

**PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO PARA AJUSTE DEL REGULADOR  
PID EN PROCESOS INDUSTRIALES DE CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS**

Ing. Ester Julia Hernández Arias  
Ingeniera en Electrónica y Control,  
Escuela Politécnica Nacional, 1994.

Ing. Patricio Burbano Romero  
MSc. Systems and Control  
Profesor principal E.P.N.

**RESUMEN**

Programa de simulación del control de nivel de líquidos, que considera aspectos tecnológicos del sensor y del actuador, tres posibles fallas que pueden presentarse en el proceso, y la opción de ajuste automático del regulador PID discreto. Desarrollado en lenguaje "C" bajo el sistema operativo DOS, permite observar los componentes del proceso y la evolución de las variables de interés en el tiempo; y variar los parámetros de la planta mediante el uso de menús de despliegue gráfico.

**ABSTRACT**

Simulation program for liquid level control, that take in count technological aspects of the sensor and actuator, tree failures that can be present, and the option for automatic tuning of digital PID regulator. It has been developed using "C" programation language, in DOS environment. Permits to observe the process components and the evolution of the variables in time; and change the plant parameters by means of the use of a menu bar.

**1. INTRODUCCION**

La mayoría de reguladores que se usan en la industria son del tipo PID. Una planta industrial grande puede llegar a tener decenas de reguladores, ingenieros de instrumentación y personal de planta involucrados en seleccionar, instalar y operar tales reguladores. Existen varios métodos para ajustar un regulador PID, siendo el método de Ziegler-Nichols [1943] uno de los esquemas más populares. A pesar de esto, en la práctica se encuentra que muchos reguladores se hallan mal ajustados. Una razón para esto es la falta

de experiencia que se tiene en el ajuste del regulador cuando se encuentra conectado en la planta, otra es que se desconocen métodos de regulación simples y consistentes.

Por otro lado es necesario considerar la incorporación de la computación en los procesos industriales que obliga a producir nuevas herramientas que estén de acuerdo con esta etapa del desarrollo tecnológico. Herramientas que no solo sean una ayuda en los laboratorio sino que también colaboren con el desarrollo de las nuevas y poderosas técnicas de control en los procesos industriales.

Este artículo presenta un programa de simulación que permite al personal técnico adiestrarse en el ajuste del controlador Proporcional Integral Derivativo PID en un proceso industrial, mediante la utilización de los métodos tradicionales; y, además permite probar uno de los nuevos métodos de ajuste automático. Este método de ajuste, simple de implementar empleando microprocesadores, ofrece la posibilidad de disponer de una herramienta de ajuste automática que permite solucionar una gran clase de problemas comunes de control.

La descripción del diseño del programa se ha estructurado en cinco secciones. La primera, presenta los componentes del sistema de control de nivel de líquidos. La segunda detalla el control PID y las características de la configuración utilizada. La tercera sección describe el desarrollo del programa de entrenamiento. En la cuarta sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de control del proceso con los parámetros dados por los diferentes métodos de auto ajuste. Finalmente, se indican las conclusiones del programa de simulación diseñado.

2. COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema de control de nivel de líquidos esta compuesto de: un tanque de almacenamiento de sección transversal constante "A" al cual ingresa un caudal de entrada "q<sub>i</sub>" a través de una válvula manual; un transductor de 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 "q<sub>o</sub>", como se muestra en la figura 1.

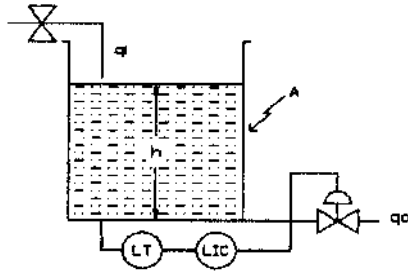


Fig. 1 Componentes del sistema a ser simulado.

Los componentes del sistema y las variables involucradas en el mismo se encuentran representados en las diagramas de bloques de las figuras 2 y 3. En la figura 2, 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). En la figura 3 se detallan los elementos de cada bloque incluyendo la respectiva constante de acoplamiento.

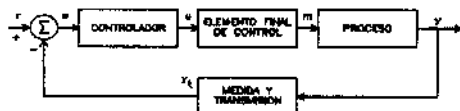


Fig. 2 Diagrama de bloques del sistema.

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 (variable manipulada).
- n = caudal del fluido de control, que es q<sub>o</sub>.

y = variable de salida o variable controlada, que es el nivel de salida h.  
 y<sub>t</sub> = señal de salida del transmisor.

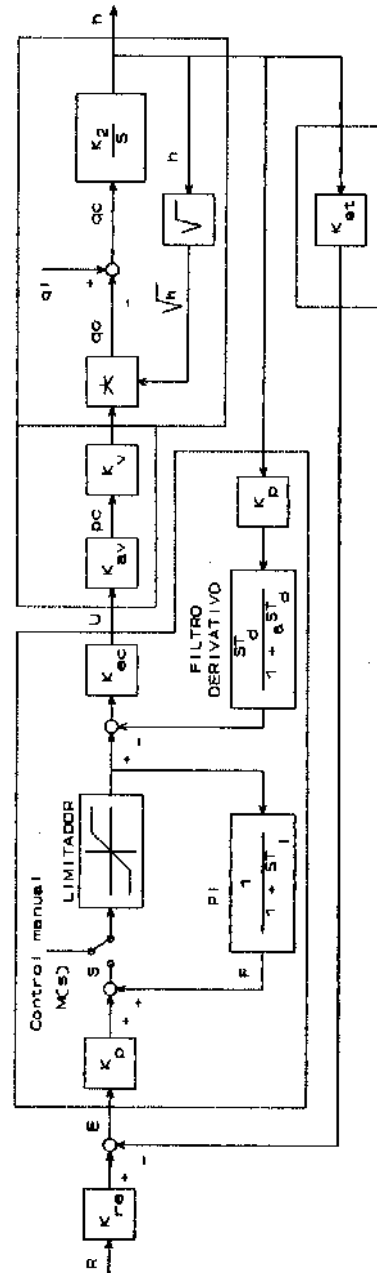


Fig. 3 Diagrama de bloques detallado del sistema.

3. CONTROL PID

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:

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

y su correspondiente transformada de Laplace es:

$$U(s) = K_p * \left[ 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right] E(s) \quad (2)$$

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

Cuando se introduce un control PID en un proceso industrial hay que considerar:

- Las dificultades que produce 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.

- Las limitaciones del actuador o elemento de control, debido a que en la práctica los actuadores y los instrumentos de medida están limitados a 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 corresponden de 3 a 15 lbf/m<sup>2</sup> para sistemas neumáticos, o de 4 a 20 mA para actuadores o transductores eléctricos.

Para corregir estos problemas se utiliza el control PID en la configuración no interactuante con componente derivativa filtrada.

3.1 Configuración no interactuante con componente derivativa filtrada

El diagrama de bloques de la configuración no interactuante con componente derivativa filtrada que se muestra en la figura 4, basa su estructura en la configuración no interactuante (llamada así debido a que al ajustar los valores de  $T_i$  y  $T_d$  no se modifican los tiempos efectivos de integración y derivación definidos en la forma clásica del regulador PID) cuya función de transferencia es la siguiente:

$$U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) E(s) - sT_d F(s) \quad (3)$$

La misma que tiene las siguientes propiedades:

- 1.- La acción PI se aplica sobre el error. Por consiguiente esta forma de control evita el transitorio derivativo.

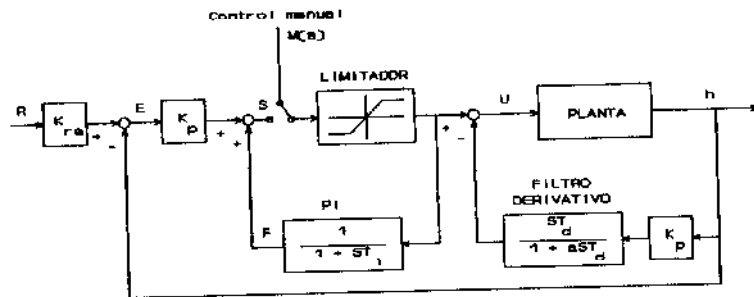


Fig. 4 No interactuante con componente derivativa filtrada.

2.- Cuando la señal de control esta fuera de los límites permisibles, el control  $u(t)$  se fija al correspondiente valor de corte, si se mantiene por un tiempo (alredor de 3 a 5 veces  $T_i$ ) el valor  $f(t)$  alcanza el límite de  $u(t)$ . Cuando la salida del elemento de ganancia  $K_p$  cambia de signo (es decir, cuando  $e(t)$  cambia de signo) la señal de control  $u(t)$  inmediatamente baja desde el valor límite; o sea presenta la propiedad de desaturación integral que es deseable tener para evitar la saturación del actuador.

3.- El interruptor S es el interruptor manual/automático. Si esta conectado a  $m(t)$  y la señal de salida del controlador  $u(t)$  esta todavía limitada, y si  $m(t)$  es constante por un intervalo, la señal  $f(t)$  mantendrá su valor. Un buen operador conmutará a automático cuando  $e(t)$  es aproximadamente igual a cero, esto es,  $y(t)$  es razonablemente constante; en tal caso habrá una transferencia sin rebotes.

Debido a que 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 y que la ganancia de la respuesta de frecuencia del término derivativo crece más allá del límite con el incremento de la frecuencia. Es necesario poner una restricción en la ganancia derivativa de la configuración no interactuante.

Esta restricción se puede lograr con un filtro derivativo, de la forma que muestra la siguiente ecuación

$$\frac{sT_d}{1 + \alpha sT_d} ; \text{ donde } \alpha = 0.1 \quad (4)$$

Por lo tanto la función de transferencia del esquema de control no interactivo con componente derivativa filtrada (ecuación 5) se consigue reemplazando el término derivativo de la configuración no interactuante por el filtro derivativo de la ecuación anterior:

$$G(s) = K_p * \left[ \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) E(s) - \left( \frac{sT_d}{1 + \alpha sT_d} \right) F(s) \right] \quad (5)$$

Esta configuración 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.

#### 4. DESARROLLO DEL PROGRAMA

El programa de simulación del sistema de control esta desarrollado en lenguaje 'C' bajo el sistema operativo MS-DOS, utilizando el compilador QuickC ver.2 de la Microsoft.

La estructura modular del programa se origina de acuerdo a las partes fundamentales en las que se puede dividir el mismo, como 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.



Fig. 5 Diagrama de bloques de los módulos

#### 4.1 Módulos del programa

Como se puede observar en el diagrama de bloques de la figura 5 el programa esta formado por cuatro módulos: TANQUE.C, GRAFICOS.C, MENU.C y PROCESOS.C, cada uno de los cuales cumple con un objetivo fundamental dentro del sistema.

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

#### Módulo TANQUE.C

Este módulo se encarga de ejecutar el programa, selecciona el modo de video gráfico necesario y restaura el mismo después de finalizado el uso del programa.

**Módulo GRÁFICOS.C**

Su objetivo principal es producir la interfaz gráfica, es decir la representación de los elementos del sistema en la pantalla del computador. Todas las funciones que conforman la interfaz gráfica están realizadas considerando que el modo de video establece que la pantalla del computador esta formada por 640 pixels en el eje de las abscisas, 480 pixels en el eje de las ordenadas, una hoja de texto de 80 columnas por 60 filas y 16 colores posibles para textos y gráficos.

**Módulo MENU.C**

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. 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.

**Módulo PROCESOS.C**

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.

**4.2 Simulación del sistema de control**

La simulación del sistema de control se realiza en base al diagrama de bloques de la figura 3. Para incorporar la opción de ajuste automático se introduce al lazo de control un relé de la forma que se indica la figura 6.

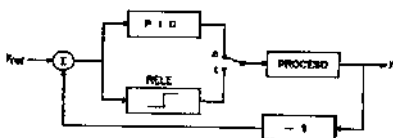


Fig. 6 Diagrama de bloques del auto-ajuste. El relé opera en el modo (t) y el regulador PID en el modo (c).

Como se observa del diagrama de bloques de la figura 3, la simulación del sistema de control consiste básicamente de: simulación del proceso, simulación del controlador PID, y simulación de la rutina de auto ajuste. Las funciones que realizan estas rutinas se desarrollan en base a: modelación del proceso de nivel de líquido, discretización del control PID no interactuante con componente derivativa filtrada, y determinación automática de los parámetros del controlador.

**Modelación del proceso**

El modelo matemático que describe el proceso de nivel de líquidos esta representado por las siguientes ecuaciones (ver figuras 1 y 3):

$$q_c = q_i - q_o \quad (6)$$

$$q_o = pc * K * \sqrt{h} \quad (7)$$

$$h' = k_2 q_c \quad (8)$$

Donde:

- pc = porcentaje de la carrera de la válvula
- h' = derivada de la altura h.

La respuesta del sistema se obtiene de la solución de la ecuación 8, mediante la representación en el espacio de estado, utilizando la forma canónica controlable y el método de integración de Runge Kutta de cuarto orden.

**Discretización**

Para la discretización del algoritmo del controlador PID no interactuante con componente derivativa filtrada, se traslada la ecuación 5 a su correspondiente representación discreta, utilizando el método de integración trapezoidal, aplicando la siguiente relación conocida como transformada bilineal.

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T(1 + z^{-1})} \quad (9)$$

Donde T es el período de muestreo.

Empleando la transformada bilineal al término proporcional integral se tiene:

$$I(K) = \beta * I(K-1) + (1 - \beta) * U_{PID}(K-1) \quad (10)$$

donde:

$$\beta = \frac{T_d}{T} \quad (14)$$

$$U_{PID}(K) = K^I * E(K) + I(K) \quad (11)$$

Finalmente la respuesta del controlador PID es:

$$U_{PID}(K) = U_{PI}(K) - K^I * D(K) \quad (15)$$

donde

$$K^I = K_p \left( 1 + \frac{T}{2T_i} \right) \quad (12)$$

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

y aplicando la transformada bilineal al término derivativo se tiene que:

$$D(K) = \frac{0.2T}{1 + 0.2T} * D(K-1) + \frac{2T}{1 + 0.2T} * [ F(K) - F(K-1) ] \quad (13)$$

### Ajuste Automático

De acuerdo al método, para realizar el ajuste automático se conecta a la planta un relé que opera 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 los parámetros del controlador PID.

Para conseguir la oscilación del sistema, la planta se conecta en un lazo de realimentación como se indica en la figura 6, 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  $T_c$ .

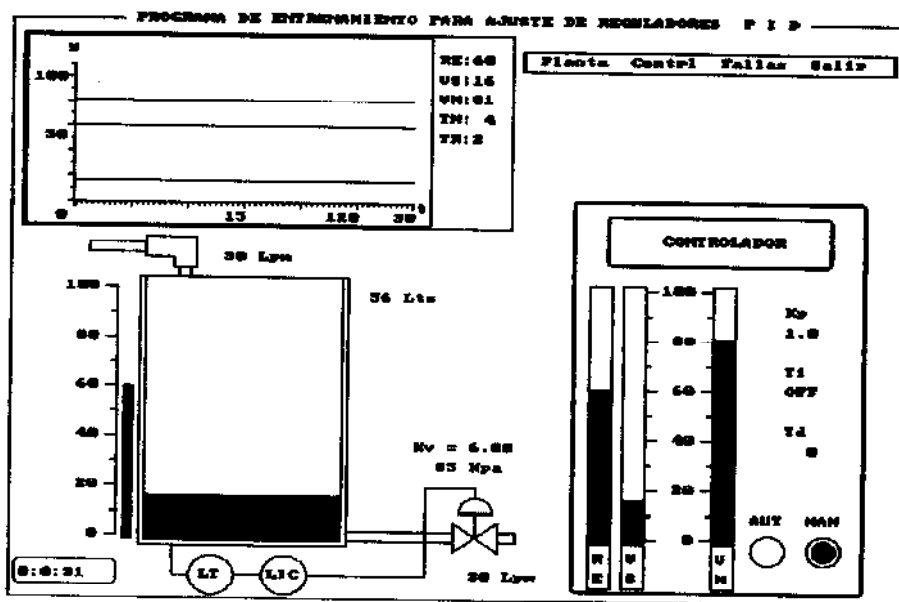


Fig. 7 Pantalla de simulación del control del proceso.

La ganancia crítica se calcula como:

$$K_c = \frac{4d}{\pi z} \quad (16)$$

Donde:

- d = Amplitud del relé y
- z = Amplitud de la salida del proceso

El periodo de oscilación se determina midiendo el tiempo entre los cruces por cero, y la amplitud midiendo el valor pico-pico de la salida del proceso.

### 5. RESULTADOS

El programa de entrenamiento para ajuste de reguladores PID en procesos industriales de control de nivel de líquidos tiene el despliegue gráfico que se muestra en la figura 7, donde se observa: el proceso físico, el controlador, la variación de las variables de interés en tiempo y un menú de opciones.

Las opciones del programa de entrenamiento, permiten realizar las siguientes pruebas para nueve procesos de control de nivel de líquidos diferentes:

- a) Simulación del proceso en lazo abierto, donde se puede analizar el comportamiento dinámico del mismo y hacer el control manual.
- b) Simulación del control del proceso (en lazo cerrado).
- c) Ajuste automático.

Las dos primeras pruebas permiten obtener las características necesarias para calcular los parámetros del controlador a través los métodos experimentales más usados en el ajuste de procesos industriales. La última prueba, utiliza uno de los nuevos métodos de ajuste automático de los parámetros del controlador.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la realización de cada una de las pruebas mencionadas.

- a) Partiendo de las condiciones de estado estable del sistema en lazo abierto se obtiene la curva de reacción de la figura 8, a partir de la cual se obtienen los parámetros del controlador que dan como resultado la respuesta del sistema de la figura 9.

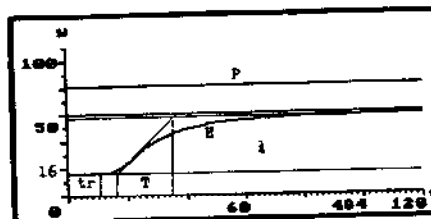


Fig. 8 Curva de reacción.

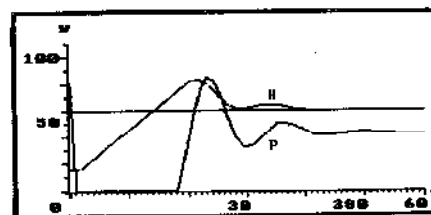


Fig. 9 Control PID, método de la curva de reacción

- b) De la prueba de control del proceso a lazo cerrado se obtienen los valores de  $K_c$  y  $T_c$  correspondientes al método de Ziegler Nichols en condiciones de oscilación del sistema. Con estos valores se calculan los parámetros del controlador que dan como resultado la respuesta del sistema de la figura 10.

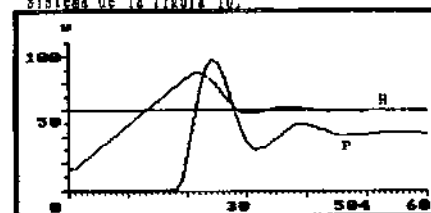


Fig. 10 Control PID, método de ganancia crítica

- c) Al aplicar el método de auto ajuste los parámetros del controlador fijados dan como resultado la respuesta del sistema de la figura 11.

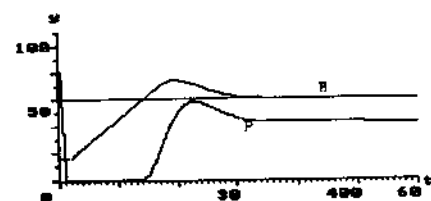


Fig. 11 Control PID, método de auto ajuste

El ajuste final del control PID utilizado da como resultado la respuesta de la figura 12.



Fig. 12 Control PID con ajuste de valores.

## 6. 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 desplegables, brindando un ambiente amigable, que facilita su utilización en el entrenamiento de personal.

La simulación del sistema de control 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 permite estudiar las características estáticas y dinámicas del proceso.

Se ha podido comprobar la eficiencia del método de ajuste automático del controlador PID aplicado al sistema de control de nivel de líquidos.

Para una implementación práctica, es necesario utilizar una implementación del control tipo no interactuante con componente derivativa filtrada que corrija los problemas que se ocasionan al introducir un controlador PID en cascada con la planta.

Este programa constituye una herramienta de laboratorio muy valiosa en el ensayo de diferentes técnicas de ajuste de control PID, como son el método de auto ajuste, la compensación por cancelación de polos y ceros; el método de la curva de reacción y la ganancia crítica. El ajuste final de valores se realiza partiendo del resultado de uno de los métodos anteriores.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] HERNÁNDEZ ESTER JULIA, "Programa de Entrenamiento para Ajuste de Reguladores PID en Procesos Industriales", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1994.
- [2] CREUS ANTONIO, "Instrumentación Industrial", Editores Marcombo, S.A., Barcelona, 1985.
- [3] KATSUNIKO OGATA, "Ingeniería de Control Moderna", Editorial Prentice-Hall International, 1974.

- [4] MARCELO ALONSO, "Física. Curso Elemental, Hidromecánica Calor", Ed. Cultural Centroamericana, S. A., Guatemala, 1967.
- [5] CARL TOWNSEND, "Understanding C", Ed. Howard W. Sams & Company, Indiana, 1988.
- [6] HUGO BANDA-GAMBOA and DELROY FOLKES, "Programming in C", The Microcomputer Centre, University of Dundee, 1989.
- [7] ESTEVEZ A. ELENA, "Implantación de un Controlador Experto", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1992.
- [8] GARZON FERNANDO, "Diseño y Construcción de un Control Analógico y Digital de Nivel de Líquidos en Tanques Acoplados", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1990.
- [9] D. W. CLARKE, "PID algorithms and their computer implementation", Department of Engineering Science, University of Oxford, 1984.
- [10] K. J. ASTROM and T. HAGGLUND, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specification on Phase and Amplitude Margins", International Federation of Automatic Control, 1984.

## 8. BIOGRAFIA

### HERNÁNDEZ ARIAS, ESTER JULIA.-

Nació en Cerrito(V)-Colombia, obtuvo su título de bachiller en Humanidades modernas en Colombia, cursó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniera en Electrónica y control en 1994. Su área de investigación es el desarrollo de software para control. En la actualidad ejerce su profesión en forma privada en su país natal.

### BURBANO ROMERO, CARLOS PATRICIO.-

Nació en Quito el 9 de octubre de 1951. Cursó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 1974. Realizó su post-gradó en Control y Sistemas en el UMIST en la Universidad de Manchester en 1983. Actualmente es Profesor Principal de la FIE y su campo de investigación está orientado al control digital, multivariable y adaptivo.