

# CONTROL ADAPTIVO EN TIEMPO REAL

Ing. GERMANICO PINTO T.

Ingeniero en Electrónica y Control, Escuela Politécnica Nacional  
Cargo: Profesor Asistente a Tiempo Parcial, EPN

## RESUMEN:

La realización del control requiere conocer previamente un modelo matemático de la planta. La modelación se realiza usando las técnicas de identificación de sistemas. El problema físico se convierte en un problema estadístico al ser necesaria la estimación de los parámetros de la planta mediante el método de mínimos cuadrados estocástico sobre un modelo ARMA. La identificación se realiza midiendo las señales de entrada y salida de la planta, tanto para simulación cuanto para tiempo real. El proyecto se completa con la realización de control adaptivo digital por ubicación de polos en base a los parámetros identificados.

## ABSTRACT:

In order to control a plant, a mathematical model must be built. Modelling is done using system identification techniques. The physical problem is turned into a statistical one since the plant's parameters must be estimated. The estimation method used here is stochastic minimal squares on an ARMA model. Simulation and real time identification are done by measuring input and output plant's signals. Pole placement digital adaptive control based on estimated parameters completes the project.

## 1. INTRODUCCION.

Un regulador adaptivo es aquel que puede modificar su comportamiento como respuesta a cambios en la dinámica de un proceso o a la existencia de perturbaciones [1]. En los sistemas de control comunes, la calibración de los parámetros de control se hace una sola vez, al inicio de su operación. En los sistemas de control adaptivos, esta calibración se realiza constantemente durante la operación del sistema, automatizando así el proceso de diseño de sistemas de control.

El objeto de este trabajo es el estudio e implementación de un sistema de control adaptivo en tiempo real mediante el uso de un computador. El modelo a utilizarse aquí es un sistema de control adaptivo tipo Self-Tuning (Self-Tuning Regulator) que, como se muestra en la figura 1, presenta un doble lazo de realimentación: el lazo de control y el lazo de identificación.

La realización de un sistema de control requiere generalmente la modelación de la planta y el posterior diseño del control. El proceso de modelación se puede realizar a través la elaboración de un modelo matemático que explica el comportamiento de la planta a partir de las ecuaciones matemáticas que rigen los procesos físicos.

Ing. Patricio Burbano R.

MSC en Sistemas de Control, Universidad de Manchester, Inglaterra.  
Cargo: Profesor Principal a Tiempo Completo, EPN.

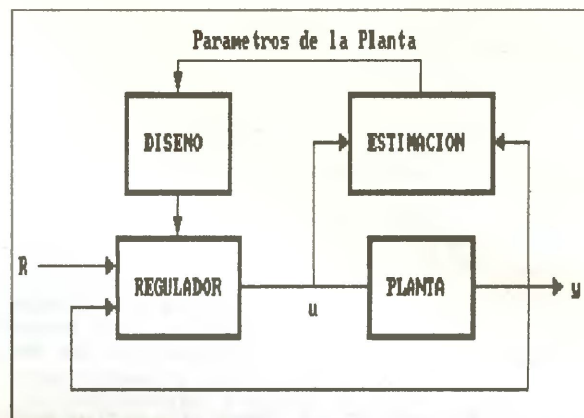


Figura 1 - Control Adaptivo Self-Tuning

Pero cuando el sistema es demasiado complejo, o no es invariante en el tiempo, esta forma de modelación se torna muy complicada. Es por tanto necesario reformular completamente el proceso de modelación. Ya no se busca la información sobre el sistema mediante sus componentes físicos, sino que se estudia su dinámica a partir de los datos experimentales de entrada y salida. El proceso consiste ahora en la estimación estadística de los parámetros de un modelo predefinido para la planta de forma que los valores obtenidos se ajusten de la mejor manera posible a la dinámica de la planta. Es la identificación de sistemas por estimación de parámetros.

El Control Adaptivo Self-Tuning realiza en forma explícita la identificación paramétrica, determinando los parámetros de la planta en el lazo de identificación y realizando permanentemente su actualización.

A partir del conocimiento del modelo de la planta se procede al diseño del control mediante la selección de una ley de control adecuada al proceso y al cálculo de sus parámetros para cumplir con ciertas condiciones preestablecidas de estabilidad respuesta transitoria, etc. Dado que se tiene los parámetros de la planta calculados a partir del proceso de identificación, que además éstos se adecúan a las variaciones de la planta, es posible entonces automatizar el diseño de la ley de control para que ésta a su vez se adecúe a las variaciones de la planta. Esto se puede conseguir mediante la utilización de un computador en línea que genere la señal de control en base al cálculo de la ley de control y a la estimación de parámetros de la planta. Se trata de utilizar el control digital directo al que se añade el diseño del control. Es el lazo de control de un sistema de control adaptivo Self-Tuning.

Existen por tanto dos momentos en el funcionamiento de este sistema de control

en primer lugar la identificación de la planta en un modelo discreto, y, en segundo lugar, el control incorporando el diseño del regulador en base a los parámetros previamente estimados.

## 2. IDENTIFICACION EN TIEMPO REAL

Para la identificación de parámetros se utilizará un modelo ARMA para describir la planta, pues éste se puede expresar simplemente tanto en la forma de variables de estado, cuanto como función de transferencia.

Un modelo ARMA tiene la siguiente forma:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + b_2 y(t-2) + \dots + b_n u(t-n)$$

lo que en forma matricial puede expresarse como:

$$y(t) = x(t)\theta(t)$$

donde:

$$x(t) = [-y(t-1) \quad -y(t-2) \quad \dots \quad -y(t-n) \quad u(t-1) \quad \dots \quad u(t-n)]$$

$$\theta(t) = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_n]^T$$

El proceso de identificación consiste entonces en la estimación estadística de los parámetros  $a_i$  y  $b_i$  a partir del conocimiento de los datos de entrada y salida (figura 2). Con este método se tiene las siguientes ventajas: facilidad en la obtención de la información (datos de entrada-salida); modelación de sistemas complejos mediante el uso del computador; obtención de un modelo discreto que evita los procesos de discretización. Sus desventajas principales son: el orden del modelo debe estar predefinido antes de iniciar la identificación; en plantas industriales las pruebas se deben realizar mediante perturbaciones alrededor del punto de equilibrio en estado estable, no pudiéndose introducir escalones o impulsos.

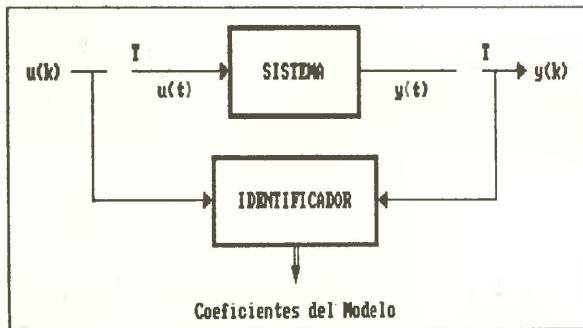


Figura 2 - Identificación en Tiempo Real

La determinación de los parámetros se realiza mediante la ecuación de error y el método de mínimos cuadrados. Definiendo el error como la diferencia entre los valores estimados de  $x(t)$  y los valores reales  $x(t)$  al aplicar en el modelo los parámetros estimados  $\hat{\theta}(t)$ , se encuentra que el error está dado por:

$$e(t; \hat{\theta}) = y(t) - x(t)\hat{\theta}(t)$$

La expresión a minimizar será entonces:

$$J(\hat{\theta}) = \sum_{k=0}^N (e(k; \hat{\theta}))^2$$

Tomando un grupo de valores medidos de  $y(t)$  y  $x(t)$ , se definen las matrices siguientes:

$$X^T(t) = [x(0) \quad x(1) \quad x(2) \quad \dots \quad x(t)]$$

$$Y^T(t) = [y(0) \quad y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(t)]$$

$$e^T(t) = [e(0) \quad e(1) \quad e(2) \quad \dots \quad e(t)]$$

Entonces, se encuentra que:

$$J = e^T e = (Y - X\hat{\theta})^T (Y - X\hat{\theta})$$

La minimización se realiza igualando a cero la derivada de  $J$  respecto a  $\hat{\theta}$ , de donde se obtiene el valor de  $\hat{\theta}$  estimado que provoca el error mínimo:

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

que es la solución general al problema. Como el modelo escogido es de tipo ARMA, existirá una sola solución siempre y cuando la matriz  $X^T X$  no sea singular. Esto ocurre cuando la señal  $u(t)$  es de excitación persistente, es decir que la señal debe "excitar" adecuadamente a la planta para obtener información suficiente sobre la dinámica de la planta. Está claro que si esta señal no cumple esta característica, no servirá el método de mínimos cuadrados.

Para facilidad de cálculo es posible construir un algoritmo de tipo recursivo basado en los resultados anteriores que permita obtener la estimación por aproximaciones sucesivas, lo que facilita la implementación en un computador. Se busca entonces una expresión de la forma:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \text{corrección}$$

Aplicando las definiciones de  $\hat{\theta}(t)$  y  $\hat{\theta}(t+1)$ , se llega al siguiente algoritmo:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + L(t+1)\epsilon(t+1)$$

donde,

$$L(t+1) = \frac{P(t)x^T(t+1)}{1 + x(t+1)P(t)x^T(t+1)}$$

$$P(t) = \left[ I - \frac{P(t-1)x^T(t+1)x(t+1)}{1 + x(t+1)P(t-1)x^T(t+1)} \right] P(t-1)$$

$$\epsilon(t+1) = y(t+1) - x(t+1)\hat{\theta}(t)$$

que debe inicializarse con  $\hat{\theta}(0)$ , parámetros iniciales;  $P(0) = \alpha I$  con  $\alpha$  grande (1000 a 10000).

Cuando los parámetros varían lentamente, la convergencia del algoritmo se resuelve incorporando un "factor de olvido" ( $\tau$ ) que permite ponderar en forma exponencial los datos dando más peso a los valores más

recientes. Los nuevos valores de L, P y  $\epsilon$  son:

$$L(t+1) = \frac{P(t) x^T(t+1)}{\gamma + x(t+1) P(t-1) x^T(t+1)}$$

$$P(t) = \left( I - \frac{P(t-1) x^T(t+1) x(t+1)}{\gamma + x(t+1) P(t-1) x^T(t+1)} \right) \frac{1}{\gamma} P(t-1)$$

$$\epsilon(t+1) = y(t+1) - x(t+1) \bar{\theta}(t)$$

Dado que el objeto de este estudio es la identificación en tiempo real, es necesario tomar en cuenta perturbaciones presentes en los casos reales, es decir ruidos existentes en la entrada y en especial en la salida de la planta. Para representar estas perturbaciones se supondrá el caso más sencillo donde éstas se asimilen a ruido blanco (ruido no correlacionado y con media cero) presente en la salida.

El problema radica ahora en mostrar que el método de mínimos cuadrados descrito anteriormente permite realizar una adecuada estimación de los parámetros en presencia de ruido. Para esto se debe estudiar cuán buena es la estimación a partir de las características de consistencia, desviación del estimador y BLUE (Best Linear Unbiased Estimator - Mejor estimador lineal insesgado).

La adición de ruido en la salida cambia la ecuación de salida que se representa ahora con:

$$Y(t) = X(t) \theta(t) + V(t)$$

siendo además de  $X(t)$  y  $Y(t)$  previamente definidos,

$$V(t) = [v(0) \ v(1) \ v(2) \ \dots \ v(t)]^T$$

donde los valores de  $v(t)$  corresponden a un proceso estocástico en forma de ruido blanco.

En base a la expresión final de  $\bar{\theta}$ , se demuestra efectivamente que este estimador es consistente, insesgado y que es el BLUE, Mejor estimador lineal insesgado, siempre y cuando la excitación sea persistente (señal  $u(t)$ ) y el ruido no sea correlacionado. Por lo que es posible utilizar el algoritmo ya desarrollado incluso para casos estocásticos [2].

### 3. CONTROL EN TIEMPO REAL

La parte de control se basa en un control digital directo cuya ley de control es diseñada en base a los valores estimados de los parámetros de la planta. El computador se encuentra dentro del lazo de control y es el encargado de generar la señal de control (ver figura 3).

La ley de control con la que se trabajará se basa en el principio de asignación de polos para la función de transferencia en lazo cerrado. Con la fijación a priori de los polos es posible las características transitorias y de estabilidad del sistema de control [3].

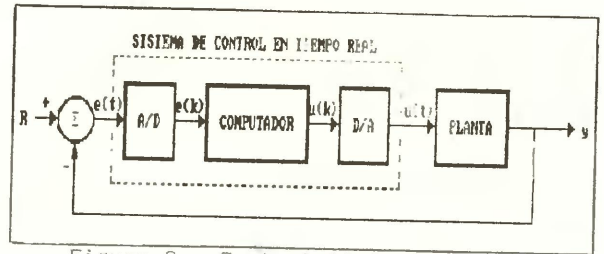


Figura 3 - Control Digital Directo

En la figura 4, se puede apreciar el lazo de control, en donde consta el regulador representado por los polinomios  $G(z)$  y  $F(z)$  y además un integrador digital que asegura que  $y(t)$  sea igual a  $r(t)$  en estado estable.

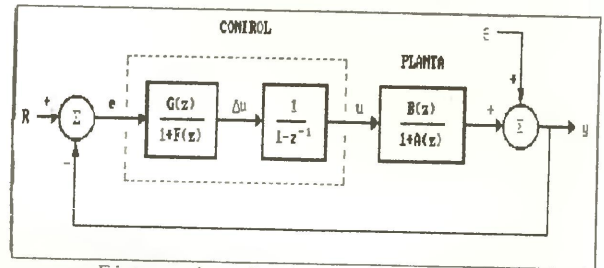


Figura 4 - Controlador Digital

La ecuación de salida será entonces:

$$y(t) = \frac{B(z)}{1+A(z)} \cdot \frac{1}{1-z^{-1}} \Delta u(t) + \frac{1}{1+A(z)} \epsilon(t)$$

Entonces es posible definir la ley de control como:

$$\Delta u(t) = \{r(t) - y(t)\} \frac{G(z)}{1+F(z)}$$

donde:

$$A(z) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_n z^{-n}$$

$$B(z) = f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_n z^{-n}$$

Para que exista una solución única en el proceso de diseño del control, es necesario que:  $n_g = n_a - 1$  y  $n_f = n_a - 1$ .

$$\bar{A}(z) = \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2} + \dots + \alpha_{n_a} z^{-n_a}$$

donde,

$$\alpha_1 = a_1 - 1$$

$$\alpha_2 = a_2 - a_1$$

:

$$\alpha_{n_a} = a_{n_a} - a_{n_a-1}$$

$$\alpha_{n_a+1} = -a_{n_a}$$

Evidentemente, se tendrá:  $n_a = n_a + 1$ .

La ecuación de salida es entonces:

$$y(t) = \frac{B(z)}{1+\bar{A}(z)} \Delta u(t) + \frac{1}{1+\bar{A}(z)} \epsilon(t)$$

La función de transferencia, sin tomar en cuenta las perturbaciones está dada por:

$$[(1+\bar{A})(1+F) + BG]y(t) = BGr(t)$$

Los polos están dados por un polinomio en el plano z, por lo que la ecuación a resolverse será:

$$(1+\bar{A})(1+F) + BG = 1 + T$$

que desarrollada da lugar a:

$$(1+\bar{A})F + BG = 1 + T - \bar{A} - 1$$

$$(1+\bar{A})F + BG = T - \bar{A}$$

con:  $n_t \dots = n_a + n_b$ .

Resolviendo este sistema de ecuaciones en  $g_i$  y  $f_i$ , a partir de los valores de  $a_i$  y  $b_i$ , la ley de control a calcularse en el computador está dada por:

$$u(t) = \frac{1}{1-z^{-1}} \Delta u(t)$$

$$= \frac{1}{1-z^{-1}} \cdot \frac{G(z)}{1+F(z)} \{r(t) - y(t)\}$$

lo que simplificando, puede describirse en forma matricial como:

$$u(t) = CX^T + r \cdot \sum_{i=0}^{n_g} g_i \quad (3.5)$$

donde:

$$C = [g_0 \ g_1 \ \dots \ g_{n_g} \ ; \ 1-f_1 \ f_1-f_2 \ f_2-f_3 \ \dots \ f_{n_f}]$$

$$X^T = [-y(t) \ -y(t-1) \ \dots \ -y(t-n_a) \ ;$$

$$u(t-1) \ u(t-2) \ \dots \ u(t-n_b)]$$

Queda entonces completamente definido el sistema de control adaptivo Self-Tuning en tiempo real (figura 5). Es necesario ahora definir el hardware y el software con el que se va a trabajar para su implementación en el computador.

#### 4. HARDWARE Y SOFTWARE

a) Hardware.

El equipo a utilizarse consta de:

- \* un computador PS/60 con coprocesador matemático y tarjeta de gráficos VGA a colores

- \* un equipo de adquisición de datos y control KEITHLEY 500A con tarjetas de entrada y salida de datos analógicos y transferencia de información digital de y hacia el computador.

- \* QUICK 500, versión compilable del SOFT 500, ampliación del QUICK BASIC 4.5 para trabajar con las rutinas de adquisición de datos y control del KEITHLEY 500A.

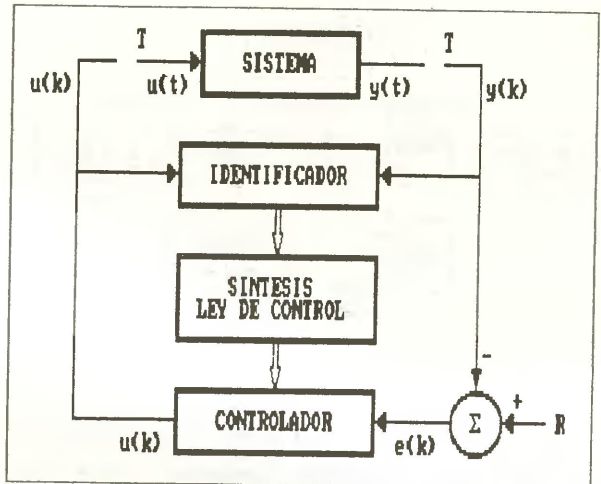


Figura 5 - Control Adaptivo en Tiempo Real

b) Software.

El software desarrollado consta fundamentalmente de un módulo ejecutable TESISAD.EXE y de algunos pequeños programas adicionales para trabajar con el sistema operativo y el LOTUS. Este programa ha sido desarrollado para poder realizar tanto simulación cuanto tiempo real, buscando simplificar la interacción del usuario con el computador con el uso intensivo de gráficos, menús y ventanas y respetando la forma estructurada del QUICK BASIC, lenguaje en el cual han sido implementados los algoritmos [4].

La estructura básica de la parte de simulación se indica en la figura 6. Constan allí las rutinas de definición del modelo, las de identificación solamente, las de identificación y control (control adaptivo), y las de presentación de resultados.

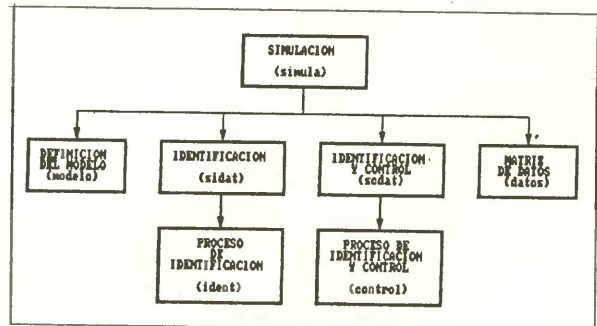


Figura 6 - SIMULACION

Para el tiempo real, ya no es necesario definir el modelo, pues la planta es real, pero se debe indicar el periodo de muestreo del proceso. Su adecuada definición garantizará el funcionamiento del sistema de control adaptivo. Se recomienda que éste se encuentre en un valor cercano a la del tiempo de respuesta de la planta.

La estructura de la parte de tiempo real se muestra en la figura 7 y consta de la definición de parámetros de tiempo real (periodo de muestreo), la identificación de la planta propiamente dicha, el control adaptivo en tiempo real y la presentación de resultados.

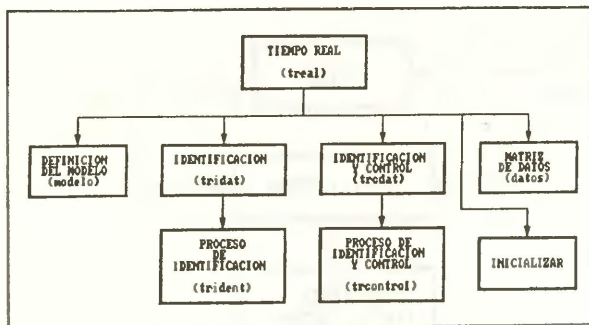


Figura 7 - TIEMPO REAL

## 5. RESULTADOS

Se realizaron muchas pruebas tanto en simulación cuanto en tiempo real con diferentes tipos de planta. Aquí se presentarán los resultados más relevantes pudiéndose encontrar el resto en [4].

### a) Simulación.

\* Primera Prueba: Identificación de una planta de tercer orden.

Se realiza tan sólo la identificación para demostrar el funcionamiento adecuado del algoritmo de identificación. Se parte de un modelo predefinido dado por:

$$\begin{aligned} A(1) &= .5 \\ A(2) &= .4 \\ A(3) &= -.5 \\ B(1) &= .9 \\ B(2) &= -.3 \\ B(3) &= .2 \end{aligned}$$

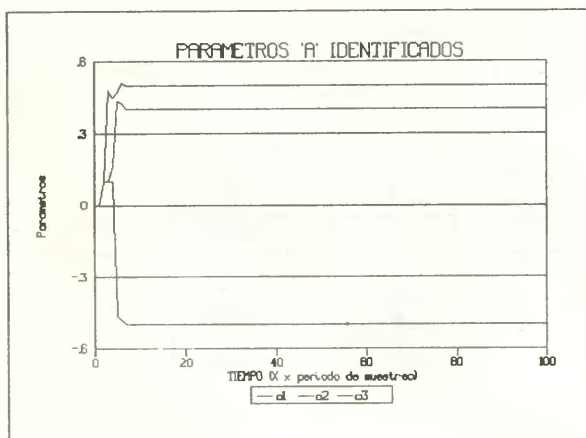


Figura 8 - Simulación: Primera Prueba

Los resultados después de la identificación son:

$$\begin{aligned} A(1) &= .49999 \\ A(2) &= .39999 \\ A(3) &= -.5000 \\ B(1) &= .89999 \\ B(2) &= -.3000 \\ B(3) &= .19999 \end{aligned}$$

con lo que se recuperan los valores dados del modelo: la identificación proporciona lo buscado. La convergencia además es muy rápida (10 iteraciones) como se puede ver en

la figura 8, donde constan los parámetros A identificados.

\* Segunda prueba: Control adaptivo para una planta de tercer orden.

Con la misma planta anterior, se realiza ahora el control adaptivo en simulación. Se trabaja con ruido en la salida y un polinomio de polos dado por:  $t(1) = -1.32$ ;  $t(2) = .5$ ;  $t(3) = 0$ . Los resultados del control se muestran en la figura 9: se puede apreciar allí que el control logra el objetivo de mantener la referencia en 5 V, luego de la identificación. Se encuentra además que no existe una exacta convergencia de parámetros en este caso: esto se explica por la presencia de ruido en la salida que se realimenta al control, por lo que se presentan perturbaciones correlacionadas que hacen fallar el algoritmo de mínimos cuadrados. Sin la perturbación, este problema no se presenta.

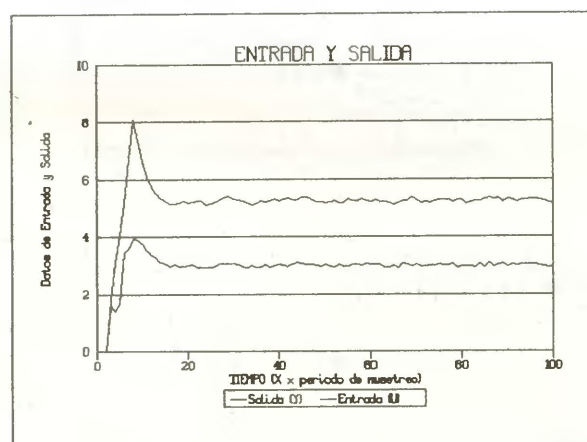


Figura 9 - Simulación: Segunda Prueba

### 2) Tiempo real.

\* Primera Prueba: Planta de segundo orden (RC en cascada).

Se trata aquí de realizar el control adaptivo sobre la planta que se muestra en la figura 10.

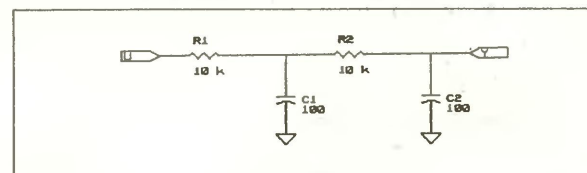


Figura 10 - Planta de segundo orden

Se trabaja con un modelo de identificación de tercer orden, un polinomio de polos igual que en simulación, y un periodo de muestreo de 400 ms. Los resultados se muestran en las figuras 11 y 12. El control es bastante bueno y la señal de salida apenas tiene un pequeño sobreimpulso. Por la realimentación de perturbaciones, como se tenía previsto en simulación, no hay una clara convergencia de parámetros no obstante los muy buenos resultados del control.

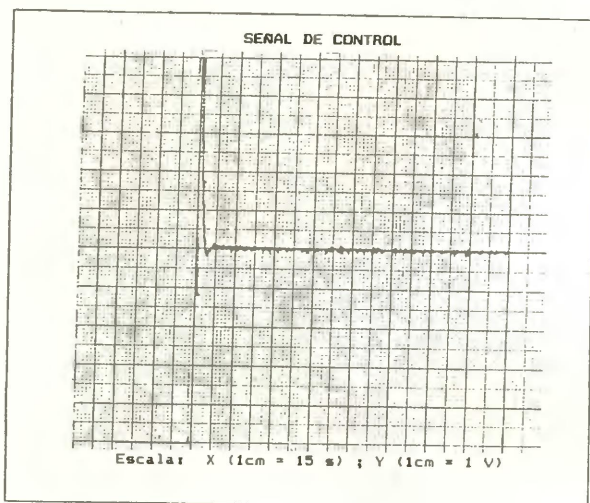


Figura 11 - Tiempo Real: Primera Prueba

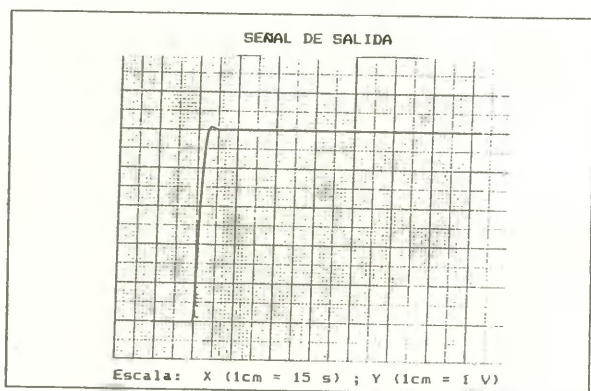


Figura 12 - Tiempo Real: Primera Prueba

\* Segunda prueba: Planta de segundo orden con perturbación momentánea.

La prueba es similar a la anterior, solo que la planta cambia momentáneamente sus características. Esto se consigue a través de un corto circuito en una de los condensadores de la planta.

Como puede verse en la figura 13, el control adaptivo reacciona a esta perturbación recuperando rápidamente la estabilidad.

\* Tercera Prueba: Planta de segundo orden con cambio permanente de parámetros.

Ahora, a diferencia de la prueba anterior, la planta cambia físicamente al añadirse un condensador en paralelo al primero. Aquí se pone a prueba la capacidad del control adaptivo para adecuarse a estas nuevas condiciones.

En la figura 14 se muestra el resultado: la primera perturbación corresponde al condensador añadido y la estabilidad que sigue; y la segunda es el retiro del condensador. El control adaptivo self-tuning está en capacidad de responder muy bien a variaciones físicas de la planta, cosa que no es posible conseguir con controladores como el PID clásico.

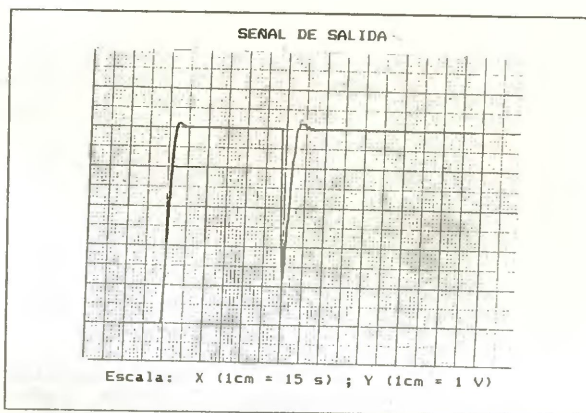


Figura 13 - Tiempo Real: Segunda Prueba

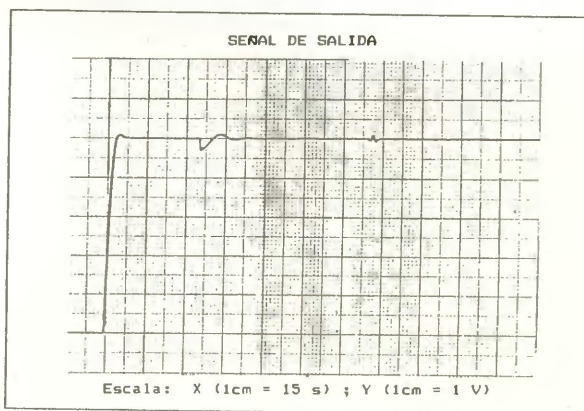


Figura 14 - Tiempo Real: Tercera Prueba

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo estuvo enmarcado en el proyecto EPN-CONUEP 87-01 "Control de Procesos en Tiempo Real". Su finalidad fue el estudio de la identificación de sistemas en tiempo real y el control adaptivo, con el uso de un computador en línea.

El programa desarrollado está en capacidad de realizar identificación y control tanto en tiempo real cuanto en simulación. El control adaptivo demuestra poder controlar adecuadamente la planta "adaptándose" a sus variaciones. Sin embargo su utilización está limitada por la velocidad del computador.

Dado que el programa fue diseñado para que su uso sea muy sencillo para el usuario, puede ser utilizado como un instrumento didáctico para el estudio del control adaptivo ya no sólo en simulación, sino ahora en tiempo real. Se espera que próximamente los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica puedan darle uso y profundizar así una temática que es parte de los temas que más se ha profundizado en estos últimos años en la teoría de sistemas de control.

Se recomienda que a partir de este trabajo se puedan realizar estudios que profundicen las aplicaciones del control adaptivo y la implementación de algoritmos más avanzados para mejorar su utilización.

## 7. REFERENCIAS

- [1] ASTROM KARL JOHAN y WITTENMARK BJORN, "Adaptive control", Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1983.
- [2] FRANKLIN GENE F. y POWELL J. DAVID, "Digital control of dynamic systems", Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1980.
- [3] BENNETT S. y LINKERS D. A. Eds., "Computer control of industrial processes", Peter Peregrinus Ltd., Stevenage, 1982.
- [4] PINTO TROYA GERMANICO, "Identificación de Sistemas en Tiempo Real", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Marzo de 1991.

## LOS AUTORES

Ing. PATRICIO BURBANO P.

Nació en Quito. Se graduó de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la EPN en el año de 1974. Realizó sus estudios de Postgrado en el UMIST, en la Universidad de Manchester en Inglaterra en 1984. Actualmente es Profesor Principal de la EPN y Director del proyecto de investigación CONUEP-EPN 87-01 "Control de Procesos en Tiempo Real".

Ing. GERMANICO PINTO T.

Nació en Colonia, Alemania, el 16 de junio de 1963. Obtuvo el Bachillerato Ecuatoriano (FFMM) y el Bachillerato Francés en 1981, en la UEB La Condamine. Se graduó de Ingeniero en Electrónica y Control en la EPN en el año de 1991. Actualmente es Profesor Asistente a Tiempo Parcial de la EPN.