

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

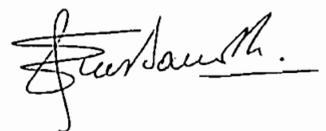
PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO PARA
AJUSTE DE REGULADORES P I D
EN PROCESOS INDUSTRIALES

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERA EN ELECTRONICA Y CONTROL

ESTER JULIA HERNANDEZ ARIAS

MARZO DE 1994

Certifico que el presente
trabajo fue realizado en su
totalidad por la señorita Ester
Julia Hernández Arias.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Patricio Burbano Romero', written in a cursive style.

ING. PATRICIO BURBANO ROMERO

Director de Tesis

DEDICATORIA:

A mis padres y hermanos y en forma muy especial a mi hermana Lilia Stella en reconocimiento a su esfuerzo y sacrificio para ayudarme.

AGRADECIMIENTO:

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a el Ing. Patricio Burbano quien acertadamente me guio en el desarrollo de esta tesis, al Ing. Rafael Fierro, al señor Julio López y las personas que me ayudaron en el desarrollo de toda mi carrera, en forma muy especial a la familia Molina Guzmán.

CONTENIDO

Introducción	1
--------------------	---

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 Alcance y objetivos	3
1.2 Descripción general de los módulos del sistema	6
1.2.1 Módulo TANQUE.C	7
1.2.2 Módulo GRAFICOS.C	7
1.2.3 Módulo MENU_HV.C	8
1.2.4 Módulo PROCESOS.C	8

CAPITULO II: DISEÑO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO

2.1 Diseño del sistema de entrenamiento	10
2.1.1 Componentes del sistema de entrenamiento	10
2.2 Simulación del proceso	13
2.2.1 Modelo de la planta	13
2.2.2 Determinación de la respuesta de la planta	19
2.2.3 Modelo del proceso de control	20
2.2.4 Respuesta del proceso de control	21
2.2.5 Determinación de parámetros	23
2.2.6 Selección del período de muestreo	25
2.2.7 Método de integración numérica	27

2.2.8	Posibles fallas en el proceso	28
2.3	Simulación del controlador PID digital.....	29
2.3.1	Propiedades del regulador PID	31
2.3.2	Consideraciones prácticas	34
2.3.3	Esquemas y algoritmos de control PID	37
2.3.4	Discretización del algoritmo PID	46
2.4	Métodos de ajuste y auto ajuste	49
2.4.1	Métodos de ajuste	50
2.4.2	Ajuste automático de reguladores	54
2.5	Transductor y actuador	56
2.5.1	Transductor de nivel de líquidos	56
2.5.2	Actuador o válvula de control	59
2.6	Simulación del sistema de control	63
2.6.1	Acoplamiento entre el transductor y el control	63
2.6.2	Acoplamiento entre el controlador y la válvula	65
2.6.3	Acoplamiento entre la referencia y el controlador..	70

CAPITULO III: IMPLANTACION DEL SISTEMA

3.1	Implantación del sistema	73
3.2	Módulos que conforman el sistema	75
3.2.1	Módulo TANQUE.C	76
3.2.2	Módulo GRAFICOS.C (Interfaz gráfica)	77
3.2.3	Módulo MENU_HV.C (Interfaz de usuario)	79
3.2.4	Módulo PROCESOS.C (Sistema de control).....	81
3.3	Principales subrutinas	82
3.3.1	Subrutina de simulación del sistema	83
3.3.2	Subrutina de simulación del proceso	87
3.3.3	Subrutina de control pid	90

3.3.4	Subrutina de auto-ajuste	92
-------	--------------------------------	----

CAPITULO IV: RESULTADOS

4	Pruebas realizadas y resultados obtenidos	96
4.1	Pruebas de funcionamiento del programa	96
4.1.1	Cambios de pantallas	97
4.1.2	Cambios de la escala de tiempo	98
4.1.3	Cambio de color de la pantalla de simulación	99
4.1.4	Cambios de tamaño del tanque.....	99
4.1.5	Cambio de la válvula de control	100
4.1.6	Cambio del período de muestreo	100
4.1.7	Cambio del tiempo de retardo	100
4.1.8	Cambio de la presión de la válvula de control	100
4.1.9	Cambio del nivel del líquido o altura	101
4.1.10	Cambio del valor de referencia.....	101
4.1.11	Cambio de los parámetros del controlador K_p T_i T_d	102
4.1.12	Cambio entre manual y automático	102
4.1.13	Cambios varios	102
4.2	Pruebas de simulación del proceso	103
4.2.1	Comportamiento dinámico del proceso.....	103
4.2.2	Control manual	105
4.2.3	Proceso en lazo cerrado	107
4.3	Pruebas de simulación del control del proceso	107
4.3.1	Control PI utilizando el método de Ziegler Nichols	108
4.3.2	Control PI utilizando el método de la curva de reacción	109
4.3.3	Control PI utilizando el método de auto-ajuste ...	111
4.3.4	Método de compensación por cancelación de polos y	

ceros	113
4.3.5 Control PI con ajuste de valores	116
4.4 Pruebas de simulación de fallas.....	116
4.4.1 Falla en el caudal de entrada	117
4.4.2 Falla en la válvula de control	117
4.4.3 Falla en el lazo de control.....	118
4.5 Conclusiones	118
Bibliografía.....	122

APENDICE A: DATOS DEL TRANSDUCTOR Y ACTUADOR UTILIZADOS

1. Especificaciones del transductor de nivel	A-1
2. Especificaciones de la válvula de control	A-9
3. Especificaciones del convertor de corriente a neumática	A-13

APENDICE B: GUIA PARA USO DEL PROGRAMA

1. Requisitos de software y hardware	B-1
2. Ingreso al programa	B-1
3. Modo de utilizar la interfaz gráfica	B-2
4. Opciones del menú de la pantalla de presentación .	B-3
5. Opciones del menú de la pantalla de simulación del del proceso	B-5
6. Opciones del menú de la pantalla de simulación del control del proceso	B-6

APENDICE C: LISTADO DEL PROGRAMA

INTRODUCCION

La incorporación de la computación en los procesos industriales obliga a producir nuevas herramientas que estén de acuerdo con esta etapa del desarrollo tecnológico, de aquí la importancia de este trabajo, el mismo que pretende no solo ser una ayuda en el laboratorio sino también colaborar con el desarrollo de las nuevas y poderosas técnicas de control en los procesos industriales.

El objetivo principal de esta tesis es conseguir una herramienta computacional de simulación que permita entrenar en el ajuste del controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) en un proceso industrial.

Para lograr este objetivo se realizó un programa en lenguaje C, el que permite al usuario, a través de una interfaz gráfica controlar un proceso físico común en la industria, como es el control de nivel en un tanque. Este trabajo se ha desarrollado en cuatro capítulos y tres apéndices que se describen a continuación.

El Capítulo I, describe en forma general el sistema de entrenamiento, y explica el diagrama de bloques de los módulos de los que está compuesto el mismo.

En el Capítulo II, se realiza el diseño del sistema de

entrenamiento, es decir se encuentran las ecuaciones que definen el funcionamiento del proceso, el transductor, el actuador, y el controlador utilizados, así como también el método de auto-ajuste.

En el Capítulo III, primero se hace una descripción detallada de los módulos que conforman el sistema donde se explica la forma en la que se desarrolla la interfaz gráfica y la interfaz de usuario. En este capítulo se presentan las subrutinas de simulación del sistema, simulación del proceso, control PID y auto-ajuste.

El Capítulo IV presenta las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. También se presentan las conclusiones y recomendaciones que provienen de la realización de este trabajo.

El Apéndice A contiene los datos del transductor y del actuador utilizados.

El Apéndice B es una guía para el uso del programa.

En Apéndice C se incluye el listado del programa.

CAPITULO I: GENERALIDADES

- 1.1 Alcance y objetivos 3
- 1.2 Descripción general de los módulos del sistema 6
 - 1.2.1 Módulo TANQUE.C 7
 - 1.2.2 Módulo GRAFICOS.C 7
 - 1.2.3 Módulo MENU_HV.C 8
 - 1.2.4 Módulo PROCESOS.C 8

1.1 ALCANCE Y OBJETIVOS

Existe una gran cantidad de procesos industriales en los que se requiere mantener un nivel de fluido H constante, tales como tanques de reacción o mezclas, calderos de generación de vapor, en una mayor escala los reservorios o tanques de distribución y planificación de fuentes de agua, etc.. Por ello, el control del nivel de fluidos es considerado uno de los problemas básicos en control de procesos industriales.

La constante de tiempo en sistemas de nivel de fluidos es relativamente grande. Es usual encontrar constantes de tiempo de varias horas y aún días. Por lo tanto, un sistema de simulación es considerado de gran utilidad para el análisis de dicho proceso.

La industria moderna busca un mayor grado de automatización que le permita obtener mejores resultados en cuanto a la calidad de sus productos, seguridad tanto del personal como de los equipos; y por supuesto, menores costos de producción que le aseguren un buen nivel de competencia tanto en el País como en la Región Andina. Para esto, la industria requiere utilizar las nuevas tecnologías disponibles y contar con un personal técnico adecuadamente entrenado. De allí, se ve la necesidad de desarrollar herramientas computacionales que asistan en el proceso de entrenamiento del personal.

En la actualidad la nueva tecnología electrónica digital ha ido poco a poco reemplazando a la tecnología analógica; de igual

forma: el desarrollo de la industria del hardware y software permite usar computadores personales de bajo costo en tareas de control, supervisión y simulación, con la consecuente ventaja que ello brinda en cuanto a costos, seguridad y versatilidad.

Además, considerando que el regulador PID ha sido utilizado en ambientes industriales por décadas, ya sea en su forma convencional o con ciertas variaciones; y, que en la actualidad se dispone en el mercado de controladores PID digitales, que están sustituyendo a los analógicos, es importante, tener una herramienta de simulación que permita al personal técnico de una planta entrenarse en la operación de este dispositivo cuando es conectado a un proceso industrial.

El objetivo de esta tesis es el de obtener una herramienta de computación versátil en la que se pueda: simular el funcionamiento de un proceso comúnmente encontrado en la industria cuando se le ha conectado un regulador digital PID, como es el caso del control de nivel de un tanque. Se dará énfasis a la interfaz gráfica la cual permitirá observar todos los componentes que conforman el proceso real y la variación de las variables involucradas en el mismo, mostrando como actúan estas variaciones en el tanque y el efecto que producen en las variables que intervienen en el proceso en un diagrama de porcentaje de la amplitud versus tiempo. De esta forma se pretende que el usuario tenga la información cualitativa y cuantitativa necesaria para una mejor comprensión del sistema, que dará como resultado un mejor control.

Ya que todo proceso real esta sujeto a diversas contingencias o fallas de carácter interno o externo, la simulación considerará este importante hecho; es decir, se incluirá un conjunto de fallas, las mismas que pueden ser introducidas en el proceso, en cualquier instante, por el usuario. Así se podrá observar como estas fallas se propagan por el sistema y tomar las medidas de seguridad pertinentes en cada caso.

Para que la simulación represente de mejor forma el proceso real, se utilizarán las características de transductores disponibles.

Finalmente, la tesis considera la simulación de un regulador PID digital, presentando en pantalla una imagen de como luce un regulador comercial, sobre el cual se puede observar la variación del valor de referencia (set-point), la variable del proceso, la salida del controlador y permitirá además el ajuste de sus parámetros K_p , T_i y T_d , y el cambio a la forma manual o automática. También se incluye una rutina para autoajuste del regulador PID.

La interfaz de usuario permitirá un adecuado ambiente de trabajo mediante la comunicación del programa con el mundo exterior de una manera fácil y versátil.

El programa será desarrollado en lenguaje "C" y bajo el sistema operativo DOS.

1.2 DESCRIPCION GENERAL DE LOS MODULOS DEL SISTEMA

La figura 1.1 presenta un diagrama de bloques de los módulos del sistema de entrenamiento.

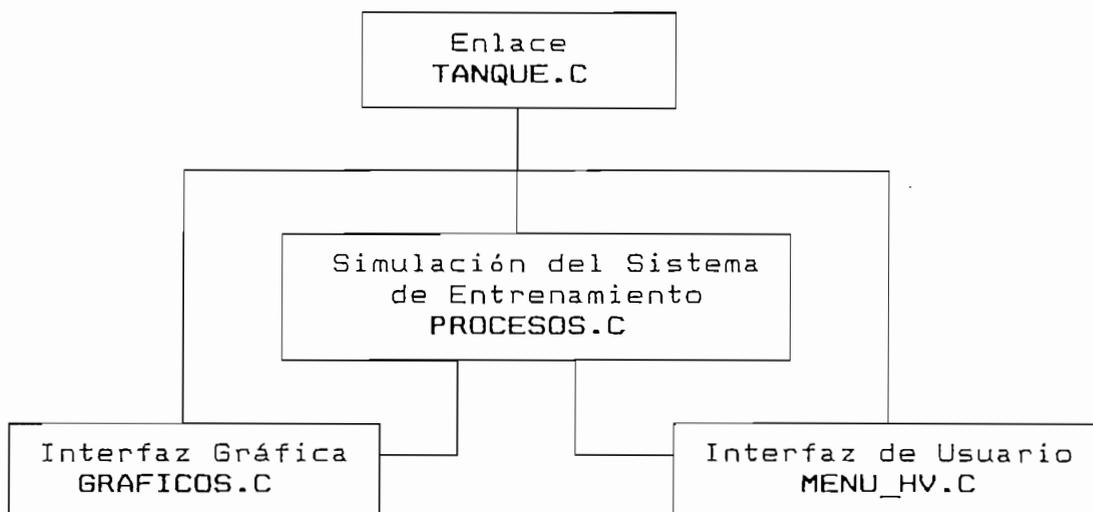


Fig. 1.1 Diagrama de bloques de los módulos del sistema.

Para el desarrollo del programa que realiza la simulación se consideró como partes fundamentales del mismo: los elementos que conforman el sistema de control del proceso, la representación gráfica de los mismos en la pantalla del computador y la forma de operar el sistema desde el teclado del computador de la misma manera como se haría en la planta. Vista así la simulación puede realizarse en tres partes: simulación del sistema de entrenamiento, interfaz gráfica e interfaz con el usuario. Estas tres partes dan origen a la estructura modular que conforma el sistema de simulación en estudio.

Cada módulo esta formado por un conjunto de funciones que persiguen un objetivo determinado. A continuación se describe en forma general cada uno de los módulos.

1.2.1 Módulo TANQUE.C

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 1.1 el módulo TANQUE.C es el encargado de interconectar los módulos que componen el sistema de entrenamiento con la ayuda del archivo de enlace entre módulos TANQUE.MAK; así como también se encarga de hacer el sistema ejecutable ya que en el se encuentra la función `main()`, función principal en el lenguaje "C", que se encarga de ejecutar las funciones que por su intermedio se utilicen; y también de inicializar el modo de video gráfico.

1.2.2 Módulo GRAFICOS.C

En este módulo se agrupan las funciones que grafican en la pantalla del computador los diferentes componentes del sistema, tratando de representar de la forma más clara posible un controlador comercial PID y el proceso físico con todos los elementos que lo conforman, utilizando las normas ISA [Ref.1] de código y símbolos para la representación gráfica de los instrumentos de medición y control.

Este módulo también contiene las funciones que adecuan el

ambiente de trabajo en la parte de presentación y estética.

De esta forma las funciones de este módulo realizan la interfaz gráfica que muestra en la pantalla del computador la simulación del proceso que permite el entrenamiento en el ajuste de reguladores PID.

1.2.3 Módulo MENU_HV.C

En este módulo se agrupan las funciones que diseñan el sistema de comunicación entre el usuario y el computador. De acuerdo a la tendencia actual el sistema de comunicación utilizado esta diseñado para funcionar a través de menús horizontales y verticales los que mediante su utilización dejan seleccionar o variar las características tanto del proceso como del controlador.

Estas funciones permiten al usuario activar, por medio de teclas de selección, el menú principal ubicado permanentemente en el extremo superior derecho de la pantalla, y sus respectivos submenús. La interfaz de usuario facilita el uso del programa por tener un sistema de comunicación semejante al que emplean los paquetes de computación más utilizados.

1.2.4 Módulo PROCESOS.C

Este módulo agrupa las funciones que realizan la simulación del

sistema de entrenamiento, desarrollando todas las rutinas que realizan la simulación del proceso, del regulador PID, de las fallas, la representación gráfica de las variables de interés en el tiempo, la rutina de auto-ajuste y las funciones que son parte y complemento de las anteriores.

CAPITULO II: DISEÑO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO

2.1	Diseño del sistema de entrenamiento	10
2.1.1	Componentes del sistema de entrenamiento	10
2.2	Simulación del proceso	13
2.2.1	Modelo de la planta	13
2.2.2	Determinación de la respuesta de la planta	19
2.2.3	Modelo del proceso de control	20
2.2.4	Respuesta del proceso de control	21
2.2.5	Determinación de parámetros	23
2.2.6	Selección del período de muestreo	25
2.2.7	Método de integración numérica	27
2.2.8	Posibles fallas en el proceso	28
2.3	Simulación del controlador PID digital.....	29
2.3.1	Propiedades del regulador PID	31
2.3.2	Consideraciones prácticas	34
2.3.3	Esquemas y algoritmos de control PID	37
2.3.4	Discretización del algoritmo PID	46
2.4	Métodos de ajuste y auto ajuste	49
2.4.1	Métodos de ajuste	50
2.4.2	Ajuste automático de reguladores	54
2.5	Transductor y actuador	56
2.5.1	Transductor de nivel de líquidos	56
2.5.2	Actuador o válvula de control	59
2.6	Simulación del sistema de control	63
2.6.1	Acoplamiento entre el transductor y el control	63
2.6.2	Acoplamiento entre el controlador y la válvula	65
2.6.3	Acoplamiento entre la referencia y el controlador..	70.

2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO

El sistema de entrenamiento diseñado realiza la simulación del control de nivel de agua en un tanque conectado a un regulador automático, considerando las posibles fallas que se presentan en el proceso. La simulación se interconecta con una interfaz gráfica en la que se pueden distinguir cuatro partes esenciales como se observan en la figura 2.1. La primera ubicada en el extremo superior izquierdo muestra el diagrama de porcentaje de amplitud de las variables involucradas en el proceso versus tiempo y el valor de las mismas; la segunda parte es la representación del proceso físico con la interacción de los componentes que conforman el sistema; en la tercera parte se ubican los menús que realizan la interfaz de usuario; y, la cuarta parte es la representación gráfica del regulador PID digital en el cual se puede observar la medición de la variable de salida "VS", la variable manipulada "VM", la referencia "RE"; el valor de los parámetros de ajuste del regulador como son: constante proporcional K_p , tiempo integral T_i y tiempo derivativo T_d , y el modo de operación, manual o automático.

2.1.1 Componentes del sistema de entrenamiento

El sistema está compuesto de: un tanque de almacenamiento de sección transversal constante "A" al cual ingresa un caudal de entrada "q_i" a través de una válvula manual; un transductor de

PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO PARA AJUSTE DE REGULADORES P I D

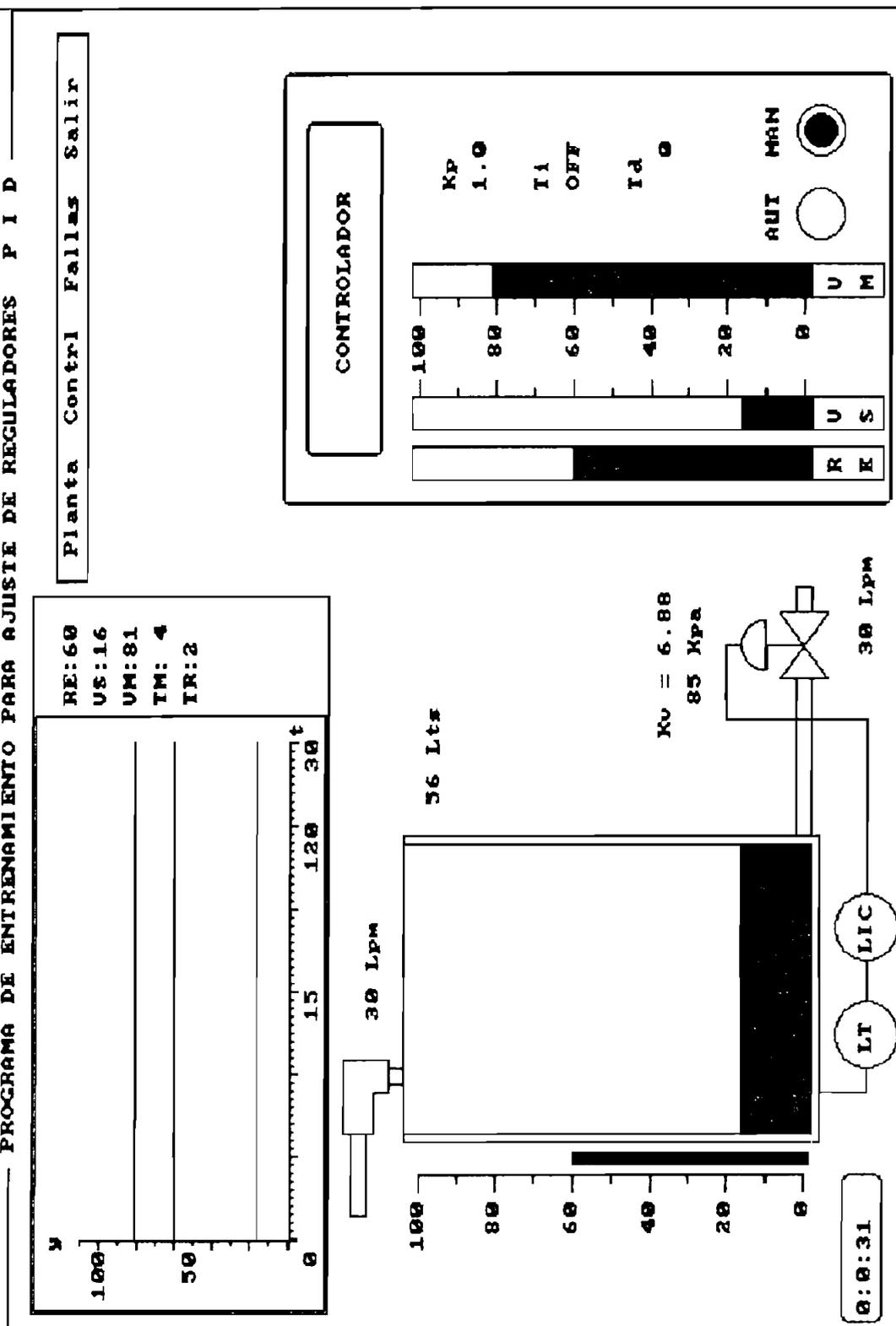


Fig. 2.1 Interfaz gráfica

nivel "LT" que mide la altura "h" del agua; un controlador indicador de nivel "LIC"; y, una válvula de salida sobre la que se ejerce la acción de control que determina el caudal de salida "qo", como se muestra en la figura 2.2.

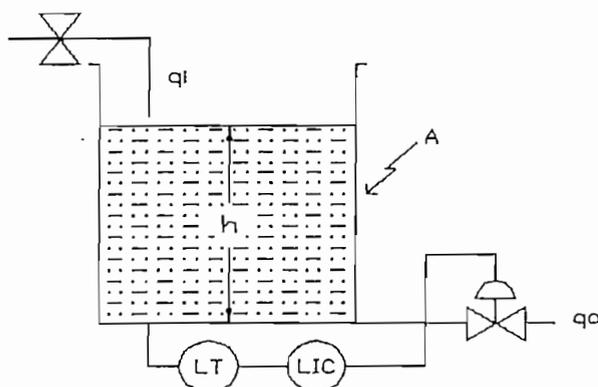


Fig. 2.2 Componentes del sistema a ser simulado.

Los componentes del sistema y las variables involucradas en el mismo se encuentran representados en el diagrama de bloques de la figura 2.3. El CONTROLADOR representa al controlador PID y al indicador de nivel (LIC), El ELEMENTO FINAL DE CONTROL es la válvula de salida sobre la cual se aplica la señal de control, el PROCESO lo constituye el tanque con su respectiva entrada y salida de agua y el bloque de MEDIDA Y TRANSMISION corresponden al transductor y transmisor de nivel (LT).

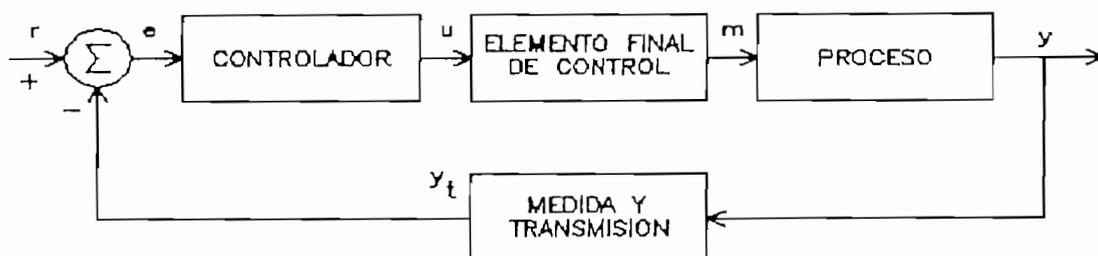


Fig. 2.3 Diagrama de bloques del sistema.

Donde:

e = error que resulta de comparar la variable controlada y , que es el nivel de salida h con el valor de referencia r , que es el nivel deseado H .

u = señal de salida del controlador a la válvula de control, que es la presión p_0 (variable manipulada).

m = caudal del fluido de control, que es q_0 .

y = variable de salida o variable controlada, que es el nivel de salida h .

y_t = señal de salida del transmisor.

2.2 SIMULACION DEL PROCESO

En esta parte se encuentran las ecuaciones que describen la dinámica de la planta, esto es el tanque, con su respectivo caudal de entrada y de salida a través de las válvulas respectivas.

2.2.1 Modelo lineal de la planta.

En los procesos industriales los sistemas de flujo de fluidos en tuberías y tanques se representan por ecuaciones diferenciales no lineales. El siguiente análisis busca conseguir un modelo lineal, a partir del modelo no lineal del proceso de control de nivel de líquidos que se indica en la figura 2.4.

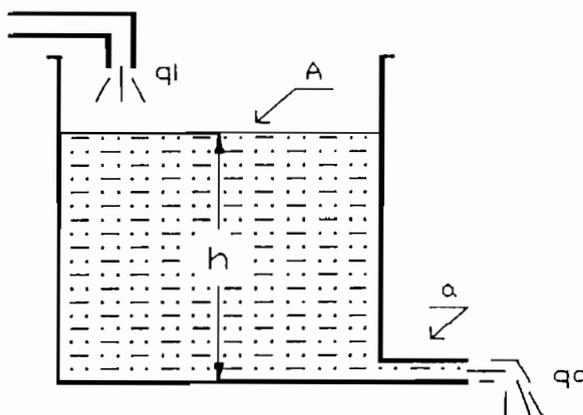


Fig. 2.4 Tanque de almacenamiento.

Donde:

h = Altura de nivel en el tanque [m].

a = Area transversal de la válvula de desfogue [m²].

q_i = Caudal de entrada al tanque [m³/s].

q_o = Caudal de salida del tanque [m³/s].

A = Area transversal del tanque [m²].

Realizando un balance de flujos se tiene:

Caudal de entrada = Caudal de almacenamiento + Caudal de salida

$$q_i = q_c + q_o \quad [2.1]$$

El caudal de salida a través de una válvula es proporcional al área transversal de desfogue por la velocidad de paso del fluido es decir:

$$q = a * v \quad [2.2]$$

Donde v es la velocidad del fluido la misma que se calcula de

acuerdo al teorema de Torricelli, (1643) [Ref.3]:

" Si en un recipiente de paredes delgadas se abre un orificio pequeño la velocidad con que sale el líquido por el mismo es igual a la velocidad que adquiriría un cuerpo si cayera libremente en el vacío desde una altura igual a la distancia vertical entre la superficie libre del líquido en el recipiente y el orificio".

La forma de la válvula da lugar a una resistencia que disminuye la velocidad, quedando la velocidad de paso del fluido definida por:

$$v = Cd\sqrt{2gh} \quad [2.3]$$

Donde: Cd = coeficiente de resistencia (descarga) [sin dimensiones].

g = gravedad [9.81 m/s²].

por lo tanto el caudal de salida a través de una válvula se expresa como:

$$q_0 = Cd * a * \sqrt{2 * g * h} \quad [m^3/s] \quad [2.4]$$

Pero, los fabricantes y usuarios de válvulas de control se han visto en la necesidad de normalizar un coeficiente que dependiendo del área de paso y de la resistencia al paso del fluido, represente la capacidad de las válvulas de control. Cuando se trabaja en unidades métricas se utiliza el coeficiente K_v definido por: "caudal de agua (de 5° a 30° C) en m³/h que pasa a través de la válvula a una apertura dada y con

una pérdida de carga de 1 Kg/cm²." (El peso específico del agua en ese rango de temperatura es de 1 kg/dm³). En unidades inglesas se usa el coeficiente C_v.

La equivalencia entre los coeficientes K_v y C_v para válvulas totalmente abiertas es:

$$\begin{aligned} K_v &= 0,86 C_v \quad [m^3/h] \\ C_v &= 1,17 K_v \quad [galones \text{ por minuto}] \end{aligned} \quad [2.5]$$

Consecuentemente el caudal de salida se expresa como:

$$q_D = K \sqrt{h} \quad [m^3/s] \quad [2.6]$$

donde $K = K_v / 3600$ [m³/s], y K_v es un dato del fabricante y representa la capacidad de la válvula, en m³/h.

El caudal de almacenamiento es proporcional a la velocidad de cambio del fluido, es decir a la variación del volumen en el tiempo lo que se expresa como:

$$q_C = \frac{dV}{dt} \quad [2.7]$$

donde V es el volumen del tanque, el mismo que de acuerdo a la relación constitutiva de los componentes del sistema de fluidos es igual a la capacidad C del tanque por la carga hidrostática P como se indica en la siguiente ecuación.

$$V = C * P \quad [2.8]$$

La carga hidrostática se define como:

$$P = \rho * h \quad [2.9]$$

donde ρ es el peso específico relativo del líquido. La capacidad se determina de igualar el volumen del tanque, igual al área A por la altura h , con la ecuación resultante de reemplazar la ecuación 2.9 en la 2.8 como:

$$A = C * \rho \quad [2.10]$$

Siendo agua el líquido considerado en el proceso, cuyo peso específico relativo es igual a la unidad, P es numéricamente igual a la altura h del líquido en el tanque; y considerando la sección transversal constante, la capacitancia C es constante para cualquier carga y también numéricamente igual al área de la sección transversal A . Consecuentemente el caudal de almacenamiento se puede expresar como:

$$q_c = A \frac{dh}{dt} \quad [2.11]$$

Reemplazando la ecuación 2.11 y 2.6 en la ecuación 2.1 se tiene que:

$$q_i = A * \frac{dh}{dt} + K * \sqrt{h} \quad [2.12]$$

$$\frac{dh}{dt} = h' = \frac{q_i}{A} - \frac{K * \sqrt{h}}{A}$$

Las ecuaciones anteriores describen el sistema dinámico en forma no lineal, por lo que se lo linealiza en el punto de

operación

$$h = H \quad y \quad q_i = Q_i \quad [2.13]$$

considerando pequeñas variaciones en q_i , q_0 , y h se tiene que las ecuaciones linealizadas se pueden expresar como sigue:

$$h' = -K_1 * h + K_2 * q_i \quad [2.14]$$

$$K_1 = \frac{K}{2A\sqrt{H}}; \quad K_2 = \frac{1}{A} \quad [2.15]$$

$$q_0 = K_3 h \quad [2.16]$$

$$K_3 = \frac{K}{2\sqrt{H}} \quad [2.17]$$

Considerando condiciones iniciales nulas se obtiene la transformada de Laplace de la ecuación 2.14:

$$sH(s) = -K_1 H(s) + K_2 Q_i(s) \quad [2.18]$$

$$H(s) = \frac{K_2}{s + K_1} Q_i(s) \quad [2.19]$$

luego

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_2}{s + K_1} \quad [2.20]$$

ecuación que conforma la función de transferencia de la planta.

2.2.2 Determinación de la respuesta de la planta

Una vez obtenida la función de transferencia de la forma

$$G(S) = \frac{b_m * S^m + b_{m-1} * S^{m-1} + \dots + b_0}{a_n * S^n + a_{n-1} * S^{n-1} + \dots + a_0} \quad [2.21]$$

donde la correspondiente ecuación diferencial del sistema, es:

$$a_n Y^{(n)} + a_{n-1} Y^{(n-1)} + \dots + a_0 Y = b_m U^{(m)} + b_{m-1} U^{(m-1)} + \dots + b_0 U \quad [2.22]$$

y utilizando la representación del sistema en el espacio de estado, en la forma canónica controlable como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= -\frac{a_{n-1}}{a_n} * x_n - \frac{a_{n-2}}{a_n} * x_{n-1} - \dots - \frac{a_0}{a_n} * x_1 + \frac{1}{a_n} * U \end{aligned} \quad [2.23]$$

donde la ecuación de salida es:

$$Y = b_0 * x_1 + b_1 * x_2 + b_2 * x_3 + \dots + b_{m-1} * x_m + b_m * x_{m+1} \quad [2.24]$$

se puede obtener la respuesta de la planta al evaluar la ecuación 2.24 después de resolver el sistema de ecuaciones diferenciales presentado en la ecuación 2.23.

Consecuentemente, para determinar la respuesta de la planta representada por la función de transferencia de la ecuación

2.20 se tiene que:

$$\begin{array}{lll}
 n = 1 & a_0 = K1 & U = q_j \\
 m = 0 & a_1 = 1 & y = h \\
 & b_0 = K2 &
 \end{array}
 \quad [2.25]$$

De donde

$$\begin{array}{l}
 X1' = -K1 * X1 + q_j \\
 y = h = K2 * X1
 \end{array}
 \quad [2.26]$$

Para encontrar el valor de $X1$ se resuelve la ecuación 2.26 empleando el método de integración de Runge Kutta de cuarto orden, el cual se detalla más adelante. Esta es una aproximación lineal que es útil en la vecindad del punto de operación. Por ello se la utilizará para el diseño del control. La simulación del proceso se hará en base a la ecuación no lineal (2.12) empleando el mismo método de integración de Runge Kutta.

2.2.3 Modelo del proceso de control

La ecuación 2.20 permite realizar la simulación del proceso a lazo abierto y analizar el comportamiento de la planta cuando la válvula de salida está totalmente abierta es decir el caudal de salida q_o depende solamente de la variación de la carga hidrostática o altura h . Pero, cuando la válvula ejerce su acción de control el caudal de salida q_o depende, además de la variación de la carga hidrostática, de la variación porcentual de la carrera del obturador de la válvula como se explica más

adelante cuando se habla del actuador.

La simulación computacional permite utilizar las ecuaciones lineales y no lineales que definen un proceso, es decir sin necesidad de linealizarlas, lo cual garantiza una simulación más real del proceso. Es por esta razón que en este caso se utiliza la ecuación no lineal que describe el proceso para realizar la simulación.

2.2.4 Respuesta del proceso de control

La ecuación 2.1 determina que el caudal de almacenamiento q_c este compuesto de dos partes: el caudal de entrada q_i ; y el caudal de salida q_o , que de acuerdo a la ecuación no lineal 2.6 varia con la raíz cuadrada de la altura "h".

Por otro lado la ecuación diferencial que relaciona el caudal de almacenamiento q_c como entrada, y la altura h como salida o respuesta esta dado por la ecuación 2.27 que se obtiene despejando la derivada de la altura de la ecuación 2.11 y reemplazando la constante K_2 de la ecuación 2.15.

$$h' = K_2 q_c \quad [2.27]$$

De acuerdo a las anteriores ecuaciones la planta se representa con el diagrama de bloques de la fig 2.5.

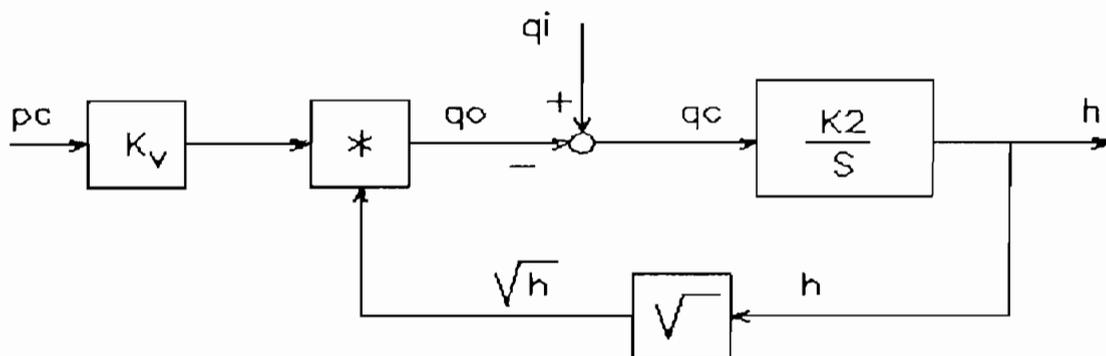


Fig. 2.5 Diagrama de bloques del proceso en forma no lineal

Donde:

h = salida del proceso

q_i = caudal de entrada

q_o = caudal de salida

q_c = caudal de almacenamiento

p_c = porcentaje de la carrera

$*$ = indica que el bloque da el producto de las entradas

$\sqrt{\quad}$ = indica que el bloque da la raíz de la entrada

La respuesta del sistema se obtiene de la solución de la ecuación 2.27, para lo cual se representa la ecuación diferencial en el espacio de estado utilizando la forma canónica controlable expuesta en las ecuaciones 2.23 y 2.24, como:

$$\begin{aligned} x_1' &= q_c \\ y = h &= K_2 * x_1 \end{aligned} \quad [2.28]$$

y donde

$$\begin{array}{lll}
 n = 1 & a_0 = 0 & U = q_c \\
 m = 0 & a_1 = 1 & y = h \\
 & b_0 = K_2 &
 \end{array}
 \quad [2.29]$$

Para encontrar el valor de X_1 se resuelve la ecuación 2.28 empleado el método de integración de Runge Kutta de cuarto orden que se expone en el numeral 2.2.7.

2.2.5 Determinación de parámetros

De las ecuaciones obtenidas anteriormente se observa que existen varios parámetros por determinar o definir entre los que se encuentran la constante de la válvula K_v , el área de la sección transversal del tanque "A", entre otros. Estos parámetros son los que determinan el valor de las constantes de la ecuación del sistema y por consiguiente el funcionamiento de la planta.

Los valores mínimo y máximo del nivel de fluido se han seleccionado de acuerdo al transductor de nivel utilizado en 0.13 m y 0.75 m respectivamente (ver apéndice A). Tomando en cuenta estos límites se ha determinado el punto de operación o trabajo en $H = 0.5$ m, por ser un valor intermedio que permite tener un amplio margen de variación.

Para un mejor estudio del proceso la simulación considera tres tamaños diferentes de tanque determinados por un múltiplo del área de la sección transversal cuadrada A . Los valores

escogidos se detallan en la tabla 2.1.

TABLA 2.1 VALOR DEL AREA DE LA SECCION TRANSVERSAL DEL TANQUE

	TAMAÑO DEL TANQUE		
	PEQUEÑO	MEDIANO	GRANDE
AREA [m ²]	A/2 = 0.045	A = 0.09	2*A = 0.18

También se considera en la simulación del proceso tres tamaños diferentes de la válvula de control escogidos del catálogo del fabricante (ver apéndice A). El tamaño del diámetro de la válvula y los valores correspondientes de K_v se detallan en la tabla 2.2.

TABLA 2.2 DIAMETRO Y K_v DE LAS VALVULAS UTILIZADAS

	VALVULA		
	PEQUEÑA	MEDIANA	GRANDE
DIAMETRO [pulg]	1/2	3/4	1 1/2
$K_v = 0.86 * C_v$ [m ³ /s]	$C_v = 6$ 5.16	$C_v = 8$ 6.88	$C_v = 13$ 11.18

Los diferentes tamaños del tanque y de la válvula determinan nueve procesos de simulación diferentes definidos por los valores de las constantes K_1 , K_2 , K_3 y K_v tabulados en la tabla 2.3.

TABLA 2.3 CONSTANTES DE LAS ECUACIONES DEL SISTEMA PARA LOS DIFERENTES VALORES DE A y $K=K_v/3600$.

$K_v = 5.16$		$K = 0.001433$	
	$K_1 = \frac{K}{2A\sqrt{H}}$	$K_2 = \frac{1}{A}$	$K_3 = \frac{K}{2\sqrt{H}}$
A/2	0.02252266	22.2222	0.00101351
A	0.01126133	11.1111	0.00101351
A*2	0.00563066	5.5555	0.00101351
$K_v = 6.88$		$K = 0.001911$	
A/2	0.03003021	22.2222	0.00135135
A	0.01501510	11.1111	0.00135135
A*2	0.00750755	5.5555	0.00135135
$K_v = 11.18$		$K = 0.003105$	
A/2	0.04879909	22.2222	0.00219595
A	0.02439954	11.1111	0.00219595
A*2	0.01219977	5.5555	0.00219595

2.2.6 Selección del período de muestreo

El período de muestreo es un parámetro muy importante en el proceso de simulación, por esta razón, se deben realizar algunas consideraciones para seleccionar correctamente su valor, ya que éste será utilizado posteriormente en los

procesos de integración numérica y cálculo de la acción de control. Para estimar el período de muestreo es necesario conocer las raíces del polinomio característico $P(S)$, siendo este polinomio el denominador de la función de transferencia del proceso se hace necesario utilizar el modelo lineal de la planta para definirlo. De la ecuación 2.20 se tiene que:

$$P(s) = s + K_1$$

En forma general se puede escribir la k ésima raíz del polinomio característico de la forma:

$$-\frac{1}{\tau_k} \quad [2.31]$$

$$-\alpha + j\omega_k \quad [2.32]$$

donde τ_k es la k ésima constante de tiempo y T_k es el k ésimo período de oscilación ($\omega_k = 2\pi / T_k$).

Si se denomina TR_{\min} a la mínima constante de tiempo y TI_{\min} al mínimo período de oscilación, entonces, el valor adecuado del período de muestreo T , debe ser mucho menor que la menor constante de tiempo del sistema, o el período de oscilación, es decir:

$$T \ll TR_{\min} \quad \text{y} \quad T \ll TI_{\min} \quad [2.33]$$

De la ecuación 2.31 se obtiene que $\tau = 1/K_1$, por lo tanto la menor constante de tiempo TR_{\min} se consigue para el máximo valor de K_1 . Considerando un factor de reducción de 10 el período de muestreo se calcula como $T \leq TR_{\min} / 10$. Este valor se tabula en la tabla 2.4 en función del tamaño del tanque.

TABLA 2.4 PERIODO DE MUESTEO PARA LOS DIFERENTES TAMAÑOS DE TANQUE.

	K1	TR _{min}	T
A/2	0.04879909	20.49	2
A	0.02439954	40.98	4
A*2	0.01219977	81.97	8

2.2.7 Método de integración numérica

El método de integración numérica de Runge Kutta aplicado a una ecuación diferencial definida por:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad [2.34]$$

usa la fórmula recurrente de la ecuación 2.35 para resolverla [Ref. 6].

$$X_{k+1} = X_k + \frac{(K_1 + 2*K_2 + 2*K_3 + K_4)}{6} \quad [2.35]$$

Donde:

$$\begin{aligned} K_1 &= h * f(X_k, t_k) \\ K_2 &= h * f\left(X_k + \frac{K_1}{2}, t_k + \frac{h}{2}\right) \\ K_3 &= h * f\left(X_k + \frac{K_2}{2}, t_k + \frac{h}{2}\right) \\ K_4 &= h * f(X_k + K_3, t_k + h) \end{aligned} \quad [2.36]$$

K1, K2, K3 y K4 son constantes específicas del método y no tienen relación con las constantes de la función de transferencia del tanque.

Un importante parámetro del algoritmo de Runge Kutta es el paso de integración h , el cual debe ser mucho menor que el período de muestreo. En este caso se considera la siguiente relación:

$$h = \frac{T}{10} \quad [2.37]$$

De esta forma, para evaluar la respuesta de la planta en cada período de muestreo se realizan un total de 10 iteraciones.

2.2.8 Posibles fallas en el proceso

Las posibles fallas que se dan en el proceso dependen de los componentes del sistema y de la interconexión entre ellos considerándose como las más importantes las siguientes:

a) Válvula de salida bloqueada.-

Con el bloqueo de la válvula de salida el caudal de salida Q_o depende solamente de la variación de la altura, por consiguiente si Q_o es mayor que el caudal de entrada Q_i , el tanque se vacía; si Q_o es igual a Q_i significa que el sistema esta en equilibrio y Q_o sigue siendo el caudal de salida; y si Q_o es menor que Q_i y la falla permanece por un tiempo suficientemente largo el tanque se llena hasta desbordarse.

b) Corte de la señal que va del transmisor al controlador.-

Esto significa que el controlador no recibe la señal de salida del proceso, pero continua enviando una señal constante de control. Al interrumpirse la señal proveniente del transmisor el voltaje de entrada al controlador es el mínimo lo que significa que para el controlador la altura es la mínima por lo tanto el error es máximo y el controlador abre la válvula por completo, si la falla permanece por un tiempo suficientemente largo el tanque se vacía.

c) No hay caudal de entrada Q_i .-

Si en el momento de la falla la altura h del nivel del líquido es mayor que la referencia el controlador abre la válvula hasta cuando el nivel alcance el valor de referencia y luego la cierra completamente para mantener el nivel deseado; pero si en el momento de la falla la altura h es menor que el valor de referencia el controlador cierra totalmente la válvula y el sistema no puede alcanzar nunca el valor de referencia H deseado.

2.3 SIMULACION DEL CONTROLADOR PID DIGITAL

El controlador PID proporciona un funcionamiento satisfactorio para una gran cantidad de procesos, considerando además que es muy conocido y fácil de implantarlo utilizando tecnología analógica o digital.

El clásico algoritmo del control PID tiene la siguiente forma:

$$u(t) = K_p * \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right] \quad [2.38]$$

y su correspondiente transformada de Laplace es:

$$U(S) = K_p * \left[1 + \frac{1}{ST_i} + ST_d \right] E(S) \quad [2.39]$$

Donde: U es la acción de control

E es el error (referencia - salida)

K_p es la ganancia proporcional

T_i es el tiempo integral

T_d es el tiempo derivativo

En la práctica los actuadores y los instrumentos de medida están limitados en un rango de valores permisibles y a menudo las variables correspondientes son escaladas en el rango de 0 a 100%. Por ejemplo una válvula de control de flujo tiene un valor de 0% cuando esta cerrada y de 100% cuando esta abierta completamente. En los procesos industriales los valores límites normalizados generalmente corresponden de 3 a 15 lbf/m² para sistemas neumáticos, o de 4 a 20 mA para actuadores o transductores eléctricos.

Cuando se introduce un control PID en un proceso industrial hay

que considerar las dificultades que producen cada una de las acciones de control, por ejemplo, el control integral tiene el problema de producir saturación del actuador, en tanto que la acción derivativa permite amplificar indeseablemente el ruido de la planta o de la medición a altas frecuencias. Estas y otras dificultades y la forma de corregirlas se analizan con más detalle en los siguientes numerales.

2.3.1 Propiedades del regulador PID

Considerando el modelo de la planta de la figura 2.6 en el cual $G_1(s)$, $G_2(s)$ están formando la función de transferencia y $P(s)$ es una perturbación indeterminada en la carga. El objetivo del controlador $G_c(s)$ es mantener el valor promedio 'y' de la salida $y(t)$ igual a la referencia 'r' despreciando posibles cambios en $p(t)$.

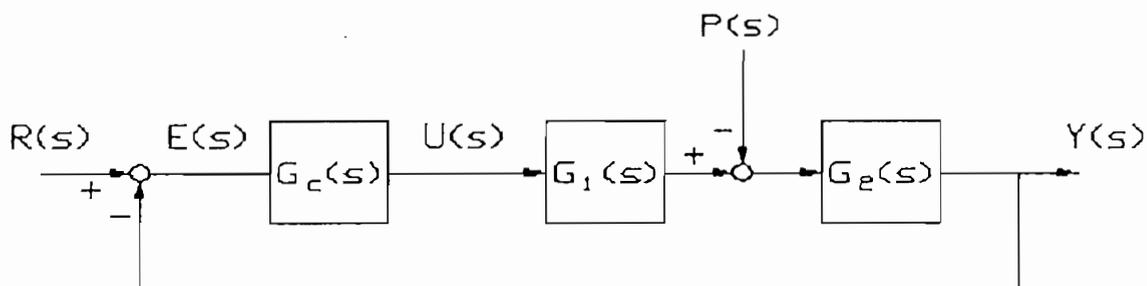


Fig. 2.6 Lazo de control con perturbación en la carga.

Resolviendo para el lazo cerrado se tiene:

$$Y(s) = \frac{G_c G_1 G_2}{1 + G_c G_1 G_2} R(s) - \frac{G_2}{1 + G_c G_1 G_2} P(s) \quad [2.40]$$

Para el caso donde r y p son constantes e iguales a R y P respectivamente, se puede aplicar un control proporcional, entonces $G_c(s) = K_p$, produciendo una salida constante igual a:

$$Y = \frac{K_p K}{1 + K_p K} R - \frac{K_2}{1 + K_p K} P \quad [2.41]$$

donde: $K_1 = G_1(0)$

$K_2 = G_2(0)$

$K = K_1 \cdot K_2$ (ganancia de la planta)

Por consiguiente, con un controlador proporcional, la forma de la salida Y no es igual a R a menos que $K_p \cdot K$ sea muy grande; este problema es conocido como "offset" o error de estado estable.

El offset se elimina si $G_1(0)$ o $G_c(0) = \infty$; esto se obtiene si la función de transferencia tiene al menos un integrador. Como es raro tener una acción integradora en G_1 (más comúnmente en G_2) el control requiere que el mismo $G_c(s)$ contenga un integrador. Por lo tanto si $G_c(s) = 1/(s \cdot T_i)$ se elimina el offset en un tiempo proporcional a T_i . Desafortunadamente, el uso del control integral solo, frecuentemente crea inestabilidad en el lazo cerrado, debido a que el controlador atrasa 90° al ángulo de fase de la planta. Sin embargo, la combinación de los términos proporcional e integral en la forma:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(\frac{1 + sT_i}{sT_i} \right) \quad [2.42]$$

generalmente da una estabilidad al lazo cerrado dependiendo de si T_i es apropiadamente escogido. La respuesta de frecuencia se obtiene de reemplazar $s=j\omega$ en la ecuación 2.42. Este control se comporta como $K_p/(s.T_i)$ a bajas frecuencias, pero como K_p para altas frecuencias donde $\omega.T_i \gg 1$.

La acción derivativa puede ser usada en procesos de control donde hay un excesivo ángulo de retardo de fase (por ejemplo con orden mayor o igual a 3 o con un retardo de tiempo significativo). En la práctica éste se emplea mucho menos que los otros términos, debido a que el ruido de la planta es indeseablemente amplificado a altas frecuencias. En procesos donde el sobreimpulso debe ser evitado, es favorable el uso de la acción derivativa, la que actúa anticipadamente logrando que el valor de la señal de control llegue a ser negativo antes de que la respuesta alcance el valor de referencia.

Con los tres términos el regulador PID puede escribirse :

$$G_C(s) = K_p \left(1 + sT_i + s^2 T_i T_d \right) / sT_i \quad [2.43]$$

este controlador contiene un polo en el origen (para remover el offset) y dos ceros dados por las raíces de:

$$s^2 + \frac{s}{T_d} + \frac{1}{T_i T_d} = 0 \quad [2.44]$$

Al seleccionar T_i y T_d se pueden localizar estos ceros en el

lugar deseado para obtener un funcionamiento satisfactorio.

La estructura del control mencionado esta conectada en cascada con la planta. El control en cascada es usado para: linealizar los efectos de un actuador; o para controlar alguna variable intermedia tal que el lazo de control total sea fácilmente manejado. Un ejemplo de la primera aplicación es el control de posición de una válvula a pasos, la cual vence el juego propio de la válvula. El segundo uso es, en el caso, por ejemplo de controlar la composición de productos en una columna de destilación. Para seleccionar la temperatura de cubetas se usa como una variable intermedia porque la primera variable de salida es típicamente medida con un termómetro con un significativo retardo de tiempo. Usar un control en un lazo interno permite controlar perturbaciones más rápidamente y los reguladores PID pueden ser usados en ambos lazos, pero a menudo el simple control proporcional es suficiente para el lazo interno. Si ambos controladores de los lazos tienen la acción integral es necesario adoptar precauciones especiales en su desaturación (algoritmo incremental).

2.3.2 Consideraciones prácticas

Cuando se aplica un regulador PID a un proceso industrial existen varios puntos importantes que deben ser considerados:

- 1.- La selección de un control de tipo posicional o incremental (ver numeral 2.3.3) depende del tipo de

actuador que se use, y si se desea un control constante $u(t)$ en caso de una falla del controlador.

- 2.- La provisión de operación manual/automática, que permita una transferencia sin rebotes cuando se cambie desde un valor de $u(t)$ seleccionado por un operador para iniciar el control PID. Esto implica que el operador debe asegurarse que la señal con que inicia el control PID no difiera significativamente de su valor manual anterior seleccionado por él.

- 3.- Evitar el "transitorio derivativo" y posiblemente el "proporcional" que aparecería al cambiar una señal paso de referencia $r(t)$. Esta acción grande y brusca de control podría llevar a la planta hacia una región no lineal. El transitorio derivativo se presenta debido a que la respuesta de un sistema, que utiliza la acción de control PD, a un escalón unitario se caracteriza por presentar un menor tiempo de crecimiento, pero un mayor sobreimpulso comparado con un sistema con realimentación de velocidad o donde la acción derivativa actúa directamente sobre la salida $y(t)$ que tiene un mínimo sobreimpulso o mejor estabilidad relativa [Ref.1]. Para evitar el transitorio derivativo, por ejemplo, la acción derivativa solo debería estar en la salida $y(t)$, no en el error, lo cual da:

$$U(s) = K_P (1 + 1/sT_i)E(s) - sT_D Y(s) \quad [2.45]$$

Similarmente, para eliminar el transitorio proporcional hay que hacer que el término proporcional correspondiente

actuó sobre la salida "y", y solamente el término integral actúe sobre el error. Esto no afecta la estabilidad o reducción de la perturbación, que son propias del algoritmo PID, pero podrían hacer lenta la respuesta a cambios tipo paso en la señal $r(t)$ requerida.

- 4.- Utilización de filtros para acondicionamiento (linealización) de las mediciones de la señal $y(t)$ para minimizar el ruido, proveniente de la planta, de las mediciones o de la acción derivativa.
- 5.- Limitación de la amplitud o velocidad de cambio (variación) de la señal de control. Los actuadores tienen inherentes límites de amplitud y, además variaciones límites que son requeridas, por ejemplo para arranque de una planta.
- 6.- Selección local (interna) o remota de la referencia. Si, por ejemplo, el controlador es parte de un lazo interior en una configuración en cascada, su referencia se escoge de acuerdo al lazo externo antes que por el interno.
- 7.- Evitar el uso de integración "recursiva", usando desaturación integral. Si, típicamente durante el arranque, la señal de error se mantiene grande por un tiempo largo, la componente $\int e(t).dt$ se vuelve también grande. Así aun cuando $y(t)$ ha llegado a su referencia $r(t)$, la acción de control permanecería saturada hasta que el término integrador deje de ser recursivo. Esto conlleva

un sobretiro sostenido y muy indeseable. La desaturación puede ser alcanzada si se limita el término de la integral a algún valor aunque la selección del valor que debería ser correcto es discutible. Típicamente se escoge un valor del 100% [Ref.8] en el límite, con el argumento de que la acción de control debería empezar a caer desde su límite cuando el error $e(t)=r(t)-y(t)$ cambie de signo. Esto todavía implica algo de sobretiro (al menos que se incluya también una acción derivativa).

2.3.3 Esquemas y algoritmos de control PID

Los diferentes esquemas de los regulador PID que se pueden utilizarse para implementar un algoritmo de control discreto en un computador digital se describen a continuación:

a) Incremental (velocidad).-

Algunas veces la parte integral en un algoritmo PID es activado externamente del controlador principal. Por ejemplo, una válvula posicionada por los cambios de un motor de pasos, donde la posición de esta depende del número de pasos necesarios o requeridos. Para procesos no críticos (no peligrosos) este hecho incrementa la confiabilidad a falla del controlador, de modo que el eje de la válvula mantiene la última posición lo cual permite que la planta continúe la operación. Esto depende del tipo de planta; en general, la falla del controlador incide en la apertura o cierre de las válvulas de acuerdo a

requerimientos de seguridad predeterminados.

Un algoritmo incremental (de velocidad) se tiene en un motor a pasos. Si un motor a pasos requiere N pasos para recorrer un rango completo ($u(t)=0\dots 100\%$), y si la acción del controlador principal necesita una rapidez $u_1(t)$ de r pasos por segundos, entonces en un intervalo Δt se requiere un número de pasos $r\Delta t$, para dar un cambio (o incremento) ΔS en el número total de pasos S ; esto es,

$$\Delta S = r\Delta t \quad \text{o} \quad S(t) = \sum r\Delta t_i \quad [2.46]$$

Si r_{\max} es la máxima rapidez, correspondiente al 100% de la señal $u_1(t)$ requerida, y $S_{\max}=N$ corresponde al 100% de control máximo $u(t)$, entonces

$$u = \frac{S}{N} \cdot 100\% \quad \text{y} \quad u_1 = \frac{r}{r_{\max}} \cdot 100\% \quad [2.47]$$

tal que:

$$\frac{Nu(t)}{100\%} = \sum \frac{u_1(t) \cdot r_{\max}}{100\%} \Delta t \quad [2.48]$$

en el límite, si $\Delta t \rightarrow 0$:

$$u(t) = \int \frac{r_{\max}}{N} u_1(t) dt \quad \text{o} \quad U(s) = \frac{1}{sN/r_{\max}} U_1(s) \quad [2.49]$$

esto corresponde a un integrador con una tiempo integral N/r_{\max} .

Como la acción de control total entre $e(t)$ y $u(t)$ es PID, el controlador principal debe tener la función de transferencia

$$U1(s) = K'_p (1 + sT_i + s^2 T_i T_d) E(s) \quad [2.50]$$

como indica la figura 2.7

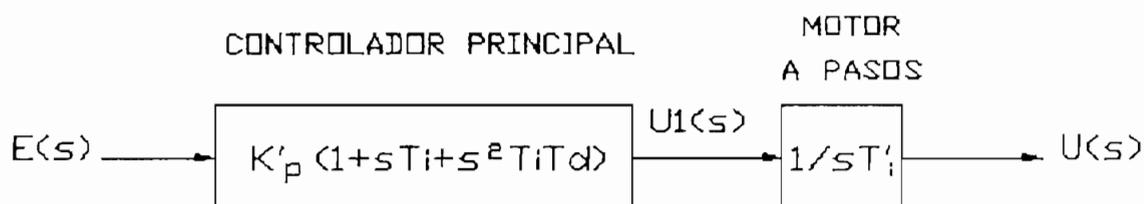


Fig. 2.7 Forma incremental de un controlador PID.

Note que, a pesar de que el motor a pasos parece tener su tiempo integral de T'_i , puede escogerse un tiempo integral arbitrario para el controlador PID total, de tal forma de igualar las ecuaciones:

$$K'_p (1 + sT_i + s^2 T_i T_d) / sT'_i = K_p (1 + sT_i + s^2 T_i T_d) / sT_i \quad [2.51]$$

de donde:

$$K_p = \frac{K'_p T_i}{T'_i} \quad [2.52]$$

Si el motor a pasos tiene una resolución indefinidamente fina

y gran rapidez, el funcionamiento del algoritmo incremental será el mismo que el de la forma posicional usual. Sin embargo la función del motor a pasos es cuantificar los niveles permisibles de $u(t)$, causando posiblemente 'dither' (por consiguiente escoger un N grande) y limitar la rapidez del control a $(r_{max}/N) \cdot 100\%$. Este límite puede ser aceptado y utilizado en plantas lentas; de otra manera r_{max} deberá ser grande, si se tiene un ángulo de atraso considerable hasta llegar al límite. El algoritmo es, en general sensitivo al ruido y deberá usarse un filtro si la acción derivativa es requerida. Este control es interesante cuando se trata de evitar la saturación del controlador.

b) Interactuante.-

Esta implementación permite algunos de los atributos descritos en las consideraciones prácticas expuestas anteriormente. Una de sus partes la constituye el control proporcional integral PI, el cual consiste básicamente de un simple retardo en la realimentación positiva de la forma como se muestra en la figura 2.8 [Ref.8]

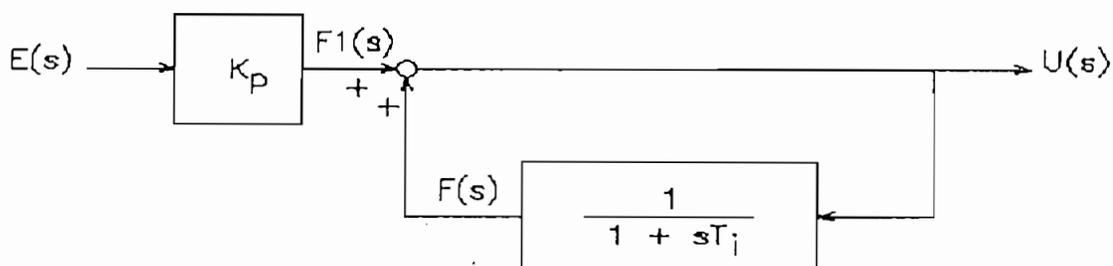


Fig. 2.8 PI con retardo en la realimentación

Del anterior diagrama de bloques se deduce que:

$$\begin{aligned}
 U(s) &= F_1(s) + F(s) \\
 F_1(s) &= K_p E(s) \\
 F(s) &= U(s) 1 / (1 + sT_i) \\
 U(s) &= K_p E(s) + U(s) / (1 + s.T_i)
 \end{aligned}
 \tag{2.53}$$

o aplicando las reglas de algebra para diagramas de bloque se tiene que:

$$U(s) = K_p \left[(1 + s.T_i) / s.T_i \right] E(s)
 \tag{2.54}$$

La configuración interactuante se completa cuando se incluyen al esquema PI anterior, un limitador a la salida: $u_{min} < u(t) < u_{max}$, un interruptor manual/automático, y la acción derivativa, como se muestran en la figura 2.9.

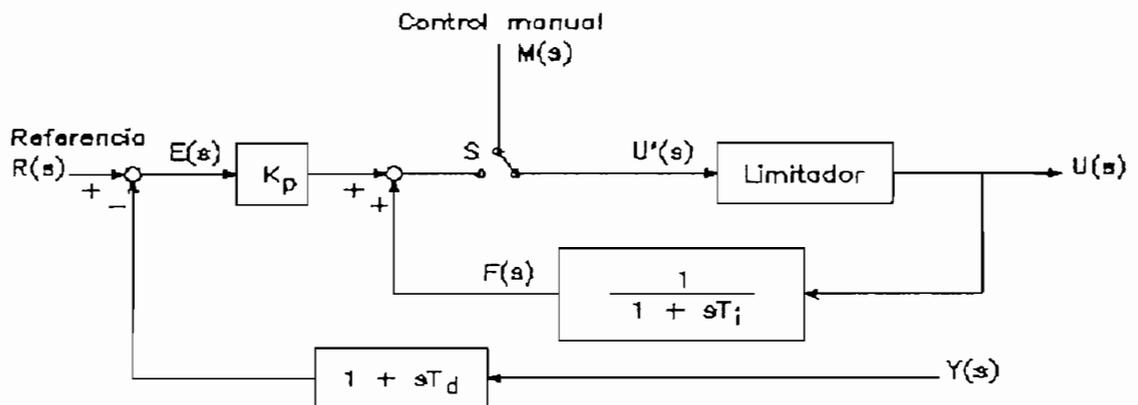


Fig. 2.9 Diagrama de bloques de un PID práctico.

Este arreglo tiene las siguientes propiedades:

1.- Cuando $u'(t)$ esta dentro de su rango lineal y sin límites, entonces $u=u'$, con lo cual la parte proporcional integral se reduce a la forma PI anterior, por otro lado de la figura 2.9 se observa que $E(s)=R(s)-(1+sT_d)Y(s)$, reemplazando esta relación en la ecuación 2.54 se determina el control como:

$$U(s) = K_p \left[(1 + T_i) / s T_i [R(s) - (1 + s T_d) Y(s)] \right] \quad [2.55]$$

$$U(s) = K_p \left[(1 + s T_i) / s T_i \right] R(s) - K_p \left[(1 + 1 / s T_i) (1 + s T_d) \right] Y(s) \quad [2.56]$$

esto significa que la acción PI se aplica sobre el error, pero la acción total sobre "y" esta dada por:

$$U(s) = -K_p \left[(1 + 1 / s T_i) (1 + s T_d) \right] Y(s) \quad [2.57]$$

$$U(s) = -K_p \left[(1 + s T_i) (1 + s T_d) / s T_i \right] Y(s) \quad [2.58]$$

Por consiguiente esta forma de control evita el transitorio derivativo, pero no se inserta completamente en la forma clásica de un regulador PID como el dado por la ecuación 2.39. Sin embargo, el algoritmo da aproximadamente el mismo comportamiento para valores pequeños de T_d . La forma factorada en la ecuación 2.58 puede ser más fácil de ajustar puesto que los ceros están dados por $-1/T_i$ y $-1/T_d$; [Ref.8].

2.- Cuando $u'(t)$ esta fuera de los límites permisibles, el control $u(t)$ se fija al correspondiente valor de corte. Si se la mantiene por algún tiempo (ejemplo, alrededor de 3 a 5 constantes de tiempo T_i) la señal $f(t)$ alcanza el valor límite de $u(t)$. Cuando la salida del elemento de ganancia K_p cambia de signo (es decir, cuando $e(t)$ cambia de signo, si $T_d=0$) $u'(t)$ inmediatamente baja desde el valor límite y de allí $u(t)$ también comienza a bajar; o sea, la propiedad de desaturación integral que se desea. Esto se ha visto que es aún más apropiado cuando $f(t)$ no ha alcanzado un nivel estable, pero nótese que $f(t)$ siempre cae dentro de los límites de $u(t)$.

3.- El interruptor S es el interruptor manual/automático. Si se lo conecta a $m(t)$ la señal de salida del controlador $U(s)$ esta todavía limitada, y si $m(t)$ es constante por un intervalo, $f(t)$ logrará alcanzar su valor (El retardo en el lazo de realimentación que tiene ganancia unitaria $sT_d, y=0$). Un buen operador conmutará a automático cuando $e(t)$ es aproximadamente igual a cero y $y(t)$ es razonablemente constante; en tal caso habrá una transferencia sin rebotes.

El controlador de la ecuación 2.57 es llamado interactivo puesto que al ajustar los valores de T_i y T_d se modifica los tiempos efectivos de integración y derivación que fueron definidos en la ecuación 2.39 la función de transferencia de la ecuación 2.57 puede ser escrita como:

$$K_p \left[1 + s(T_i + T_d) + s^2 T_i T_d \right] / s T_i \quad [2.59]$$

la misma que, cuando es comparada con la forma convencional de la ecuación 2.39:

$$K'_p \left[1 + s T'_i + s^2 T'_i T'_d \right] / s T'_i \quad [2.60]$$

da:

$$\text{tiempo real integral} = T'_i = T_i + T_d$$

$$\text{tiempo real diferencial} = T'_d = (T_i \cdot T_d) / (T_i + T_d)$$

$$\text{factor de ganancia real} = K'_p = K_p (1 + T_d / T_i)$$

c) No interactuante.-

Contrariamente de lo que sucede en la forma interactuante, en la forma no interactuante, al ajustar los valores de T_i y T_d no se modifican los tiempos efectivos de integración y derivación provenientes de la ecuación 2.39.

Para la implementación de esta configuración se usa la estructura que se muestra en la figura 2.10, la misma que tiene la función de transferencia de la ecuación 2.61. Esta configuración conserva las propiedades requeridas por las consideraciones prácticas, conservando el término derivativo en la señal de salida para evitar el transitorio derivativo.

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{s T_i} \right) E(s) - s T_d Y(s) \quad [2.61]$$

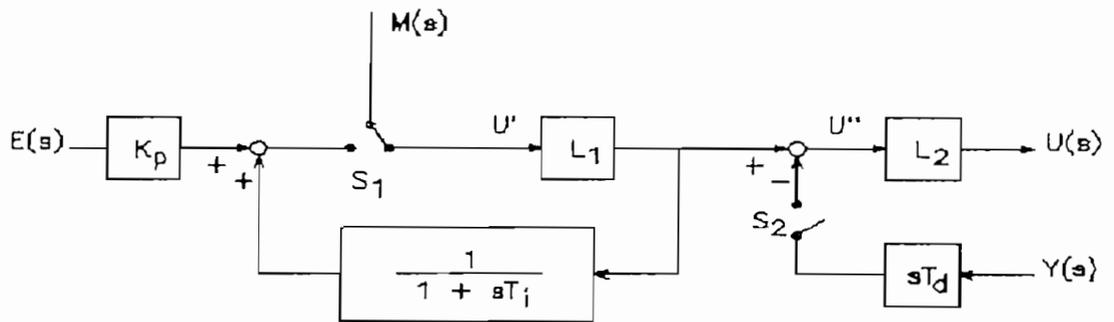


Fig. 2.10 Implantación del PID no interactuante.

L1 y L2 son limitadores: L1 produce la propiedad de desaturación para el término de integración en el primer lazo y limita el valor final del control. L2 podría ser omitido si los límites obtenidos corresponden a los límites prácticos del actuador. Los conmutadores S1 y S2 son para la transferencia automática/manual.

d) No interactuante con componente derivativa filtrada.-

La ganancia de la respuesta de frecuencia del término derivativo crece más allá del límite con el incremento de la frecuencia [Ref.8]. Fuera del ancho de banda normal de la planta los principales componentes de $y(t)$ son el ruido de la medición y el ruido del proceso. Por lo tanto, es necesario poner una restricción en la ganancia derivativa, generalmente se usa un factor de 10.

Esta restricción se puede lograr con un filtro derivativo, de la forma que muestra la ecuación 2.62, que reemplace al término derivativo de la configuración no interactuante. [Ref.8]

$$\frac{sT_d}{1 + \alpha sT_d} ; \quad \text{donde} \quad \alpha = 0.1 \quad [2.62]$$

La función de transferencia de este esquema se define en la ecuación 2.63, la misma que se consigue reemplazando el filtro derivativo de la ecuación anterior en la ecuación 2.61.

$$U(S) = K_p * \left[\left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) E(S) - \left(\frac{sT_d}{1 + \alpha sT_d} \right) Y(S) \right] \quad [2.63]$$

2.3.4 Discretización del algoritmo PID

De las diferentes formas para desarrollar el algoritmo de control se ha utilizado la configuración del controlador PID no interactuante con componente derivativa filtrada, que se muestra en la figura 2.11.

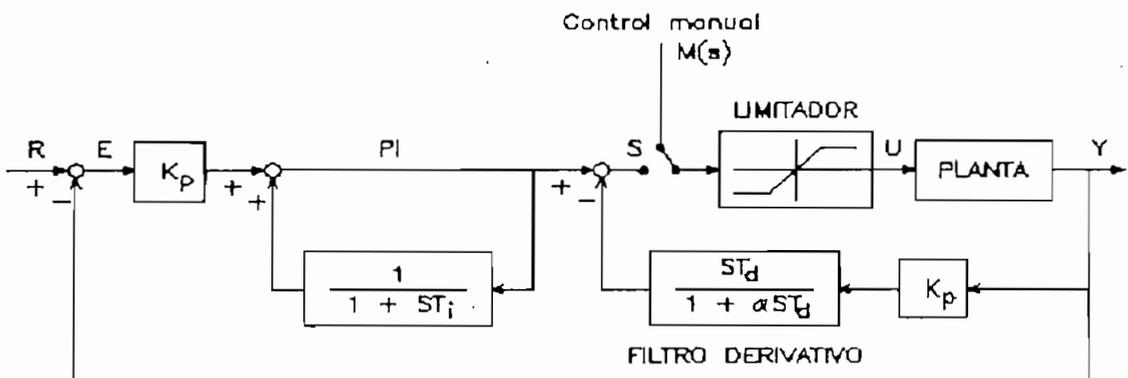


Fig. 2.11 No interactuante con componente derivativa filtrada.

Esta configuración no interactuante permite modificar los

valores efectivos de T_i , T_d y K_p además cumple con las recomendaciones prácticas que permiten una desaturación del actuador (propiedad de desaturación integral) y evitan el transitorio derivativo a la vez que garantizan un menor nivel de ruido con la utilización del filtro derivativo, siendo de esta forma la configuración más práctica a utilizar en procesos industriales.

Para la discretización del algoritmo del controlador PID no interactuante, se traslada la ecuación 2.63 a su correspondiente representación discreta, utilizando el método de integración trapezoidal. Se aplica la siguiente relación conocida como transformada bilineal.

$$S = \frac{2(1-Z^{-1})}{T(1+Z^{-1})} \quad [2.64]$$

Donde T es el período de muestreo.

Empleando la transformada bilineal [Ref.6] al término proporcional integral se tiene:

$$U_{PI}(Z^{-1}) = K' \left(1 + \frac{(1-\beta)Z^{-1}}{1-Z^{-1}} \right) E(Z^{-1}) \quad [2.65]$$

o:

$$U_{PI}(Z^{-1}) = K' E(Z^{-1}) + \left(\frac{(1-\beta)Z^{-1}}{1-\beta Z^{-1}} \right) U_{PI}(Z^{-1}) \quad [2.66]$$

Donde:

Donde:

$$\Gamma = \frac{T_d}{T} \quad [2.73]$$

La ecuación de diferencias que se obtiene de la ecuación 2.72 es:

$$D(K) = \frac{0.2\Gamma}{1+0.2\Gamma} * D(K-1) + \frac{2\Gamma}{1+0.2\Gamma} * [Y(K) - Y(K-1)] \quad [2.74]$$

Finalmente la respuesta del controlador PID es:

$$U_{PID}(K) = U_{PI}(K) - K^I * D(K) \quad [2.75]$$

2.4 METODOS DE AJUSTE Y AUTO AJUSTE

Existen varias técnicas para el ajuste de los parámetros en un controlador PID, es decir K_p (ganancia proporcional), T_i (tiempo de acción integral) y T_d (tiempo de acción derivativo) del controlador. Este ajuste debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación, que satisfaga los criterios necesarios para que el control sea estable.

Para que el acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible, es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado.

2.4.1 Métodos de ajuste

Existen tres métodos fundamentales para ajustar un control PID en función de las características estáticas y dinámicas de la planta.

- Método analítico: Se basa en determinar la ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en el tiempo. Es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales, y la dificultad de obtener datos reales aproximados. Es un método muy laborioso que requiere normalmente el empleo de un computador. En resumen implica modelación de la planta y utilización de dicho modelo para calcular el controlador (simulación).
- Método experimental: Este método basa el ajuste en las características estáticas y dinámicas obtenidas a partir de una medida o de una serie de medidas en el proceso real.
- Método de ensayo y error (tanteo): Requiere que el controlador y la planta estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento se basa en poner en marcha todas las acciones, con valores iniciales o referenciales y ajustarlos poco a poco individualmente hasta obtener la especificación deseada.

Los métodos más utilizados en los procesos industriales para

encontrar los valores de las constantes del controlador son: el método de ganancia límite y el método de la curva de reacción, que corresponden al método experimental, los cuales se describen a continuación.

a) **Método de ganancia límite:**

Este método fue desarrollado en 1941 por Ziegler & Nichols y otorga la facilidad de calcular los tres parámetros del controlador PID, a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del lazo cerrado de control. Se basa en incrementar en forma gradual la ganancia proporcional, con las constantes integral y derivativa en su valor más bajo, mientras se crean pequeños desplazamiento en la señal de referencia, hasta el punto en que el sistema empiece a oscilar de modo continuo. Aquí, se obtiene lo que se denomina ganancia proporcional límite, o ganancia crítica " K_c ". Se toma nota del valor del período crítico " T_c " de dicha oscilación y de K_c .

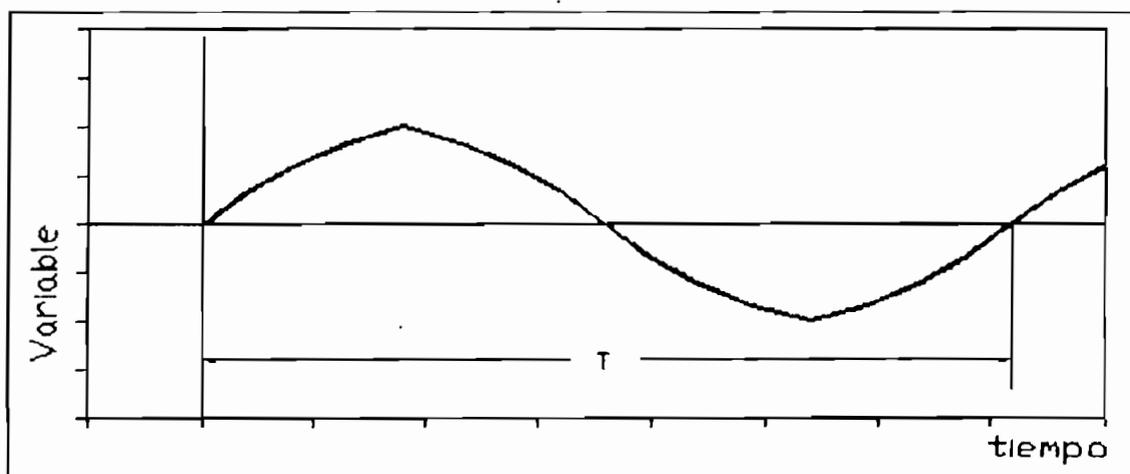


Fig. 2.12 Oscilación a la ganancia $K_{crítica}$.

La calibración del control, que aproximadamente producirá una respuesta de acuerdo al criterio de área mínima, ó de la razón de amortiguamiento $\epsilon = 0.25$, se calcula de acuerdo a la tabla 2.5. En la figura 2.12 se observa la oscilación en la variable de salida.

TABLA 2.5 PARAMETROS DE LOS CONTROLADORES P, PI, PID
SEGÚN ZIEGLER & NICHOLS (GANANCIA CRITICA).

CONTROL	AREA MINIMA	1/4 AMPLITUD
P	$K_p = 0.5 K_c$	$K_p \leq 0.5 K_c$
P-I	$K_p = 0.45 K_c$ $T_i = T_c/1.2$	$K_p \leq 0.45 K_c$ $T_i = T_c$
P-I-D	$K_p = 0.6 K_c$ $T_i = 0.5 T_c$ $T_d = T_c/8$	$K_p \leq 0.6 K_c$ $T_i = T_c/1.5$ $T_d = T_c/6$

b) Método de la curva de reacción:

Para utilizar este método, es necesario abrir el lazo cerrado de control y trabajar directamente sobre el proceso (planta), creando un pequeño y rápido cambio de una señal escalón en la entrada del sistema.

La respuesta que se obtenga debe registrarse con ayuda de algún grafizador o plotter de forma que se la pueda analizar con la mayor resolución posible, tal como se observa en la figura

2.13.

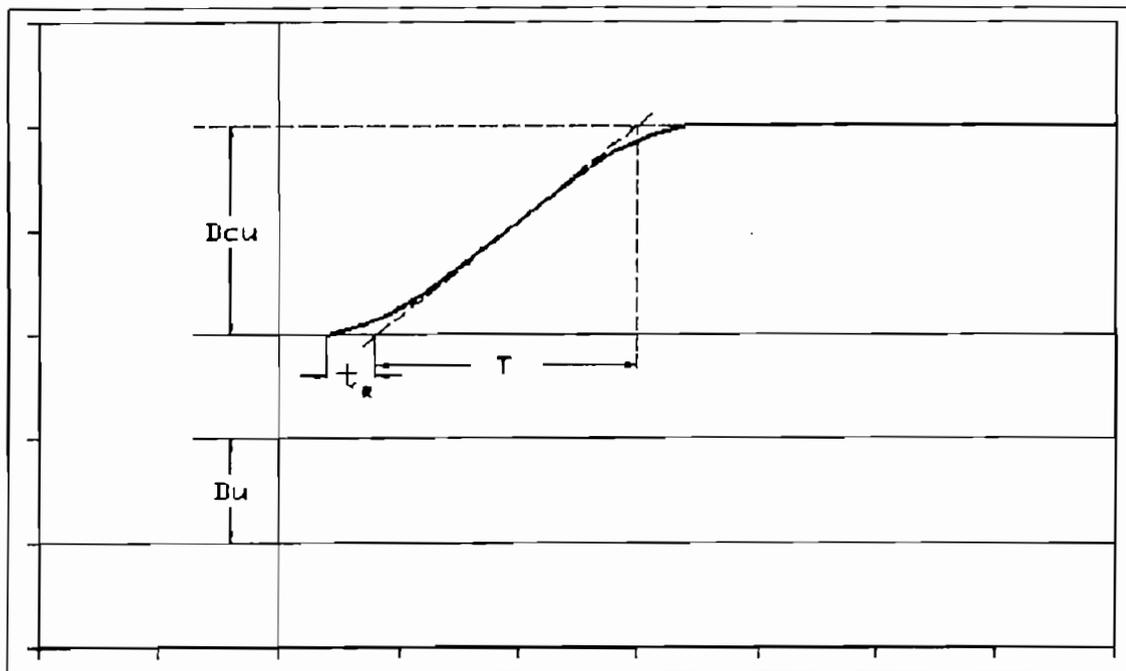


Fig. 2.13 Curva de reacción.

Donde: D_u = % de variación en la entrada

D_{cu} = % de variación en la salida

t_r = Tiempo de retardo

T = Tiempo de variación en la salida (constante de tiempo)

La calibración de los parámetros del controlador, se realiza de acuerdo a la relación pseudoempírica que se encuentra especificada en la tabla 2.5. Este método fue desarrollado por Ziegler & Nichols, y trata de inducir una respuesta en el proceso afín al criterio del área mínima. Como sugerencia, las pruebas deben desarrollarse en las peores condiciones de desempeño del sistema ya que si se realizan a condiciones

óptimas, posiblemente los parámetros que se obtengan no satisfagan todas las condiciones de trabajo.

TABLA 2.5 PARAMETROS DE LOS CONTROLADORES P, PI, PID SEGUN CURVA DE REACCION

CONTROL	AREA MINIMA
P	$K_p = \frac{Du * T}{Dcu * TR}$
P-I	$K_p = 0.9 * \frac{Du * T}{Dcu * TR}$ $T_i = 3.333 TR$
P-I-D	$K_p = 1.2 \frac{Du * T}{Dcu * TR}$ $T_i = 2 TR$ $T_d = 0.5 TR$

2.4.2 Ajuste automático de reguladores.-

Estas técnicas de estimación proveen de nuevos métodos para el ajuste automático de los controladores PID los cuales pueden introducirse fácilmente en los lazos de control.

El método se basa en conectar a la planta un relé que opere a una frecuencia determinada, con el propósito de hacer oscilar

el sistema, para con la amplitud y la frecuencia de la oscilación determinar el valor de la ganancia crítica K_c y el período crítico T_c , y una vez encontrados estos valores utilizar el método de Ziegler Nichols para la determinación de las constante K_p , T_i y T_d del controlador PID [Ref.9].

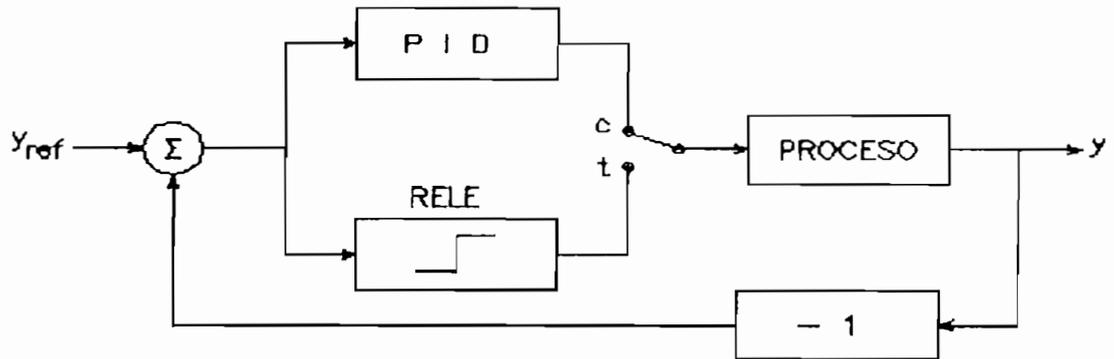


Fig. 2.14 Diagrama de bloques del auto-ajuste. El relé opera en el modo (t) y el regulador PID en el modo (c).

Para conseguir la oscilación del sistema la planta se conecta en un lazo de realimentación como se indica en la figura 2.14, y es la misma oscilación del sistema la que provee la apropiada señal de error que acciona el funcionamiento automático del relé a la frecuencia T_c .

Si 'd' es la amplitud del relé y 'a' la salida del proceso, la ganancia crítica esta dada aproximadamente, por [Ref.2]:

$$K_c = \frac{4d}{\pi a} \quad [2.76]$$

El período de una oscilación puede ser fácilmente determinado midiendo el tiempo entre los cruces por cero, y la amplitud midiendo el valor pico-pico de la salida.

Una vez encontrados los valores de K_c y T_c se aplican las reglas clásicas de ajuste de Ziegler Nichols.

2.5 TRANSDUCTOR Y ACTUADOR

Las características del transductor de nivel y del actuador o válvula de control utilizados en la simulación se han obtenido de los catálogos del fabricante de una de las marcas disponibles en el mercado. Las copias correspondientes de estos catálogos se presentan en el apéndice A.

2.5.1 Transductor de nivel de líquidos

En un sistema industrial de control de nivel de líquidos el transductor se encarga de medir la señal de salida o altura h , haciendo uso de una o algunas de las propiedades físicas del líquido (presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc.), y de convertir el valor medido en una señal electrónica en el rango normalizado de 4 a 20 mA o neumática de 3 a 15 psi equivalente a 0.2-1 Kg/cm².

Las características del transductor de nivel del líquido que se utiliza en la simulación corresponde al modelo con el código

827DF-IS1SLSA1-A de la marca Foxboro. Este código significa que:

- La señal de salida va de 4 a 20 mA.
- Las partes y piezas del transductor que no están en contacto con el agua están fabricadas en acero inoxidable 316.
- El sensor y las partes que están en contacto directo con el agua están fabricados en acero inoxidable y lubricadas con aceite de silicon.
- Los límites del rango de medida son 0.13 y 0.75 metros de agua.
- El material de la argolla que lo sujeta al tanque es acero inoxidable, y la argolla sujetadora o brida tiene un diámetro de 3 pulgadas, lo que determina que el límite máximo de presión diferencial que puede soportar es de 228 psi o 1.57 Mpa.
- El sensor esta ubicado en el lado de mayor presión.
- El transductor posee un indicador de nivel con una escala uniforme que va de 0 a 100%.

Estos y otros datos del transductor se encuentran en el catálogo del fabricante, de los cuales para encontrar la

relación entre la entrada y la salida, que permita simular el efecto del transductor en el proceso, se utiliza el rango de medida del transductor de 0.13 a 0.75 m y su correspondiente señal de salida de 4 a 20 mA. Con estos datos se obtiene la característica del transductor de nivel como:

$$\frac{h_t}{h} = K_t \quad [2.77]$$

donde:

h = altura en m.

h_t = salida del transductor en mA.

K_t = constante del transductor igual a 25.8 mA/m, ver figura 2.15.

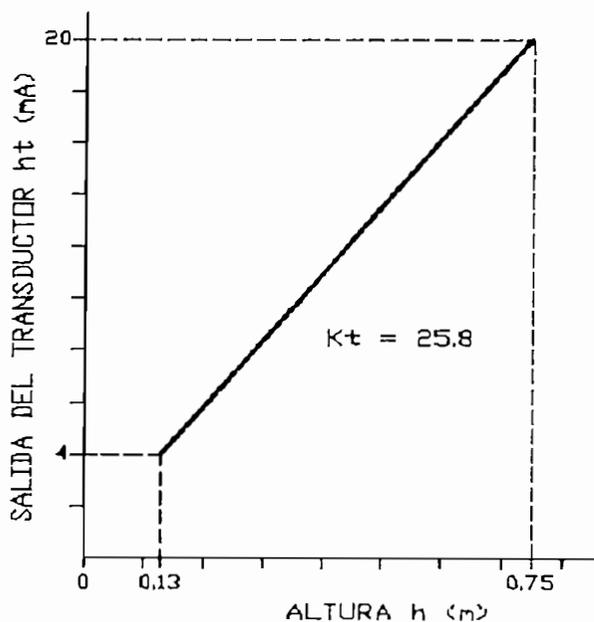


Fig. 2.15 Curva característica del transductor.

2.5.2 Actuador o válvula de control

En el control automático de un proceso industrial la válvula juegan un papel muy importante en el lazo de control, pues es la encargada de variar el caudal del fluido que modifica a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable.

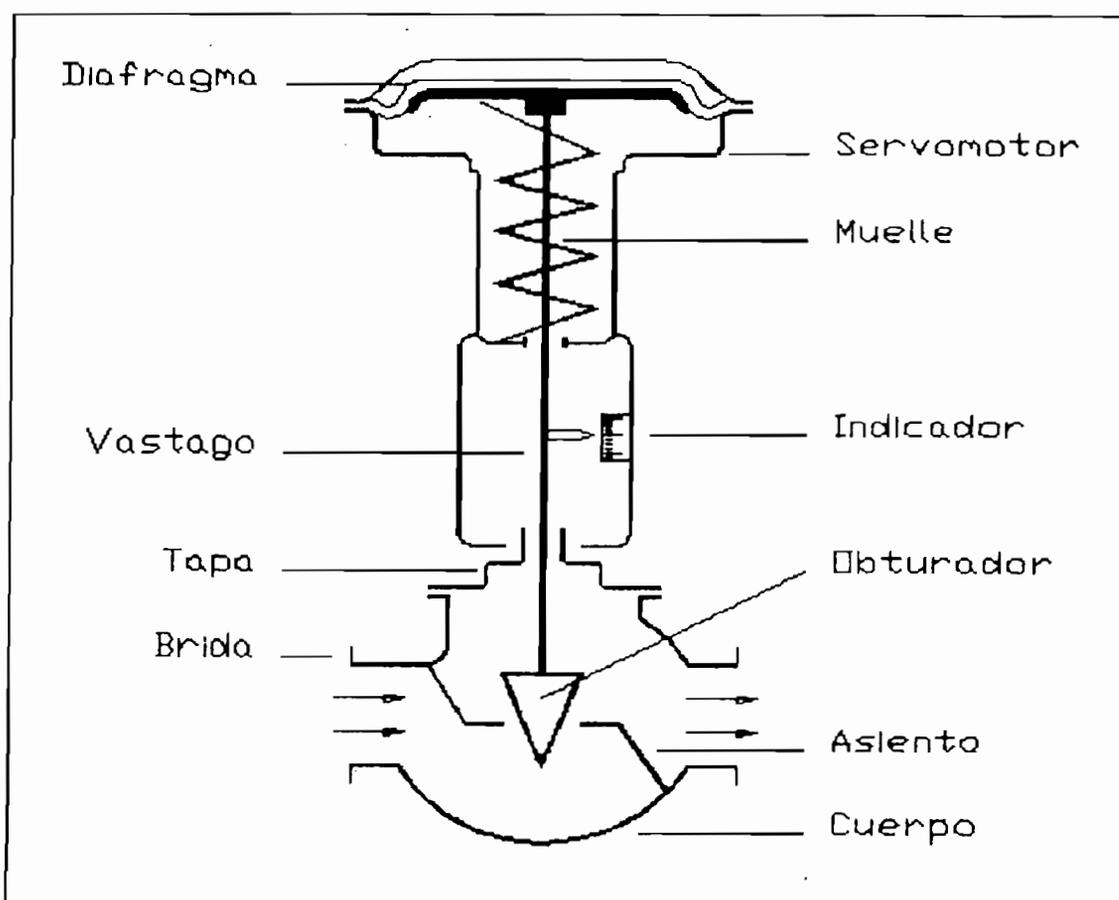


Fig. 2.16 Válvula de control representativa

Como se puede ver en la figura 2.16 las válvulas de control se componen básicamente del cuerpo y del servomotor. El cuerpo es por donde pasa el fluido, contiene en su interior el obturador

y los asientos, y se conecta directamente a la tubería. El obturador es quien realiza la función del control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje, esta unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor, el cual puede ser eléctrico o neumático.

El obturador determina la característica de flujo de la válvula como la relación que existe entre la carrera del obturador y el caudal de paso del fluido. La misma que se conoce como característica de caudal inherente y se representa considerando como abscisas el porcentaje del caudal máximo bajo una presión diferencial constante y como ordenadas la carrera del obturador de la válvula.

El caudal máximo se lo obtiene de reemplazar el correspondiente valor de K_v de la válvula en la ecuación 2.6, la misma que puede también ser escrita como:

$$q_D = \frac{K_v}{3600} * \sqrt{\frac{P}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad [2.78]$$

donde:

K_v = capacidad de la válvula, dato del fabricante

P = carga hidrostática o presión diferencial.

ρ = peso específico relativo del líquido.

En condiciones reales de operación la presión diferencial cambia. Este efecto es considerado en la simulación al mantener

variante el término dentro de la raíz que para este caso es numéricamente igual a la altura.

La carrera del obturador esta determinada por la acción del servomotor, las válvulas con servomotor neumático consisten en un diafragma con resortes o muelle que trabaja en el rango normalizado de 3 a 15 psi (20 a 100 Kpa) produciendo idealmente una relación lineal entre el 0% y el 100% de la carrera del obturador.

Para la simulación del control de flujo se utiliza la válvula de globo de bronce modelo V1400UE de la marca Foxboro con las siguientes especificaciones:

- Característica de flujo de igual porcentaje, esto significa que para iguales incrementos de la carrera del obturador, a presión diferencial constante, ocurren iguales cambios en el porcentaje del flujo. El flujo aumenta el mismo porcentaje cuando el vástago cambia de 40 a 50 por ciento, o cuando por ejemplo, cambia de 70 a 80 por ciento del porcentaje de operación.
- Servo motor neumático o actuador de la válvula tipo P30;
- Fuente de alimentación de aire de 140 Kpa con un rango de trabajo entre 20 y 100 Kpa;
- Diámetro o tamaño de la válvula, se han seleccionado tres tamaños así: 1/2", 3/4" y 1", cuyos correspondientes

valores de Cv son 6, 8 y 13;

- Máxima presión diferencial de corte permisible de 150, 150 y 90 psi, para cada uno de los tamaños de la válvula;
- Acción de aire para abrir la válvula.

De las anteriores especificaciones de la válvula, tomadas del manual del fabricante, se determina que la relación entre la carrera de obturador y la presión esta dada por:

$$\frac{p_a}{p} = K_a \quad [2.79]$$

donde:

p_a = porcentaje de la carrera del obturador.

p = presión de entrada a la válvula en Kpa

K_{av} = constante del actuador igual a 1.25 %/Kpa, ver figura

2.17

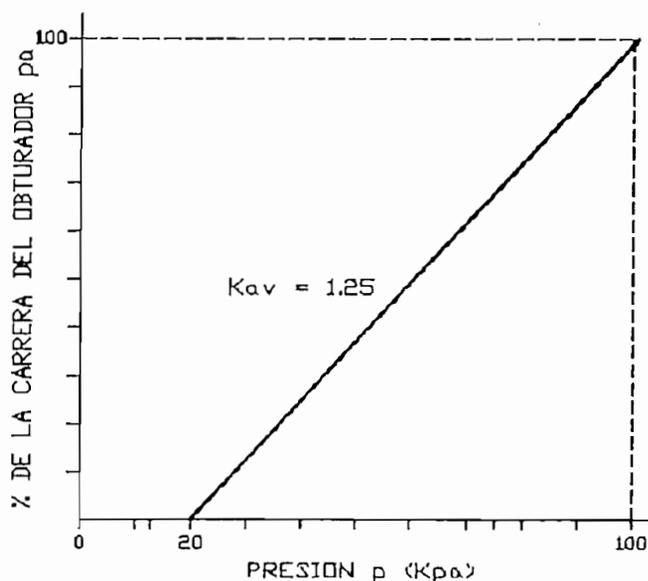


Fig. 2.17 Curva característica del actuador de la válvula.

2.6 SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez encontradas las ecuaciones, que relacionan la entrada con la salida, de cada uno de los componentes del sistema se procede a realizar las respectivas interconexiones que permitan cerrar el lazo de control.

Al considerar en la simulación componentes que tienen entradas y salidas normalizadas, en el ambiente industrial, se hace necesario realizar acoplamiento o acondicionamiento de señales que permitan la interconexión de los elementos tal como se lo tendría que hacer en la implantación real del sistema de control. Por lo tanto antes de interconectar los elementos del sistema se realizan los respectivos acoplamientos de señales.

2.6.1 Acoplamiento entre el transductor y el controlador

Considerando que el controlador tiene una señal de entrada que varia entre 0 y 10 V y que la señal de salida del transductor va de 4 a 20 mA se introduce un bloque de acoplamiento cuya ecuación esta dada por:

$$\frac{h_{at}}{h_t} = K_{at} \quad [2.80]$$

donde:

hat= salida del acoplamiento del transductor en voltios.

ht = salida del transductor en mA.

Kat= constante de acoplamiento del transductor igual a

0.625 V/mA, ver figura 2.18.

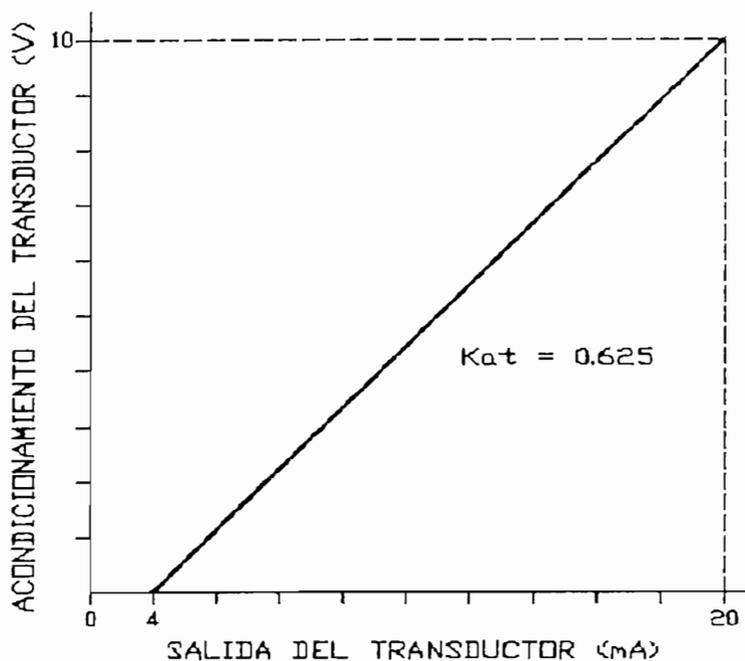


Fig. 2.18 Curva característica de acoplamiento del transductor.

De la característica del transductor y del acoplamiento del mismo se puede obtener una característica equivalente como:

$$\frac{h_e}{h} = K_{et} \quad [2.81]$$

donde:

h = altura en m.

h_e = altura equivalente en m.

K_{et} = constante equivalente entre transductor y el acoplamiento del mismo igual a 16.129 m/V, ver figura 2.19.

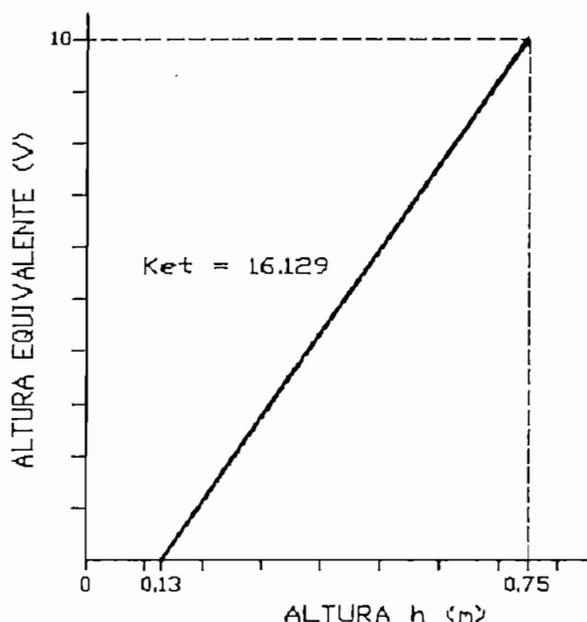


Fig 2.19 Característica equivalente entre el transductor y el acoplamiento del mismo.

Por tratarse de un trabajo de simulación no se detalla el circuito para el acondicionamiento de señales.

2.6.2 Acoplamiento entre el controlador y la válvula

La válvula de control es un elemento neumático y el controlador es electrónico, lo que indica que es necesario utilizar un convertor de corriente a neumático para lograr el acoplamiento de las señales. De igual forma que para la válvula y el transductor se utilizan las características de un convertor industrial.

Las características del convertor utilizado corresponde al modelo E69F-BI2-R de la marca Foxboro, cuyas especificaciones

se enumeran a continuación, las mismas que se han obtenido de las copias del catálogo del fabricante que se incluyen en el apéndice A:

- Convierte proporcionalmente una señal de corriente directa a una neumática.
- De instalación directa en la planta.
- Para todas las aplicaciones donde no se realicen pruebas de explosión.
- Rango de la señal de entrada de 4 a 20, de acción directa.
- Señal de salida de 20 a 100 Kpa.

Con el dato del rango de la señal de entrada y el de la señal de salida se obtiene la característica del convertidor como:

$$\frac{P}{u_a} = K_C \quad [2.82]$$

donde:

p = presión en Kpa.

U_a = corriente de entrada en mA.

K_C = constante del convertidor igual a 5 Kpa/mA, ver figura 2.20.

Además del convertidor es necesario colocar un bloque de acoplamiento que permita transformar la señal de voltaje de 0 a 10 voltios proveniente del controlador a la correspondiente

señal de corriente de 4 a 20 mA correspondiente a la entrada del convertor.

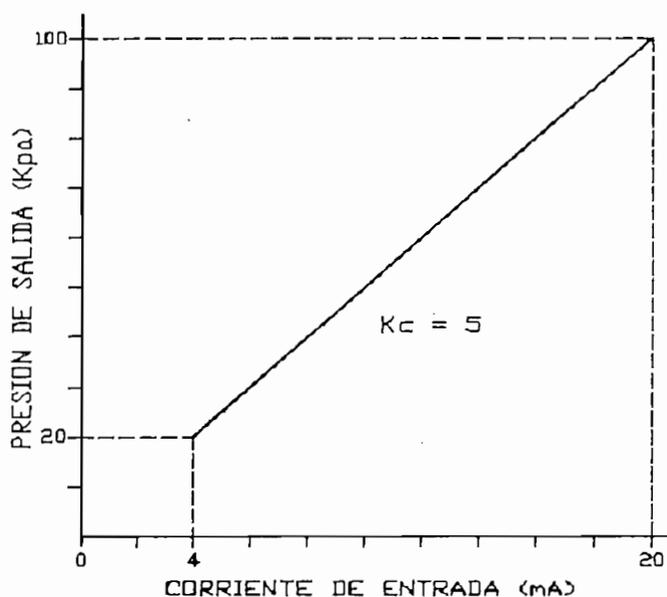


Fig 2.20 Característica de convertor de corriente a presión.

La característica de este acoplamiento se define como:

$$\frac{U_a}{U} = K_{ac} \quad [2.83]$$

donde:

U = señal de salida del controlador en V.

U_a = corriente de entrada al convertor en mA.

K_{ac} = constante de acoplamiento entre el controlador y el convertor, igual a 1.6 mA/V, ver figura 2.21.

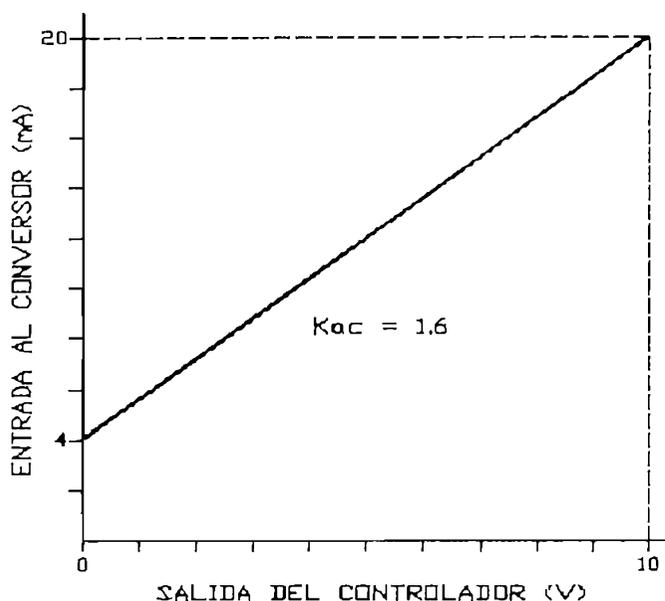


Fig 2.21 Característica de acoplamiento entre el controlador y el convertidor.

De la característica del acoplamiento entre el controlador y el convertidor y de la característica del convertidor se obtiene una equivalente dada por:

$$\frac{p}{u} = K_{ec} \quad [2.84]$$

donde:

U = señal de salida del controlador en V.

p = presión de entrada a la válvula en Kpa.

K_{ec} = constante equivalente entre el convertidor y el acoplamiento del mismo con el controlador, igual a 8 Kpa/V, ver figura 2.22.

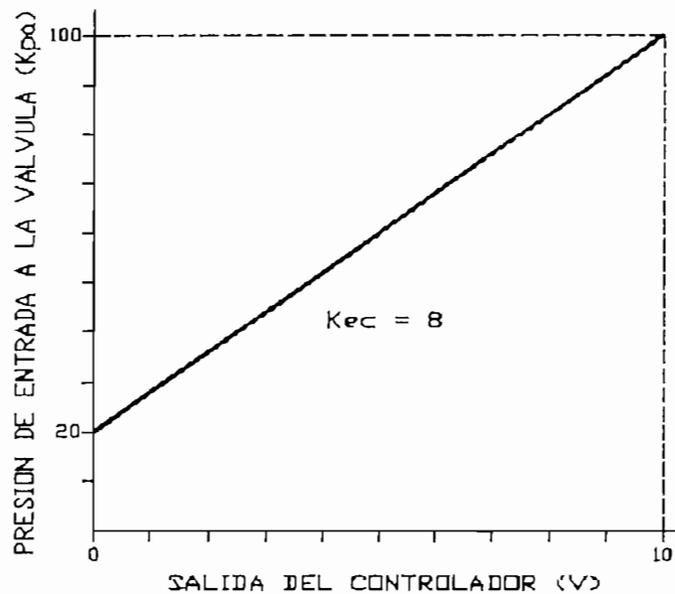


Fig.2.22 Característica equivalente entre el convertidor y el acoplamiento del mismo con el controlador.

Antes de unir la salida del controlador con la válvula de control se verifica si la relación entre ellos esta de acuerdo con el correcto funcionamiento de la válvula.

Al ser la válvula de control accionada con aire para abrir se tiene que cuando la presión es cero la válvula esta cerrada y cuando la presión es máxima (100 Kpa) la válvula está totalmente abierta.

Lo anterior lleva a que cuando la salida del controlador sea máxima la presión disminuya a su valor mínimo para que la válvula se cierre, y cuando la salida del controlador sea mínima, la presión aumente para que la válvula se abra.

Del análisis anterior se deduce que es necesario un cambio de

signo que permita el correcto acoplamiento entre la salida del controlador y la presión de entrada a la válvula.

El cambio de signo se puede conseguir de dos formas: invirtiendo la salida del controlador, o la acción de la presión sobre la válvula de aire para abrir a aire para cerrar.

Para efectos de simulación siempre es necesario el cambio de signo. Como la acción de la presión sobre la válvula ya fue definida, se realiza el cambio de signo a la salida del controlador como $U_{max}-U$ ($10 - U_{pid}$). Esto se puede observar en la implementación de la subrutina del control PID en el literal 3.3.3.

2.6.3 Acoplamiento entre la referencia y el controlador

Al ingresar la referencia al controlador como un porcentaje se necesita una etapa de acoplamiento que la convierta en la correspondiente señal de voltaje que requiere el controlador, para lo cual se utiliza el siguiente acoplamiento definido por:

$$\frac{ref[\%]}{ref[V]} = K_{re}$$

donde:

ref[%] = referencia en porcentaje.

ref[v] = referencia en voltios.

K_{re} = constante acoplamiento entre la referencia y el controlador, igual a 0.1 V/%, ver figura 2.23.

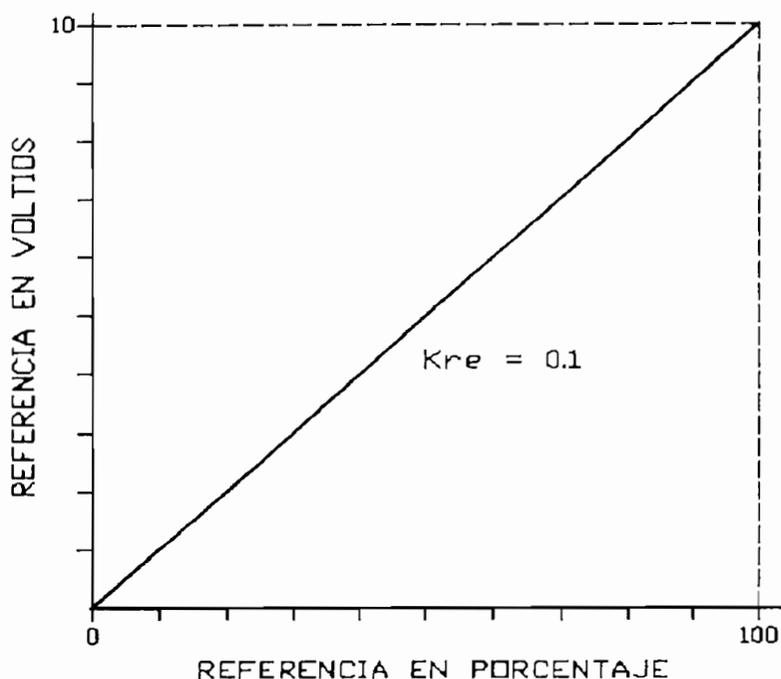


Fig. 2.23 Característica de acoplamiento de la referencia.

Una vez determinadas las constantes de los diferentes bloques del sistema de control del proceso, el lazo total queda definido como se representa en los diagramas de bloques de las figuras 2.24 y 2.25.

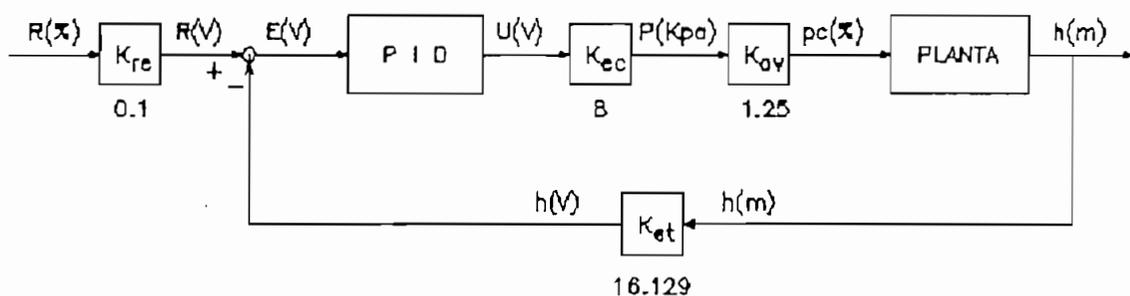


Fig. 2.24 Diagrama de bloques del sistema de control.

CAPITULO III: IMPLANTACION DEL SISTEMA

3.1	Implantación del sistema	73
3.2	Módulos que conforman el sistema	75
3.2.1	Módulo TANQUE.C	76
3.2.2	Módulo GRAFICOS.C (Interfaz gráfica)	77
3.2.3	Módulo MENU_HV.C (Interfaz de usuario)	79
3.2.4	Módulo PROCESOS.C (Sistema de control)	81
3.3	Principales subrutinas	82
3.3.1	Subrutina de simulación del sistema	83
3.3.2	Subrutina de simulación del proceso	87
3.3.3	Subrutina de control pid	90
3.3.4	Subrutina de auto-ajuste	92

3.1 IMPLANTACION DEL SISTEMA

La simulación del sistema de control de agua en un tanque permite desarrollar El Programa de Entrenamiento para Ajuste de Reguladores PID en Procesos Industriales. La implementación de la simulación del sistema, expuesto en el capítulo anterior, ha sido desarrollada en lenguaje 'C' bajo el sistema operativo MS-DOS y utilizando el compilador QuickC ver.2 de la Microsoft.

El programa de entrenamiento esta formado por tres grandes partes que son:

- Ecuaciones matemáticas que definen y describen el sistema de control.
- Representación gráfica de los elementos en la pantalla.
- Forma de operar el sistema desde el teclado del computador.

Conociendo que el lenguaje 'C' facilita la programación estructurada permitiendo la formación de diversos módulos o grupos de funciones que desempeñan una tarea específica, se han tomado como base las partes que conforman el programa de entrenamiento para dar origen a la estructura modular que se observa en la figura 3.1, la cual permita realizar la simulación del sistema de control.

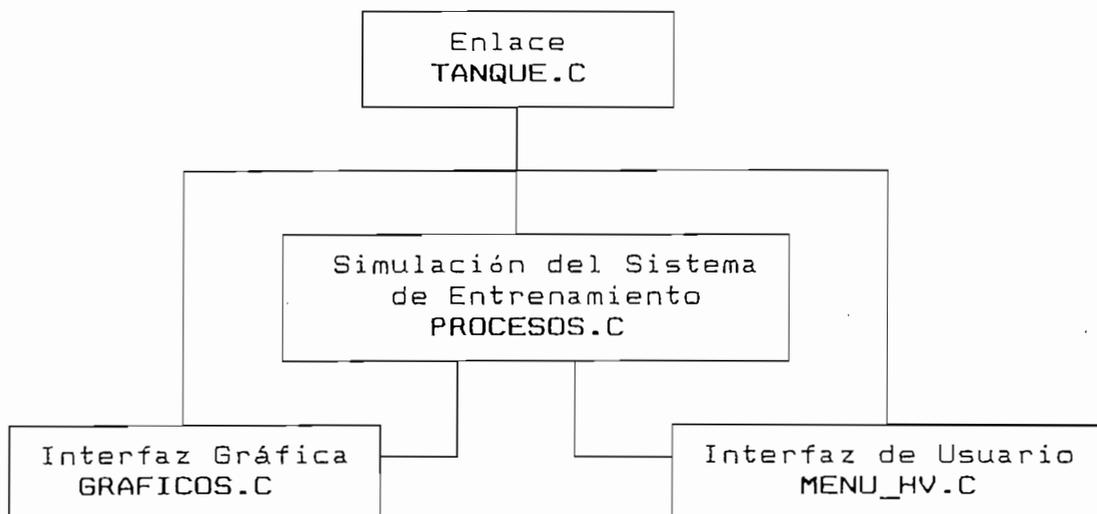


Fig. 3.1 Estructura modular del sistema.

Los módulos que forma el sistema son compilados, con la ayuda de la lista de módulos grabada en el archivo TANQUE.MAK, para producir el archivo ejecutable TANQUE.EXE.

Para que los módulos funciones correctamente es necesario la utilización de los correspondientes archivos tipo y de definición: `tanque.h`, `graficos.h`, `menu_hv.h` y `procesos.h`, encargados de definir las funciones respectivas de cada módulo y las estructuras y constantes utilizados en los mismos. También se hace necesaria la utilización del archivo `colores.h` que define una lista de colores de donde se escogen los utilizados en la simulación.

En la tabla 3.1 se resumen los archivos que conforma el Programa de Entrenamiento para Ajuste de Reguladores PID en Procesos Industriales.

TABLA 3.1 LISTA DE ARCHIVOS DEL PROGRAMA

CLASIFICACION	ARCHIVOS
Módulos del programa	TANQUE.C GRAFICOS.C MENU_HV.C PROCESOS.C
Lista de módulos	TANQUE.MAK
Archivo ejecutable	TANQUE.EXE
Archivos de funciones tipo y definiciones	tanque.h graficos.h menu_hv.h procesos.h colores.h

3.2 MODULOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 3.1 y en la tabla 3.1 el programa esta formado por cuatro módulos: TANQUE.C, GRAFICOS.C, MENU_HV.C y PROCESOS.C, cada uno de los cuales cumple con un objetivo fundamental dentro del sistema.

Cada módulo a su vez esta formados por un grupo de funciones que realizan una tarea específica o ejecutan una rutina para producir un resultado.

Las funciones que conforman cada uno de los módulos han sido creadas con el objeto de ser utilizadas en la simulación del sistema de control de nivel de agua en un tanque, pero la mayoría de ellas podrían llegar a ser utilizadas en cualquier implementación que se las requiera.

3.2.1 Módulo TANQUE.C

Este módulo se encarga de ejecutar el programa de entrenamiento. Está formado por cuatro funciones, las mismas que se enumeran en la tabla 3.2, de las cuales la más importante es la función `main()`, por ser la función principal del lenguaje "C" encargada de hacer ejecutable un programa.

Para la realización del programa de entrenamiento la función `main()` se desarrolla de la siguiente forma: después de inicializar las variables, primero hace uso de la función `inicio()` la cual a su vez llama a la función `set_mode()`, que selecciona el modo de video gráfico que necesita el programa para funcionar y si encuentra que el monitor del computador no acepta ninguno de los modos de video gráfico establecidos da por finalizado el programa con un mensaje de error.

Seguidamente da paso a la pantalla de presentación del programa donde aparece el primer menú, con cinco opciones a escoger (Simulación del Proceso, Control del Proceso, Amplificación, Color y Salir), dejando el programa en estado de espera, por una tecla de selección, es decir que el programa entra en un

lazo infinito hasta detectar la presencia de una tecla de selección válida que le permita acceder a una de las opciones presentadas.

Cada una de las opciones permiten realizar una tarea determinada manteniendo el programa siempre en estado de espera por una tecla válida. Una vez concluido el uso de las opciones el programa utiliza la función `fin()`, que restaura el modo de video del monitor después de finalizar el programa y/o después de salir del mismo por error en el modo de video.

TABLA 3.2 FUNCIONES DEL MODULO TANQUE.C

FUNCION	DESCRIPCION
main()	Función principal
inicio()	Define la pantalla gráfica de trabajo
fin()	Restaura las condiciones de la pantalla
set_mode()	Selecciona el modo de video

3.2.2 Módulo GRAFICOS.C (Interfaz gráfica).

Su objetivo principal es producir la interfaz gráfica, es decir la representación de los elementos del sistema en la pantalla del computador. Esta formado por las funciones que se enumeran en la tabla 3.3, algunas de las cuales pueden ser utilizadas en forma independiente, pero la mayoría utilizan las mismas funciones que se encuentran en el módulo como parte de una

nueva función, esto facilita y simplifica la comprensión y la construcción de nuevas funciones.

Todas las funciones que conforman la interfaz gráfica se ha realizado considerando que el modo de video seleccionado establece que la pantalla del computador esta formada por 640 pixels en el eje de las abscisas, 480 pixeles en el eje de las ordenadas, una hoja de texto de 80 columnas por 60 filas y 16 colores posibles para textos y gráficos.

TABLA 3.3 FUNCIONES DEL MODULO GRAFICOS.C

FUNCION	DESCRIPCION
origen()	Punto de posición u origen del dibujo en la pantalla
linea_hor()	Dibuja una línea horizontal
linea_ver()	Dibuja una línea vertical
circulo()	Dibuja un circulo
alarma()	Da una señal de alarma audible y gráfica.
circulo_lleno()	Dibuja un circulo relleno.
rectangulo_fill()	Dibuja un rectángulo con las puntas redondeadas.
posiciontexto()	Escribe texto en posición indicada
tuberia_ent()	Dibuja tubería de entrada.
tuberia_sal()	Dibuja tubería de salida.

<code>escala_num()</code>	Escribe escala numérica.
<code>marcas_escala()</code>	Dibuja las marcas de la escala.
<code>tanque()</code>	Dibuja el tanque.
<code>valvula()</code>	Dibuja la válvula de control.
<code>ventana_de_ tiempo()</code>	Enmarca y adecua el espacio donde se grafican las funciones en el tiempo.
<code>complementos_ tanque()</code>	Dibuja la representación del transmisor de nivel y el indicador controlador de nivel conectado al tanque.
<code>control()</code>	Dibuja el controlador PID
<code>pantalla1()</code>	Agrupar todos los dibujos de la pantalla de simulación que no sufren cambios durante la simulación.

3.2.3 Módulo MENU_HV.C (Interfaz de usuario)

El objetivo fundamental de este módulo es producir la interfaz de usuario, es decir, establecer la correspondiente comunicación entre el usuario y el sistema de control a través del teclado del computador.

Este módulo está formado por las funciones que se enumeran en la tabla 3.4, las mismas que se han diseñado con el objetivo fundamental de crear menús en la pantalla de forma horizontal y vertical. Las funciones de la interfaz de usuario permiten

modificar los parámetros del sistema de control por intermedio de menús, que puedan ser seleccionados bien sea por la tecla resaltada del ítem correspondiente; o por las flechas de ubicación y la tecla enter, después de haberse posicionado en el ítem deseado.

Al utilizar menús desplegables para el desarrollo de la interfaz de usuario se facilita el uso del programa debido a que este sistema permite relacionar el ítem o palabra "clave" con la acción o efecto que se produciría cuando se seleccione.

TABLA 3.4 FUNCIONES DEL MODULO MENU_HV.C

FUNCION	DESCRIPCION
Menus()	Realiza el menú de la pantalla de presentación
MenuVer()	Menú vertical de la simulación
MenuHor()	Menú horizontal de la simulación
Box()	Dibuja los recuadros de cada menú
Itemize()	Coloca los atributos de cada ítem
GetKey()	Identifica la tecla de función o selección en la simulación. Por ser el lazo más interno ejecuta la función que realiza la simulación del sistema (función()).
GetTecla()	Identifica la tecla de función en la pantalla de presentación.
_outchar()	Función interna que muestra un carácter.

3.2.4 Módulo PROCESOS.C (Sistema de control).

Este módulo, cuyo objetivo fundamental es simular el sistema de control del proceso, agrupa las funciones que realizan la simulación del proceso, el control PID, la rutina de auto ajuste, la representación en el tiempo de las variables del proceso, la introducción de fallas y todas las rutinas que permiten modificar las variables del proceso de forma cualitativa y cuantitativa. Las funciones de este módulo se enumeran en la tabla 3.5.

TABLA 3.5 FUNCIONES DEL MODULO PROCESOS.C

FUNCION	DESCRIPCION
simulacion_proceso()	Activa el menú principal
control_del_proceso()	Activa el menú principal
cambios_planta()	Elejir cambios en la planta
contrl()	Elejir acciones de control
fallas()	Elejir fallas
va_entrada()	Cambios del caudal de entrada
va_salida()	Cambios del caudal de salida
tiempo_muestreo()	Modifica el tiempo de muestreo
controlador()	Elejir párametro del controlador
sw_manual_automatico()	Permuta entre manual y automatico
subir_bajar_kp()	Modifica Kp

subir_bajar_ti()	Modifica Ti
subir_bajar_td()	Modifica Td
referencia()	Modifica la referencia
tanque_lleno()	Gráfica el llenado del tanque
borrar()	Borra un área dada de la pantalla
cronometro()	Cronómetro en tiempo real
clear()	Inicializa variables
desplazar()	Desplazamiento gráfico (tiempo)
variable_salida()	Gráfica y escribe el valor de VS
variable_manipulada()	Gráfica y escribe el valor de VM
ajusteaautomatico()	Elejir auto-ajuste y rele
RUNGE_KUTTA()	Método de integración
EVALUAR()	Función a evaluar en Runge Kutta
funcion()	Sistema de control
PLANTA()	Simulación del proceso
P_I_D()	Control PID
AUTO_AJUSTE	Rutina de auto-ajuste

3.3 PRINCIPALES SUBRUTINAS

Es necesario señalar que cada una de las funciones desempeña un papel importante dentro del correcto funcionamiento del programa, pero las funciones que definen la dinámica de la

simulación del sistema de control son las que dan sentido y razón de ser a las demás funciones que han sido creadas, por lo cual se las considera como funciones principales. Estas funciones se encuentran en el módulo PROCESOS.C y se encargan de realizar las rutinas de: simulación del sistema de control (`funcion()`), simulación del proceso (`PLANTA()`), simulación del controlador PID (`P_I_D()`) y rutina de autoajuste (`AUTO_AJUSTE()`).

3.3.1 Subrutina de simulación del sistema.

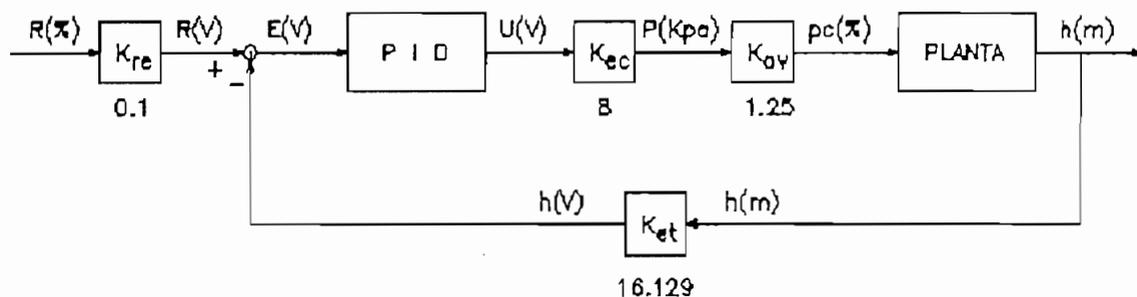


Fig. 3.2 Diagrama de bloques del sistema de control.

Esta subrutina se realiza en base al diagrama de bloques de la figura 3.2, el mismo que se obtuvo como resultado del análisis realizado en la simulación del sistema de control presentado en el literal 2.6; y al diagrama de bloques de la figura 3.3 que permite incorporar la opción de ajuste automático al sistema (literal 2.4.2).

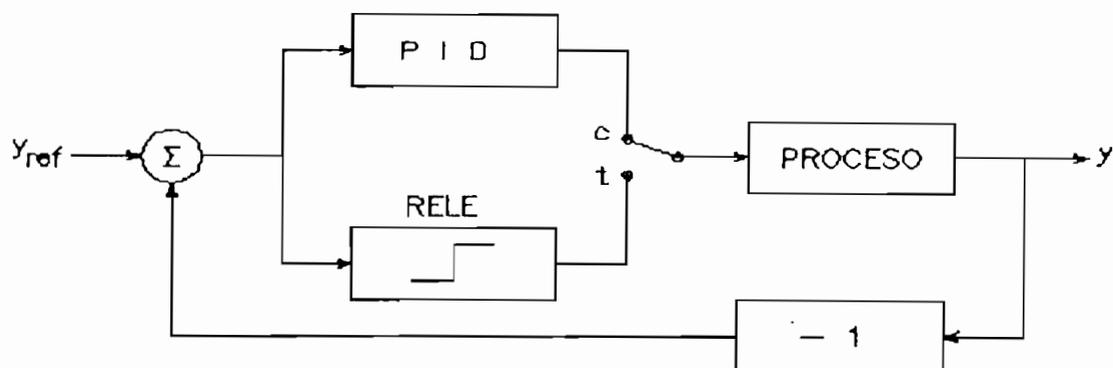


Fig. 3.3 Diagrama de bloques del auto-ajuste. El relé opera en el modo (t) y el regulador PID en el modo (c).

La implementación se realiza en la función `funcion()`, la cual se encarga de producir el retardo de tiempo como un desplazamiento de la señal de salida del sistema. Esta función integra el sistema de control por lo cual es ejecutada en el lazo de espera más interno que corresponde a la función `GetKey()` del módulo `MENU_HV.C`, de esta forma se actualizan los valores del sistema en cada recorrido del programa. A continuación se presenta el pseudocódigo de esta función en lenguaje 'C'.

```

/*-----
Funcion:          funcion()

Variables:
ts                tiempo en milisegundos
dts              incremento de tiempo
altura           altura en metros
Kav              constante del actuador de la valvula
Ket              constante equivalente entre el transmisor y el
                 acoplamiento del mismo con el controlador
Kec              constante equivalente entre el conversor y el
                 acoplamiento del mismo con el controlador
Kre              constante de acoplamiento entre la referencia
                 y el controlador
PRE              porcentaje de la referencia
PVM              porcentaje de la variable manipulada

```

PVS	porcentaje de la variable de salida
UPID	salida del controlador en voltios
referencia	referencia en voltios
altura	altura en metros
presion	presion en Kpa

Descripcion: Implementacion del sistema de control

```
-----*/
void funcion()
{
    /* Definicion de la estructura de tiempo */

    struct timeb tstruct;

    /* Definicion e inicializacion de variables */

    int ts, dts, i;
    int yvs, yvm, yre;
    static unsigned tiempo=0, ts1=0;
    double altura, pcarrera;
    static double RETAR[5];
    double Kav, Ket, Kec, Kre;
    double PRE, PVM, PVS, UPID;
    double referencia, VS;

    Kre = 0.1;
    Kav = 1.25;
    Ket = 1/0.062;
    Kec = 8;

    /* Cronometro en tiempo real */

    ftime(&tstruct);
    ts=tstruct.millitm;
    if(ts<ts1)
    {
        dts=1000-ts1+ts;
        cronometro(58,2);
    }
    else
        dts=ts-ts1;
    tiempo=tiempo+dts;
    if(tiempo>=timepro*1000)
    {
        con=(con<10000)? con+1: 1;
        _settextposition(22,27);
        printf("%5.0f",muestreo*(con-1));

        if(resetear)
            con=1;

        /* Actuador de la valvula */

        pcarrera = Kav*presion;

        /* Simulacion del proceso */
    }
}
```

```

altura = PLANTA(pcarrera/100);          /* en metros */

/* Trasmisor de nivel con y sin retardo de tiempo */
if(inicio)
{
    for(i=0;i<5;i++)
        RETAR[i] = altura;
    con=1;
    inicio=0;
}

/* Retardo de transporte de la señal */

for(i=0;i<4;i++)
    RETAR[i] = RETAR[i+1];
RETAR[4] = altura;

VS = Ket*RETAR[4-TR];

/* Señal de alarma por desbordamiento del tanque */

if(VS>=10)
    alarma(85,78,20,3,sonido);

/* Porcentaje de las variables del sistema */

/* variable se salida */

PVS = -(VS*10);
yvs = (PVS<-100) ? -100 : PVS;
if(yvs>0)
    yvs=0;

/* variable manipulada */
PVM = -pcarrera;
yvm = (PVM<-100) ? -100 : PVM;

/* referencia */
PRE = -Nre;
yre = (PRE<-100) ? -100 : PRE;

/* Representacion grafica de las variables en el tiempo */
_setlogorg(u*11+1,40*u-1);

xx = (xx <= 121) ? xx+1 : 121;

desplazar(xx, yvs, xvs, yyvs, y2vs, x11vs, y11vs, CYAN);
desplazar(xx, yvm, xvm, yyvm, y2vm, x11vm, y11vm, ROJO);
desplazar(xx, yre, xre, yyre, y2re, x11re, y11re, AMARILLO);

/* Actualizacion grafica y numerica de las variables */
variable_salida(yvs);
variable_manipulada(yvm);

```

```

/* Ajuste automatico de los parametros del controlador */
if(autoajuste)
{
    /* Conversion a voltios */

    referencia=Kre*Nre;

    AUTO_AJUSTE(VS, referencia);          /* en voltios */
}
else
{
    /* Reseteo de las banderas del ajuste automatico */

    /* Control PID */

    if (automan)
    {

        if(fallaout)                    /* Falla en la salida */
        {
            /* Conversion a voltios */

            referencia=Kre*Nre;

            if(fallactrl)                /* Falla en el control */
                UPID = 10;                /* en voltios */
            else
                UPID = P_I_D(VS, referencia); /* voltios*/

            presion = Kec*(UPID);        /* en Kpa */
        }
    }
}

/* Escribe el valor numerico de la presion */

_settextposition(47,38);
printf("          ");
_settextposition(47,38);
printf("%3.0f Kpa",presion+20);

tiempo=tiempo-timepro*1000;
}
ts1=ts;
}
/*-----*/

```

3.3.2 Subrutina de simulación del proceso.

Para el desarrollo de esta subrutina se considera el diagrama de bloques de la figura 3.4, que proviene del estudio de la

simulación del proceso realizado en el literal 2.2. Más específicamente de la respuesta del proceso expuesta en el literal 2.2.4, donde se resumen las funciones y parámetros del proceso de simulación.

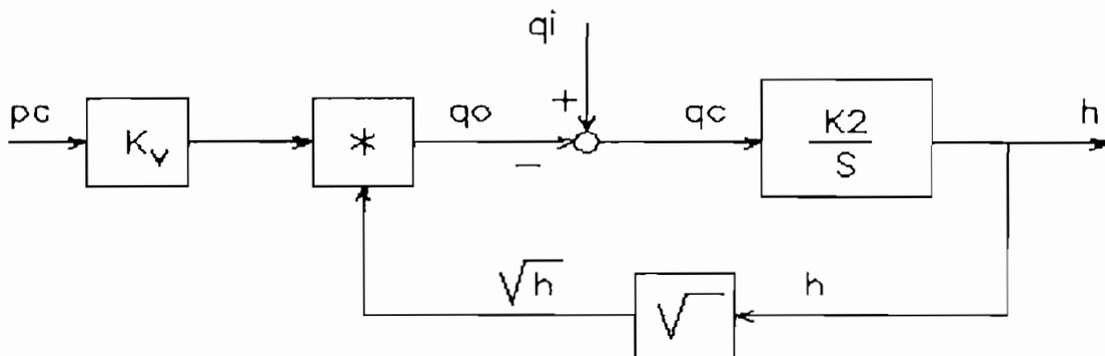


Fig. 3.4 Diagrama de bloques del proceso en forma no lineal

Esta subrutina se encuentra en la función PLANTA(), cuyo pseudocódigo en lenguaje 'C' se presenta a continuación.

```

/*-----
Funcion:          PLANTA()

Parametros:
(entrada)        altura    valor anterior de la altura
(entrada)        pc        porcentaje de la carrera en por unidad
(salida)         Y         altura

Variables:
X1[MAX]          arreglo de variables de estado
dXdT1[MAX]       arreglo de la derivada de variables de estado
a1[MAX]          arreglo de los coeficientes del denominador
b1[MAX]          arreglo de los coeficientes del numerador
n1              orden del numerador
m1              orden del denominador
K               coeficiente de capacidad de la valvula en m3/s
K2              constante de la ecuacion diferencial
qi              caudal de entrada
qo              caudal de salida
q               caudal se almacenamiento
i               indice de lazo

Descripcion:     Simulacion del proceso.
-----*/
double PLANTA(double pc)

```

```

{
    /* Definicion e inicializacion de variables */

    static double altura=0;
    static double X1[MAX], dXdT1[MAX];
    double a1[MAX], b1[MAX];
    double nvout;
    double K, K2;
    double qi, qo, q;
    int n1=1, m1=0;
    int i;

    K= Kv/3600;
    K2 = 1/A;

    /* Inicializacion del control del proceso */

    if(inicio)
    {
        presion=65;
        nvint=30;
        altura=16*0.0062;
        X1[1]=altura/K2;
        dXdT1[1]=X1[1];
    }

    /* simulacion del proceso */

    if(fallaint) /* Falla en la entrada */
    {
        qi=0;
        _settextposition(26,19);
        printf("          ");
        _settextposition(26,19);
        printf("%3.0f Lpm",qi);
    }
    else
    {
        qi=nvint/60000; /* nvint [Lpm] * 1/60000 = qi [m3/s] */
        _settextposition(26,19);
        printf("          ");
        _settextposition(26,19);
        printf("%3.0f Lpm",nvint);
    }

    /* Simulacion de la planta */

    qo = pc*K*sqrt(altura); /*
[m3/s]*/
    q = qi - qo; /*
[m3/s]*/
    a1[0] = 0;
    a1[1] = 1;
    b1[0] = K2;

    altura = RUNGE_KUTTA(m1, n1, a1, b1, q, X1, dXdT1); /*
metros */

```

```

/* Inicializacion de la simulacion del proceso */

if(resetear)
{
    for(i=0;i<=MAX;i++)
    {
        X1[i]=0;
        dXdT1[i]=0;
    }
    altura=0;
    resetear=0;
}

/* Valor en Lpm del caudal de salida qo */

nvout = 60000*qo;    /* nvout [Lpm] = 60000 * qo [m3/s] */
_settextposition(58,41);
printf("          ");
_settextposition(58,41);
printf("%3.0f Lpm",nvout);

return(altura);
}
/*-----*/

```

3.3.3 Subrutina del control PID.

Esta subrutina se realiza en base a la discretización del algoritmo de control PID no interactuante con componente derivativa filtrada desarrollado en el literal 2.3.4. del cual se extraen las siguientes ecuaciones, las mismas que definen el control PID.

$$K' = K_p \left(1 + \frac{T}{2T_i} \right) \quad [3.1]$$

$$\beta = \frac{2T_i - T}{2T_i + T}$$

$$I(K) = \beta * I(K-1) + (1 - \beta) * U_{PI}(K-1) \quad [3.2]$$

$$U_{PI}(K) = K^I * E(K) + I(K) \quad [3.3]$$

$$\Gamma = \frac{T_d}{T} \quad [3.4]$$

$$D(K) = \frac{0.2\Gamma - 1}{1 + 0.2\Gamma} * D(K-1) + \frac{2\Gamma}{1 + 0.2\Gamma} * [Y(K) - Y(K-1)] \quad [3.5]$$

$$U_{PID}(K) = U_{PI}(K) - K^I * D(K) \quad [3.6]$$

La implementación de esta rutina se encuentra en la función P_I_D(), cuyo pseudocódigo en lenguaje 'C' se presenta a continuación.

```

*-----
Funcion:      P_I_D()

Parametros:
(entrada)    Yin      altura
(entrada)    ref      referencia
(entrada)    kp       constante proporcional
(entrada)    ti       tiempo integral
(entrada)    td       tiempo derivativo
(entrada)    banPI    bandera on/off de la accion I
(salida)     Upid     salida del controlador

Variables:
ERROR        error del proceso
Uni          valor anterior del controlador
Yold         valor anterior de la altura
Upi         valor anterior del control PI
T           tiempo de muestreo
K           constantes de las ecuaciones del PID
BETA        .
GAMA        .
D1          factores del la parte derivativa
D2          .
INTEGRAL    parte integral del control PID
DERIVATIVO  parte derivativa del coontrol PID

Descripcion: Subrutina del control PID, con entrada y
              salida en voltios.
*-----*/
double P_I_D(double Yin, double ref)
{

```

```

/* Definicion e inicializacion de variables */

static double INTEGRAL, DERIVATIVO;
static double Uin=0;
static double Yold=0;
static double Upi;
double Upid;
double T=muestreo;
double K, BETA, GAMA, D1, D2, ERROR;

/* Calculo del error */

ERROR = ref-Yin;

/* Control PID */

K= kp*(1 + T/(2*ti));
BETA=(2*ti - T)/(2*ti + T);
INTEGRAL = BETA*INTEGRAL +(1-BETA)*Upi;
if(banPI)
    Upi = kp*ERROR;
else
    Upi = K * ERROR + INTEGRAL;
GAMA = td /T;
D1 = (0.2*GAMA)/(1+0.2*GAMA);
D2 = (2*GAMA)/(1+0.2*GAMA);
DERIVATIVO = D1*DERIVATIVO + D2*(Yin - Yold);
Upid = Upi - K * DERIVATIVO;
Yold = Yin;

/* Limitacion de la salida del controlador */

if( Upid > 10)
    Upid = 10;
if( Upid < 0)
    Upid = 0;

/* Salida del controlador */

return (10-Upid);
}
/*-----*/

```

3.3.4 Subrutina de auto-ajuste.

Esta subrutina se basa en el procedimiento para el ajuste automático de reguladores expuesto en el literal 2.4.2 y en la utilización de los parámetros de control como son: constante proporcional k_p , tiempo integral t_i y tiempo derivativo t_d ,

dados por el método de ganacia límite de Ziegler & Nichols, de acuerdo al criterio de área mínima expuesto en el literal 2.4.1 resumido en la tabla 3.6.

TABLA 3.6 PARAMETROS DEL CONTROLADOR PID SEGÚN ZIEGLER & NICHOLS (GANANCIA CRITICA).

CONTROL	AREA MINIMA
P-I	$K_p = 0.45 K_c$ $T_i = T_c/1.2$

Esta subrutina se encuentra en la función AUTO-AJUSTE(), cuyo pseudocódigo en lenguaje 'C' se presenta a continuación.

```

/*-----
Funcion:      AUTO_AJUSTE()

Parametros:
(entrada)    alt      altura en voltios
(entrada)    ref      referencia en voltios
(salida)     kp       constante proporcional
(salida)     ti       tiempo integral

Variables:
Ymax         altura maxima de la oscilacion
Ymin         altura minima de la oscilacion
t1           tiempo superior de la oscilacion
t2           tiempo inferior de la oscilacion
ta           bandera del tiempo superior
tb           bandera del tiempo inferior
amplitud     amplitud de la oscilacion
Kc           constante critica
Tc           periodo critico
ban          banderas del periodo de rele
ban1         .
ban2         .
ban3         .

Descripcion: Ajuste automatico de los parametros de control.
-----*/
double AUTO_AJUSTE(double alt, double ref)
{

```

```

/* Inicializacion y definicion de variables */

static double Ymax, Ymin;
static unsigned ta=0;
static unsigned tb=0;
static unsigned t1=0;
static unsigned t2=0;
static unsigned ban=0;
static unsigned ban1=0;
static unsigned ban2=0;
static unsigned ban3=0;
static double Tc, Kc;
double amplitud, error;

/* Reseteo de las banderas y contadores */
if(resetearAA)
{
    ban1=0;
    ban2=0;
    ban3=0;
    ta=0;
    tb=0;
    t1=0;
    t2=0;
    resetearAA=0;
}

if(ban3<1)
{
    ban=0;
    Tc=0;
    Ymin=alt;
}

error = ref-alt;

/* Rele en funcion del error */
if(error>0)
{
    /* Cerrar la valvula */
    /* Disminuir la presion */
    /* en Kpa */
    presion = (ref-d)*8;
    if(presion>80)
        presion=80;
    if(presion<0)
        presion=0;
    ban=1;
    ban1=ban2+1;
}
if(error<0)
{
    /* Abrir la valvula */
    /* Aumentar la presion */
    /* en Kpa */
    presion = (ref+d)*8;
    if(presion>80)
        presion=80;
    if(presion<0)
        presion=0;
    ban=2;
    ban2=ban1+1;
}
if(ban1>=2)

```

```

{
    ban1=2;
    if(ban2>=2)
    {
        ban2=2;
        ban3=1;
    }
}
/* Ajuste automatico */
if(ban3>=1)
{
    if( alt > Ymax)
        Ymax = alt;
    if( alt < Ymin)
        Ymin = alt;

    amplitud = (Ymax-Ymin)/2;

    if(ban == 1)
    {
        ta=ta+1;
        if(ta>t1)
            t1=ta;
        tb=0;
    }
    if(ban == 2)
    {
        tb=tb+1;
        if(tb>t2)
            t2=tb;
        ta=0;
    }
    Tc=(t2+t1)*muestreo;
    if(amplitud>0.001)
    {
        Kc=4*d/(3.1416*amplitud);

        kp=0.45*Kc;
        ti=Tc/1.2;

        if(ti<201)
            banPI=0;
        else
            ti=200;

        /* Valor numerico de las constantes */
        _settextposition(33,70);
        printf("          ");
        _settextposition(33,70);
        printf("%1.1f",kp);
        _settextposition(39,70);
        printf("          ");
        _settextposition(39,70);
        printf("%3.0f",ti);
    }
}
}
/*-----*/

```

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.	Pruebas realizadas y resultados obtenidos	96
4.1	Pruebas de funcionamiento del programa	96
4.1.1	Cambios de pantallas	97
4.1.2	Cambios de la escala de tiempo	98
4.1.3	Cambio de color de la pantalla de simulación	99
4.1.4	Cambios de tamaño del tanque	99
4.1.5	Cambio de la válvula de control	100
4.1.6	Cambio del período de muestreo	100
4.1.7	Cambio del tiempo de retardo	100
4.1.8	Cambio de la presión de la válvula de control	100
4.1.9	Cambio del nivel del líquido o altura	101
4.1.10	Cambio del valor de referencia	101
4.1.11	Cambio de los parámetros del controlador Kp Ti Td	102
4.1.12	Cambio entre manual y automático	102
4.1.13	Cambios varios	102
4.2	Pruebas de simulación del proceso	103
4.2.1	Comportamiento dinámico del proceso	103
4.2.2	Control manual	105
4.2.3	Proceso en lazo cerrado	107
4.3	Pruebas de simulación del control del proceso	107
4.3.1	Control PI utilizando el método de Ziegler Nichols	108
4.3.2	Control PI utilizando el método de la curva de reacción	109
4.3.3	Control PI utilizando el método de auto-ajuste ...	111
4.3.4	Método de compensación por cancelación de polos y ceros	113
4.3.5	Control PI con ajuste de valores	116
4.4	Pruebas de simulación de fallas.....	116

4.4.1	Falla en el caudal de entrada	117
4.4.2	Falla en la válvula de control	117
4.4.3	Falla en el lazo de control	118
4.5	Conclusiones	118

4. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Para comprobar el correcto funcionamiento del "Programa de Entrenamiento para Ajuste de Reguladores PID en Procesos Industriales" se realizan cuatro tipos de pruebas: pruebas de funcionamiento del programa o de cambios de los parámetros del sistema; pruebas de simulación del proceso donde se analiza el comportamiento dinámico del mismo; pruebas de simulación del control del proceso; y, pruebas de simulación de fallas.

4.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROGRAMA

Estas pruebas permiten constatar los cambios de los parámetros del sistema describiendo el efecto que produce cada uno; y, comprobando el rango de variación o las opciones del cambio.

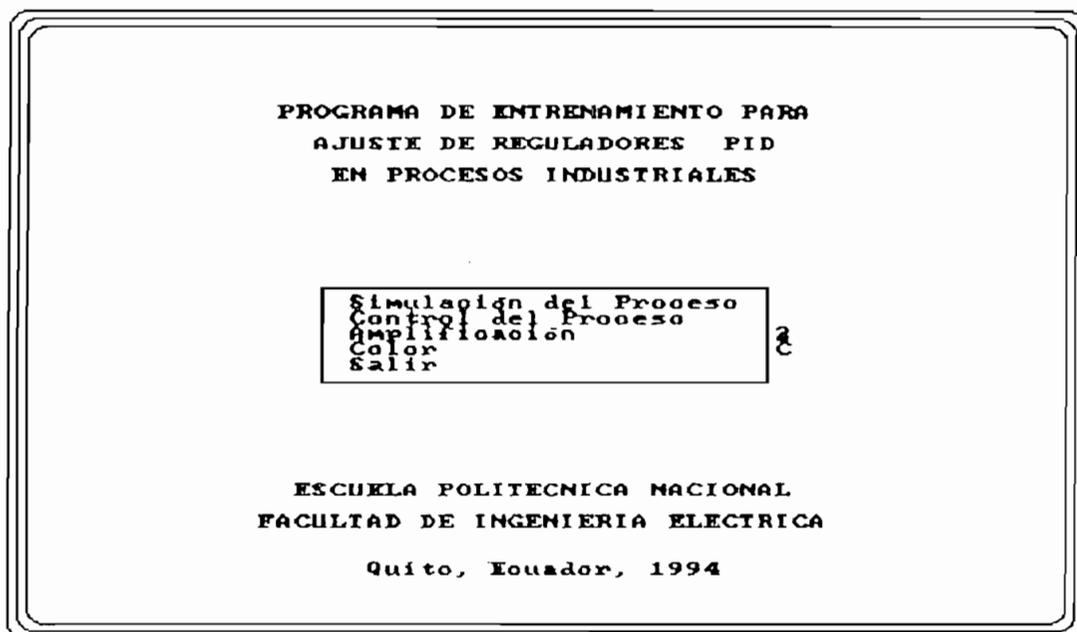


Fig. 4.1 Pantalla de presentación.

4.1.1 Cambios de pantallas

El programa esta formado por tres pantallas, la primera es la pantalla de presentación que se indica en la figura 4.1. Esta aparece cuando se ingresa al programa.

La segunda es la pantalla de simulación del proceso, que se muestra en la figura 4.2, donde se puede observar que los parámetros K_p , T_i , T_d del controlador están desconectados, y que el menú no presenta ninguna opción que permita manipular el controlador, solamente se puede operar la planta manualmente. Esto permite simular el proceso en lazo abierto y estudiar las características dinámicas del mismo.

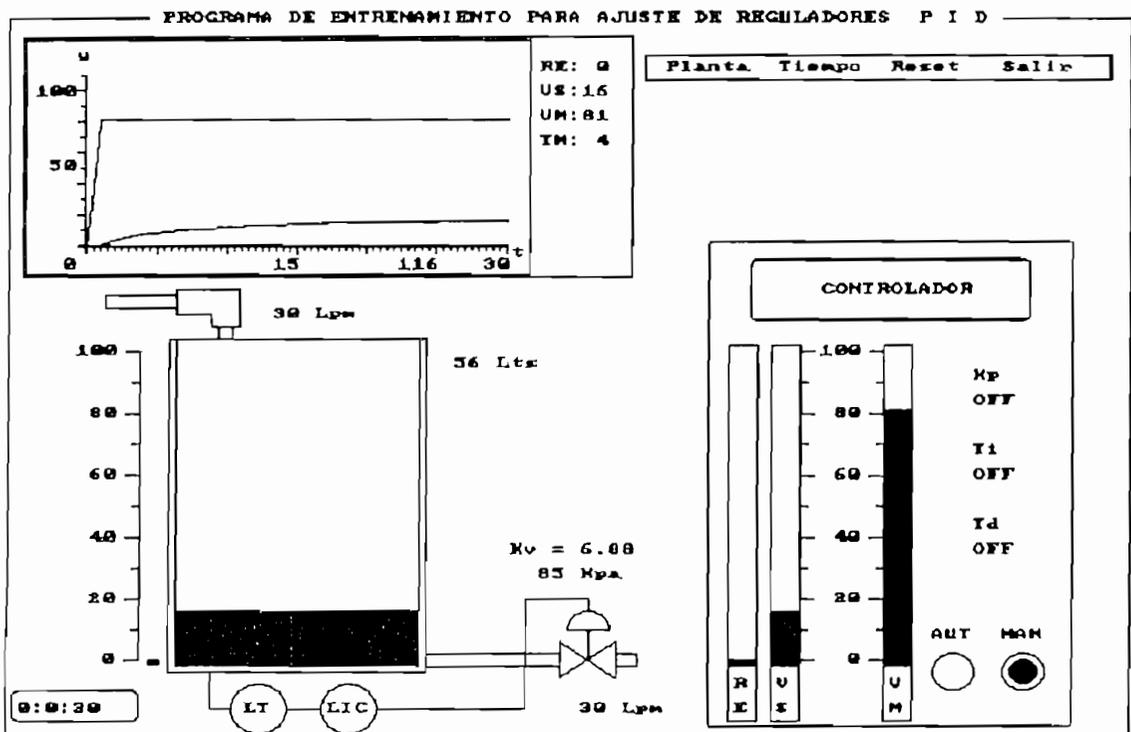


Fig. 4.2 Pantalla de simulación del proceso.

La tercera es la pantalla de simulación del control del proceso

que se indica en la figura 4.3. Esta difiere de la anterior en las opciones del menú principal, donde se puede observar que existe una opción que permite realizar el control del proceso, y otra que permite introducir fallas en el sistema. También se observa que el proceso inicia en condiciones estables y no desde cero como sucede en el caso anterior. Esto permite simular el control del proceso en lazo cerrado.

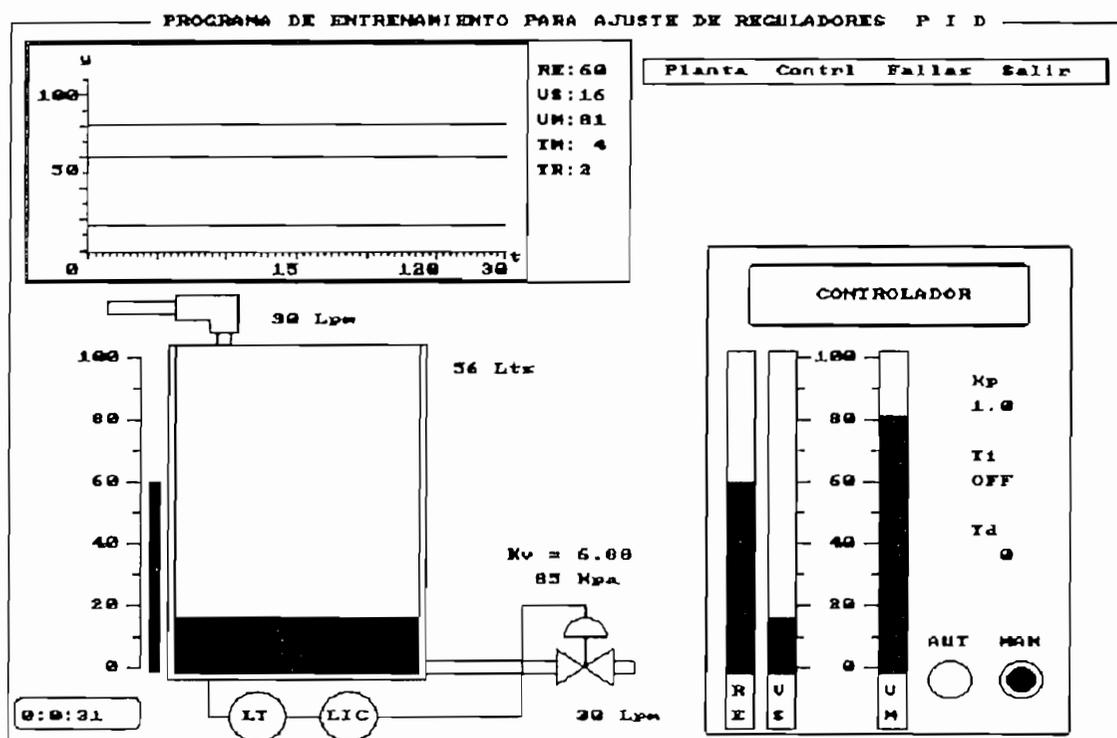


Fig. 4.3 Pantalla de simulación del control del proceso.

4.1.2 Cambios de la escala de tiempo

La amplificación de la escala se indica inicialmente con el número ubicado a la derecha del recuadro del menú de la pantalla de presentación. Su cambio modifica la escala de tiempo de las variables del proceso, de las pantallas de

simulación. Las marcas del eje del tiempo están hechas en base al período de muestreo, por lo tanto el tiempo en segundos se obtiene multiplicando el período de muestreo por las marcas de escala del eje de tiempo o de valor numérico (del tiempo en segundos) que aparece en la parte inferior del mismo eje. La amplificación puede ser de una a seis veces la escala de tiempo, en pasos de uno.

4.1.3 Cambio de color de la pantalla de simulación

Este cambio se indica con la letra que aparece en la pantalla de presentación a la derecha del recuadro del menú. La C indica que las pantallas de simulación se presentaran en colores y la B en blanco y negro. Este cambio permite obtener reportes gráficos de la pantalla de simulación, o de una parte de ella, con un capturador de gráficos como el GRAB del programa Word Perfect.

4.1.4 Cambio de tamaño del tanque

Se tienen tres tamaños diferentes de tanque, cada vez que se cambia se observa en la pantalla como varia el tamaño y la capacidad en litros del mismo expresada numéricamente a un lado de la esquina superior derecha del tanque (ver figura 4.2 o 4.3).

4.1.5 Cambio de la válvula de control

Se tienen tres válvulas diferentes, cada vez que se cambia se observa como varia en la pantalla el gráfico que la representa y el valor de la constante Kv de la válvula ubicado sobre ella (ver figura 4.2 o 4.3).

4.1.6 Cambio del período de muestreo

Se indica en la cuarta fila de la columna numérica (ubicada al lado derecho del espacio donde se grafican las variables en el tiempo) precedido por TM: (ver figura 4.2 o 4.3). Va de 1 a 50 segundos, en pasos de uno.

4.1.7 Cambio del tiempo de retardo

Se indica en la quinta fila de la columna numérica precedido por TR: (ver figura 4.3). Hay tres opciones: 0, 2, y 4. Por ejemplo si aparece TR: 2 el tiempo de retardo en segundos es $2*TM$ [s], donde TM es el período de muestreo.

4.1.8 Cambio de la presión de la válvula de control

Su cambio se observa en el valor numérico ubicado sobre la válvula de control, va de 20 a 100 Kpa en pasos de uno.

Por ser la presión la variable manipulada su cambio porcentual se indica en la tercera fila de la columna numérica precedida por VM:. También se puede observar en la correspondiente columna VM del controlador, y en el gráfico de porcentaje de la amplitud versus tiempo (ver figura 4.2 o 4.3). Esta variable se identifica con el color rojo.

4.1.9 Cambio del nivel del líquido o altura

Se indica en la segunda fila de la columna numérica precedido por VS:, varia en forma porcentual de 0 a 100 %. Por ser la variable manipulada su cambio es función del caudal de entrada y del porcentaje de la apertura de la válvula de control (porcentaje de la presión). Este cambio se puede observar en la correspondiente columna VS del controlador, y en el gráfico de porcentaje de la amplitud versus tiempo (ver figura 4.2 o 4.3). Esta variable se identifica con el color azul celeste (cyan).

4.1.10 Cambio del valor de referencia

Se indica en la primera fila de la columna numérica precedido por RE:, varia en forma porcentual de 0 a 100 % en pasos de uno. Su cambio se puede observar en la correspondiente columna RE del controlador, y en el gráfico de porcentaje de la amplitud versus tiempo (ver figura 4.3). Esta variable se identifica con el color amarillo.

4.1.11 Cambio de los parámetros del controlador K_p , T_i , y T_d

Su cambio se observa bajo su correspondiente título en el valor numérico que se indica dentro del gráfico del controlador: K_p va de 0 a 10 con un incremento de 0.1; T_d va de 0 a 10 con un incremento de 0.1; T_i va de 2 a 200 con un incremento de uno. T_i , con un incremento después de 200 pasa a la posición de desconexión que se indica con OFF (ver figura 4.3).

4.1.12 Cambio entre manual y automático

Este cambio se observa en los círculos que aparecen en el extremo inferior derecho del controlador. La posición en la que se encuentre el círculo relleno (verde) indica el estado del controlador. Si esta dentro del círculo sobre el que aparece la leyenda MAN, el controlador está en manual; si esta dentro del círculo sobre el que aparece la leyenda AUT, el controlador está en automático (ver figura 4.3). La posición automática permite simular el proceso en lazo cerrado.

4.1.13 Cambios varios

- La válvula utilizada, el cambio de la presión y el nivel del líquido definen el caudal de salida cuyo valor numérico, en Lpm, se puede observar bajo la válvula de control.
- Cambio de la velocidad de simulación de un segundo a la

velocidad de maquina y viceversa.

- Reseteo del proceso sin modificar los valores de las variables seleccionadas previamente.
- Cambio de señal de alarma o aviso de desbordamiento del tanque de visual a visual audible (sonido) y viceversa.

4.2 PRUEBAS DE SIMULACION DEL PROCESO

Se realizan tres pruebas de simulación del proceso: comportamiento dinámico del proceso, control manual del proceso y proceso en lazo cerrado.

Para las siguientes pruebas de simulación se utiliza el tanque y la válvula de tamaño mediano.

4.2.1 Comportamiento dinámico del proceso

En esta prueba se simula el proceso en lazo abierto. Consiste en observar el comportamiento del proceso desde la altura $h=0$ hasta el valor de establecimiento.

El valor de establecimiento de la altura (H) se puede calcular con la ecuación 4.1 como:

$$H = \left(\frac{Q_i}{PA * K} \right)^2 \quad [4.1]$$

Donde:

H = Altura final del proceso.

Q_i = Caudal de entrada en m^3/s ($Q_i[Lpm]/60000=Q_i[m^3/s]$).

PA = Porcentaje de la carrera de la válvula igual al porcentaje de la presión ejercida.

K = Constante de la válvula igual a $K_v/3600$.

Para la simulación se considera que:

$Q_i = 30$ Lpm

PA = 75 % (85 Kpa)

K = 6.88/3600

por consiguiente el valor de establecimiento de la altura es:

H = 0.1216 m correspondiente a 16 %

Como resultado de la simulación se obtiene el gráfico de la figura 4.4. Donde H, dado por la variable de salida VS, es igual al valor esperado.

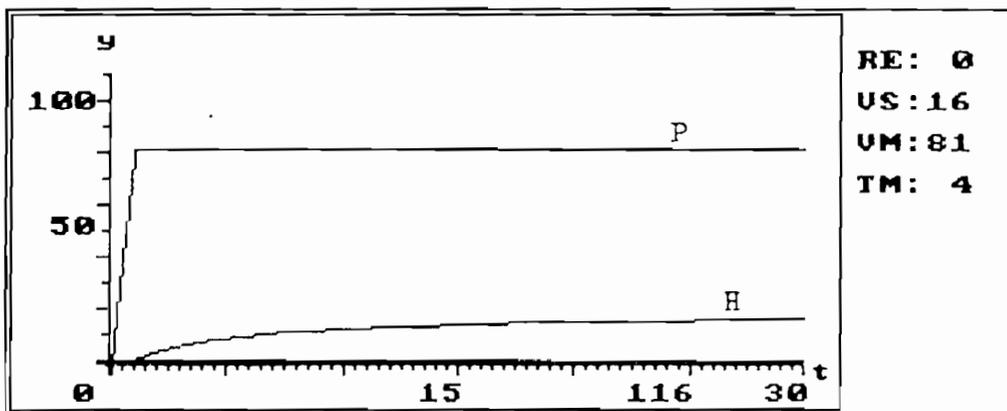


Fig. 4.4 Comportamiento dinámico del proceso

Además se tiene que el tiempo de establecimiento t_s es de 115 segundos y que el proceso no presenta sobre impulso.

4.2.2 Control manual

El control manual consiste en alcanzar un valor de salida H variando manualmente la presión de la válvula de control.

Para realizar esta prueba se considera como condiciones iniciales las mismas de la prueba anterior, y como valor de salida $H = 60 \%$.

De igual forma que en el caso anterior se puede determinar previamente el valor de PA con la ecuación:

$$PA = \frac{Q_i}{\sqrt{H} * K} \quad [4.2]$$

reemplazando los correspondientes valores en la anterior ecuación se tiene que:

$$PA = 42,89 \% (54.3 \text{ Kpa})$$

Como no es posible colocar decimales en el valor de la presión se recalcula el valor de la altura con 54 Kpa, esto da que H será 0.378m es decir 61%.

La prueba de control manual se realiza manteniendo el caudal de entrada fijo y cerrando poco a poco la válvula de control hasta conseguir que el nivel suba al valor de salida H deseado como se indica en la figura 4.5.

El gráfico de la figura 4.6 muestra el resultado final de esta prueba donde se verifica que la altura alcanza el valor de salida H para el porcentaje de presión calculado.

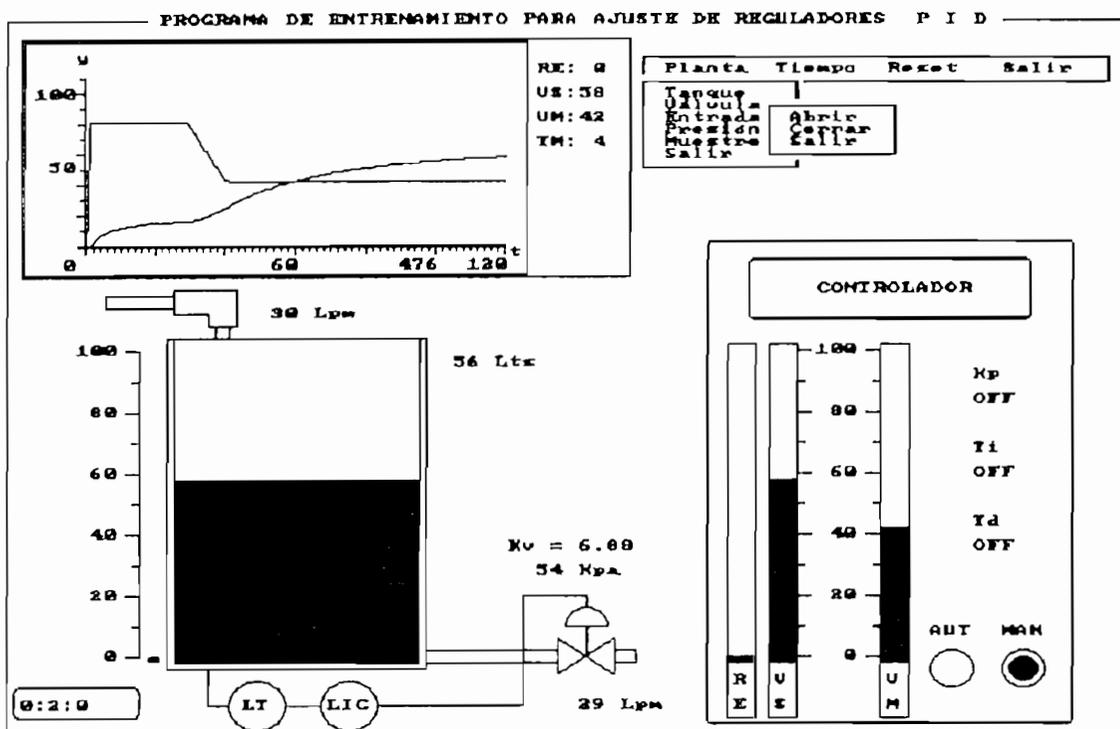


Fig. 4.5 Gráfico general del control manual

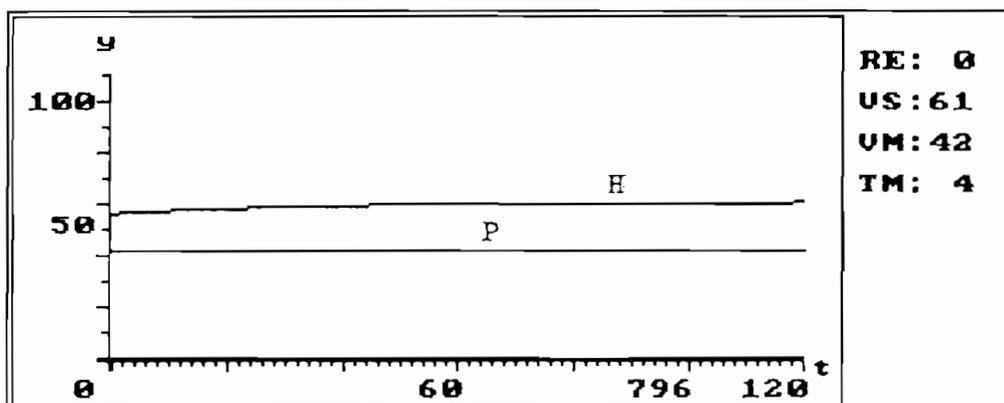


Fig. 4.6 Control manual

Del gráfico anterior se observa que la respuesta del proceso se caracteriza por presentar un tiempo de establecimiento $t_s=796s$, y por no existir sobre impulso.

4.2.3 Proceso en lazo cerrado

Para realizar esta prueba se consideran las mismas condiciones iniciales de las pruebas anteriores, con $K_p=1$, $T_i=OFF$, $T_d=0$.

Como resultado de la prueba se obtiene el gráfico de la figura 4.7 donde se observa que el nivel del líquido sube, pero no alcanza el valor de referencia, es decir, existe un error de estado estable diferente de cero.

Esto es, el sistema en lazo cerrado se caracteriza por tener un error de posición $E_p=58,3\%$, un máximo sobreimpulso porcentual $M_p=0$, y un tiempo de establecimiento $t_s=80$ seg.

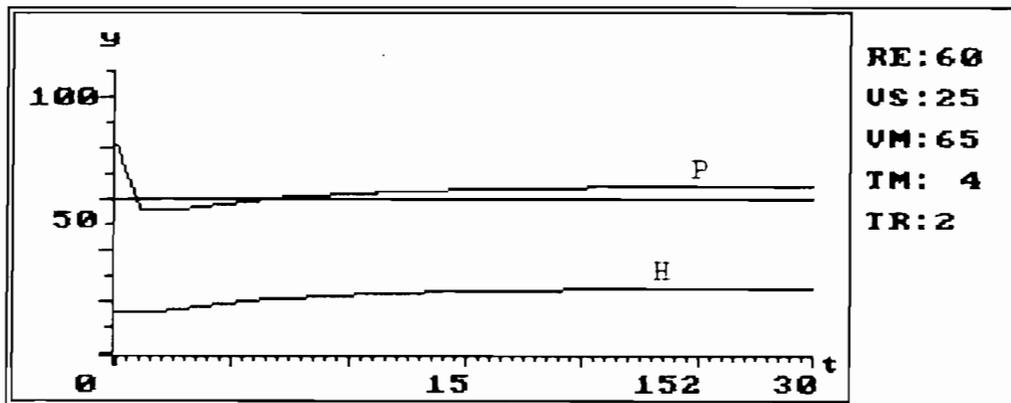


Fig. 4.7 Proceso en lazo cerrado

4.3 PRUEBAS DE SIMULACION DEL CONTROL DEL PROCESO

Se realizar cinco pruebas de control del proceso, las cuatro primeras consisten en diseñar el control PI utilizando las técnicas de ajuste, ajuste automático y lugar geométrico de las

raíces, así: método de Ziegler Nichols, método de la curva de reacción, método de auto-ajuste; y, cancelación de polo y cero. La quinta prueba consiste en ajustar el controlador, a los mejores valores, partiendo de uno de los diseños previos.

4.3.1 Control PI utilizando el método de Ziegler Nichols

Siguiendo las recomendaciones del método expuesto en el literal 2.4.1a, se aumenta el valor de K_p hasta conseguir que el sistema oscile de forma continua, en estas condiciones, se encuentra la ganancia crítica K_c como el valor de K_p que produce la oscilación, y el período crítico T_c , como el período de la oscilación del sistema. Para conseguir la oscilación de la variable de salida del sistema se utiliza un retardo de tiempo de dos veces el período de muestreo ($TR:2$).

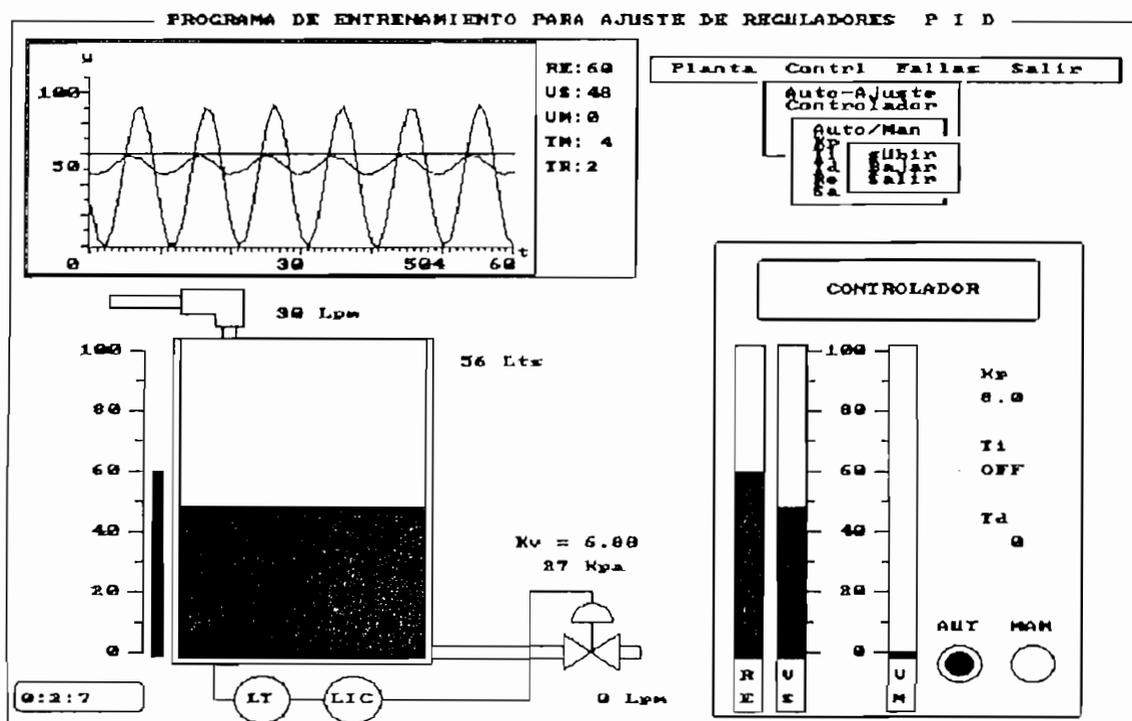


Fig. 4.8 Sistema en condiciones de oscilación.

La figura 4.8 presenta el sistema en condiciones de oscilación, de donde se extraen los valores de $K_c=8$ y $T_c=36$, que de acuerdo al método utilizado determinan que $K_p=3.6$ y $T_i=30$.

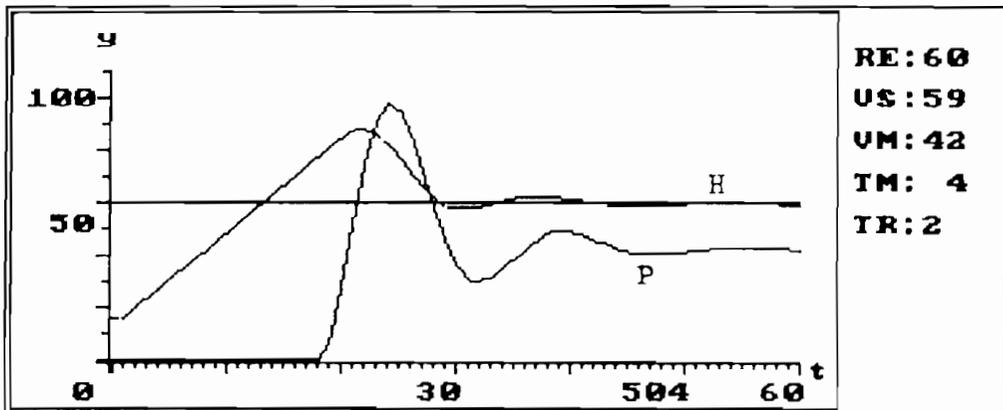


Fig. 4.9 Control PI con el método de Ziegler Nichols

Utilizando una amplificación de 2 se obtiene la curva de la figura 4.9. Donde se observa que la respuesta del sistema utilizando el método de Ziegler Nichols se caracteriza por tener un error de posición $E_p=0$, un máximo sobreimpulso porcentual $M_p=46.6$, y un tiempo de establecimiento $t_s=120s$.

4.3.2 Control PI utilizando el método de la curva de reacción

De acuerdo al método expuesto en el literal 2.4.1b, para la realización de la prueba se parte de las condiciones en estado estable del sistema en lazo abierto (simulación del proceso), y se da una perturbación en el caudal de entrada de 30 a 56 Lpm, obteniéndose como resultado la curva de reacción de la figura 4.10 utilizando una amplificación de 1, de donde $t_r=12$, $T=54$, $D_u=46.43$ y $D_{cu}=72.41$, que de acuerdo al método utilizado

los parámetros del control PI son: $K_p=4$ y $T_i=40$.

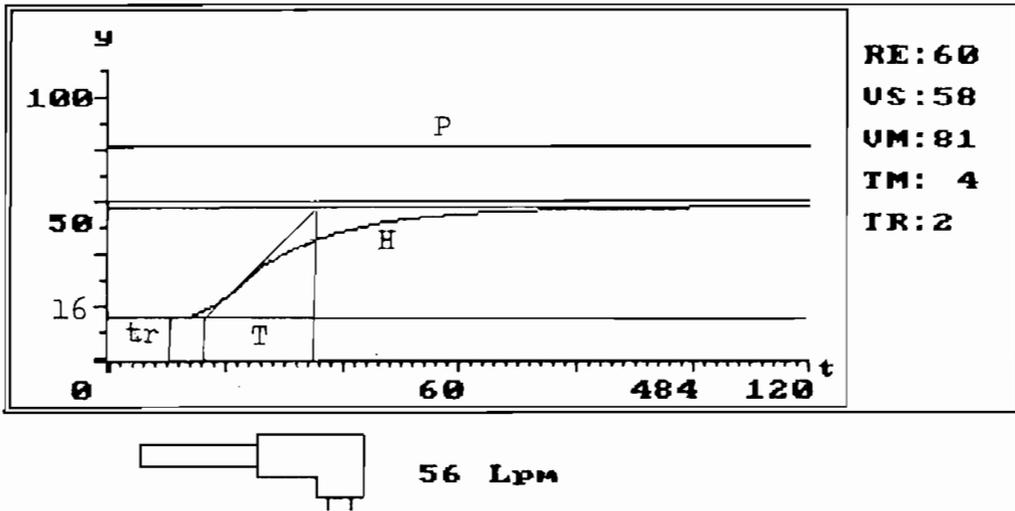


Fig. 4.10 Curva de reacción.

Utilizando los valores anteriores como parámetros del controlador se obtiene la curva de la figura 4.11. Donde se observa que la respuesta del sistema utilizando el método de reacción se caracteriza por tener un error de posición $E_p=0$, un máximo sobreimpulso porcentual $M_p=36.66\%$; un tiempo de establecimiento $t_s=156s$.

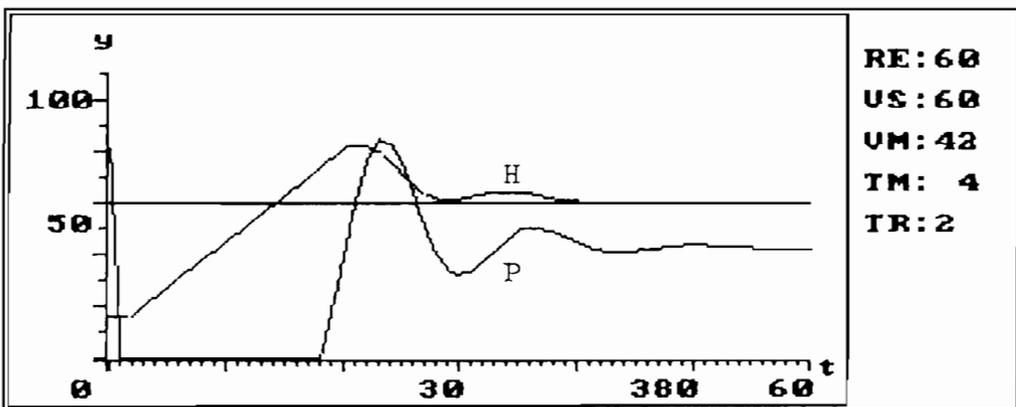


Fig. 4.11 Control PI con el método de la curva de reacción

4.3.3 Control PI utilizando el método de auto-ajuste

Esta prueba se basa en la utilización del método de ajuste automático expuesto en el literal 2.4.2, implementado como una rutina particular del programa, la misma que se detalla en el literal 3.3.4. A continuación se explica la forma general de utilizar esta rutina a la vez que se realiza la respectiva prueba de control.

Para activar la rutina de auto-ajuste el controlador debe estar en manual. Cuando se conecta al proceso se indica con d:4 AA, en la línea sexta de la columna numérica, el número 4 indica la amplitud del relé utilizado en el método, esta amplitud puede variar de 1 a 5 en pasos de uno, siempre que este apagado el auto-ajuste. Las letras AA son las iniciales de auto-ajuste. A medida que el método se desarrolla se van modificando automáticamente los valores de los parámetros K_p y T_i del controlador. Para colocar el controlador en automático es necesario desconectar el auto-ajuste del proceso, esto se indica cuando desaparece la leyenda AA de la sexta línea de la columna numérica.

Con una amplitud del relé $d=4$ se obtienen los resultados de los parámetros que se observan en la figura 4.12.

Con los valores anteriores se realiza el control del proceso que da como resultado la curva de la figura 4.13. Donde se observa que la respuesta del sistema utilizando el método de auto-ajuste se caracteriza por tener un error de posición $E_p=0$,

un máximo sobreimpulso porcentual $M_p=23.3$; un tiempo de establecimiento $t_s=120s$.

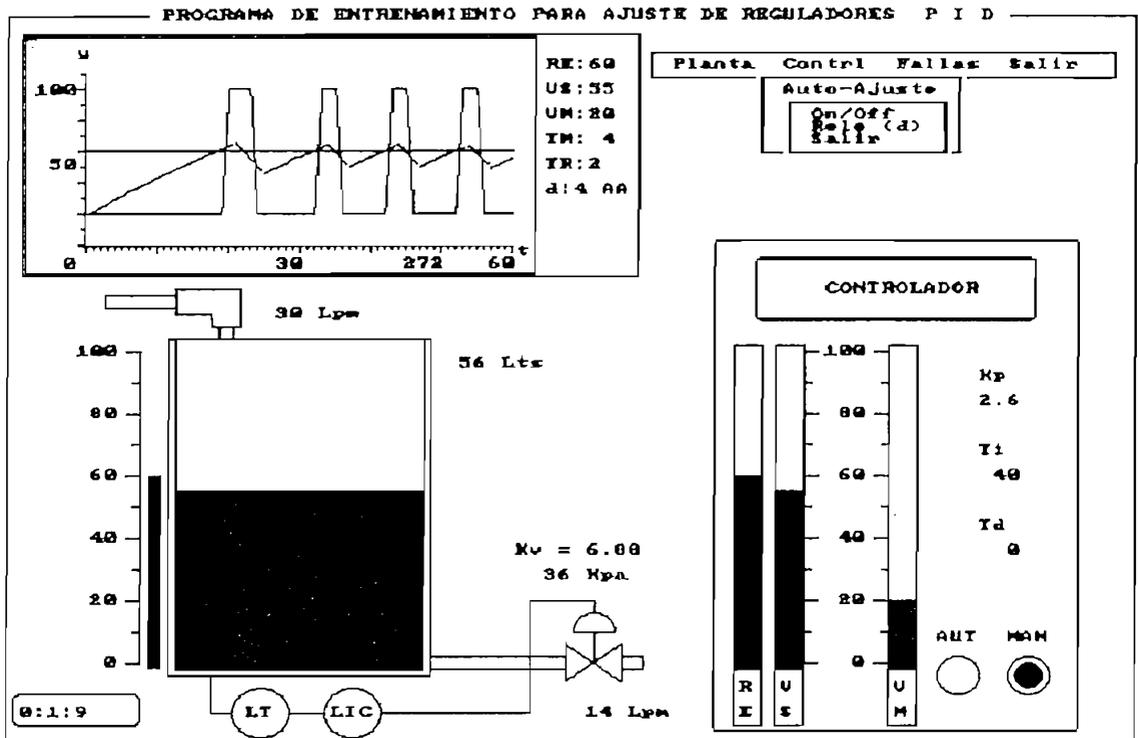


Fig. 4.12 Método de auto ajuste

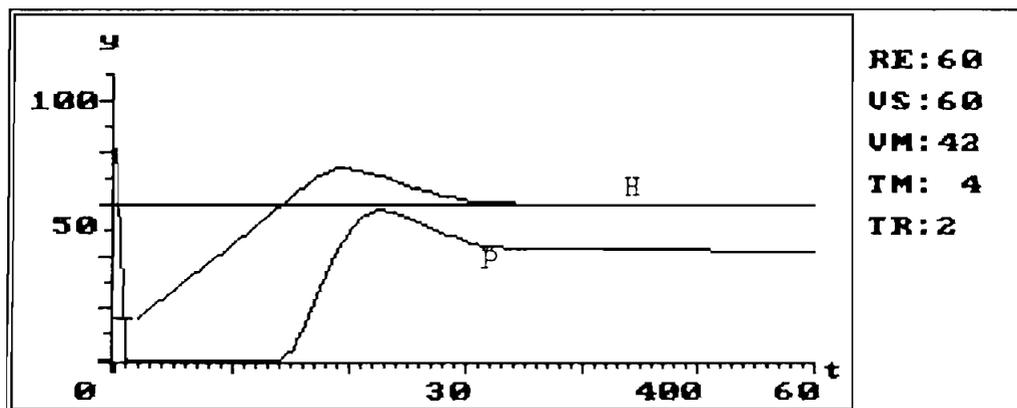


Fig. 4.13 Control PI con el método de auto ajuste ($d=4$)

Con una amplitud del relé $d=3$ se tienen que $K_p=3$ y $T_i=43$, lo que da como resultado la curva de la figura 4.14. Donde se

observa que la respuesta del sistema se caracteriza por tener un error de posición $E_p=0$, un máximo sobreimpulso porcentual $M_p=25$; un tiempo de establecimiento $t_s=120s$.

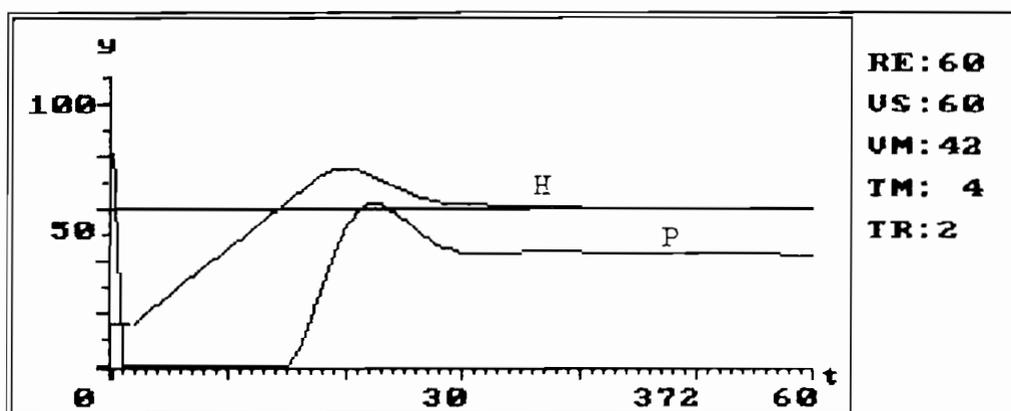


Fig. 4.14 Control PI con el método de auto ajuste ($d=2$)

4.3.4 Método de compensación por cancelación de polos y ceros

Para la realización de esta prueba se utiliza la función de transferencia del sistema obtenida en el literal 2.2.1

Siendo la función de transferencia de la planta igual a:

$$G(s) = \frac{K_2}{s+K_1} \quad [4.3]$$

$$G(s) = \frac{11.1111}{s+0.0150151} \quad [4.4]$$

y la función de transferencia del control PI igual a :

$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad [4.5]$$

la función de transferencia total es:

$$G_T(s) = G_C(s) * G(s) \quad [4.6]$$

$$G_T(s) = \frac{K_2 K_P}{(s+K_1)} * \frac{(s+K_i)}{s} \quad [4.7]$$

Donde: $K_i = 1/T_i$

De la anterior ecuación se concluye que para cancelar el polo de la planta con el cero del controlador es necesario que K_i sea igual a K_1 , decir que $T_i=66.6s$. Reemplazando este valor en la ecuación 4.7, la función de transferencia total de la planta se reduce a:

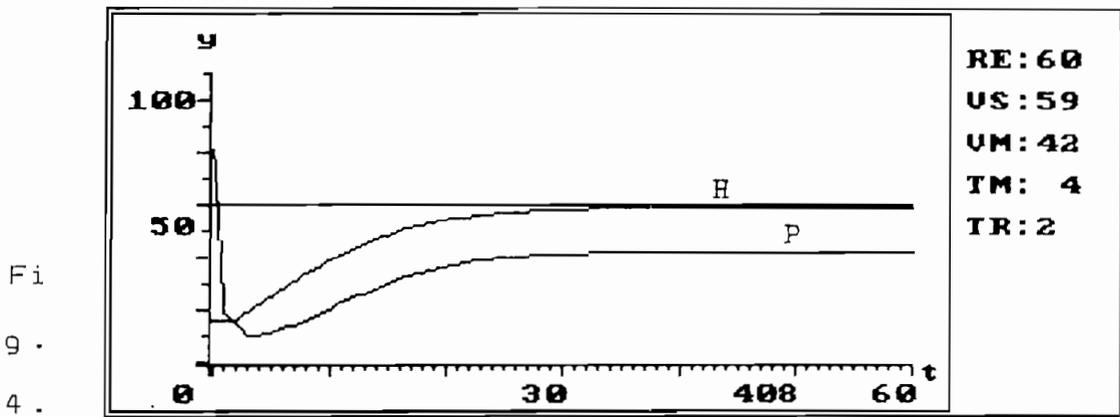
$$G_T(s) = \frac{11.1111 * K_P}{s} \quad [4.8]$$

Con lo cual la función de transferencia total en lazo cerrado es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_T}{1+G_T} \quad [4.9]$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{11.1 * K_P}{s+11.1 * K_P} \quad [4.10]$$

Ubicando el polo de lazo cerrado en -20 , es decir con $K_P=1.8$ y T_i igual al valor calculado en la cancelación, se realiza el control del proceso, obteniendo como respuesta del sistema la curva de la figura 4.15.



Fi

9 .

4 .

15

Cancelación de polos y ceros

Donde se observa que la respuesta del sistema utilizando la compensación por cancelación de un polo con un cero se caracteriza por tener un error de posición $E_p=0$, un máximo sobreimpulso porcentual $M_p=0\%$, y un tiempo de establecimiento $t_s=132s$.

TABLA 4.1 CARACTERISTICAS OBTENIDAS CON LOS DIFERENTES METODOS DE CONTROL.

METODO DE CONTROL	K_p	T_i	M_p	t_s
Ganancia crítica	3.6	30	46.6	120
Curva de reacción	4	40	36.66	156
Método de auto-ajuste	2.6	40	23.3	120
Cancelación de polo y cero	1.8	66	0	132

En la tabla 4.1 se resumen los parámetros del controlador y las características de cada una de las cuatro formas de ajuste

del controlador analizadas previamente.

4.3.5 Control PI con ajuste de valores

Partiendo de los valores dados por el método de auto ajuste se encuentran los parámetros del controlador que permitan tener un M_p que este dentro del rango de 5 a 10% , y con el menor tiempo de establecimiento posible.

Del ajuste del control se obtiene la curva de respuesta del gráfico de la figura 4.16, donde $K_p=2$, $T_i=49$, $M_p=3\%$, $t_s=100s$ y $E_p=0$.

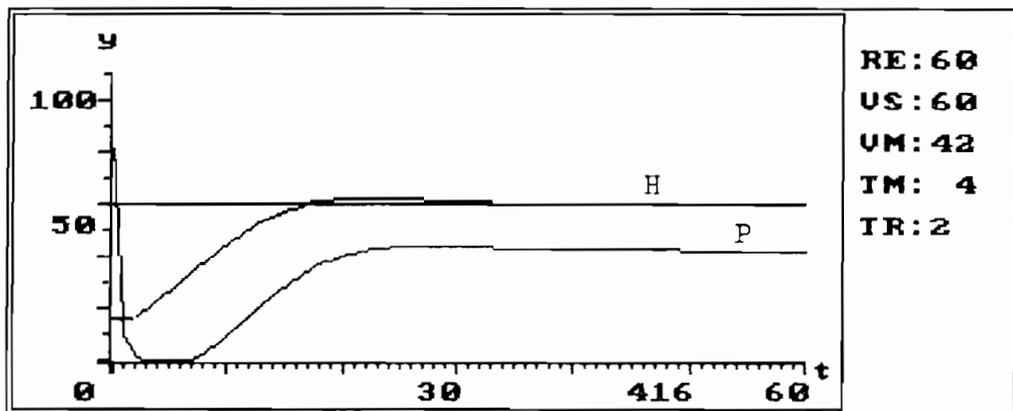


Fig. 4.16 Control PI con ajuste de valores

4.4 PRUEBAS DE SIMULACION DE FALLAS

Se realizan tres pruebas de simulación de fallas correspondientes a los tres tipos de fallas que considera el programa: falla en el caudal de entrada, falla en la válvula de control y falla en el lazo de control.

Estas pruebas describen el efecto que produce cada una y la forma de identificarlas cuando se activan. Las fallas solamente se activan cuando el controlador esta en automático.

4.4.1 Falla en el caudal de entrada

Cuando esta activada aparece la indicación F-ENTR en la séptima fila de la columna numérica. Esta falla hace que el caudal de entrada sea cero, por lo cual el controlador cierra inmediatamente la válvula de control. Debido al tiempo de retardo, el nivel del líquido baja a un valor menor del que tenía antes de la falla, por lo tanto no se alcanza el valor de referencia. Cuando la falla desaparece el caudal de entrada vuelve a su valor inicial y el controlador mantiene cerrada la válvula de control hasta que el sistema se restablece.

4.4.2 Falla en la válvula de control

Cuando esta activada aparece la indicación F-SALI en la octava fila de la columna numérica. Esta falla bloquea la válvula de salida o control haciendo que conserve el último valor que tenía antes de que se presentara. Si la falla se presenta cuando la válvula se esta cerrándose el tanque puede llegar a llenarse hasta desbordarse, si se presenta cuando se ha alcanzado el valor de estabilidad no se puede apreciar su efecto, si se presenta cuando la válvula se esta abriendo el tanque se vacía hasta su valor de establecimiento.

4.4.3 Falla en el lazo de control

Cuando esta activada aparece la indicación F-CTRL en la novena y última fila de la columna numérica. Cuando esta falla se presenta la válvula de control se abre totalmente a menos que se encuentre bloqueada, es decir que este activada la falla en la válvula de control, el nivel baja hasta su valor de establecimiento. Cuando se elimina la falla el controlador vuelve a su operación normal.

4.5 CONCLUSIONES

El programa desarrollado presenta un excelente despliegue gráfico del sistema y de los resultados; permite además cambiar los diferentes parámetros en forma sencilla con la utilización de menús desplegable, brindando un ambiente amigable, que facilita su utilización en el entrenamiento de personal.

Esta tesis realiza aportes bibliográficos en cuanto a la modelación completa de un sistema real de control de nivel de líquidos que incluye la consideración no lineal del proceso, sus parámetros y las especificaciones técnicas del actuador y transductor utilizados.

La simulación del sistema se realiza en base a la determinación del modelo de cada uno de los componentes del mismo como son: planta, controlador, actuador y transductor.

También se realiza una aplicación del método de ajuste automático de controladores PID, al sistema de control de nivel de líquidos.

Esta tesis realiza un aporte bibliográfico de los distintos esquemas y algoritmos de implementación prácticos del control PID bajo consideraciones de operación y funcionamiento, y la discretización del control PID no interactuante.

Del estudio del control PID se concluye que:

La acción de control integral sola, crea inestabilidad en el lazo cerrado debido a que atrasa 90° el ángulo de fase de la planta. Pero si T_i es apropiadamente escogido la acción proporcional integral PI da estabilidad en lazo cerrado. La acción de control integral tiene el problema de producir saturación del actuador, por ello se ha puesto énfasis en el estudio de implementaciones que eviten este inconveniente.

La acción derivativa es utilizada en procesos de control donde hay un excesivo ángulo de retardo de fase por ejemplo con un orden mayor o igual a tres o con un retardo de tiempo significativo. En la práctica la acción derivativa se emplea mucho menos que las otras debido a que el ruido de la planta es indeseablemente amplificado a altas frecuencias. Para evitar el transitorio derivativo la acción derivativa debe actuar solamente sobre la salida $y(t)$, y no sobre el error.

El control PID es un algoritmos en cascada con la planta y

tiene la ventaja de filtrar (filtro pasa bajo) los efectos del actuador o de controlar algunas variables intermedias.

Esta tesis esta orientada a la utilización en el Laboratorio de Control Automático, puesto que constituye una valiosa herramienta en el ensayo de diferentes técnicas de ajuste del control PID, como son: el método de Ziegler Nichols, el método de la curva de reacción, el método de auto ajuste, la compensación por cancelación de polos y ceros, y el ajuste de valores partiendo del resultado de uno de los métodos anteriores.

De las diferentes pruebas de control realizadas se concluye que:

Para realizar el control de un proceso es necesario conocer las características estáticas y dinámicas del mismo.

En el control de nivel de líquidos, un sobreimpulso muy grande es indeseable porque produce desbordamiento del tanque.

El diseño del control utilizando el método de la curva de reacción es muy sensible a errores por la imprecisión en el análisis de la curva de reacción.

La función de transferencia es útil para diseñar el control, aun cuando no se la pueda utilizar para la simulación real del proceso físico por ser una aproximación válida solamente en la vecindad del punto de operación.

El diseño del control con la función de transferencia, permite seleccionar el valor de los parámetros del controlador mediante una ubicación arbitraria de polos en el lugar deseado para obtener un funcionamiento satisfactorio.

El método de auto ajuste es una técnica útil de inicialización el controlador.

De las pruebas realizadas se han podido comprobar la eficacia del programa, puesto que arroja resultados satisfactorios y permiten afirmar que se ha cumplido con el objetivo propuesto que era " Conseguir una herramienta computacional de simulación que permita entrenar en el ajuste del controlador proporcional integral derivativo (PID) en un proceso industrial".

BIBLIOGRAFIA

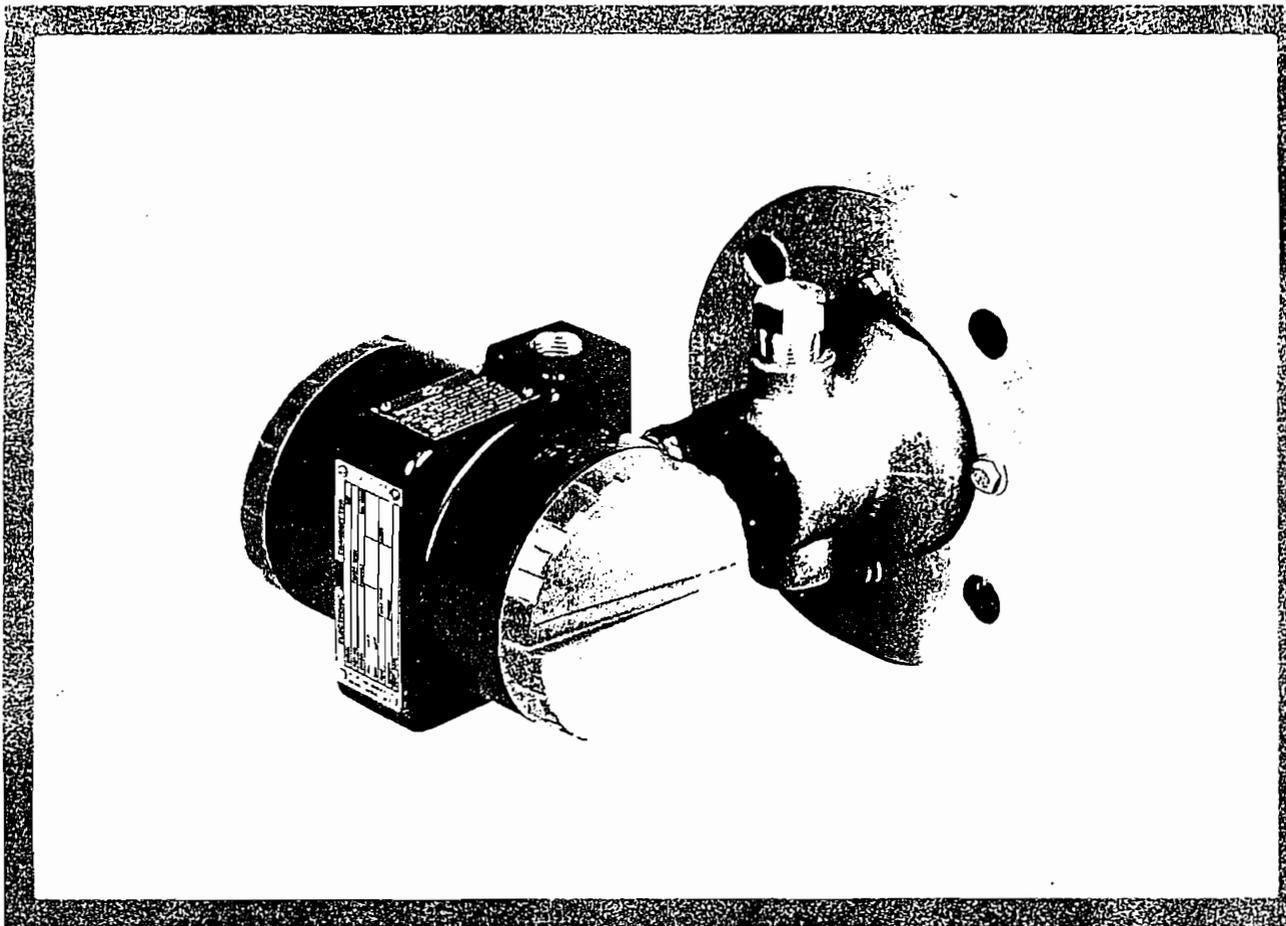
- 1.- CREUS ANTONIO, "Instrumentación Industrial", Editores Marcombo, S.A., Barcelona, 1985.
- 2.- KATSUHIKO OGATA, "Ingeniería de Control Moderna", Editorial Prentice-Hall International, 1974.
- 3.- MARCELO ALONSO, "Física, Curso Elemental, Hidromecánica Calor", Ed. Cultural Centroamericana, S. A., Guatemala, 1967.
- 4.- CARL TOWNSEND, "Understanding C", Ed. Howard W.Sams & Company, Indiana, 1988.
- 5.- HUGO BANDA-GAMBOA and DELROY FOLKES, "Programming in 'C'", The Microcomputer Centre, University of Dundee, 1989.
- 6.- ESTEVEZ A. ELENA, "Implantación de un Controlador Experto", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1992.
- 7.- GARZON FERNANDO, "Diseño y Construcción de un Control Análogo y Digital de Nivel de Líquidos en Tanques Acoplados", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1990.
- 8.- D. W. CLARKE, "PID algorithms and their computer

implementation", Department of Engineering Science, University of Oxford, 1984.

- 9.- K. J. ASTROM and T. HAGGLUND, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specification on Phase and Amplitude Margins", International Federation of Automatic Control, 1984.

APENDICE A: DATOS DEL TRANSDUCTOR Y ACTUADOR UTILIZADOS

1. Especificaciones del transductor de nivel A-1
2. Especificaciones de la válvula de control A-9
3. Especificaciones del conversor de corriente a
neumática..... A-13



827DF LIQUID LEVEL OR DENSITY FLANGED TRANSMITTER

This 2-wire transmitter provides precise measurement of liquid level or density, and transmits a proportional 4-to-20 or 10-to-50 mA dc signal. A version with frequency output for use with SPEC 200 Input Components is also available. (Refer to PSS 2A-1A4 B.)

Resonant wire sensor technology provides significant improvement in performance and long-term stability. Modular construction simplifies servicing and helps to reduce spare parts inventory. This unique blend of up-to-date technology and product design, combined with advances in wetted-parts materials, provides the process industries with a liquid level or density measurement transmitter having a new dimension in versatility.

SUPERIOR PERFORMANCE

The 827DF Transmitter provides assured accuracy of $\pm 0.2\%$ of span, repeatability of 0.05% of span, and ex-

cellent long-term stability. Combine this with a field-replaceable sensor, and minimal ambient temperature and static pressure effects, and the result is unequalled overall performance.

WARRANTY

All Foxboro Resonant Wire transmitters are warranted against defects in material and workmanship. This Warranty, combined with the transmitter's proven worldwide performance record, provides assurance of continuous accurate service.

FIELD-REPLACEABLE SENSOR

Unlike other flanged transmitters, the 827DF is not a modified differential pressure transmitter with a capillary seal system. The sensor is field-replaceable resulting in a transmitter that has superior temperature stability and is easy to maintain.

RADIO-FREQUENCY INTERFERENCE (RFI) PROTECTION

The 827DF Transmitter output is virtually unaffected by radio-frequency signals or stray electrical noise.

MULTIPLE PROTECTION FROM ENVIRONMENTS

There are only two accesses to the epoxy-coated aluminum housing. Each is sealed to exclude moisture and corrosive atmospheres. The housing has two separate compartments: one for the electronics, the other for field connections. This eliminates the need to open the electronic compartment during installation. The electronic circuits are encapsulated in one replaceable module which also provides protection against the effects of moisture.

FUNCTIONAL SPECIFICATIONS

Operating Conditions

Influence	Reference Operating Conditions	Normal Operating Condition Limits	Transportation and Storage Condition Limits
Sensor Temperature	24 ± 2°C (75 ± 3°F)	- 40 and + 120°C (- 40 and + 250°F)	—
Topworks Temperature	24 ± 2°C (75 ± 3°F)	- 40 and + 80°C (- 40 and + 180°F)	-45 and + 95°C (-50 and + 200°F)
Relative Humidity	50 ± 10%	0 and 100%	0 and 100% noncondensing
Supply Voltage 4 to 20 mA dc 10 to 50 mA dc	30 ± 0.5 V dc 80 ± 0.5 V dc	Refer to Supply Voltage Requirements and External Loop Load Limitations	—
Output Load 4 to 20 mA dc 10 to 50 mA dc	650 Ω 600 Ω		

Span and Range Limits

Sensor Designation ^(a)	mH ₂ O		inH ₂ O	
	Span	Range ^(b)	Span	Range ^(b)
L	0.13 and 0.75	0 and 0.75	5 and 30	0 and 30
M	0.65 and 3.8	0 and 3.8	25 and 150	0 and 150
H	3.2 and 19	0 and 19	125 and 750	0 and 750

^(a)Refer to Model Code, Page 6, for sensor designation.

^(b)The measurement corresponding to minimum output may be suppressed up to 150% of calibrated span; upper range value must not exceed range limit of sensor.

Calibration Adjustments

Zero An external adjustment screw is located behind a protective hinged cover.

Span Coarse and fine span adjustments are in the electronics compartment.

Output Action Adjustment Reverse output is selectable by moving two jumpers from "F" (Forward) position to "R" (Reverse) position. Jumpers located on electronics module behind hinged access cover.

Volumetric Displacement for Full Scale ΔP Less than 0.16 cm³ (0.01 in³) for all sensors.

Flange Working Pressure Limits^(a)

Flange Type ^(b)	Operating Conditions					
	Normal ^(c)			Maximum ^(d)		
	MPa	psi	bar	MPa	psi	bar
KA	1.69	245	16.9	1.96	285	19.6
KC	9.19	1333	91.9	10.20	1480	102.0
SA	1.57	228	15.7	1.90	275	19.0
SC	8.14	1180	81.4	9.93	1440	99.3
KP	4.00	580	40.0	4.00	580	40.0
KR	10.00	1450	100.0	10.00	1450	100.0
SP	4.00	580	40.0	4.00	580	40.0
SR	10.00	1450	100.0	10.00	1450	100.0

^(a)ANSI B16.5 and applicable DIN and British standards.

^(b)Flange designations in Model Code; see Page 6.

^(c)With temperature limits of - 40 and + 120°C (- 40 and + 250°F)

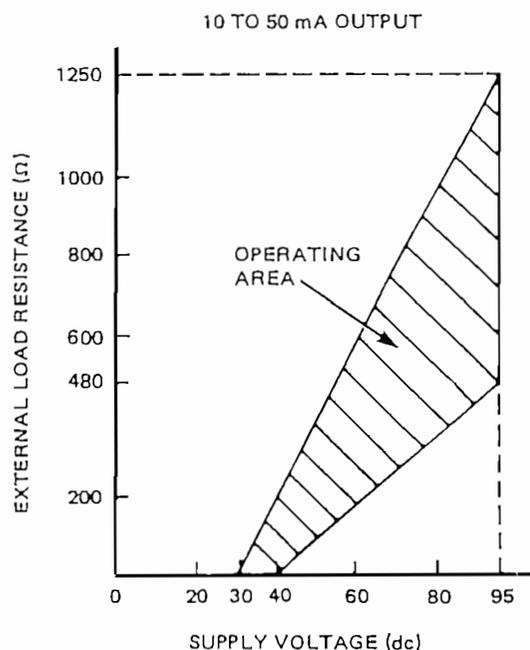
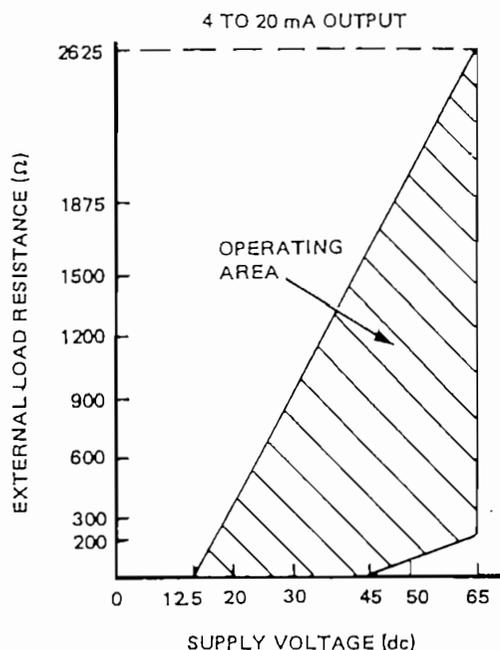
^(d)Values stated are at 38°C (100°F).

Mounting Position May be mounted in any orientation

Output Signal 4 to 20, or 10 to 50 mA dc.

Output Action Either forward or reverse, determined by position of two jumpers.

Supply Voltage Requirements and External Loop Load Limitations Refer to figures below.



Adjustable Damping Frequency response is set by positioning a jumper (located in the electronics compartment) in one of three positions. The jumper positions are designated L, M, and H for low, medium, and high damping, respectively. Response times and nominal frequency response at a magnitude ratio of -3 dB are as follows:

Jumper Position	Frequency Response (Hz)	Response Time (s) ^(a)
L	1.0	0.5
M	0.3	1.5
H	0.1	5.0

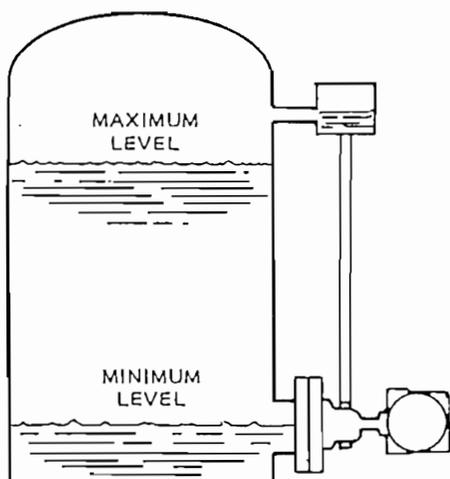
^(a)Time required for a 90% recovery from an 80% input step, as defined in ANSI/ISA S51.1 (1979).

Elevated-Zero Range

Elevated-zero range applications, such as closed tank level measurement with a seal liquid in the outside leg (wet leg), are handled simply by reversing the position of the sensor (see Sensor Orientation in Model Code). This now becomes a suppressed-zero range calibration and the desired output action is selected with the output action jumpers located in the electronics compartment. See figure below. For ranges which cross zero (compound ranges), a maximum of 20% of input span can be below zero.

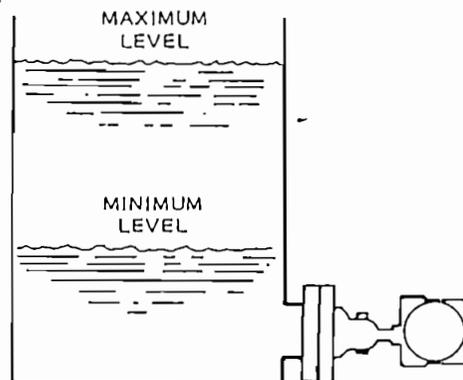
Suppressed-Zero Range

The measurement value corresponding to minimum output may be as high as 150% of calibrated span. The amount of zero suppression plus calibrated span cannot exceed the upper range limit of the sensor used. See figure below.



Typical Ranges:
0.75 to 0.15 metres head of water
30 to 5 inches head of water

Typical Elevated-Zero Range Application



Typical Ranges:
0.5 to 2.5 metres head of water
20 to 100 inches head of water

Typical Suppressed-Zero Range Application

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Transmitter with cobalt-nickel-chrome sensor diaphragms, at Reference Operating Conditions, unless otherwise specified

Accuracy (Includes linearity, hysteresis, and repeatability) $\pm 0.2\%$ of calibrated span.

Repeatability 0.05% of calibrated span.

Hysteresis 0.05% of calibrated span.

Reproducibility (Includes effects of hysteresis, repeatability and drift over a one-hour period) 0.1% of calibrated span.

Drift (Over a six-month period) 0.1% of reference span.

Reference Span A commonly used span for each sensor has been determined and defined as the reference span. Performance specifications which vary with calibrated span are also given at the reference span. This provides more useful information than if these specifications were given only at the maximum span. The reference spans are as shown in the table below.

Sensor Designation	Reference Spans	
	mH ₂ O	inH ₂ O
L	0.51	20
M	2.5	100
H	12.7	500

Static Pressure Effect The table opposite lists the maximum zero shift and total effect (maximum effect at any point in calibrated range) when the static pressure is increased from 0 to the values listed. (For sensor with Co-Ni-Cr diaphragms and AISI Type 316 stainless steel [316 ss] wetted parts.)

Sensor Designation	Effect	Static Pressure Change Effect in percent of:					
		Minimum Span		Reference Span		Maximum Span	
		10 MPa ^(a)	2 MPa ^(b)	10 MPa	2 MPa	10 MPa	2 MPa
L	Zero Shift	± 2.5	± 0.45	± 0.55	± 0.10	± 0.40	± 0.10
	Total Effect	± 3.0	± 0.60	± 0.75	± 0.15	± 0.60	± 0.10
M	Zero Shift	± 1.0	± 0.20	± 0.25	± 0.10	± 0.25	± 0.10
	Total Effect	± 1.5	± 0.25	± 0.30	± 0.10	± 0.25	± 0.10
H	Zero Shift	± 1.5	± 0.30	± 0.40	± 0.10	± 0.30	± 0.05
	Total Effect	± 3.0	± 0.60	± 0.75	± 0.15	± 0.60	± 0.15

^(a)1450 psi or 100 bar

^(b)285 psi or 20 bar

Position Effect The zero shift is $\pm 0.1\%$ of reference span for a 90° rotation in plane of flange, with air in body. This shift may be calibrated out with the zero adjustment. There is no span effect.

Vibration Effect The total effect (maximum effect at any point on the scale) is 0.1% of reference span at frequencies up to 200 Hz and amplitudes up to 7.8 mm (0.31 in) peak-to-peak or for acceleration up to 10 m/s² (1 "g") whichever is smaller.

Ambient Temperature Effect The table below lists the maximum zero shift and total effect (maximum effect at any point in calibrated range) per 55°C (100°F) change between the limits of -30 and +80°C (-20 and +180°F).

Sensor Designation ^(a)	Effect	Effect in Percent of:		
		Minimum Span	Reference Span	Maximum Span
M, H	Zero Shift	± 3.0	± 0.75	± 0.5
	Total Effect	± 3.5	± 1.25	± 1.0

^(a)With L sensor, effects are doubled.

RFI Effect The output error is 0.1% of calibrated span for radio frequencies in the range of 27 to 500 MHz and field intensity of 20V/m when the transmitter is properly installed and topworks housing covers are on.

Supply Voltage Effect The output changes 0.005% of span for each 1 V change within the specified supply voltage requirements. See "Supply Voltage Requirements and External Loop Load Limitations."

PHYSICAL SPECIFICATIONS

Process Wetted Parts Materials

Sensor Diaphragms Cobalt-nickel-chrome alloy (standard), 316 ss, or Hastelloy C-276, as specified. Other sensor parts are 316 ss with Co-Ni-Cr and 316 ss diaphragms, and Hastelloy C-276 with Hastelloy C-276 diaphragms. Refer to TI 037-078 for information regarding the universal corrosion-resistant properties of the standard cobalt-nickel-chrome sensor material.

Retaining Ring 316 ss, or Hastelloy C with Hastelloy C-276 diaphragms.

Sensor Gasket pipe jacket with Co-Ni-Cr spring insert for 316 ss and Co-Ni-Cr diaphragms; Hastelloy C spring insert for Hastelloy C-276 diaphragms.

Nonwetted Parts Materials

Flange Cadmium-plated carbon steel, or 316 ss, as specified.

Body 316 ss

Body Plug 316 ss

Topworks Housing The housing and its covers are die-cast low copper aluminum alloy finished with blue epoxy paint. The covers are threaded and seat on Buna-N O-rings.

Sensor Fill Liquid Dow Corning dimethylsiloxane (DC200) silicone oil.

Data Plate Stainless steel data plate fastened to electronics housing with tapping screws. Includes space for customer tag data up to a maximum of 32 characters and spaces. For additional space, see optional Customer Tag.

Environmental Protection The transmitter housing is weatherproof and dusttight as defined in IEC IP65, and provides the watertight protection of NEMA Type 4.

Approximate Mass 13.5 kg (30 lb)

MODEL CODE

827DF = Liquid Level or Density Flanged Transmitter

Output Signal
 -H = 10 to 50 mA
 -I = 4 to 20 mA

Body Material (non-wetted)
 S = 316 Stainless Steel

Sensor Fill Fluid and Wetted Parts Material

<u>Fill Fluid</u>	<u>Sensor Diaphragm</u>	<u>Other</u>
1N = Silicone Oil	Cobalt-Nickel-Chrome	316 ss
1S = Silicone Oil	316 SS	316 ss
1C = Silicone Oil	Hastelloy C-276	Hastelloy C-276

Sensor Designation - Span Limits

<u>metres H₂O</u>	<u>inches H₂O</u>
L = 0.13 and 0.75	5 and 30
M = 0.65 and 3.8	25 and 150
H = 3.2 and 19	125 and 750

Flange Material (nonwetted)
 K = Cadmium-plated carbon steel
 S = 316 SS

Flange Size and Rating
 A = 3 inch ANSI, Class 150
 C = 3 inch ANSI, Class 300/600
 P = 80 mm, 40 bar, DIN and BS
 R = 80 mm, 100 bar, DIN and BS

Sensor Orientation
 1 = High Pressure Side Facing Process^(a)
 2 = Low Pressure Side Facing Process^(b)

Optional Selections
 -A = Indicator with 0 to 100% Uniform Scale
 -C = Indicator with Scale as Specified.

Example: 827DF-IS1NMKC2-A

^(a)For open tank, or closed tank with dry leg.

^(b)For closed tank with wet leg.

PRODUCT SAFETY SPECIFICATIONS

Electrical Classification

Testing Laboratory, Types of Protection and Area Classification	Conditions of Certification	Electrical Classification Code
BASEEFA certified Exn for IIC, Zone 2.	4 to 20 mA output. Connect to source not exceeding 45 V. Temperature Class T6 at 40°C or T4 at 80°C.	CS-E/BN-A
BASEEFA certified intrinsically safe EEx ib for IIC, Zone 1 (CENELEC).	4 to 20 mA output. Connect to BASEEFA certified intrinsically safe associated apparatus. Temperature Class determined by power ($P \leq 0.56$ W, T6; $P < 0.75$ W, T5; $P < 1.20$ W, T4).	CS-E/PB-E
CSA certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1, and Class II, Groups E, F, and G, Division 1.	4 to 20 mA output. Connect per TI 005-105. Temperature Class T6.	CS-E/CB-A
CSA certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1.	4 to 20 mA output. Connect to CSA-certified barriers rated 33 V, 415 Ω ; 30 V, 300 Ω ; 28 V, 270 Ω ; 26.7 V, 200 Ω or 20 V, 70 Ω . Temperature Class T4A.	CS-E/CD-A
CSA certified intrinsically safe for Class I, Groups C and D, Division 1.	4 to 20 mA output. Connect to CSA-certified barriers rated 33 V, 185 Ω ; 30 V, 130 Ω ; or 28 V, 115 Ω ; or 20 V, 30 Ω . Temperature Class T4A.	
CSA certified explosionproof for Class I, Groups B, C, and D, Division 1, and dust ignition-proof for Class II, Groups E, F, and G, Division 1.	4 to 20 or 10 to 50 mA output. Temperature Class T6.	CS-E/CD-A
CSA certified suitable for use in Class I, Groups A, B, C, and D, Division 2 locations.		
FM certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1, and Class II, Groups E and G, Division 1.	4 to 20 mA output. Connect per TI 005-101. Temperature Class T6.	CS-E/FB-A
FM certified intrinsically safe for Class I, Groups C and D, Division 1, and Class II, Groups E and G, Division 1.	4 to 20 mA output. Connect to Honeywell 38 barrier. Refer to TI 005-101 for barrier types and groups. Temperature Class T6.	CS-E/FB-H
FM certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1, and Class II, Groups E and G, Division 1.		
FM certified explosionproof for Class I, Groups B, C, and D, Division 1, and dust-ignition-proof for Class II, Groups E and G, Division 1.	4 to 20 or 10 to 50 mA output. Temperature Class T6.	CS-E/FD-A
FM certified nonincendive for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 2, and Class II, Group G, Division 2.		
LCIE certified flameproof combined with intrinsic safety EExd (ia) for IIC, Zone 1.	4 to 20 mA or 10 to 50 mA output. Temperature Class T6.	CS-E/LD-E
PTB certified intrinsically safe EEx ib for IIC, Zone 1 (CENELEC). Also accepted for use in all EEC member countries and in some CENELEC member countries outside the EEC. BASEEFA systems certificates have been obtained to permit connection with approved zener barriers or with other Foxboro associated safe area apparatus. Refer to Foxboro.	4 to 20 mA output. Connect to PTB-certified SPEC 200, UIO, and UCM intrinsically safe apparatus. Temperature Class determined by power ($P \leq 0.56$ W, T6; $P \leq 0.75$ W, T5; $P \leq 1.20$ W, T4).	CS-E/PB-E
SAA certified intrinsically safe Ex ib for IIC, Zone 1.	4 to 20 mA output. Connect per drawings 15001FL and 15001EL. Temperature Class T6.	CS-E/AB-A
SAA certified intrinsically safe Ex ib for IIC, Zone 1.	4 to 20 mA output. Connect per drawing 15001EL or 15001FL. Temperature Class T6.	
SAA certified flameproof Exd for IIB, Zone 1.	4 to 20 mA or 10 to 50 mA output. Temperature Class T6.	CS-E/AD-A

OPTIONAL FEATURES

Optional Feature	Description	AS Reference ^(a)
5-Year Warranty	Standard 1-year warranty increased to a full 5-year warranty. Refer to "Warranty" statement.	EW
Field Mounted Indicator	A Foxboro 65FS Indicator is provided for panel mounting by user. Refer to PSS 2A-3B1 A for Model Number of indicator required.	FMI
12.0 V dc Minimum Supply Voltage	A plug-in jumper is provided in the test jacks on the field wiring connection terminal block, 4 to 20 mA versions only, to allow an additional 25 Ω external load. Not available with optional indicator.	SB-12V
Compliance to NACE Standard MR-01-75	The National Association of Corrosion Engineers (NACE) Standard MR-01-75 (1980 revision) covers metallic requirements for resistance to sulfide stress cracking. This option includes process wetted parts selected to comply with the standard.	MR-01
Metric Conduit Adapter	Adapter supplied to permit connecting to M20 X 1.5 metric conduit thread.	MCTC
Field Mounted Indicator	Foxboro Model 65FS Indicator. Specify complete model number from PSS 2A-3B1 C. Remote mounting by customer.	FMI
PG 11 and PG 13.5 Trumpet Connection	A PG 11 or PG 13.5 electrical cable connection (trumpet connection) is attached to the topworks base. Connection provides a smooth trumpet-shaped entrance and strain-relieved support for open cable wiring. The PG 11 is recommended for cable diameter from 8 to 12 mm. The PG 13.5 is recommended for cable diameters from 9 to 14 mm.	PG 11 or PG 13.5
Customer Tag	Stainless steel tag wired to transmitter for customer tag data that doesn't fit on data plate. There can be a maximum of 10 lines of data with 40 characters and spaces per line.	MTS
Electrical Connector	Brass Hawk-type cable gland with 1/2 NPT external thread.	HCG

^(a)When ordering an option, add AS Reference to Model Code Example: 827DF-IS1NMKC2, AS Reference SB-12V.

WARRANTY

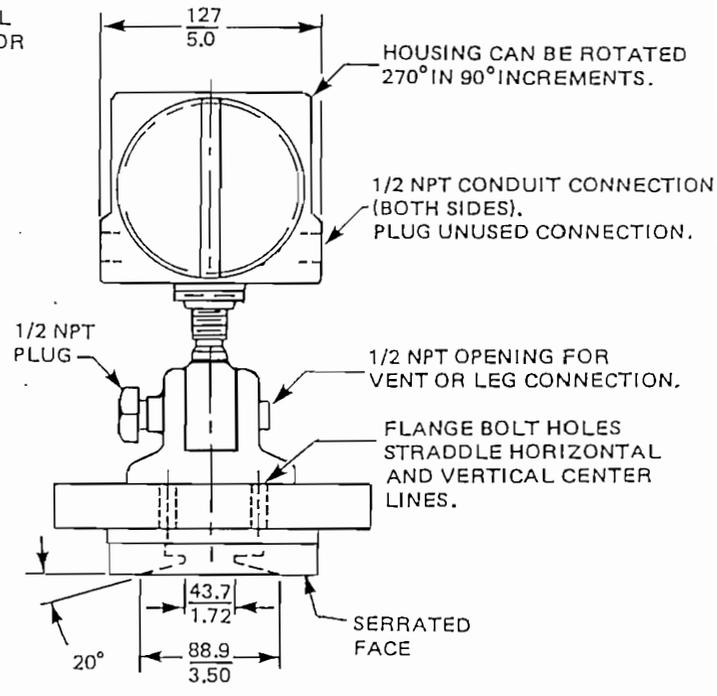
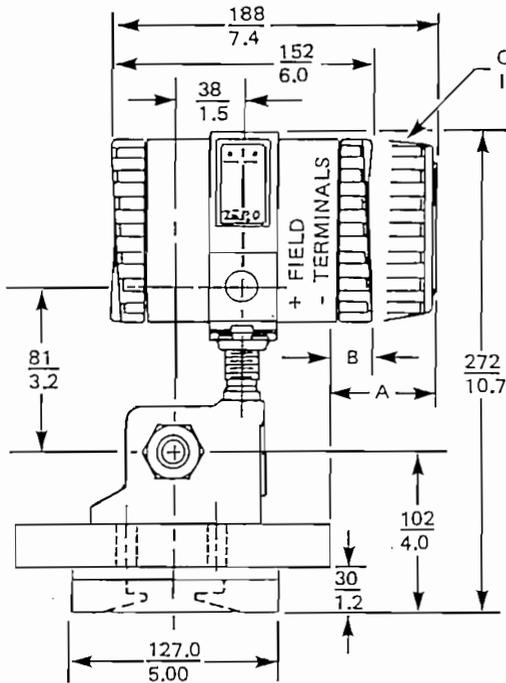
Foxboro warrants the original Purchaser that Foxboro-manufactured resonant wire transmitters shall be free from defects in material and workmanship, and agrees to either replace or repair free of charge, any such transmitter which shall be returned to the nearest authorized Foxboro repair facility within one year (or five years with Optional Feature EW) from date of delivery, transportation charges prepaid by the Purchaser. Purchaser retains responsibility for the application, corrosion resistance, and functional adequacy of the transmitter. For further details, refer to Section 11A of the Foxboro "General Conditions of Sale" document.

ORDERING INSTRUCTIONS

1. Model Number
2. Electrical Classification
3. Calibrated Pressure Range
4. Optional Features
5. Customer Tag Data

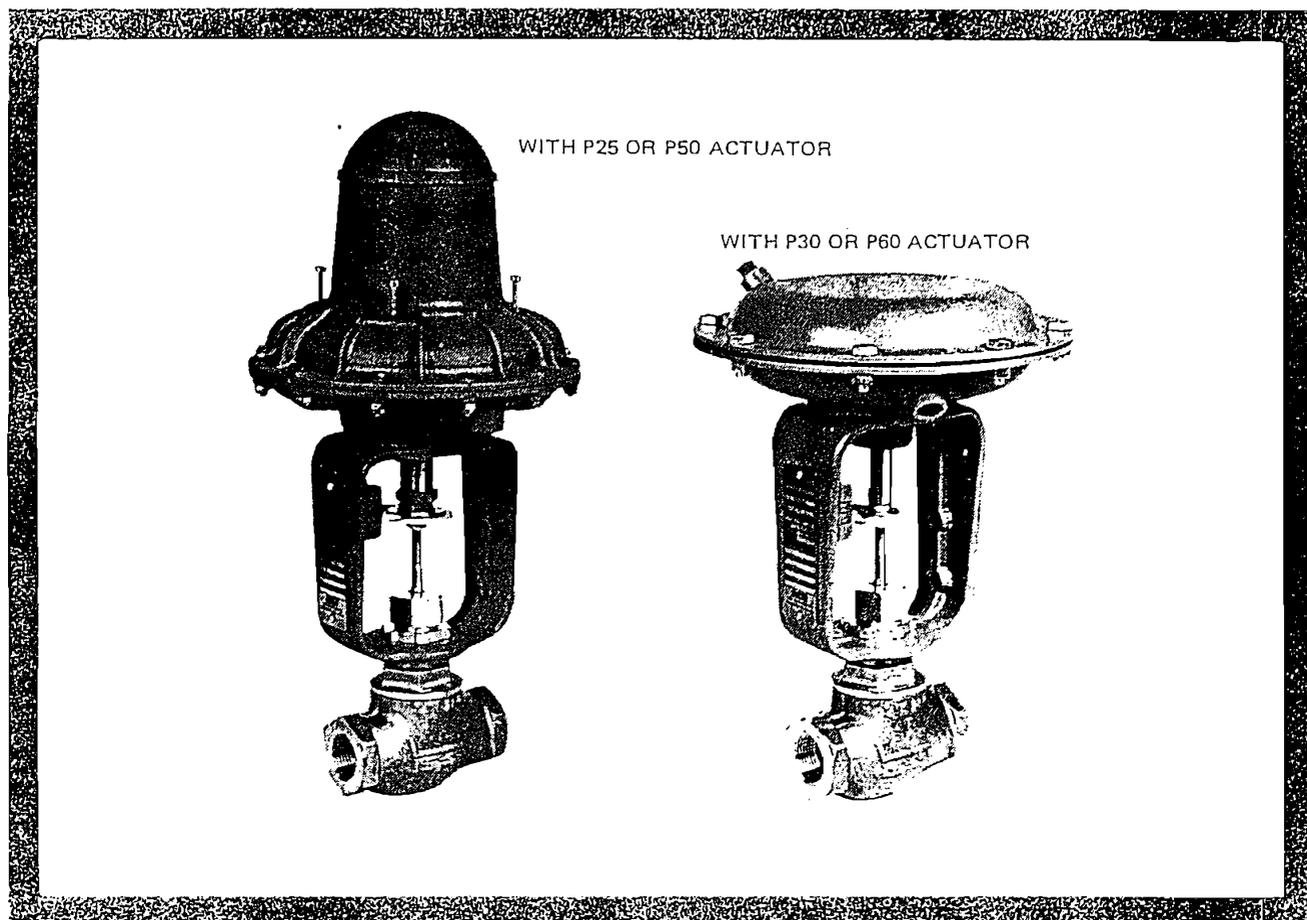
DIMENSIONS—NOMINAL

mm
in



FLANGE DATA					DIMENSION		
SIZE	DIAMETER	THICKNESS	DIAMETER OF BOLT CIRCLE	NO. OF HOLES	DIAMETER OF BOLT HOLES	A	B
3 in ANSI, CL 150	190.5 7.50	25.4 1.00	152.4 6.00	4	19.1 0.75	55 2.16	19.3 0.76
3 in ANSI, CL 300/600	209.6 8.25	38.1 1.50	168.3 6.63	8	22.4 0.88	45 1.78	9.8 0.38
80 mm, 40 bar, DIN and BS	200.0 7.87	25.4 1.00	160.0 6.30	8	18.0 0.71	50 1.98	14.6 0.58
80 mm, 100 bar, DIN and BS	230.0 9.06	38.1 1.50	180.0 7.09	8	26.0 1.02	36 1.4	0 0

d/p Cell and SPEC 200 are trademarks of The Foxboro Company.
Hastelloy -C and Hastelloy C-276 are trademarks of Stellite Division of Cabot Corporation.



WITH P25 OR P50 ACTUATOR

WITH P30 OR P60 ACTUATOR

V1400U SERIES CONTROL VALVES

The V1400UE and V1400UV Control Valves are suitable for pressure reducing, flow control, heating, and other applications where accurate control of steam, gas, or liquid is desired. Although compact in design, these valves are ruggedly constructed for long service life, having easily replaceable AISI Type 316 stainless steel (316 ss) trim parts.

CHOICE OF PLUG DESIGNS

The equal percentage plug (V1400UE) features the desired flow characteristic for accurate control of most processes. The V1400UE also features high flow capacities in such a relatively compact design. Its C_v range compares quite favorably with much larger and more expensive globe valves.

The V-port plug (V1400UV) offers a modified equal percentage flow characteristic and, with its port-guided inner valve, is most effective and stable on higher differential service. It should also be considered when economy is an important factor.

METAL OR ptfE SEATING

Precision metal seating provides shutoff tight enough for the majority of uses. Optional ptfE soft seating is available

for the V1400UE (1/2, 3/4, and 1 in nominal sizes), and is used for applications which require virtually bubble-tight shutoff.

DEPENDABLE DIAPHRAGM ACTUATORS

Foxboro P25 or P50 Diaphragm Actuators, which have been field-proven for more than fifteen years, are available with each valve assembly. These devices are made of diecast aluminum with a painted vinyl coating. They provide fast, accurate responses to changes in signal pressure. The actuator is field-reversible, without additional parts, by inverting the topworks on the yoke. The vinyl coating and enclosed spring enhance corrosion resistance. Guides are ptfE-faced, bronze-steel bushings located at top and bottom. Low friction seals result in minimum hysteresis. A preformed neoprene-nylon diaphragm retains constant area through the full stroke.

Optionally available are the P30 and P60 Diaphragm Actuators which have a steel housing and a multi-spring nest design. The steel housing, protected with epoxy paint, provides improved corrosion resistance, particularly in applications where the process fluid can attack the P25 and

P50 aluminum housing. The multi-spring design results in exceptionally low hysteresis, assures a sensitive response to controller action, and allows for a smaller overall actuator size with a lower profile. These actuators are easily field-reversible with no additional parts required.

PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Seat Leakage

Metal Seats Meet Class IV, ANSI Standard B16.104, 1976.

Optional ptfе Seats Virtually bubble-tight shutoff. Meet Class VI, ANSI Standard B16.104, 1976.

Rangeability 50 to 1.

FUNCTIONAL SPECIFICATIONS

Valve Size Nominal 1/2, 3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2, and 2 in.

Valve Capacity (C_v) Refer to Table 1 for standard maximum C_v values.

Maximum Differential Shutoff Pressure See Table 2.

Body Pressure and Temperature Limits Refer to Figure 1 for pressure-temperature limits using metal seats.

Table 1. C_v Values

Valve Size (In)	C _v Value	
	V1400UE	V1400UV
1/2	6	5.4
3/4	8	6.3
1	13	11
1 1/4	20	15
1 1/2	28	23
2	50	34

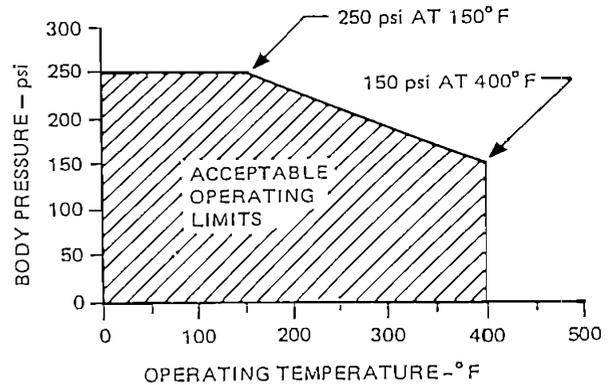


Figure 1

Air Supply Required

20 psi 3 to 15 psi nominal signal range.

35 psi 6 to 30 psi nominal signal range.

Diaphragm Actuator P25 and P50 are standard. Diecast aluminum topworks with iron yoke. Air connection is 1/4 NPT. Maximum supply pressure is 60 psi. Air-to-open or air-to-close action reversible in field, without additional parts, by inverting topworks on yoke.

Valve Action Air-to-open or air-to-close.

Model Code

V1400U = Port Guided, Single Seated, Bronze Control Valve
Flow Characteristic
E = Equal Percentage
V = V-Port
Examples: V1400UE, V1400UV

PHYSICAL SPECIFICATIONS

Valve Body Material Cast bronze.

Valve Trim The plug, plug stem, and seat ring are made from 316 ss.

End Connections Internally threaded (NPT) for all sizes.

Bonnet Plain, threaded type.

Packing Box Threaded type.

Packing Nonlubricated ptfе asbestos.

Table 2. Maximum Differential Shutoff Pressure

Nominal Valve Size	Control Valve Model	When Used With Actuator	Allowable Shutoff Pressure ^(a)			
			Air-to-Open		Air-to-Close	
			at 20 psi ^(b)	at 35 psi ^(b)	at 20 psi ^(b)	at 35 psi ^(b)
1/2 in	All	P25	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi
		P30	150 psi	150 psi	200 psi	250 psi
3/4 in	All	P25	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi
		P30	150 psi	150 psi	200 psi	250 psi
1 in	V1400UE	P25	150 psi	250 psi	150 psi	250 psi
		P30	90 psi	90 psi	125 psi	250 psi
		P60	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi
	V1400UV	P25	150 psi	150 psi	150 psi	250 psi
		P30	125 psi	125 psi	175 psi	250 psi
		P50	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi
P60	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi		
1 1/4 in	All	P25	100 psi	150 psi	100 psi	250 psi
		P30	100 psi	100 psi	130 psi	250 psi
		P50	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi
		P60	200 psi	200 psi	250 psi	250 psi
1 1/2 in	All	P25	50 psi	100 psi	50 psi	200 psi
		P30	65 psi	65 psi	90 psi	220 psi
		P50	250 psi	250 psi	250 psi	250 psi
		P60	130 psi	250 psi	180 psi	250 psi
2 in	All	P25	25 psi	50 psi	25 psi	100 psi
		P30	35 psi	35 psi	50 psi	125 psi
		P50	150 psi	150 psi	150 psi	250 psi
		P60	80 psi	150 psi	100 psi	250 psi

^(a) All pressure values are based on the use of standard (full area) valve trim. Shutoff pressure must not exceed rated body pressure at operating temperature. Refer to Figure 1.

^(b) 20 psi supply required with 3 to 15 psi nominal signal range; 35 psi supply required with 6 to 30 psi nominal signal range

OPTIONAL FEATURES

P30 and P60 Diaphragm Actuators Steel housing construction for corrosive environments. Multi-spring design results in low hysteresis. Lower profile than P25 and P50 Actuators, thus allowing installation in applications with space limitations.

ptfe Soft Seat Available with V1400UE, sizes 1/2, 3/4, and 1 in. Provides virtually bubble-tight shutoff.

Extension Bonnet Used for cryogenic service. Extends low temperature limit to -320°F.

Reduced Area Trim Available in 1/2, 3/4, and 1 in sizes per the following table:

Valve Model	Valve Size (in)	Available Reduced C _v 's
V1400UE	1/2, 3/4, 1	4.0, 2.5, 1.0, 0.4
V1400UV	1	6.3

Solenoid Valves May be used to actuate valve for on-off service, or to vent actuator upon power failure.

Type C Vernier VALVACTOR Positioner Provides fast, precise valve positioning proportional to 3 to 15 psi input signal. Maximum supply pressure is 60 psi.

E69F Current-to-Pneumatic Signal Converter Converts a direct current milliamper input signal to a proportional pneumatic output signal for control valves or other final actuators.

E69P Current-to-Pneumatic Valve Positioner Converts a direct current milliamper input signal to a pneumatic output signal with position feedback for positioning control valve actuators.

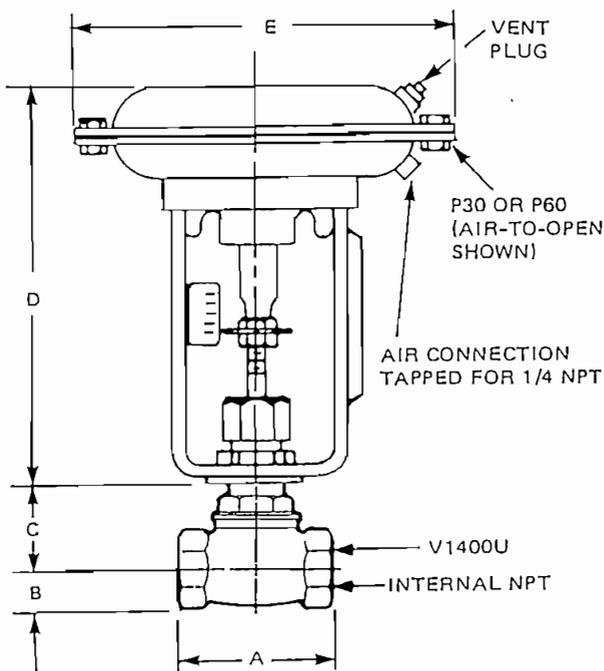
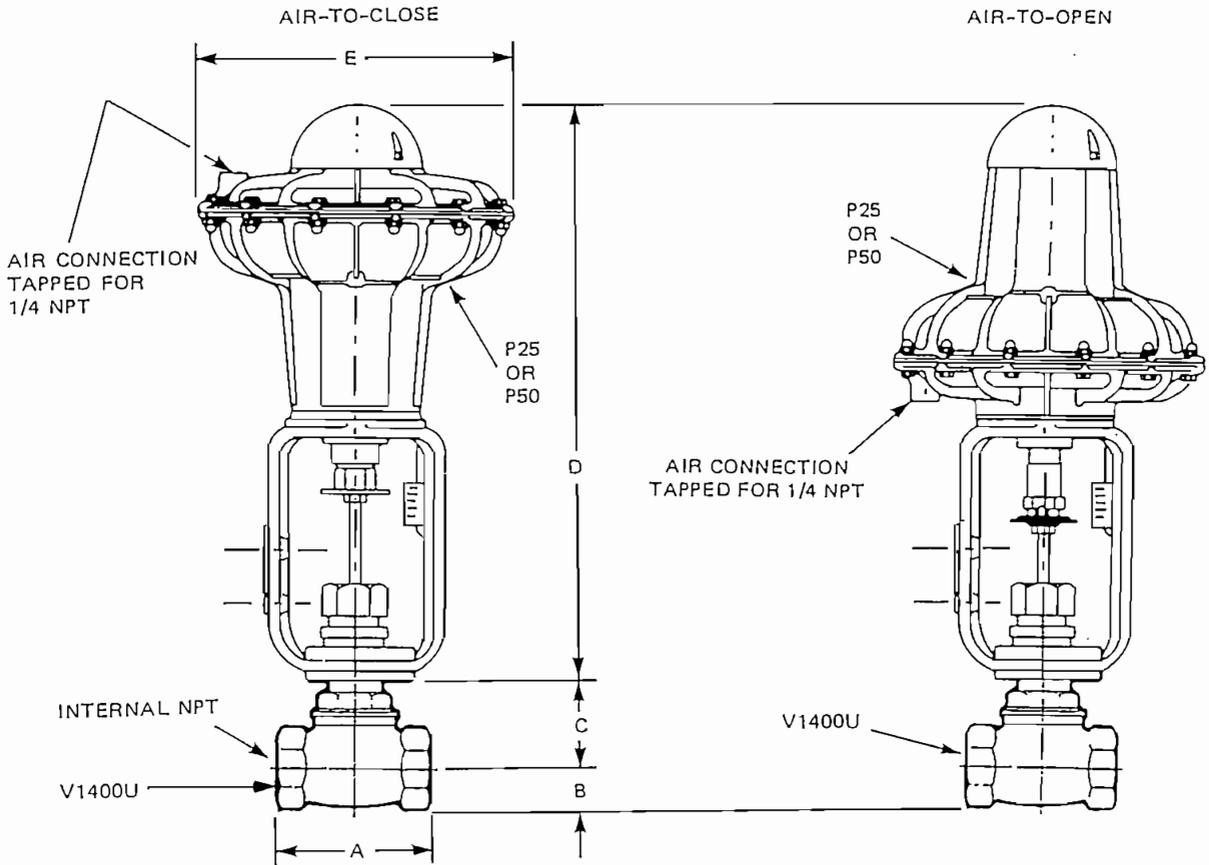
Limit Switches For electrical indication of each end of the valve stroke; available as either single-pole double-throw (spdt) or double-pole double-throw (dpdt). Also available as cam-operated enclosed switches which may be field-adjusted to indicate positions other than full open or full closed.

Top-Mounted Handwheel Jackscrew For emergency manual operation or can be used as adjustable stop to limit travel on spring stroke. Also retains the reversibility feature. For P25 and P50 Actuators only.

ORDERING INSTRUCTIONS

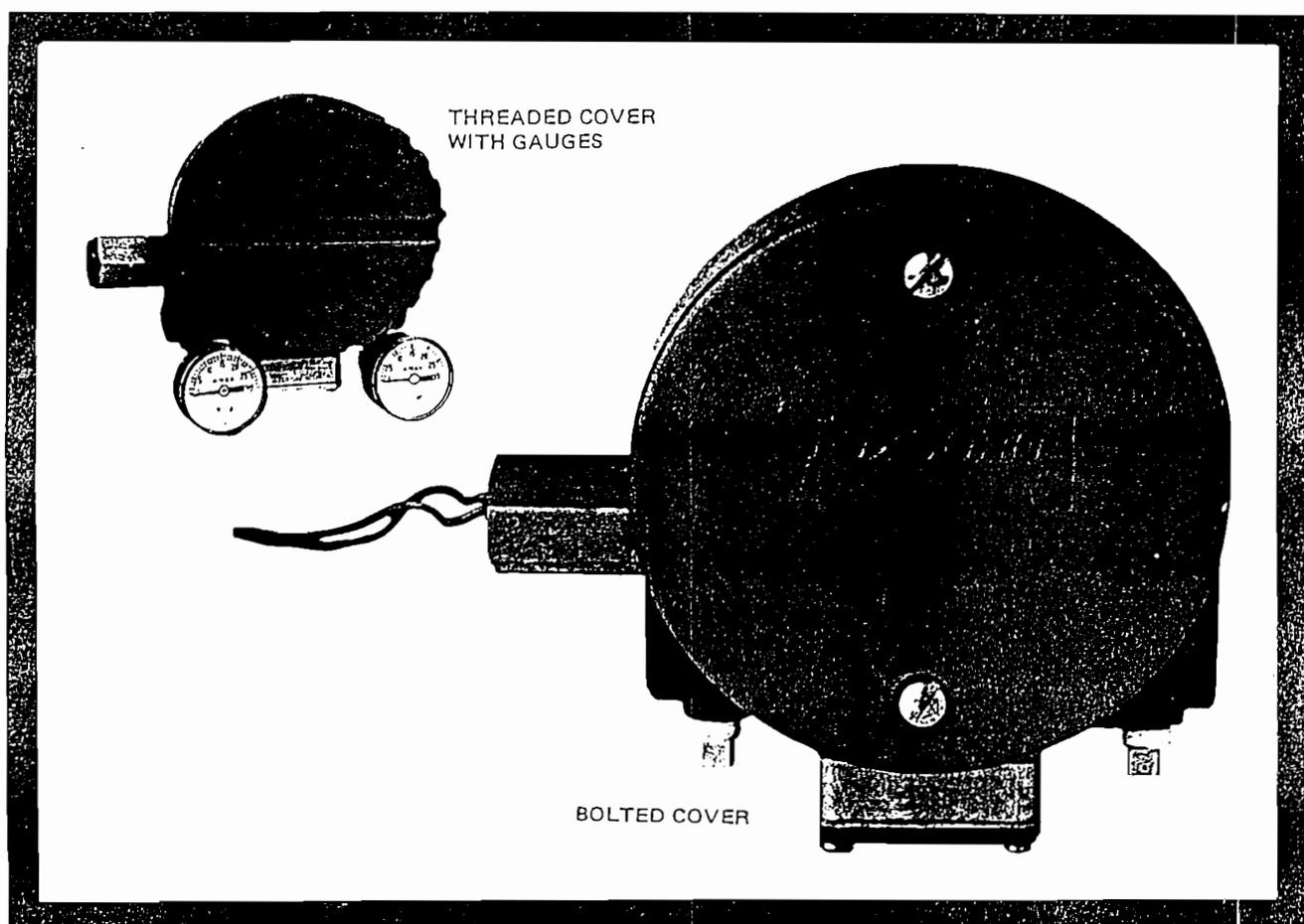
1. Model Number
2. Valve Size
3. Actuator Model, Supply Pressure, and Signal Range
4. Required Differential Shutoff Pressure
5. Air-to-Open or Air-to-Close
6. Operating Conditions
7. Optional Features
8. Tag and Application

DIMENSIONS—NOMINAL



Valve Size (inches)	Actuator Model	Dimensions (inches)				
		A	B	C	D	E
1/2	P25	3.5	1.0	2.3	13.4	7.9
	P30	3.5	1.0	2.3	8.0	8.5
3/4	P25	3.5	1.0	2.3	13.4	7.9
	P30	3.5	1.0	2.3	8.0	8.5
1	P25	4.3	1.3	2.3	13.4	7.9
	P30	4.3	1.3	2.3	8.0	8.5
	P50	4.3	1.3	2.3	17.0	10.5
1 1/4	P25	4.3	1.3	2.3	9.9	11.0
	P30	4.6	1.5	2.6	13.4	7.9
	P60	4.6	1.5	2.6	8.0	8.5
1 1/2	P25	4.6	1.5	2.6	17.0	10.5
	P30	4.6	1.5	2.6	9.9	11.0
	P60	4.6	1.5	2.6	8.0	8.5
2	P25	5.3	1.9	2.6	13.4	7.9
	P30	5.3	1.9	2.6	8.0	8.5
	P60	5.3	1.9	2.6	17.0	10.5
2	P25	6.6	2.3	3.1	13.4	7.9
	P30	6.6	2.3	3.1	8.0	8.5
	P50	6.6	2.3	3.1	17.0	10.5
	P60	6.6	2.3	3.1	9.9	11.0

VALVACTOR is a trademark of The Foxboro Company.
Neoprene is a trademark of E.I. duPont de Nemours and Company.



E69F FIELD-MOUNTED CURRENT-TO-PNEUMATIC SIGNAL CONVERTER

The E69F Field-Mounted Current-to-Pneumatic Signal Converter accepts a standard direct current input signal and converts it to a proportional pneumatic output signal for use with other pneumatic instruments or control valves.

SHOCK, VIBRATION, AND INCLINATION EFFECTS MINIMIZED

Utilizing stiff feedback flexures and low mass components, the effect of vibration and shock normally encountered in process applications is minimized. Statically balancing the coil in the unique galvanometric motor greatly minimizes inclination effects.

MINIMAL EFFECTS FROM AMBIENT ATMOSPHERIC CONDITIONS

The design of the galvanometric motor in the E69F Converter provides for generous clearances between coil and housing. Normal atmospheric changes which may cause corrosion and dust particles do not hinder operation of the mechanism, as sometimes happens with voice coil type instruments.

APPLICATION VERSATILITY

Choice of input and output signals, split input ranges, as well as direct or reverse action, makes this converter easily adaptable for a wide range of applications. Output signals are available to make this converter particularly suitable for use in valve applications.

COMPACT AND EASILY MOUNTED

The E69F Converter is a small, compactly designed device which is very simply connected to both electrical and pneumatic interfaces. It can be easily mounted to a surface, a valve yoke, or to a DN 50 or 2 in vertical pipe.

PERFORMANCE SPECIFICATIONS
(All values are for normal input ranges)

- Accuracy
 - Output Signal Codes
 - 2 and 3 ±0.5% of span
 - 7 and 8 ±2% of span
- Linearity 0.25% of span typical^(a)
- Repeatability 0.1% of span typical^(a)
- Hysteresis 0.2% of span typical^(a)
- Dead Band 0.1% of span
- Supply Pressure Effect A change in supply pressure causes a zero shift of less than 0.04% of span per kPa (0.25% per psi).

Ambient Temperature Effect A 28°C (50°F) change in ambient temperature, based on a 55°C (100°F) cycle within the operative limits, will cause zero and span shifts of ±1.0% of span, or less.

Inclination Effect Maximum zero shift is 0.25% of span for a 5 degree angular change in inclination from the vertical. This error can be eliminated by calibrating instrument at its intended mounting position.

Shock Effect Maximum zero shift is 0.5% of span when subjected to a shock test level of 300 m/s² (30 "g") measured at the feedback support bracket.

FUNCTIONAL SPECIFICATIONS

Input Signal Ranges

Normal Range (mA)	Split Ranges	Input Resistance (Ω)
4 to 20	4 to 12 or 12 to 20 mA	170
10 to 50	10 to 30 or 30 to 50 mA	27

Relative Humidity Operative Limits 0 to 100% RH, no condensate.

Air Consumption (at standard conditions)
 Output Signal Code 2 3.50 m³/h (0.30 cfm)
 All Other Codes 1.3 m³/h (0.75 cfm) with 140 kPa (20 psi, 1.4 bar or kg/cm²) supply; 1.7 m³/h (1.0 cfm) with 240 kPa (35 psi, 2.4 bar or kg/cm²) supply.

Output Signal See Model Code table.

Instrument Adjustments

- Zero** Provided by externally located screwdriver adjustment.
- Range** Provided by internally located wrench adjustment.

Air Handling Capacity (at standard conditions)

Output Signal Code	Supply		Exhaust	
	m ³ /h	cfm	m ³ /h	cfm
2	1.0	0.6	0.8	0.5
3 or 8	1.9	1.1	1.5	0.9
7	1.2	0.7	1.5	0.9

Ambient Temperature Operative Limits
-40 and +80°C (-40 and +180°F).

Supply Pressure

Nominal			Operative Limits		
kPa	psi	bar or kg/cm ²	kPa	psi	bar or kg/cm ²
140	20	1.4	130 and 160	19 and 23	1.3 and 1.6
240	35	2.4	225 and 260	33 and 38	2.3 and 2.6

Also, supply pressure must not be less than 20 kPa, 3 psi, 0.2 bar or kg/cm² above the maximum output signal pressure.

^(a)Maximum deviation for this parameter is limited by the accuracy specification.

PHYSICAL SPECIFICATIONS

Enclosure Diecast low copper aluminum alloy body and cover, with a vinyl or epoxy powder finish. Meets the requirements of IEC IP65 and provides the environmental protection of NEMA Type 4.

Mounting Valve yoke, surface, or DN 50 or 2 in pipe. Calibrated for vertical mounting unless otherwise specified.

Approximate Mass 2.3 kg (5 lb)

Input Output Connections

Electrical Tapped for 1/2 inch conduit fitting to connect to a pair of 0.5 m (18 in) long 1.00 mm² (18 AWG) twisted leads.

Pneumatic 1/4 NPT for air supply and output signal

Data Plate Stainless steel data plate fastened to housing with drive screws. Includes space for customer tag data up to a maximum of 87 characters and spaces. For additional space, see optional Customer Tag.

PRODUCT SAFETY SPECIFICATIONS

Testing Laboratory, Types of Protection, and Area Classification	Conditions of Certification	Elec. Class. Code
BASEEFA certified intrinsically safe (Ex)ia for IIC, Zone 0 or IIC, Zone 1.	4 to 20 mA output only. Power source must be intrinsically safe and must not exceed 35 V or 0.66 W. Temperature Class T6.	CS-E/BA-A
BASEEFA certified nonincendive (Ex)n for IIC, Zone 2.	4 to 20 mA output only. Power source must not exceed 75 V dc or 35 mA. Temperature Class T6.	CS-E/BN-A
CSA certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1.	4 to 20 mA output only. Connect per SI 8-00465. Temperature Class T6.	CS-E/CB-A
CSA certified explosionproof for Class I, Group D, Division 1, Class II, Groups E, F, and G, Division 1 and Class III.	4 to 20 and 10 to 50 mA output. Temperature Class T6. E69F-T only.	CS-E/CD-A
CSA certified nonincendive for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 2.		
CSA certified nonincendive for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 2.	4 to 20 and 10 to 50 mA output. Temperature Class T6 E69F-B only.	CS-E/CN-A
FM certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1 and Class II, Groups E and G, Division 1.	4 to 20 mA output only. Connect per TI 005-101. Temperature Class T6.	CS-E/FB-A
FM certified intrinsically safe for Class I, Groups C and D, Division 1 and Class II, Groups E and G, Division 1.	4 to 20 mA output only. Connect to Honeywell Class 38 barrier. Refer to TI 005-101 for barrier types and groups. Temperature Class T6.	CS-E/FB-H
FM certified intrinsically safe for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 1 and Class II, Groups E and G, Division 1.		
FM certified explosionproof for Class I, Groups C and D, Division 1 and Class II, Groups E and G, Division 1.	4 to 20 and 10 to 50 mA output Temperature Class T6. E69F-T only.	CS-E/FD-A
FM certified nonincendive for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 2 and Class II, Group G, Division 2.		
FM certified nonincendive for Class I, Groups A, B, C, and D, Division 2 and Class II, Group G, Division 2.	4 to 20 and 10 to 50 mA output. Temperature Class T6 E69F-B only	CS-E/FN-A
LCIE certified flameproof (EEx)d for IIB, Zone 1 (CENELEC)	4 to 20 and 10 to 50 mA output. Temperature Class T6. E69F-T only	CS-E/LD-E
PTB certified intrinsically safe (EEx)ib for IIC, Zone 1 (CENELEC).	4 to 20 mA output only. Connect to intrinsically safe circuit with a maximum current of 90 mA. Temperature Class T6.	CS-E/PB-E
SAA certified intrinsically safe (Ex)ia for IIC, Zone 0.	4 to 20 mA output only. Connect per drawing 15001FB, 15001FC, or 15001FM. Temperature Class T6.	CS-E/AA-A
S-COMM (Yugoslavia) certified intrinsically safe (Sib) for IIC, Zone 1.	4 to 20 mA output only. Connect to S-COMMISION certified apparatus with a short circuit current of 90 mA maximum. Temperature Class T6.	CS-E/YB-A

MODEL CODE

E69F = Field Mounted Current-to-Pneumatic Converter

Enclosure

- B = Bolted cover (For use in all non-explosionproof applications)
- T = Threaded cover (Must be used in all explosionproof applications)^(a)

Input Signal Range^(b)

- I = 4 to 20, 4 to 12, or 12 to 20 mA dc, direct or reverse action
- H = 10 to 50, 10 to 30, or 30 to 50 mA dc, direct or reverse action

Output Signal^(b)

- 2 = 20 to 100 kPa, 3 to 15 psi, or 0.2 to 1.0 bar or kg/cm²
- 3 = 40 to 200 kPa, 6 to 30 psi, or 0.4 to 2.0 bar or kg/cm², or 3 to 27 psi
- 7 = 7 to 125 kPa, 1 to 18 psi, or 0.07 to 1.3 bar or kg/cm^{2(c)}
- 8 = 7 to 220 kPa, 1 to 32 psi, or 0.07 to 2.2 bar or kg/cm^{2(c)}
- X = Other output signal as specified; refer to "Optional Features" Section

Optional Selections (Also refer to "Optional Features" Section)

- J = Integral explosionproof junction box
- M = Miniature junction box with 1/2 inch conduit connection; front entry
- P = Miniature junction box with 1/2 inch conduit connection; rear entry
- R = Adjustable filter regulator without gauge
- S = Supply/output gauges (Select per output range requirements)

Example: E69F-TI2-J (4 to 20 mA dc input, direct action, 3 to 15 psi output)

^(a)Refer to "Product Safety Specifications" table.

^(b)Specify input signal range, and whether direct or reverse action; also specify output signal.

^(c)Specify Output Signal Code 7 or 8 when used to operate actuators.

OPTIONAL FEATURES

Customer Tag Stainless steel tag wired to converter for customer tag data that doesn't fit on data plate. There can be a maximum of 10 lines of data with 40 characters and spaces per line. Specify AS Code MTS.

Split Range Input Signal 4 to 12, 12 to 20, 10 to 30, or 30 to 50 mA dc. Selectable using Model Code and specifying split range required.

Alternative Output Signal Refer to Foxboro for other than standard output signals.

Explosionproof Junction Box Integrally mounted to converter. Required with S-COMMISSION versions (CS-E/BN-A and CS-E/YB-A). Selectable using Model Code.

PG11 Trumpet Type Cable Connection For use with, and assembled to explosionproof (-J) junction box specified above. Specify AS Code PG-11. Also available without (-J) junction box for non-explosionproof applications.

Adjustable Filter Regulator Provided without gauge. Selectable using Model Code.

Supply (Input) and Output Pressure Gauges Must be selected per output range requirements. Integrally mounted to converter. Selectable using Model Code.

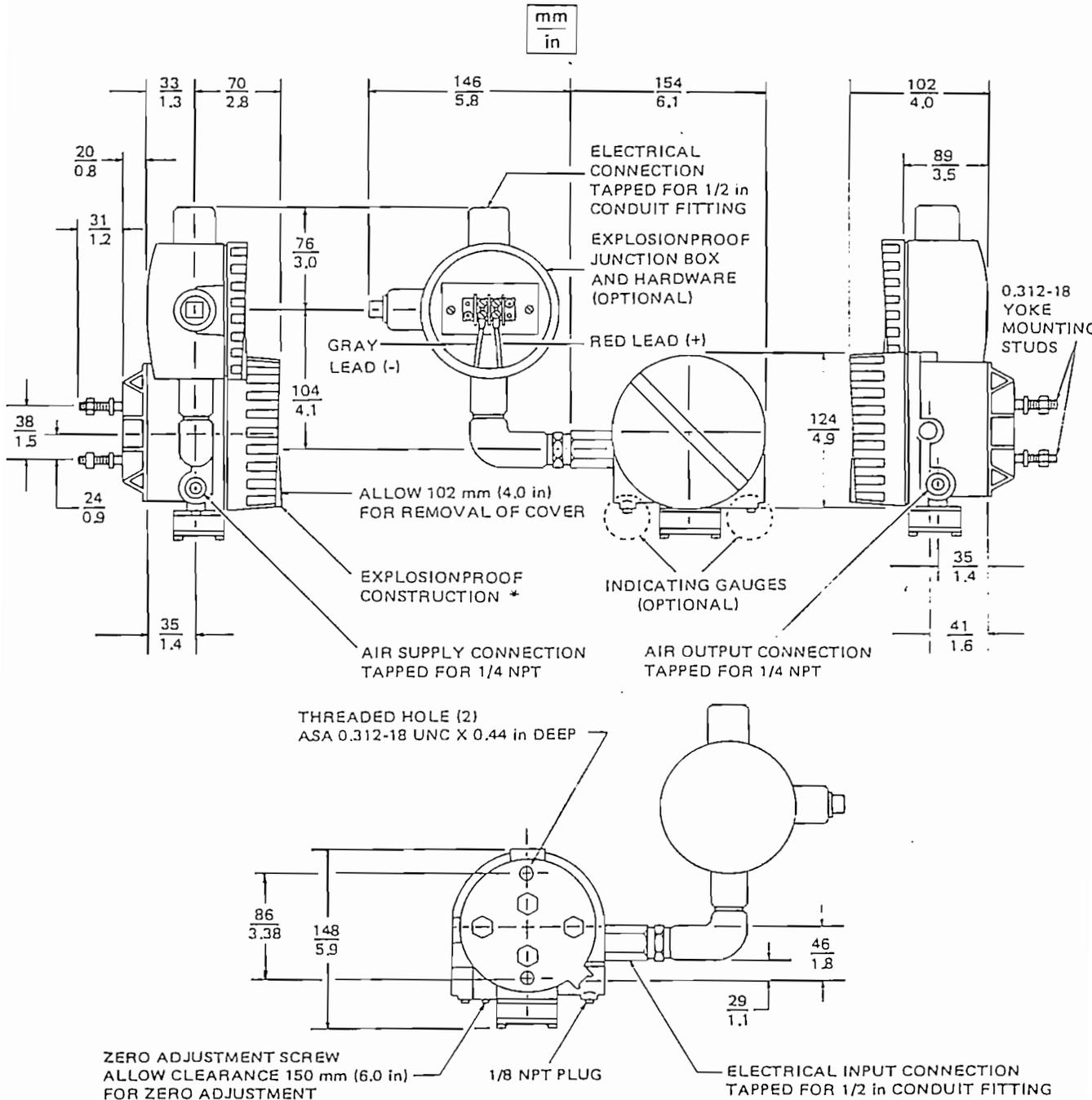
Miniature Junction Box Enclosure size is approximately 64 x 58 x 33 mm (2.5 x 2.3 x 1.3 in). Designed to meet the requirements of IEC IP65 and provide the environmental protection of NEMA Type 4. Provided with 1/2 inch conduit connection, 20 mm (M20) threaded hole, or PG 11 or PG 13.5 trumpet type cable connections. These connections are located for either front or rear cable entry. This junction box is not suitable for explosionproof applications. Junction box with 1/2 inch conduit connection is selectable using the Model Code. For other type of connection, specify AS Code MB-A to MB-F as follows:

AS Code	Description
MB-A	PG 11 connection, front entry
MB-B	PG 13.5 connection, front entry
MB-C	M20 connection, front entry
MB-D	PG 11 connection, rear entry
MB-E	PG 13.5 connection, rear entry
MB-F	M20 connection, rear entry

DIMENSIONS—NOMINAL

E96F CURRENT-TO-PNEUMATIC CONVERTER
WITH OPTIONAL EXPLOSIONPROOF JUNCTION BOX

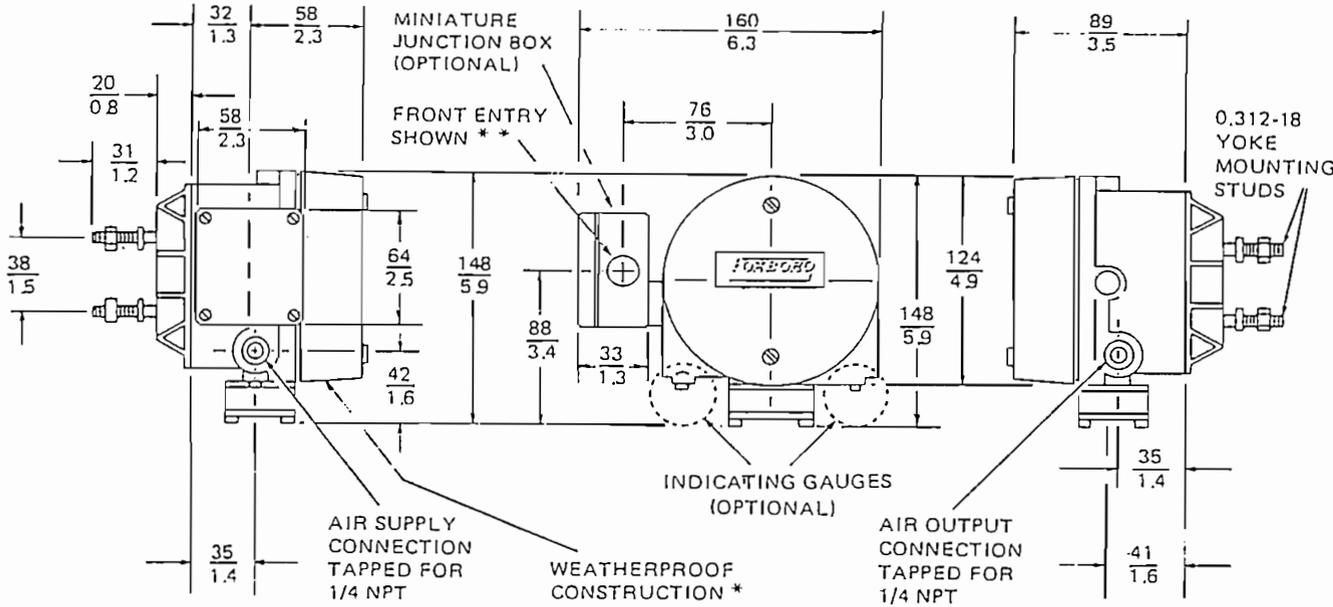
(Dimensions with optional miniature junction box are shown on the next page.)



*WEATHERPROOF CONSTRUCTION IS SHOWN ON THE NEXT PAGE.

E69F CURRENT-TO-PNEUMATIC CONVERTER
WITH OPTIONAL MINIATURE JUNCTION BOX

mm
in



* EXPLOSIONPROOF CONSTRUCTION IS SHOWN ON THE PREVIOUS PAGE.

** CONNECTION OPTIONS

<input type="checkbox"/>	1/2 NPT CONDUIT, FRONT ENTRY	-M
<input type="checkbox"/>	1/2 NPT CONDUIT, REAR ENTRY	-P
		<u>"AS" CODE</u>
<input type="checkbox"/>	PG11 CABLE, FRONT ENTRY	MB-A
<input type="checkbox"/>	PG11 CABLE, REAR ENTRY	MB-D
<input type="checkbox"/>	PG13.5 CABLE, FRONT ENTRY	MB-B
<input type="checkbox"/>	PG13.5 CABLE, REAR ENTRY	MB-E
<input type="checkbox"/>	M20 THREADED HOLE, FRONT ENTRY	MB-C
<input type="checkbox"/>	M20 THREADED HOLE, REAR ENTRY	MB-F

ORDERING INSTRUCTIONS

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Model Number | 5. Direct or Reverse Action |
| 2. Electrical Classification (Specify CS Reference) | 6. Optional Features |
| 3. Input Signal | 7. Customer Tag Data |
| 4. Output Signal | |

APENDICE B: GUÍA PARA USO DEL PROGRAMA

1.	Requisitos de software y hardware	B-1
2.	Ingreso al programa	B-1
3.	Modo de utilizar la interfaz gráfica	B-2
4.	Opciones del menú de la pantalla de presentación .	B-3
5.	Opciones del menú de la pantalla de simulación del del proceso	B-5
6.	Opciones del menú de la pantalla de simulación del control del proceso	B-6

1. REQUISITOS DE SOFTWARE Y HARDWARE

El "Programa de Entrenamiento para Ajuste de Reguladores PID en Procesos Industriales" requiere del siguiente software y hardware:

- Computador IBM o compatible.
- Procesador 286 o superior.
- Monitor VGA a color o blanco y negro.
- Sistema operativo MS-DOS (versión 5.0 en adelante).
- Programa tanque.exe en disco flexible o en disco duro.

2. INGRESO AL PROGRAMA

Considerando los requerimientos de hardware y software mencionados en el numeral anterior:

- Ubicarse en la unidad de disco y/o subdirectorio donde se encuentre el archivo tanque.exe
- Digite tanque y presione ENTER, con lo cual aparece una primera pantalla de presentación como la que se muestra en la figura 1, que indica que el programa se encuentra instalado y listo para utilizarse.

Si, aparece el mensaje de error "El programa no acepta el modo de video gráfico", significa que el equipo donde se quiere instalar no cumple con los requerimientos de hardware requeridos por el programa.

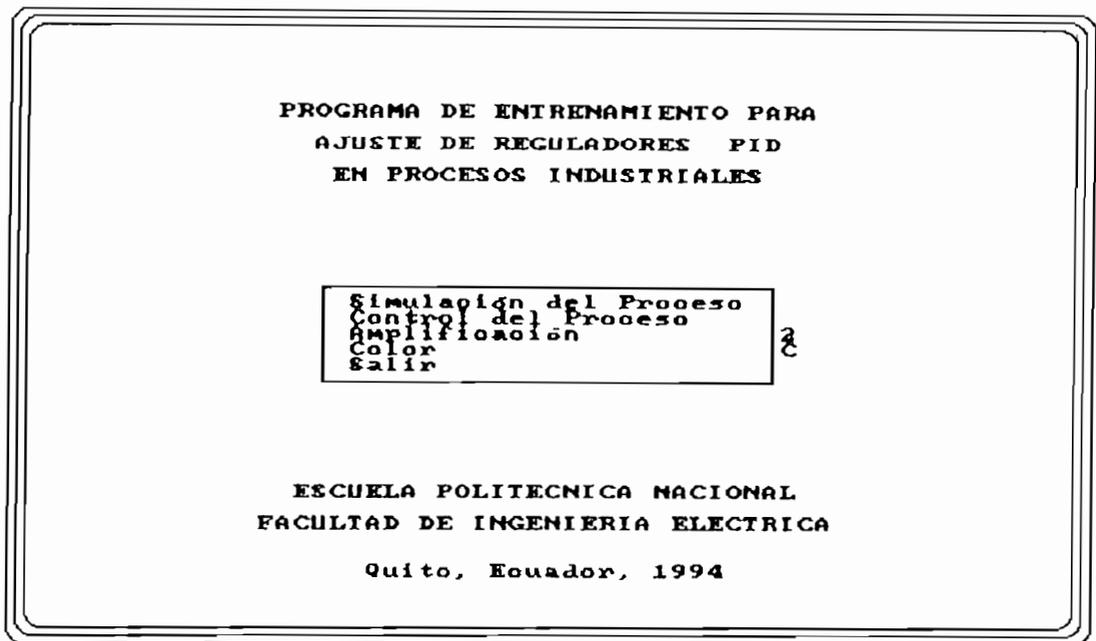


Fig.1 Pantalla de presentación.

3. MODO DE UTILIZAR LA INTERFAZ DE USUARIO

Para acceder a una de las opciones de cualquiera de los menús puede hacerse de dos forma: con las flechas de ubicación y la tecla ENTER; o la letra resaltada. Así:

- Si la opción deseada esta resaltada presione ENTER
- Si la opción deseada no se encuentra resaltada puede llegar hasta ella con la ayuda de las flechas de ubicación, ARRIBA ABAJO para los menús verticales y DERECHA IZQUIERDA para los menús horizontales, a medida que la flecha va avanzando se resaltará la opción correspondiente, cuando llegue a la opción deseada presione ENTER.
- Para utilizar cualquier opción de forma inmediata

puede hacerse presionando la tecla o carácter resaltado de la opción deseada en el menú presente.

4. OPCIONES DEL MENU DE LA PANTALLA DE PRESENTACION

Como se puede observa en la figura 1, la pantalla de presentación incluye un menú con cinco opciones, Simulación, del Proceso, Control del Proceso, Amplificación, Color y Salir.

- Para seleccionar Simulación del Proceso digitar la tecla i o ENTER después de situarse en ella con las flechas de ubicación. Con esta opción aparece la pantalla de simulación que se muestra en la figura 2.

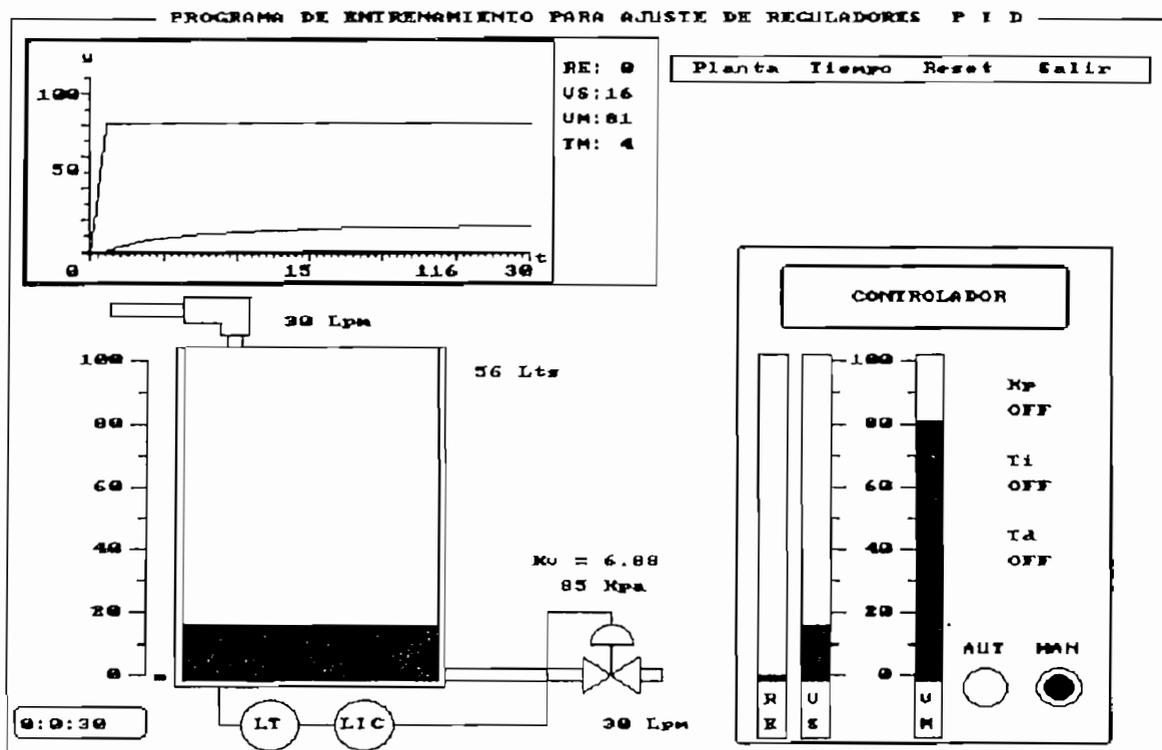


Fig.2 Pantalla de la opción Simulación del Proceso.

- Para seleccionar Control del Proceso digitar la tecla C o ENTER después de situarse en ella con las flechas de ubicación. Con esta opción aparece la pantalla de simulación que se presenta en la figura 3.

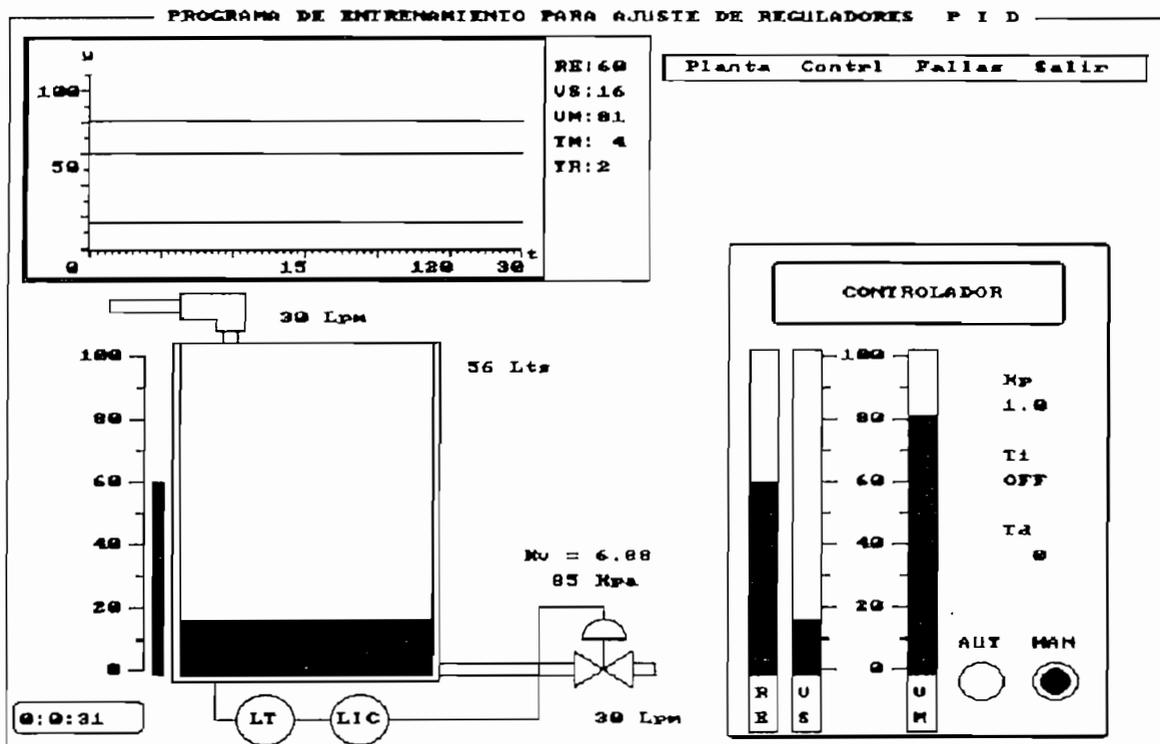


Fig.3 Pantalla de la opción Control del proceso.

- Para cambiar la amplificación de la escala de tiempo se debe seleccionar la opción Amplificación. El número que aparece a la derecha indica el factor en que se amplifica en el tiempo el gráfico de las variables del proceso.
- Para pasar la pantalla de color a blanco y negro se debe seleccionar la opción Color. Si la letra que aparece a la derecha de esta opción es la C indica que el monitor esta en colores y si es la letra B que esta en blanco y negro.

- La opción Salir da por terminado el uso del programa.

5. OPCIONES DEL MENU DE LA PANTALLA DE SIMULACION DEL PROCESO

El menú principal de la pantalla de Simulación del Proceso (figura 2) aparece en el extremo superior derecho del monitor, tiene cuatro opciones donde:

- Planta, abre un menú vertical que permite modificar el tamaño del Tanque, cambiar la Válvula, variar el caudal de Entrada, el caudal de salida variando la Presión de la válvula de control y modificar el período de Muestreo.

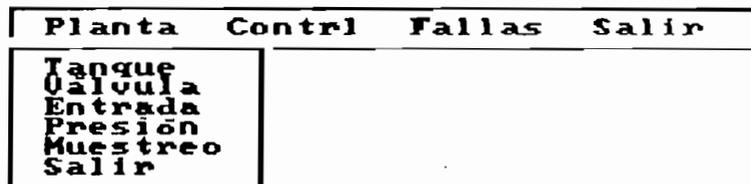


Fig. 4 Menú Planta.

- Tiempo, cambio el tiempo de simulación del proceso de un segundo al de tiempo de maquina y viceversa.
- Reset, permite reinicializar el proceso sin modificar las variables fijadas previamente.
- Salir, permite regresar a la pantalla de presentación donde se encuentra el menú de inicialización.

6. OPCIONES DEL MENU DE LA PANTALLA DE SIMULACION DEL CONTROL DEL PROCESO

El menú principal de la pantalla de Control del proceso (figura 3) aparece en el extremo superior derecho del monitor, presenta cuatro opciones donde:

- Planta, abre un menú igual al de la figura 4.
- Control, abre un menú con cinco opciones como se observa en la figura 5.

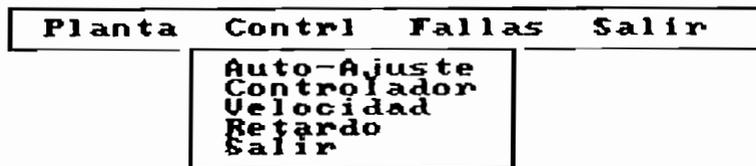


Fig. 5 Menú Control.

La opción Auto ajuste, abre un submenú que permite conectar y desconectar (On/Off) la rutina de auto-ajuste y modificar la amplitud 'd' del Relé utilizado en ella.

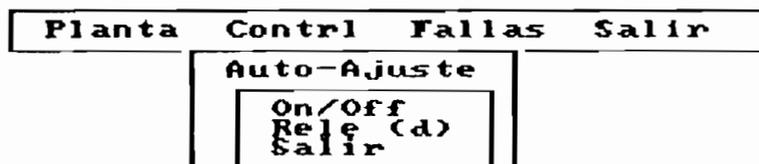


Fig. 6 Submenú Auto ajuste.

La opción Controlador, abre un submenú donde se puede seleccionar el modo de operación del control, manual o automático con la opción Auto/Man, y variar los parámetros de control K_p , T_i , T_d y la referencia Re .



Fig. 7 Submenú Controlador.

La opción Velocidad, cambio el tiempo de simulación del proceso de un segundo al el tiempo de maquina y viceversa.

La opción Retardo modifica el tiempo de retardo de transporte de la señal del transmisor.

- Fallas, abre un menú que permite introducir fallas en el caudal de Entrada, en la válvula de Salida, en la transmisión de la señal de Control. La opción Reset inicializa el proceso sin modificar las condiciones previamente seleccionadas y la opción Sonido coloca sonido a la señal de alarma de desbordamiento del tanque.

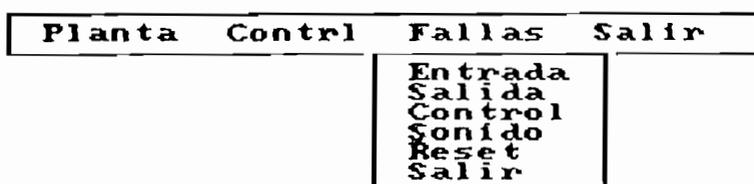


Fig. 8 Menú Fallas.

- Salir, permite regresar a la pantalla de presentación donde se encuentra el menú de inicialización.

En general:

- Al seleccionar un parámetro aparece un nuevo submenú con las opciones Subir y Bajar las que al ser activadas consecutivamente modifican el valor del mismo. Este cambio se puede apreciar inmediatamente en el valor del parámetro y en el efecto que su variación produce al sistema.



Fig. 9 Submenú de modificación de parámetros.

- Para el caso del caudal de entrada y de la válvula de control se tiene un submenú con las opciones Abrir y Cerrar que funcionan de la misma forma que el anterior.

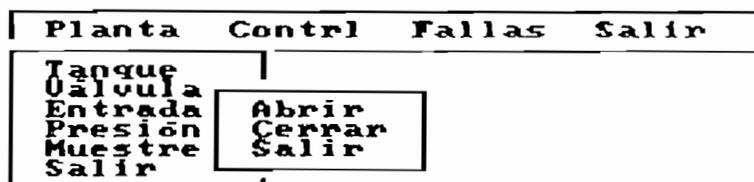


Fig. 10 Submenú de modificación de caudales.

- Para detener el proceso se puede utilizar la tecla PAUSE, y para reactivarlo se debe presionar cualquier tecla.

- El programa permite la utilización del capturador de gráficos GRAB del programa Word Perfect. Para utilizar esta opción se recomienda colocar previamente la pantalla en blanco y negro.

La opción Salir, se encuentra en cada uno de los menús y submenús. Permite retornar al menú inmediatamente anterior. En Todos los casos donde se tiene esta opción se puede ejecutar además de las formas en la que operan todas las opciones con la tecla ESC.