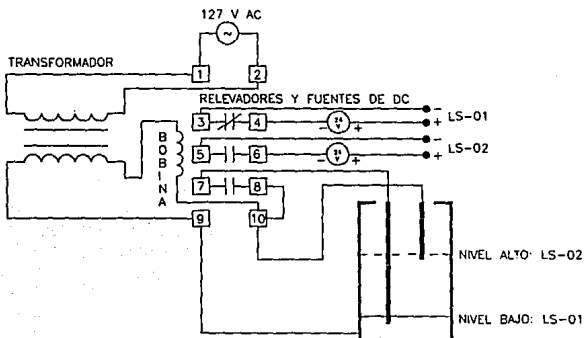


Fig. 37.- Configuración del control On/Off.

La figura 37 muestra la configuración, con las conexiones de los relevadores, del control On/Off; tomándola como referencia y partiendo de la condición inicial

mencionada antes, el interruptor de nivel LS-01 está activado porque físicamente la bobina de los relevadores en esta situación está desconectada, y el interruptor se relaciona con el relevador normalmente cerrado; dicha relación se refiere al estado de los relevadores de acuerdo al contacto del agua con ambos electrodos. De acuerdo al párrafo del control On/Off, en el tema 1, la bomba BA-01 no deja de funcionar y BA-02 está conectada al interruptor LS-02 para ser controlada. Para la condición inicial LS-02 está desactivada, puesto que está relacionada con el relevador normalmente abierto, (ver figura 37). Al tocar el agua a la varilla corta o nivel alto, se energiza la bobina de los relevadores, cambiando el estado de ellos, por lo que se desactiva LS-01 y se activa LS-02, arrancando a la bomba BA-02, la cual comienza a drenar al tanque FA-02 que en este momento está casi lleno en su totalidad. Con esto, al llegar el agua al nivel inferior, deja de tener contacto con la varilla (electrodo) corta y se desenergiza la bobina de los relevadores, los cuales regresan a su estado original repitiéndose el proceso y recirculando el agua en la planta debido a la bomba BA-01. El interruptor LS-01 no se utiliza, ya que el control es realizado únicamente por el otro interruptor de nivel; LS-01 puede servir para otras aplicaciones: conmutación alternada de las bombas de acuerdo a los niveles, control de una o ambas válvulas solenoides, etc. Los interruptores pueden controlar tanto a las bombas como a las válvulas solenoides, por medio de los interruptores local/remoto, obviamente en la posición de remoto, y por medio de conectores banana-banana, haciendo las conexiones correspondientes en la botonera de la planta.

5.2.- CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL

En la figura 3 se muestra el diagrama del control proporcional - integral, en este caso de flujo (que debe ser proporcional - integral y no puramente proporcional, como se verá en el tema 6). El diagrama del lazo cerrado se muestra en la figura 3B, tomando como referencia los datos de la figura 3. Para determinar la acción que debe de tener el controlador para este caso, se hace el siguiente análisis de lazo:

- Si se aumenta el punto de ajuste $r(t)$, tiene que aumentar la variable controlada $c(t)$ para que el error $e(t)$ sea cero; por lo tanto debe aumentar el flujo o gasto Q .
- La acción del actuador/válvula FV-01 es inversa, puesto que a mayor presión (aplicada al actuador) se abre la válvula; para aumentar el flujo, la válvula debe tener mayor apertura, por lo que se le debe de aplicar al actuador más presión.
- Para dar mayor presión, el convertidor corriente - presión debe de recibir mayor corriente.
- El controlador, de acuerdo a lo anterior, debe aumentar su salida de corriente al aumentar el punto de ajuste y la variable controlada. Por lo tanto, la acción del controlador debe de ser directa.

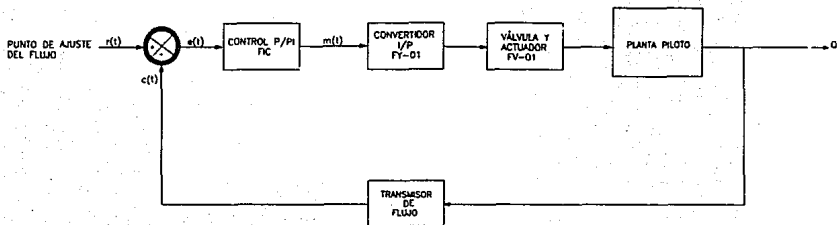


Fig. 38.- Diagrama de bloques del lazo de control P ó PI.

Después de determinar la acción del controlador, éste debe sintonizarse con el proceso, utilizando algún método (ver tema 6).

5.3.- LAZOS COMPUESTOS.

Primero se expondrá la teoría de cada uno de los lazos compuestos utilizados por la planta, y luego los casos particulares de aplicación de cada uno para diferentes parámetros a controlar en la planta, como son flujo, nivel y presión.

5.3.1.- CONTROL EN CASCADA.

El control en cascada consiste en un controlador primario (maestro) controlando la variable que debe ser puesta a un valor constante, y de un controlador secundario (esclavo) controlando otra variable que cause fluctuaciones en la primer variable. El controlador primario posiciona el punto de ajuste del secundario y éste, en turno, manipula la válvula de control. El objetivo del sistema del control en cascada es el mismo que cualquier controlador de un solo lazo. Su función es simplemente lograr un balance entre provisión y demanda, para mantener la variable de control a su valor constante requerido. Sin embargo, el lazo secundario es introducido para reducir retrasos, y así estabilizar el flujo de entrada para hacer toda la operación más exacta.

El diagrama de bloques del control en cascada es mostrado en la figura 39. Dos controladores realimentados son usados pero sólo una variable de proceso m es

manipulada. El controlador primario mantiene la variable controlada primaria c_1 a su punto de ajuste r_1 por ajuste automático de r_2 , el punto de ajuste del controlador secundario. El controlador secundario controla el lazo secundario respondiendo a su punto de ajuste y a la variable controlada secundaria c_2 . El controlador secundario puede ser considerado como un elaborado elemento final del control, posicionado por el controlador primario en la misma manera que un controlador solo posicionaría una válvula de control. La variable controlada secundaria no es controlada en el mismo sentido de la primaria; es manipulada sólo como algún medio del control. Si por ejemplo, el controlador secundario es un controlador de flujo, entonces el controlador primario no dictará una posición de válvula, pero lo hará, en su lugar, dictándose el flujo prescrito, a través de la influencia de su salida en el punto de ajuste del controlador secundario. Este tipo de sistema de control incrementa la frecuencia natural y reduce la magnitud de algunas de las constantes de tiempo en el sistema, ambos resultados benéficos. Sin embargo, los beneficios más evidentes son el efecto reducido de las perturbaciones, mayor ajuste exacto en la presencia de las perturbaciones, y la posibilidad de incorporar límites altos y bajos en el control secundario.

Saturación: La saturación es el problema en el control en cascada. Por ejemplo, las demanda de la carga del proceso es mayor de lo que la válvula del control puede entregar; esto provocaría una desviación de la variable controlada secundaria de su punto de ajuste; entonces la variable controlada primaria cambiaría y habría un cambio de la salida del controlador primario. Esto modificaría el punto de ajuste del controlador

secundario. En la práctica el controlador primario no tiene que cambiar su salida. Una manera sencilla de llevar a cabo esto en un sistema, por ejemplo neumático, es usar la variable controlada secundaria como acción integral para el controlador primario; en el sistema en cascada esto es precisamente el punto de ajuste secundario. Mientras la variable controlada secundaria y su punto de ajuste sean iguales, la acción integral del controlador primario procede en forma normal. Si la salida (variable controlada) del controlador secundario no puede seguir su propio punto de ajuste, la acción integral en el controlador primario parará. Se reanudará solamente cuando la variable controlada secundaria otra vez pueda seguir a su punto de ajuste. Para llevar a cabo esto, ambos controladores tienen que tener acción integral y el controlador primario tiene que estar equipado con una conexión integral externa. El uso lógico de este tipo de sistemas de control requiere nada más que los instrumentos estandarizados de control. Una unidad estándar puede proveer la indicación o el registro, y el control de ambas variables, primaria y secundaria más la indicación de la salida y traslado manual- automático. Eso es todo lo necesario para operación normal.

Sintonización de los sistemas de control en cascada:

1. Poner ambos controladores en manual.

- . Ajustar las puestas de banda proporcional y tiempo integral a valores moderados (ancha banda proporcional y largo tiempo integral) en el controlador secundario.

3. Poner el controlador secundario en automático y sintonizarlo usando algún procedimiento de sintonización.
4. Ajustar las puestas de proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo en el controlador primario a valores iniciales moderados.
5. Poner el controlador primario en automático y entonces sintonizar usando algún procedimiento para sintonización.

Siempre se debe sintonizar primero el controlador secundario (con el controlador primario en manual) y luego el controlador primario.

Las mayores ventajas de este lazo compuesto son:

- Los disturbios que afectan el lazo secundario son corregidas por el controlador secundario antes de ser percibidas en el lazo primario.
- Cerrar el lazo secundario reduce los retrasos percibidos por el controlador primario y así crece la velocidad de la respuesta.

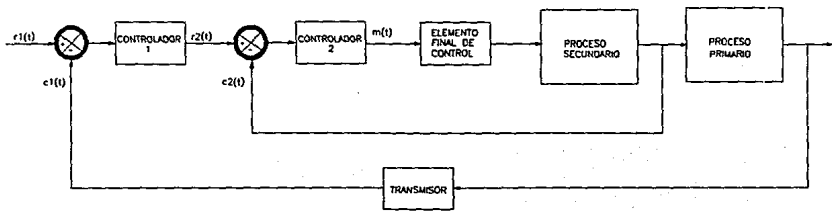


Fig. 39.- Diagrama de bloques del control en cascada.

En el caso de la planta se controla en cascada el nivel por medio del flujo (ver figura 5).

5.3.2.- CONTROL DE RELACIÓN.

Formalmente, el control de relación es un sistema que mantiene 2 o más variables a una razón predeterminada. Se usa, por ejemplo, cuando una relación fija entre 2 flujos va a ser controlada. El factor de relación es establecido por un relevador (estación) de relación, que simplemente es un multiplicador con el factor de multiplicación seleccionado manualmente de acuerdo a las necesidades del proceso; esta unidad se debe localizar entre el transmisor del flujo inestable y el punto de ajuste del controlador del otro flujo. Supóngase que se desea controlar un flujo B en una relación preestablecida con otro flujo A; el transmisor del flujo A sensa el flujo inestable A y el relevador de relación multiplica la salida (que va de 0 a 100 %) del transmisor por un factor puesto manualmente:

Salida del flujo A x Factor preestablecido = Salida del relevador de relación.

Esta salida se vuelve el punto de ajuste del controlador que regula al flujo B. En el equilibrio el flujo B iguala al punto de ajuste del controlador B:

$$\text{Factor de relación} = \frac{\text{Flujo B}}{\text{Flujo A}}$$

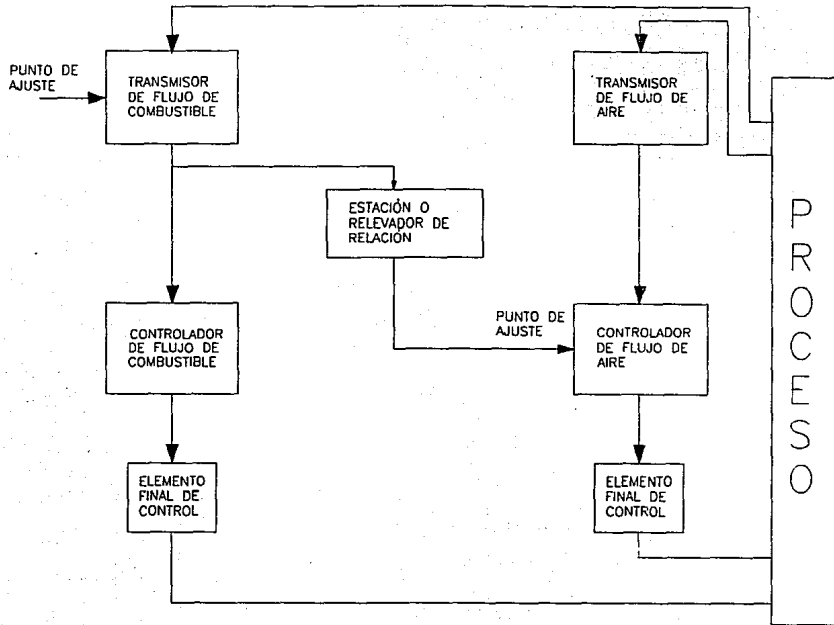


Fig. 40 - Diagrama de bloques del control de relación para el ejemplo correspondiente.

Ahora, supóngase, que la escala del flujo A va de 0 a 100 GPM y la del flujo B igual, y que la salida de sus respectivos transmisores cambia linealmente de 0 a 100%, y que el relevador de relación tiene un ajuste de factor con escala de 0.3:1 a 3:1. Si el factor de relación es puesto a 1, significando una relación de 1:1, para cada galón medido de A el control permitirá fluir un galón de B, si 50 GPM fluyen de A, la misma cantidad fluirá de B; si la escala de flujo del transmisor B se cambia de 0 a 10 GPM y la escala de transmisor A permanece igual, se configurará un factor de relación de 1:10 en el sistema. De aquí la escala de transmisores, así como el factor de multiplicación puesto en el relevador de relación, determinan el factor de relación del sistema; por lo tanto se debe tener cuidado en seleccionar transmisores para permitir máxima flexibilidad del sistema tratando de escoger una escala, de modo que el factor de relación esté normalmente a la mitad; sin embargo se debe asegurar que las escalas del transmisor cubran toda condición del proceso. Los medidores usados en los sistemas de control de relación de flujo son a menudo placas de orificio, o cualquier medidor de obstrucción con transmisores de presión diferencial; puesto que el flujo es proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial, la relación de flujos debe estar en raíz cuadrada también. Un transmisor con salida lineal no puede usarse con otro que tenga salida de raíz cuadrada, a menos de que la salida lineal pase por un convertidor lineal/raíz cuadrada. Un sistema de control de relación puede implementarse de diferentes maneras; el relevador de relación puede ser incorporado en el controlador, y una perilla de relación sustituye en este caso a la perilla de punto de ajuste. La puesta normal de relación para la mayor parte de las aplicaciones es en la vecindad de 1.0,

cuyo punto usualmente es seleccionado en posición a media escala. Esta condición puede llevarse a cabo seleccionando el tamaño de orificios y medidores de orificio (para el caso de flujo) en proporción, de modo que, bajo operación normal, los dispositivos de medición lean con respecto al mismo flujo en porcentaje. La escala típica de estaciones de relación es de 0.3 a 3.0 ó de 0.2 a 4.0; puesto que la salida de un transmisor es de 3-15 psi o de 4-20 mA, la estación de relación primero debe remover la elevación de cero antes de ejecutar la multiplicación, y en turno entonces agregar en la elevación.

Ejemplo: en un sistema de relación de flujos de aire y de combustible, la estación de relación toma la salida del transmisor de flujo del combustible y substraer 3 psi ó 4mA, dependiendo el tipo de señales que maneje el transmisor (con esto, se quita la elevación de cero), luego la estación multiplica por la relación seleccionada y entonces agrega el cero (3 psi ó 4 mA) de regreso a la señal antes de mandarla a un controlador de flujo de aire como el punto de ajuste. En el ejemplo, el transmisor de flujo de combustible determina el punto de ajuste del controlador de flujo de aire por medio de la estación (relevador) de relación. Como el flujo de combustible cambia, el punto de ajuste del controlador de flujo de aire cambia automáticamente, de modo que, una relación exacta se mantiene entre ambos flujos. El sistema de control garantiza que no importa cómo el flujo cambia, la correcta cantidad de aire para óptimas condiciones de combustión siempre será suministrada. Para mayor claridad de este lazo compuesto, en la figura 40 se muestra el esquema del control de relación del ejemplo anterior. En el

caso de la planta, se trata de un control de relación de los flujos de sus 2 ramas (ver figura 6).

5.3.3.- CONTROL DE RANGO (ESCALA) DIVIDIDO.

También llamado control duplex, el control de rango dividido es un sistema de control que tiene una entrada y 2 salidas; puede tener 2 mecanismos de control, cada uno con su salida, o un mecanismo de control operando 2 válvulas de control por medio de relevadores o posicionadores. Formalmente es un sistema donde 2 variables manipuladas son establecidas por una sola variable controlada y el punto de ajuste. El objetivo de este sistema de control es aprovechar la respuesta de los actuadores y elementos finales de control para la escala del controlador, que es dividida para cada uno (de ahí el nombre). El fin de este control será mejor comprendido por el siguiente ejemplo:

En un sistema es necesario mantener una temperatura requerida, la cual puede alternar entre la operación de calentamiento y la de enfriamiento. La salida del controlador de temperatura es la estándar: 4-20 mA; las válvulas trabajan de tal forma que sus actuadores, en lugar de modular de cierre completo a apertura completa para salida a plena escala del controlador, se programan para operar por la mitad de la escala de la señal de control: el actuador de agua caliente opera de cerrado a abierto para una escala de 12 a 4 mA, mientras que el actuador de agua fría opera de cerrado a abierto para una escala de 12 a 20 mA. Por lo tanto, cuando la temperatura está en el

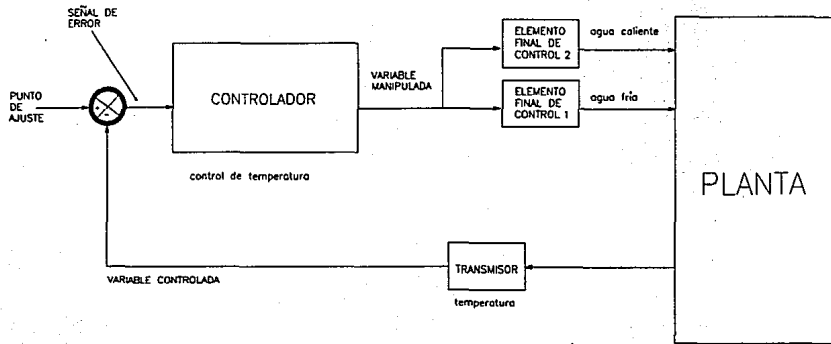


Fig. 41.- Diagrama de bloques de control de rango dividido o duplex para el ejemplo correspondiente.

punto de ajuste (12 mA, la mitad de la escala) ambas válvulas de los actuadores están cerradas. Si la temperatura baja demasiado, la válvula de calentamiento se abre, si ésta abre demasiado, la de enfriamiento se abre; para ésto, un solo transmisor de temperatura manda la información al controlador. La figura 41 muestra el esquema de este tipo de lazo compuesto refiriéndose al ejemplo anterior. En el caso de la planta el control de rango dividido manipula aire suministrado al tanque FA-02, en este caso se controla presión dentro del tanque (figura 7).

Los ejemplos de control de relación y control de rango dividido presentados en los párrafos anteriores, fueron tomados como referencia del libro "Instrumentation for process measurement and control" de Norman A. Anderson

Después de ver la teoría de los lazos de control compuestos utilizados en la planta piloto, se describirá la aplicación de cada uno en ella:

Control en cascada. Como ya se mencionó anteriormente, el control de cascada en la planta piloto es de flujo-nivel; el controlador maestro o primario controla el nivel y el controlador esclavo o secundario controla el flujo; ésto se ve claramente en la figura 42. El análisis de lazo para determinar la acción de cada controlador es el siguiente:

-Si se demanda mayor flujo en la salida del controlador de nivel, para que el error sea cero en el controlador de flujo debe aumentar la variable controlada de flujo; para ello la

válvula FV-01 tiene que aumentar su apertura. Como su actuador es de acción inversa, requiere de mayor presión aplicada para abrir.

-Para dar más presión, el convertidor FY-01 debe de recibir más corriente.

-Ya que se requiere más flujo en el punto de ajuste, su controlador debe aumentar su salida de corriente. Por lo tanto, la acción del controlador de flujo debe de ser directa.

-Para un nivel alto de agua el flujo debe de ser pequeño, y para un nivel bajo el flujo debe de ser grande; esto se refleja a la salida del controlador de nivel. Por ejemplo, si se aumenta el punto de ajuste de nivel, debe aumentar su variable controlada en el controlador para un error igual a cero; con ello debe disminuir su salida, para que el punto de ajuste del flujo para disminuya también. Por lo tanto, la acción para el controlador de nivel debe de ser inversa, para satisfacer las condiciones del sistema de control.

Por último, es importante aclarar que los controladores deben de tener ciertas modificaciones en su funcionamiento para poder ser conectados en cascada. Para el caso de los utilizados en la planta, uno de ellos debe poseer un interruptor local/remoto para el punto de ajuste (de hecho se hizo esta modificación en uno de los controladores, puesto que ambos carecían del interruptor), para hacer posible la conexión de controladores en cascada. Para instalar el interruptor local/remoto se

consultó la parte del manual del controlador para instalar dicha opción: de la tarjeta de servicio del controlador se quitan 2 puentes llamados J3 y J25 para modificar el circuito, e instalar donde estaba el puente J3 un interruptor de 1 polo 2 tiros; el polo se conecta en el extremo donde el puente J3 conectaba con el potenciómetro R6 de la tarjeta de servicio del controlador, y uno de los tiros se conecta del otro extremo; el otro tiro se conecta con la terminal 11 de la tablilla de conexiones, que es la de punto de ajuste.

Aparte se hacen otras modificaciones en la tablilla de terminales de ambos controladores para el funcionamiento del control en cascada; tomando como referencia el diagrama de la tablilla de conexiones de la figura 25, las modificaciones son las siguientes:

-Para la tablilla del controlador primario (nivel) se pone una resistencia de carga de $560\ \Omega$ entre las terminales 15 y 4; se reemplaza la resistencia de $649\ \Omega$ con una de $1050\ \Omega$ en las terminales 14 y 4.

-Para la tablilla del controlador secundario (flujo) se pone una resistencia de $8.2\ K\Omega$ entre las terminales 9 y 19, y se conecta un puente o conexión entre las terminales 19 y 11.

- Las conexiones entre ambas tablillas son: un puente que se conecta, de la terminal 14 de la tablilla del controlador primario, a la terminal 9 de la tablilla del secundario; el otro

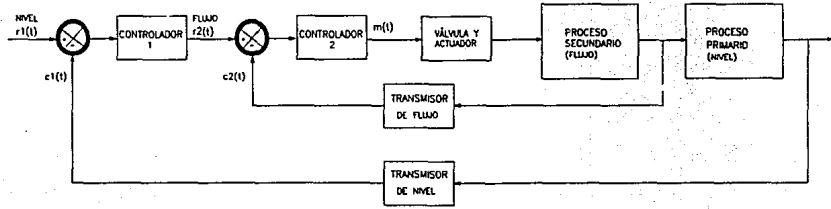


Fig. 42. Diagrama de bloques del control en cascada de la planta piloto.

puente se conecta entre las terminales 4 de ambas tablillas; ésta es la referencia del punto de ajuste remoto. Finalmente, el interruptor de punto de ajuste del controlador secundario (flujo) se pone en la posición de remoto, para que su circuito reciba entonces a la salida del controlador primario (nivel) como el punto de ajuste. Las conexiones para acción inversa del controlador de nivel se hacen exactamente como ya se explicó al principio de este tema. Si se desea regresar a ambos controladores a sus funciones normales, se vuelven a implementar las conexiones de la figura 25. Luego de determinar la acción de los controladores, lo que resta es sintonizarlos como ya mencionó anteriormente, en la teoría de control en cascada.

Control de relación. En el caso de la planta piloto este tipo de control es más sencillo, puesto que sólo un controlador es utilizado y la relación entre flujos es a través de la estación de relación y el transmisor FT-01. En este caso particular del control de relación, se hace el análisis de un sólo lazo:

-Si la relación de flujos requiere más flujo en la rama de la válvula FV-02, para que el error sea cero, debe aumentar la variable controlada de flujo. Como la acción del actuador de dicha válvula es directa, requiere de menor presión para abrir.

-Para menor presión se necesita menos corriente en el convertidor FY-02.

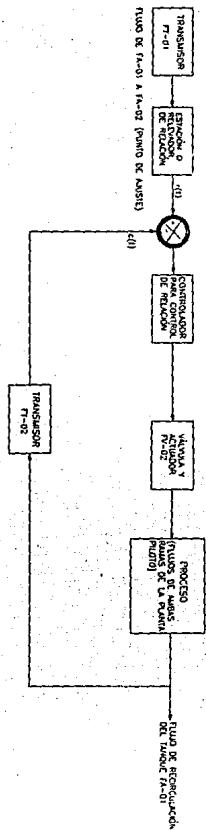


Fig. 43.- Diagrama de bloques del control de relación de la planta piloto.

- Al requerir menor corriente de salida para más flujo en el punto de ajuste del controlador de relación, la acción para él en este caso es la inversa. La figura 43 muestra su diagrama de bloques. Como no se pudo disponer de una estación de relación, la descripción de este tipo de control para la planta piloto queda como proyecto, cuyos resultados serán reportados posteriormente.

Control de rango dividido o duplex. Para este caso, en el punto de ajuste deben estar ambas válvulas cerradas. Al exceder la presión en FA-02, la de desfogue se abre y la de suministro permanece cerrada; al no haber suficiente presión, la de suministro se abre y la de desfogue se cierra. El problema en este caso es programar a ambas válvulas para funcionar a la mitad de su escala (punto de ajuste), de manera que funcionen tal y como se vió en la teoría para este lazo compuesto, ya que el proceso es semejante; como el actuador - válvula PY-03 y PV-03 no es todavía adquirido, no se puede dar un análisis completo. Los únicos datos disponibles son que la acción de la válvula PV-02 es directa, puesto que a mayor presión aplicada a su actuador, la válvula cierra y que el rango de trabajo de los convertidores de las válvulas es de 4 a 20 mA. El rango para los 2 elementos finales de control, debe utilizarse a la mitad para cada uno:

$$\frac{(20-4) \text{ mA}}{2} = 8 \text{ mA}$$

Con esto, el primer rango va de 4 a $4+8 = 12$ mA y el segundo, de 12 a 20 mA. Por lo tanto, el punto de ajuste para ambas válvulas es cuando el controlador tiene una

salida de 12 mA hacia ambos convertidores corriente - presión PY-02 y PY-03. Para determinar qué rango corresponde a qué convertidor - actuador - válvula, se tiene el dato que abajo del punto de ajuste de 12 mA la presión es baja, por lo que PV-02 abre y PV-03 cierra, para el suministro. Arriba del punto de ajuste PV-02 cierra y PV-03 abre, para el desfogue del exceso de presión; con esta información se concluye que a PY-02 le pertenece el rango de 4-12 mA, y a PY-03 el de 12 a 20 mA. Es importante aclarar, que para hacer trabajar en dichos rangos a los convertidores hay que programarlos o recalibrarlos, así como a los actuadores, para que respondan correctamente, ya que la señal de 4-20 mA en los convertidores sale como 3-15 psig hacia los actuadores, por lo que para éstos se deben determinar de la misma manera los rangos para control de rango dividido:

$$\frac{(15-3) \text{ psig}}{2} = 6 \text{ psig}$$

Con este dato, y de acuerdo a los rangos definidos para los convertidores, PV-02 tiene el rango de 3 - 9 psig y PV-03 el de 9 - 15 psig.

El hecho de que la acción de la válvula PV-02 es directa, ayuda a las anteriores determinaciones; la acción para el controlador utilizado para esta aplicación se determina de la siguiente manera: por ejemplo, si la variable controlada aumenta (mayor presión), PV-03 tiene que abrir y PV-02 tiene que cerrar; para ello sus respectivos actuadores deben de recibir una mayor señal de presión de los convertidores; por la

acción directa de PV-02 en esta condición hay un cierre y forzosamente la válvula PV-03 debe tener acción inversa, para la apertura. Al aumentar la presión de salida de los convertidores, debe aumentar la salida de corriente del controlador, por lo tanto, la acción adecuada para el controlador en este sistema es la directa, puesto que debe aumentar su salida al aumentar la variable controlada. Otra aclaración muy importante, es que el controlador debe de tener una interfase, que convierta a su salida normal en dos; la interfase puede ser un circuito analógico con un convertidor corriente-voltaje de entrada al cual se le conectan 2 convertidores voltaje-corriente para obtener las dos salidas necesarias. Debido a que no se tiene información de la presión máxima soportada por el tanque FA-02, ni se dispone de PY-03, PV-03, la tubería para éste, y tampoco de la interfase mencionada, el funcionamiento descrito para la aplicación del control de rango dividido en la planta piloto queda también como proyecto, cuyos resultados se reportarán posteriormente.

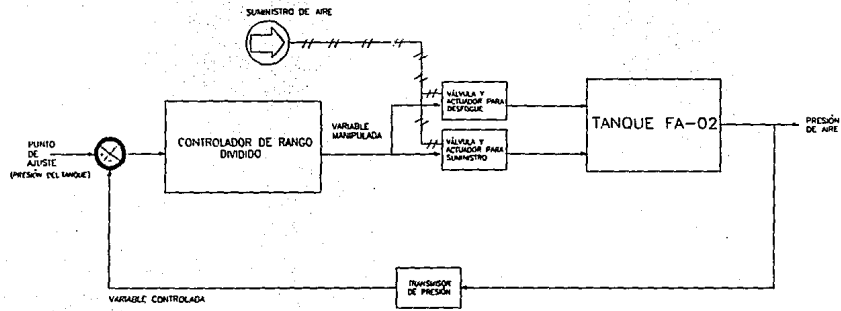


Fig. 44.- Diagrama de bloques del control de rango dividido de la planta piloto.

6.- OPERACIÓN GLOBAL DEL SISTEMA EN MODO AUTOMÁTICO.

6.1.- BOTONERA DE LA PLANTA PILOTO DE TIPO INDUSTRIAL.

Es la parte fundamental de la operación global de la planta, puesto que en ella se implementan los lazos de control y se activan las bombas y válvulas solenoides. Junto con ella también es importante la parte neumática, formada por el compresor de aire y su tubería tipo poliflow, que alimenta a los actuadores de diafragma y válvulas solenoides.

Anteriormente ya había mencionado la relación de la botonera de la planta con las bombas, válvulas solenoides, etc. En este tema se expondrá con detalle.

La botonera de la planta es un módulo independiente de la planta piloto que se comunica con ella a través de cableado; en su interior contiene el siguiente equipo:

- Su propio sistema de fusibles y cableado para la alimentación de 127 V AC de la planta piloto.
- Los relevadores de los interruptores de nivel, con el cableado correspondiente a ellos.
- La fuente de poder de 24 V DC que alimenta a los transmisores y a los diferentes lazos de control, da las señales de control de los interruptores de nivel, y puede ser utilizada

para otra aplicaciones; su corriente máxima de 5 amperes le da flexibilidad para alimentar a varios dispositivos, como en el caso de los lazos de control compuestos; también puede ser utilizada para otros fines.

- Los controladores, que no formaban parte de la planta piloto por lo que se acoplaron con sus respectivas conexiones y cableado para entrada y salida; los controladores eran equipo disponible del Departamento de Control que fue aprovechado para la planta piloto como equipo opcional. Cada uno de los controladores posee su propio fusible, para evitar daños por corto circuito.

- El cableado de comunicación, que es utilizado por los convertidores corriente - presión (convertidores I/P), actuadores - válvula solenoides, transmisores e interruptores de nivel.

Físicamente la botonera es un gabinete de lámina de acero con ruedas para su manipulación; en su parte trasera tiene una puerta que posibilita el mantenimiento del equipo interno y la realización de conexiones internas adicionales al equipo (por ejemplo las que se hacen a los controladores para implementar el sistema de control en cascada).

EL frente de la botonera es un panel que se puede dividir en 3 partes para su exposición. Cabe destacar que para toda entrada y salida de señal en el panel de la

botonera se compone de 2 conectores tipo banana hembra polarizados con los colores negro (-) y rojo (+), también se indica la polarización de la entrada o salida, si es el caso, bajo ella con la convención de signos: negativo para el conector izquierdo y positivo para el conector derecho. Las partes del panel son las siguientes:

1. En primer lugar se tiene la parte superior, que hasta arriba tiene al interruptor de encendido con su lámpara indicadora que se prende al activar a la planta piloto; a la izquierda de ella está la leyenda "ALIMENTACIÓN GENERAL". Continuando abajo, de izquierda a derecha, hay otras leyendas:

- BOMBAS, la cual tiene abajo los nombres, BA-01 y BA-02; bajo de cada nombre hay un par vertical de botones, el superior es el de arranque (botón en verde) y el inferior es el de paro (botón en rojo) estas indicaciones están abajo de su botón correspondiente.

- VÁLVULAS, leyenda que está a la derecha de la anterior, que tiene bajo ella los nombres de las válvulas solenoides SV-01 y SV-02; cada una tiene su correspondiente par vertical de botones, el superior es para alinear (verde) y el inferior es para bloquear (rojo).

Abajo de lo anterior, para cada bomba y para cada válvula solenoide hay un interruptor para la operación local/remoto. Los interruptores están bajo de cada uno de los pares verticales de botones, formando una fila horizontal de 4; cada uno tiene abajo

una entrada para una señal remota de 24 V DC. Si el interruptor de un dispositivo se pone en la posición de "local", podrá controlarse por medio de sus respectivos botones. Si el interruptor se pone en la posición de "remoto", el dispositivo se controlará por medio de una señal de 24 V DC aplicada a la entrada remota, procedente de la salida de uno de los interruptores de nivel o de alguna de la fuente de 24 V DC. A la derecha de todo el conjunto anterior descrito, están los interruptores de nivel; arriba de ellos está escrito el nombre del tanque FA-02, que los contiene. El interruptor de nivel

LS-02 se indica con la lámpara HL (High Level o nivel alto) y el interruptor LS-01 se indica con la lámpara LL (Low Level o nivel bajo). Abajo de la lámpara de cada interruptor de nivel está su correspondiente salida de señal de 24 V DC. La figura 45 muestra esta parte del panel.

2. La parte media del panel tiene tanto entradas como salidas de señales, de arriba hacia abajo se tiene:

- Una hilera horizontal de 5 entradas de señal para los convertidores I/P, con la leyenda "convertidores electroneumáticos" arriba de ellas; cada entrada tiene indicado abajo de ella el correspondiente nombre de su convertidor. La disposición, de izquierda a derecha, es la siguiente: LY-01, FY-01, FY-02, PY-01 y PY-02, de los cuales sólo están disponibles funcionando FY-01 y FY-02 (por ello actualmente se les llama también PY-01 y PY-02).

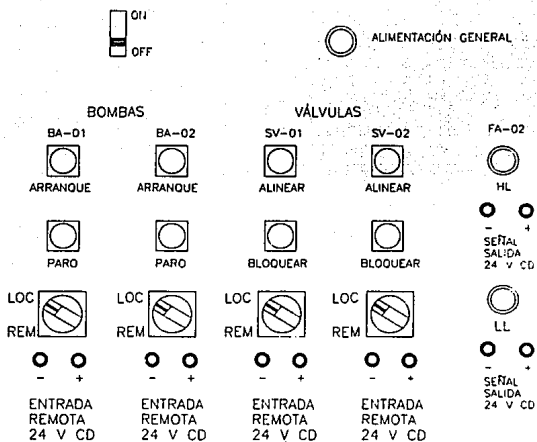


Fig. 45.- Elementos de la parte superior del panel de la botonera.

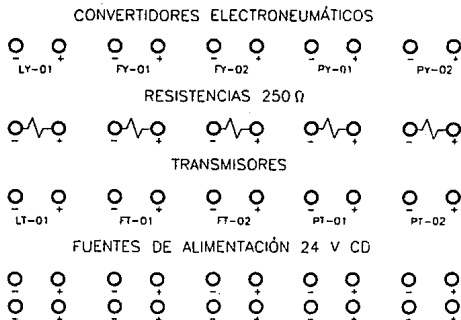


Fig. 46.- Elementos de la parte media del panel de la botonera.

- Una hilera de 5 resistencias de 250 Ω , con su leyenda correspondiente arriba de ellos; estas resistencias se utilizan para el funcionamiento de los transmisores.

- Una hilera horizontal de salidas de señal para 5 transmisores, con la leyenda "transmisores" arriba de ellos. El orden, de izquierda a derecha, es: LT-01, FT-01, FT-02, PT-01 y PT-02, de los cuales FT-01, FT-02 y LT-01 están disponibles (actualmente FT-01 y FT-02 son llamados PT-01 y PT-02 por lo mismo); cada salida tiene indicado el nombre de su correspondiente transmisor abajo de ella.

- Las últimas 2 hileras horizontales, que son las 10 salidas de la fuente de 24 V, 5 A DC de la planta piloto, obviamente cada hilera de 5 salidas. La figura 46 muestra dicha parte del panel.

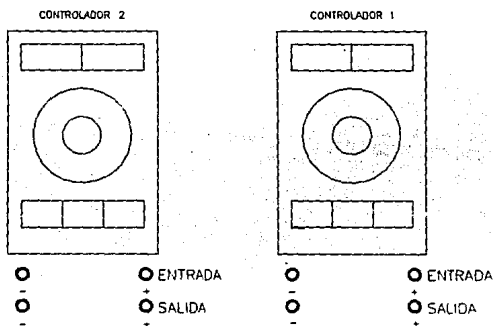


Fig. 47.- Elementos de la parte inferior del panel de la botonera de la planta.

3. La parte inferior del panel de la botonera contiene a los controladores electrónicos Leeds and Northrup utilizados para los lazos de control; bajo cada uno están sus correspondientes entradas y salidas. La entrada de cada controlador ocupa el lugar superior y la salida el inferior. La figura 47 muestra la disposición de los controladores de las planta piloto; a la derecha está el controlador 1, que tiene acción inversa y a la izquierda está el controlador 2, cuya acción es directa, aunque ambos pueden ser configurados en su tablilla de terminales para la acción que se desee. Dado a que la figura del panel es grande, se tuvo que partir en 3 secciones.

La figura 48 muestra la figura completa del panel de la botonera de la planta piloto de tipo industrial.

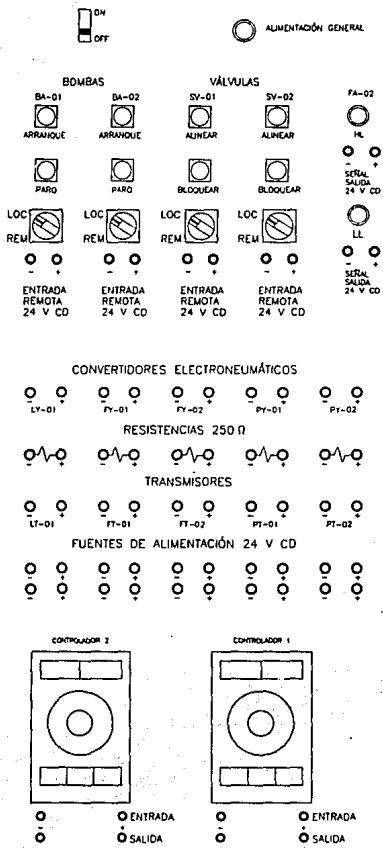


Fig. 48.- Figura completa del panel de la botonera de la planta piloto de tipo industrial.

6.2.- SINTONIZACIÓN DE LOS LAZOS CERRADOS DE CONTROL.

Para que la planta piloto pueda funcionar con su sistema de control en el modo automático, primero debe definirse la acción del controlador y luego sintonizarse con ella (lo mismo se debe de hacer con todos los controladores en el caso de utilizar lazos compuestos), que es el proceso a controlar. Todo controlador debe sintonizarse, o ajustarse o entonarse con el proceso para ligar las funciones de tiempo y ganancia con el resto de los elementos en el lazo de control (el proceso, junto con los transmisores, actuadores y elementos finales de control); con esto se logra una adecuada calidad de control, ajustando los parámetros de ganancia y tiempo del controlador a su valor óptimo para las diferentes acciones de control (P, PI y PID). Es necesario para la sintonización observar y definir las características dinámicas de la planta o proceso a controlar, y su respuesta a las perturbaciones y variaciones de entrada; como cada proceso tiene características bien definidas, que debe escogerse la acción de control que más se adapte a él. Para esto interviene el concepto de banda proporcional (B.P.), que es el porcentaje de escala completa a través de la cual debe moverse la variable de proceso para producir una variación completa en la señal de salida; tiene relación directa con la ganancia K_p del controlador y es:

$$B.P. = \frac{100}{K_p}$$

Existen varios métodos para la sintonización de controladores, de los cuales se presentan en este trabajo los desarrollados por Ziegler y Nichols: El primero es

sintonización a partir de la curva de respuesta del sistema en malla abierta, y el segundo conocido como sensibilidad o ciclo límite.

Sintonización por respuesta del sistema en malla abierta: Por medio de un graficador conectado en paralelo a la entrada del controlador, se registra la variable controlada $c(t)$ proveniente del transmisor, para ésto se pone el sistema con control en malla abierta, y se le aplica una entrada escalón, en cuya curva de respuesta desplegada en el graficador, se identifican y se evalúan el tiempo de retraso L (incluyendo el tiempo muerto) y la velocidad de reacción R . Dichos factores se obtienen trazando sobre la curva graficada una línea tangente al punto de inflexión, como se muestra en la figura 49.

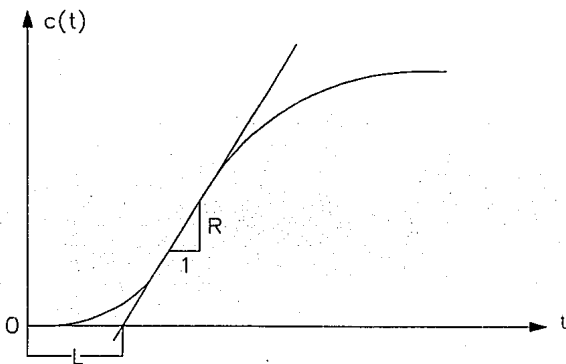


Fig. 49.- Localización de los parámetros de sintonización por respuesta del sistema en malla abierta en la curva de la variable controlada $c(t)$.

La velocidad de reacción R es el valor de la pendiente de la tangente trazada:

$$R = \frac{\text{incremento de salida}}{\text{intervalo de tiempo de magnitud } 1}$$

El retraso L es el intervalo que va desde el momento de la excitación (escalón) hasta el punto en donde la línea tangente corta al eje del tiempo. Los ajustes en el controlador se definen de acuerdo al tipo de control empleado; aquí interviene la banda proporcional:

P: B.P. = 100 RL

PI: B.P. = 110 RL, Ti = 3.3 L

PID: B.P. = 83 RL, Ti = 2 L, Td = 0.5 L

Método de la sensibilidad o ciclo límite: Con este método se pueden calcular los parámetros para sintonización a partir de la siguiente prueba:

1. En el controlador se fijan el tiempo de integración Ti al máximo y el tiempo de derivada Td al mínimo; La banda proporcional se fija en el máximo, y se pone el controlador en automático (malla cerrada); se ajusta poco a poco la banda

proporcional hasta lograr que la salida presente una oscilación sostenida ante el mínimo cambio en el punto de ajuste.

2. Cuando se logra la oscilación, se debe anotar el valor de banda que la causa, llamada banda proporcional límite, B.P.u. Registrando la respuesta de la oscilación en un graficador, se mide su período, Pu.

3. De los datos anteriores se calculan los parámetros de ajuste en el controlador que dan una respuesta con amortiguamiento de 0.25, aproximadamente:

$$P: B.P. = 2 B.P.u.$$

$$PI: B.P. = 2.2 B.P.u. \quad T_i = 0.83 P_u.$$

$$PID: B.P. = 1.6 B.P.u., \quad T_i = 0.5 P_u, \quad T_d = 0.125 P_u.$$

Cabe aclarar que ambos procedimientos presentan sus limitaciones, ya que fueron diseñados a partir de las características de diversos lazos de control de procesos industriales, por lo que pueden haber procesos en donde son inaplicables. Aparte de esto, algunos procesos no pueden trabajar en condiciones de oscilación aunque sea producida durante una prueba. Por esta razón se optó por la sintonización empírica o

de ensayo y error en las pruebas con controladores; la sintonización empírica consiste en los siguientes pasos, adaptados al tipo de controladores con los que se trabajaron:

1. Ajustar la perilla de ganancia proporcional al máximo valor estable donde no oscile el sistema.
2. Ajustar la perilla de repeticiones por minuto al máximo número de repeticiones estable, sin oscilaciones. Aquí cabe destacar la relación del tiempo integral o de integración T_I y las repeticiones por minuto, que es la frecuencia de reposición (ya mencionada en el tema 3, en la parte referente a controlador):

$$F.R. = \frac{1}{T_I} \text{ [rep/min]}$$

3. Si hay oscilaciones en el sistema, eliminarlas disminuyendo el ajuste del parámetro que los provocó (por ejemplo, disminuir ganancia excesiva).

Durante la sintonización empírica, hay que dar al sistema de control tiempo de estabilizarse después de cada ajuste; si la oscilación no se puede eliminar por completo, hay que sintonizar para la mínima frecuencia y amplitud, reduciendo la oscilación al mínimo.

A continuación se expondrá la operación global de la planta, primero con las condiciones en que debe de estar antes del funcionamiento, y luego por cada lazo de control.

6.3.- OPERACIÓN DE LOS LAZOS DE CONTROL EN MODO AUTOMÁTICO.

Acciones previas para funcionamiento de la planta piloto de tipo industrial.

Primero se echa a andar el compresor de aire para alimentar al sistema neumático de la planta piloto, el cual está compuesto por el compresor mismo, las válvulas - actuadores solenoides, los actuadores de diafragma y la tubería plástica de poliflow que los interconecta. El compresor deja de funcionar cuando ya hay suficiente aire para alimentar al sistema neumático; para ello se debe verificar que la válvula de salida del compresor está abierta para poder dar la alimentación y que no haya fugas en cualquier parte de la tubería; el compresor debe de permanecer conectado, para arrancar cuando la provisión de aire se acabe con el uso del sistema y se reponga. Luego de lo anterior se busca el tomacorriente de la planta piloto, la cual está dentro del gabinete de la botonera y se coloca en cualquier contacto disponible de 127 V DC, para 3 patas, de los cuales hay en el laboratorio de Control Analógico. Se enciende a la planta piloto por medio de su interruptor general y deben encenderse su lámpara indicadora, y una de las de los interruptores de nivel. Para un funcionamiento eficiente de éstos, el tanque abierto FA-01 debe estar lleno de agua y el tanque cerrado FA-02 debe estar casi vacío, de modo que la lámpara indicadora del interruptor de nivel LS-01 (LL) se encuentre prendida. También debe checarsé que ningún foco de la botonera esté fundido ya que

puede interferir en el funcionamiento de los interruptores de nivel como se verá en la parte para control On/Off. A su vez, los controladores deben activarse, ésto se refleja en el medidor de desviación de cada uno, cuya aguja indicadora se desvía hacia la izquierda (proceso bajo punto de ajuste) lo cual indica que no hay proceso aún. Si la aguja está en punto de ajuste para esta condición en un controlador, quiere decir que su fusible está fundido, y puede tener un problema de corto circuito. Después de comprobar que no hay problemas, la planta piloto está lista para usarse en cualquiera de los lazos de control presentados que se quiera configurar. Para la implementación de cada lazo de control se utilizan cables tipo banana macho - banana macho para interconectar entre sí a sus respectivos elementos de una manera muy sencilla en la botonera de la planta.

Sistema de control On/Off. Después de checar el correcto funcionamiento de la planta con las acciones previas, primero se llena el tanque FA-01 a casi toda su capacidad para evitar derrames, luego se pone el interruptor de la bomba BA-02 en la posición de remoto, y por medio de cables banana - banana (macho) se conecta la entrada remota de BA-02 con la salida HL del interruptor de nivel LS-02, positivo con positivo y negativo con negativo; acto seguido, se pone el interruptor de la bomba BA-01 en la posición de local, y se activa con su botón verde de arranque. Como ya se explicó en los temas 2 y 5, al llegar el agua al nivel superior dentro del tanque FA-02, se activa LS-02, la cual arranca a la bomba BA-02. Al ocurrir ésto, se desactiva el interruptor de nivel LS-01 y se apaga su lámpara LL, para que en el momento de la

conmutación, se active LS-02, prenda su lámpara HL y arranque a BA-02; en las condiciones normales de operación global de la planta piloto para éste caso lo anterior es lo que debe de ocurrir. Si alguno de los focos de las lámparas indicadoras de los interruptores de nivel está fundido, no funcionará su interruptor de nivel correspondiente, puesto que el foco está conectado en serie con el relevador del interruptor. Si por alguna razón el nivel de agua está a la mitad del tanque FA-02, no deberá ponerse a funcionar el sistema de control On/Off, porque empezará a oscilar, activándose cada uno de los interruptores al menor cambio del nivel de agua; por lo tanto, se deberá drenar a FA-02, de modo que quede lleno FA-01 como la condición inicial correcta. El sistema de control On/Off es parte fundamental de casi todos los lazos de control, por lo que en primer lugar se debe verificar su correcto funcionamiento.

Como ya se comentó en el tema 2, la válvula solenoide SV-01 es utilizada únicamente como perturbación para el sistema de control On/Off; sin embargo, cabe destacar una característica importante del funcionamiento de este control, cuya explicación se dejó precisamente para este tema:

Viendo la lista de equipo e instrumentos en el tema 2, se notará que la bomba BA-01 es dos veces más potente que la bomba BA-02, lo que implica que el flujo desde FA-01 hacia FA-02 es más rápido si se abre la válvula solenoide SV-01, mientras que la válvula de control FV-01 se mantiene cerrada. En este caso el tanque FA-01 se vacía

rápidamente, y la bomba BA-02 no puede drenar el líquido del otro tanque lo suficientemente rápido, ocasionando que entre aire a la bomba BA-01, haciendo que trabaje en vacío y se dañe.

Para el correcto funcionamiento del control On/Off con respecto a la conducción del flujo, solamente se utiliza a la válvula de control FV-01. Para aumentar o disminuir su apertura, se conecta la entrada de su convertidor FY-01 a la salida de uno de los controladores de la planta, que se pone a funcionar en manual (haciendo la conexión + con + y - con -); a continuación se oprime el botón rojo del panel frontal del controlador para aumentar su salida de corriente, que debe ser indicada por el medidor de salida del controlador. Como la válvula FV-01 es de acción inversa, tiene que abrirse al sentir el aumento de presión debido al aumento de la corriente recibida del controlador. El fabricante no dió datos respecto al flujo correcto de funcionamiento del control On/Off, por lo que se hizo una prueba de él para una abertura de 100% de FV-01; en este caso también el flujo de FA-01 a FA-02 es demasiado rápido para que el control pueda regresar el agua al tanque FA-01; para esta prueba, el rotámetro FI-01 dió una lectura de flujo de 15 GPM aproximadamente. Con ésto, se hicieron otras pruebas similares reduciendo gradualmente la apertura de la válvula FV-01 para disminuir 1 GPM en cada prueba, tomándose como referencia las lecturas en el rotámetro FI-01. Se concluyó, que el máximo flujo en que el control On/Off funciona correctamente, es de 10 GPM; para este flujo el medidor de salida del controlador indica 60% (recordando que 0% equivale a una salida de corriente del controlador de 4mA y 100% equivale a una salida

de corriente del controlador de 20 mA). Para este flujo, el drenado del tanque FA-02 es lento, pero no hay peligro de que se vacíe el tanque FA-01, el cual ahora se va llenando debido a la correcta función del control On/Off. Es importante tomar en cuenta que el control On/Off funciona correctamente para dicho flujo, que va del tanque FA-01 al tanque FA-02 y para flujos menores, y que debe considerarse para todo aquél sistema de control que tenga al control On/Off como parte fundamental de sí mismo; tal es el caso del control PI y del control en cascada.

Control con los controladores electrónicos. Para controlar a la planta piloto por medio de los controladores, hay que caracterizarla primero:

1. La planta piloto es un sistema multicapacidad. Sólo 2 capacidades de la planta piloto son las dominantes: los tanques FA-01 y FA-02, que son capacitancias hidráulicas.
2. La planta tiene un tiempo muerto o retraso por transporte, el cual puede ser detectado al activar la bomba BA-01, observando el tiempo en que responde el flotador del rotámetro FI-01.
3. La planta tiene perturbaciones, que son las válvulas solenoides y el mismo control On/Off al conmutar.

La determinación de la acción de control (P, PI o PID) para el controlador depende de las características dinámicas de la planta y proceso en ella a controlar (flujo, nivel, presión o temperatura). Para la caracterización se graficó la respuesta de la planta a malla abierta, para ella se utilizó el ramal de la planta donde recircula el agua al tanque FA-01 por medio de la bomba BA-01; ésto se logra bloqueando las válvulas V-09, V-10, SV-01 y SV-02. Hecho lo anterior, se configura en la botonera de la planta el mismo lazo de control del ejemplo del apartado "acción directa o inversa" del tema 5 guiándose por las figuras 34 y 35, ya que fue utilizado dicho ejemplo para la determinación de la acción de un controlador y para la respuesta en malla abierta. La única diferencia con la figura 34 es que en la entrada del controlador se conecta en paralelo un graficador para registrar la respuesta $c(t)$; con el controlador en manual, por medio de sus botones de aumento/disminución de corriente de salida (rojo y amarillo) se ajustó el convertidor FY-02, para que por medio del actuador - válvula FV-02 se ajustara el flujo a 5 GPM (valor elegido arbitrariamente) tomando como referencia la lectura proporcionada por el rotámetro FI-01. Después del ajuste en manual del flujo deseado se apagó la bomba y se encendió al graficador; la entrada a escalón para el sistema de control a malla abierta fue una breve pulsación al botón de arranque de BA-01 activando simultáneamente al graficador.

La respuesta obtenida fue muy parecida al de un sistema de primer orden; de acuerdo a las escalas utilizadas por el graficador el tiempo muerto fue $T_m = 0.55$ s y la

constante de tiempo o retraso fue $\tau = 1.14$ s (cifras aproximadas). Comparando con la tabla 2 las características observadas en la respuesta:

Número de capacidades: cualquiera

Velocidad de reacción: moderada.

Constante de tiempo: moderada a grande

Tiempo muerto: pequeño a moderado

Cambios de carga: tamaño y velocidad cualquiera.

La acción de control recomendada es la Proporcional Integral con banda proporcional ancha (ganancia pequeña) y tiempo integral rápido o pequeño (muchas repeticiones por minuto). Se concluye que las características dinámicas de la planta concuerdan con la acción de control PI disponible en los controladores electrónicos. A continuación se explicará la operación global de la planta en cada uno de los casos de los sistemas de control disponibles para la planta piloto.

Sistema de control PI. Se implementa este lazo de control con el controlador electrónico 1, el transmisor FT-01 y el convertidor FY-01, que maneja al conjunto actuador de diafragma - válvula FV-01, tal y como se explicó en el tema 5 guiándose por la figura 34 para las respectivas conexiones con cables banana - banana en la botonera de la planta: La salida (-) del transmisor se conecta con la entrada (+) del controlador, La entrada (-) del controlador se conecta con el polo (-) de la fuente de 24 V D.C. .y

finalmente , para seguridad del lazo, se conecta el polo(+) de la fuente de 24 V D.C. con la salida (+) del transmisor. La salida del controlador se conecta con la entrada de convertidor, (+) con(+) y (-) con (-). Este tipo de conexiones también deben hacerse para cada lazo del control en cascada; en este caso, obviamente la salida del controlador de nivel no se conecta a ningún convertidor.

Antes de poner a trabajar al lazo de control PI, se verifica la condición inicial para el control On/Off y el flujo correcto para su funcionamiento, menor igual a 10 GPM. Al poner en marcha al sistema, se sintoniza el controlador con alguno de los métodos vistos anteriormente y se oprime su tecla de función AUTO para el funcionamiento del lazo a malla cerrada. Para este caso, como el flujo es un parámetro algo conflictivo para controlar, se notará en el medidor de desviación del controlador cómo el sistema se sale un poco del punto de ajuste al transcurrir el tiempo; ésto se resuelve aumentando poco a poco las repeticiones por minuto en la perilla correspondiente del panel de control del controlador. La lectura de flujo del transmisor FT-01 debe ser igual a la lectura que da el rotámetro FI-01, que precisamente mide el flujo que va de FA-01 a FA-02. De acuerdo a la caracterización antes explicada, no conviene usar un sistema de control puramente proporcional; además cabe mencionar que para control de flujo se requiere una banda proporcional ancha.

Sistema de control en cascada. Es el único lazo de control compuesto con su equipo necesario disponible que pudo implementarse en la planta piloto. En este caso cabe hacer notar una importante aclaración:

Para la conexión en cascada del controlador de nivel, la resistencia carga de 560 Ω debe de conectarse en las terminales 13(+) y 4(-) de la tablilla de terminales de dicho controlador, ya que funciona con acción inversa. En el tema 5 se explicó que esa resistencia de carga se conectaba en las terminales 15 y 4 de la tablilla, pero ésta conexión es para el caso de acción directa; por otra parte, las demás conexiones quedan exactamente igual para ambos casos. Si no se hace la consideración anterior (que de hecho no viene en el manual de los controladores utilizados), la señal de punto de ajuste remoto que debe salir del controlador de nivel jamás se activará. Aparte, la conexión en cascada entre controladores no se realiza con cables banana - banana, sino con un par de puentes entre las tablillas de terminales; esto se dejó así porque en los otros lazos de control no existe una conexión similar que amerite la utilización de cables banana - banana. El control de los parámetros nivel y flujo se hace con la acción proporcional - integral, de acuerdo a la caracterización de la planta y tomando en cuenta que para control de nivel se requiere una banda proporcional angosta. Cada lazo de control se implementa en la botonera de la planta tomando como referencia a la figura 34 y a la descripción del párrafo de operación global anterior para el sistema de control PI. Como ya se mencionó anteriormente, el controlador de nivel tiene acción inversa y el controlador de flujo tiene acción directa. Para el lazo de nivel se usa el

transmisor de nivel LT-01 y para el lazo de flujo se utiliza el transmisor de flujo FT-01, el convertidor FY-01 y el actuador - válvula FV-01.

El análisis de lazo y la sintonización se hacen de acuerdo con lo visto para este control en el tema 5. Al poner a funcionar el sistema de control en cascada en manual o malla abierta, se notará que la aguja indicadora del medidor de desviación del controlador de flujo se desvía hacia la derecha (indicando que el proceso está arriba del punto de ajuste) y no responde aunque se aumente o disminuya la corriente de salida del controlador de nivel, que precisamente es el punto de ajuste remoto. Dicha situación no quiere decir que el controlador de flujo funcione mal, sino que, la variación del punto de ajuste remoto se manifestará exclusivamente en el medidor de salida del controlador de nivel, observándose claramente cuando el sistema de control está en automático (malla cerrada), por ello en este caso tampoco se observa respuesta del medidor de desviación del controlador de flujo. Para cada nivel de agua en el tanque FA-01, hay un correspondiente flujo circulando en la planta, por lo que el punto de ajuste remoto del flujo nunca es fijo, sino que varía hasta que el sistema de control alcanza el punto de ajuste de nivel. Por lo demás, el punto de ajuste del controlador de nivel puede ser ajustado por medio de la correspondiente perilla sin ningún problema.

Como ejemplo, se hizo una prueba estableciendo para los controladores los siguientes valores de sintonización:

-Controlador de nivel : $K_p = 2.5$, $\frac{1}{T_i} = 400 \text{ rep/min}$

-Controlador de flujo : $K_p = 0.2$, $\frac{1}{T_i} = 0.15 \text{ rep/min}$

Dichos valores se definieron usando sintonización empírica o de ensayo y error. Para comenzar, ambos controladores deben de estar en manual; se llenó el tanque FA-01 a casi toda su totalidad para evitar derrames, Por medio del botón rojo del panel frontal del controlador de flujo en manual se abrió la válvula FV-01, hasta aproximadamente 50 % de salida de corriente de dicho controlador para mantener el flujo menor a 10 GPM; se fijó el punto de ajuste remoto de flujo por medio del botón rojo del panel frontal del controlador de nivel al 100% de salida de dicho controlador, e indicándose precisamente en su medidor de salida; hecho esto, se puso el controlador de flujo en automático (el controlador secundario se sintoniza primero). Luego, se fijó el punto de ajuste del controlador de nivel por medio de su perilla de punto de ajuste, se puso a éste controlador en automático e inmediatamente activó la bomba BA-01. La aguja del medidor de desviación del controlador de nivel se deflectó a la derecha indicando que el proceso se disparó arriba del punto de ajuste, para luego estabilizarse poco a poco hacia él. Al mismo tiempo varió lentamente la salida del controlador de nivel y aumentó un poco la salida el controlador de flujo (abriendo un poco la válvula FV-01), para posteriormente disminuir también un poco. Como era de esperarse, el

medidor de desviación del controlador de nivel respondió a las variaciones de nivel, indicando su aguja cuándo el proceso estaba arriba del punto de ajuste y cuándo abajo de él, pudiéndose revisar dichas situaciones en el tubo transparente indicador de nivel líquido que posee el tanque FA-01 (el tanque FA-02 tiene un tubo indicador semejante). Los medidores de salida de ambos controladores respondían al cambio de nivel, variando precisamente el flujo, como también se esperaba. En ningún momento hubo interrupción de flujo en la planta, y el control On/Off respondió satisfactoriamente, ya que el flujo no sobrepasó los 10 GPM en ningún momento.

7.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

El trabajo fue para establecer la integración del sistema de control de la planta piloto, describiendo con ello los principios y características principales de los elementos que intervienen.

Se hizo énfasis en los equipos principales que son los controladores y los transmisores "inteligentes".

Se establecieron y probaron los circuitos de control On/Off, PI y cascada; en cada uno se estableció el procedimiento para asegurar que el funcionamiento de los dispositivos fuera el adecuado, considerando los rangos de medición y operación, calibración, condiciones de acción directa e inversa de los controladores y actuadores, etc. En cada caso las pruebas fueron satisfactorias, observándose el comportamiento esperado con respecto a la estabilización de la operación continua del sistema.

Se establece en el trabajo el procedimiento de arranque y paro del sistema, que se basa en dispositivos de conmutación eléctrica sobre bombas y válvulas solenoides, como condición previa a la operación automática del sistema.

El alcance del trabajo no incluye el análisis detallado o modelado de componentes o circuitos de control, dado que originalmente se especificó la integración del sistema.

Queda como trabajo futuro el analizar o hacer aplicaciones más específicas, respecto a los lazos de control en su operación, sintonización u optimización de acuerdo con las diversas técnicas de la teoría de control, que son muchas y de diversas profundidades.

Se trabajó fundamentalmente en automatizar lazos cerrados de control, no se abordó la automatización de secuencias o lógicas de control.

El trabajo de tesis sirvió en la profundización de las materias de Control Analógico y Medición e Instrumentación (que forman parte de la carrera de Ingeniero Mecánico Eléctricista, área eléctrica - electrónica), ya que se aplicaron los conocimientos aprendidos en un equipo real utilizado por la industria; se reconocieron y configuraron los instrumentos adecuados para la medición de los parámetros flujo y nivel, y se reconoció también la importancia del elemento primario de medición en un sistema cuando se trabajó con las placas de orificio de la planta piloto; también se concluye que los transmisores de cualquier parámetro deben de trabajar bajo cierta escala, que es manejada por el proceso o sistema. Con respecto a Control Analógico, se concluyó que el análisis del lazo de control con respecto a la acción directa o inversa de los elementos finales de control y controladores es imprescindible para su correcto funcionamiento. La relación entre medición, instrumentación y control es muy estrecha, por lo que también se comprendió la importancia de observar estándares con respecto a las señales de comunicación y control (de 4 -20 mA para las eléctricas y de 3 - 15 psig

para las neumáticas), así como su influencia sobre las escalas manejadas por instrumentos y controladores; otra conclusión importante es tener en cuenta siempre acciones de seguridad con respecto a todo el sistema de la planta piloto y quienes lo operan, y considerar los correspondientes dispositivos de protección en cada parte de la planta.

El trabajo sirvió también para adquirir experiencia en el manejo de equipo usado por la industria en base a la interpretación de los respectivos manuales de cada instrumento, y en base a la experiencia y asesoramiento del director de este trabajo; para ésto, es muy importante para el desarrollo profesional la dirección de alguien con experiencia para el óptimo aprendizaje y desempeño.

A la planta piloto de tipo industrial le falta el equipo e instrumentos necesarios para los esquemas de los lazos de control PID, control de relación y control de rango dividido; aparte le faltan los esquemas de control por computadora con su software para autosintonización y aparte software para aplicaciones de análisis de respuesta del proceso a sistemas de control. Paralelamente al uso de computadora, se utilizarían esquemas de control con PLC (Control Lógico Programable), dispositivo muy utilizado por la industria.

Como conclusión final, la utilidad fundamental de la planta piloto de tipo industrial es sin duda el acercar al alumno, al tesista y al profesor al equipo utilizado actualmente

por la industria y aplicar los conocimientos vistos en teoría directamente a un equipo real, cuyas características y estándares deben ser consideradas durante el análisis y funcionamiento de los diferentes sistemas de control que se implementen, para su correcto desempeño.

BIBLIOGRAFÍA.

-Anderson, Norman A., Instrumentation for process measurement and control, Chilton company Radnor, Pennsylvania, 1980.

-Fox, R.W., McDonald, A.T., Introducción a la mecánica de fluidos, McGraw-Hill, México, 1989.

-Ogata, Katsuhiko, Ingeniería de control moderna, Prentice Hall, México, 1983.

-Enciclopedia of instrumentation and Control, Robert E. Krieger Publishing company, New York, 1981.

-Garibay, Jiménez R., Rodríguez Ramírez F., Notas sobre Control Analógico de procesos, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1990.

-Notas del curso "Introducción a la instrumentación y control de procesos" del Departamento de Control de la Facultad de Ingeniería, UNAM, México, marzo de 1994.

-Operation and maintenance instruction manual LD301 intelligent pressure transmitter with control capability, version 3.06, smar, July 1992.

-Directions 420 C.A.T. Controller, Leeds and Northrup.

-Warrick liquid level controls, catalog No. 200B, Warrick controls.