

Controlador Self-Tuning: Aplicado a Control de Procesos con Dinámicas Altamente Variables

Edinson Franco Mejía*

John Jairo Martínez M.**

Héctor Calero R.***

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la investigación y desarrollo de un controlador adaptativo Self-Tuning, los algoritmos, los resultados de la validación del programa con plantas cuyas dinámicas son fuertemente variables y las conclusiones importantes para la implementación de ésta estrategia de control.

Abstract

This paper shows for an adaptive Self-Tuning Control, its research and development results, algorithms, program validation results using plants with high variation dynamics and some important conclusions to implementate it.

- * *Ingeniero Electricista, Magister en Automática de la Universidad del Valle. Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Colombia.*
- ** *Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle. Estudiante de la Maestría en Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Colombia.*
- *** *Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle. Estudiante de la Maestría en Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica - Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Colombia.*

Introducción

Los controladores industriales Self-Tuning han estado disponibles en el mercado por muchos años. La falta de una descripción clara y concisa de los conceptos, implementación práctica y software para investigación de controladores Self-Tuning, no ha permitido que la industria nacional encuentre aplicaciones de este controlador, lo cual mejoraría notablemente los procesos de producción industrial.

El estudio del diseño e implementación de controladores adaptativos e inteligentes, como el caso del controlador Self-Tuning, forma parte del plan estratégico del Grupo de Investigación en Aplicaciones Industriales de la Teoría de Control (GIAIC) adscrito a la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica - Facultad de Ingeniería de la Universidad de Valle, en la búsqueda de estrategias y tecnologías de control y automatización para el desarrollo de los procesos productivos de la industria nacional, con el claro objetivo de hacerlos más competentes.

Una de las metas del control adaptativo consistirá en compensar los cambios de los parámetros de la planta o proceso. Existen diferentes esquemas adaptativos, como son: "Robust High-gain Control" (control Robusto de Alta Ganancia), cuyo sistema incluye un modelo de la característica deseada; "Self-oscillating Adaptive System" (Sistema Adaptativo Auto-oscilante), sistema similar al anterior donde el ancho de banda del sistema realimentado se ajusta automáticamente hasta donde sea posible; "Gain Scheduling" (Ganancia Programada), esquema en el cual se cambian los parámetros del regulador como una función de variables auxiliares que se correlacionan bien con los cambios en la dinámica del proceso; "Model-Reference Adaptive System" (Sistema Adaptativo por Modelo de Referencia), cuyas especificaciones se dan en términos de un modelo de referencia el cual dice como debe responder idealmente la salida del sistema a la señal de control; "Self-Tuning Regulator" (Regulador de Auto-ajuste), que presenta un mecanismo de monitoreo del sistema y ajusta los coeficientes del controlador correspondiente para mantener un funcionamiento adecuado.⁽¹⁾

El esquema implementado en este trabajo es el método del "Self-Tuning Regulator", que se conoce como

un método indirecto. En los esquemas anteriores los parámetros del controlador son actualizados de manera directa, mientras en el esquema Self-Tuning se actualizan primero los parámetros del proceso para luego obtener los parámetros del controlador como una solución a un problema de diseño.

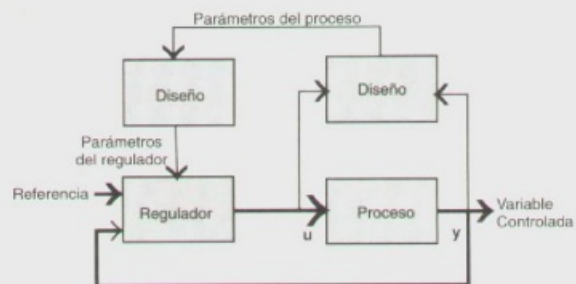


Figura 1. Diagrama de bloques de un regulador Self-tuning.

Controladores Self-Tuning

En un sistema adaptativo se asume que los parámetros del controlador son ajustados todo el tiempo; es decir, que éstos siguen a los cambios en el proceso. Sin embargo, es difícil analizar las propiedades de convergencia y estabilidad en cada cambio del proceso o sistema; para simplificar este problema se asume que el proceso es constante, salvo que sus parámetros son desconocidos.

Cuando el proceso o sistema es conocido, el Ingeniero de Control diseña un controlador cuyos parámetros se deben ajustar a unas especificaciones dadas de funcionamiento. Para las mismas especificaciones, pero asumiéndolo desconocido, un controlador adaptativo deberá converger a los mismos parámetros del caso anterior.

El controlador Self-Tuning tiene esta propiedad, de modo que, automáticamente el controlador se ajusta a una configuración deseable del sistema realimentado.⁽²⁾

El esquema básico de un controlador Self-Tuning se muestra en la Figura 1, donde se utiliza un algoritmo de estimación recurrente en tiempo real de los parámetros del modelo. Los resultados de este algoritmo se aplican para obtener los valores de los parámetros del controlador, mediante un algoritmo de diseño del mismo.

(1) AMSTROM, K.J. and Wittemmark, B. [1] p. 3-12.

(2) Ibid. p. 163

El procedimiento de diseño del controlador puede considerarse como un proceso de síntesis en tiempo real a partir de una estructura previamente definida;⁽³⁾ es decir, el controlador es un resultado "inmediato" que se obtiene con base en los requerimientos o características deseadas del sistema realimentado.

El algoritmo Self-Tuning, mediante algún método de diseño deberá "ajustar" al controlador para que cumpla los requerimientos del sistema en lazo cerrado. Si la planta presenta alguna variación en sus parámetros, el controlador deberá automáticamente cambiar los suyos para conservar la característica deseada $A_m(z)$.



Planta de Control de Presión Neumática.

Componentes

• Bloque de identificación o estimación

Los parámetros desconocidos de la planta son estimados en línea, usando un método de estimación recursiva. Los parámetros estimados son tratados como si fueran verdaderos, porque mediante el principio de equivalencia certera no se consideran las incertidumbres de las estimaciones. Pueden utilizarse diferentes esquemas de estimación, tales como: aprox-

mación estocástica, mínimos cuadrados extendidos y generalizados, variable instrumental y máxima verosimilitud.

• Bloque de diseño

Este bloque representa una solución en línea al problema de diseño para un sistema de parámetros conocidos. Esto es llamado el problema de diseño fundamental. Entre los diseños que pueden ser usados se encuentran: mínima varianza, lineal cuadrática, asignación de polos y seguimiento del modelo.

El método de diseño cambia dependiendo de las especificaciones del sistema en lazo cerrado y del método de estimación.

• Bloque de control o regulador

Es el encargado de hacer control en tiempo real, en él va escrita la ley de control tal como en un sistema realimentado convencional, con la diferencia de que en este controlador los parámetros son variables (determinados por el bloque de diseño).

Aplicaciones

El control adaptativo permite realizar control de sistemas que por su complejidad y por el desconocimiento de muchas leyes que lo gobiernan no son fáciles de controlar con las estrategias clásicas.

Los campos de aplicación del control adaptativo son muy amplios y abarcan el control de procesos, control industrial, teleinformática, robótica y el control de calidad.⁽⁴⁾

Estas son algunas aplicaciones encontradas en diferentes papers y documentos de investigación:

- Estabilizador adaptativo en sistemas de potencia.⁽⁵⁾
- Control de velocidad adaptativo para un motor primario Diesel.⁽⁶⁾
- Estabilizador adaptativo para máquinas sincrónicas.⁽⁷⁾
- Estabilizador Self-Tuning para sistemas de potencia.⁽⁸⁾
- Amortiguamiento de las oscilaciones de un generador usando un compensador adaptativo estático de VAR.⁽⁹⁾

(3) OLLERO B, A. Descripción interna y diseño óptimo [3] p.297

(4) Franco M., E. [8] p.15

(5) *IEEE. Transactions on energy conversion* [5]

(6) *IEEE. Transactions on energy conversion* [3] p. 499.

(7) *IEEE. Transactions on energy conversion* [7] p.6

(8) *IEEE. Transactions on energy conversion* [8] p.476

(9) *IEEE. Transactions on energy conversion* [2] p.718

- Controladores Self-Tuning bilineales para la estabilidad transitoria en sistemas multimáquinas.⁽¹⁰⁾
- Control de velocidad de un grupo turbina-alternador de una minicentral hidráulica.⁽¹¹⁾

Identificación de sistemas

Identificación

Se conoce como identificación, a la determinación de un modelo, a partir del conocimiento previo sobre el proceso y de experiencias prácticas.⁽¹²⁾⁽¹³⁾

Estimación

La estimación puede definirse como la determinación de constantes o variables de un sistema de forma óptima con respecto a un índice estadístico, y que son basadas en una serie de medidas tomadas sobre el proceso. El problema de la estimación de parámetros consiste en obtener los valores de los coeficientes de un modelo matemático, cuya estructura se supone conocida, haciendo uso de medidas del proceso; si existieran ruidos, el problema de estimar magnitudes a partir de unas medidas se reduciría a resolver las ecuaciones del modelo matemático (algebraicas en la estimación paramétrica y diferenciales en la estimación de estados). Sin embargo, al existir ruidos, la solución será probablemente diferente para cada serie de medidas. Por consiguiente, las estimaciones calculadas de esta forma tienen una naturaleza aleatoria.⁽¹⁴⁾

Métodos de Estimación de Parámetros

En el control adaptativo suele utilizarse métodos de identificación paramétrica y, en particular, técnicas recurrentes de estimación paramétrica tales como: el método de mínimos cuadrados, mínimos cuadrados ponderados, modelos estocásticos, y algunos otros métodos de estimación recurrente extendidos como el método de mínimos cuadrados extendido, variable

instrumental, máxima verosimilitud y aproximación estocástica.

Para tiempos pequeños de identificación, importante en control adaptativo, el método de mínimos cuadrados es el más utilizado debido a su simplicidad y aceptable convergencia.⁽¹⁵⁾ Sin embargo, en control adaptativo es fundamental que el algoritmo de estimación sea capaz de seguir las posibles variaciones de los parámetros. El algoritmo recurrente de mínimos cuadrados, tiene una rápida convergencia en la etapa inicial pero posteriormente la ganancia del estimador tiende a reducirse lo cual puede originar la parada del mecanismo de adaptación, para evitarlo se han propuesto diversas modificaciones del algoritmo básico, entre las cuales se halla la correspondiente a mínimos cuadrados ponderados.

Diseño del controlador digital

Teniendo en cuenta la modularidad del esquema de control Self-Tuning (autoajustable), virtualmente es posible emplear cualquier controlador cuyos parámetros puedan ser modificados en tiempo real y en función de los resultados de la estimación.

Para la selección del algoritmo de control es necesario tener en cuenta los requerimientos computacionales como: tiempo de cálculo y necesidades de almacenamiento, que inciden directamente en el cálculo de los parámetros del controlador. Así mismo, es importante la aplicabilidad en distintas condiciones posibles de trabajo de un mismo proceso o de diferentes procesos y señales, cuando el objetivo sea el diseño de un controlador autoajustable de uso general.

Entre los métodos de diseño de controladores digitales, aplicados al control autoajustable, se encuentran: el método de mínima varianza, lineal cuadrática, asignación de polos y seguimiento del modelo. Se utilizó el método de asignación de polos porque presenta un procedimiento de diseño directo muy simple, utilizando como datos los parámetros de la planta y como especificaciones, la ecuación característica deseada.

Método de Asignación de Polos

Este método es un procedimiento de diseño directo muy simple que usa como datos los parámetros estimados de la planta y como especificaciones la ecuación característica deseada. Su objetivo es encontrar una ley de realimentación que haga cumplir la localización

(10) IEEE. Transactions on energy conversion [4] p.1.379

(11) OLLERO, B., A. [10] p.365

(12) GRAUPE, D [9].

(13) EYKHOFF, P. [5].

(14) OLLERO, B., Op. cit. p. 183

(15) Ibid. p.298.

deseada de los polos de lazo cerrado del sistema controlado.

El proceso controlado es descrito por: $Ay = Bu + v$

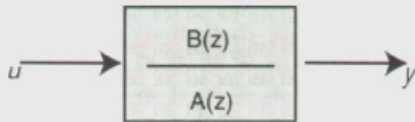


Figura 2. Proceso con una entrada y una salida

Donde u es la variable de control, y la salida medida, y v un disturbio. Los símbolos A y B denotan los polinomios que conforman la función de transferencia del sistema. Se requiere que los polinomios A y B no sean coprimos y que el sistema sea causal; además, A debe ser mónico. A y B se obtienen a partir de la estimación de los parámetros.

La ecuación característica deseada $A_0 \cdot A_m(z)$ donde $A_m(z)$ contiene los polos definidos por los requerimientos de funcionamiento y A_0 es el polinomio del observador.

El esquema de control se ilustra en la figura 3.

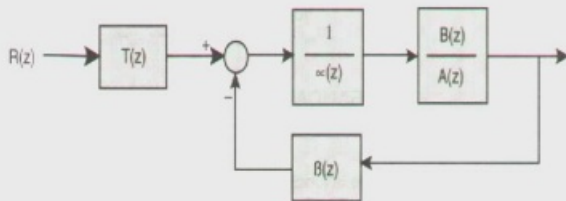


Figura 3. Esquema de control por el método polinomial de asignación de polos.

La función de transferencia de red cerrada esta dada por:

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{T(z) \cdot B(z)}{\alpha A(z) + \beta B(z)}$$

De modo que la ecuación característica deseada $A_0 \cdot A_m(z)$ debe corresponder a la calculada:

$$\alpha A(z) + \beta B(z) = A_0 \cdot A_m(z)$$

Esta ecuación es conocida como ecuación Diofántica,⁽¹⁶⁾ obsérvese que los polinomios α y β contienen parámetros desconocidos. Para encontrar solución a la ecuación anterior, el polinomio A_0 debe compensar matemáticamente la ecuación Diofántica. La solución de la ecuación Diofántica se resuelve mediante la Matriz de Sylvester.⁽¹⁷⁾

Algoritmos implementados

Algoritmo de identificación

Etapa Off-line

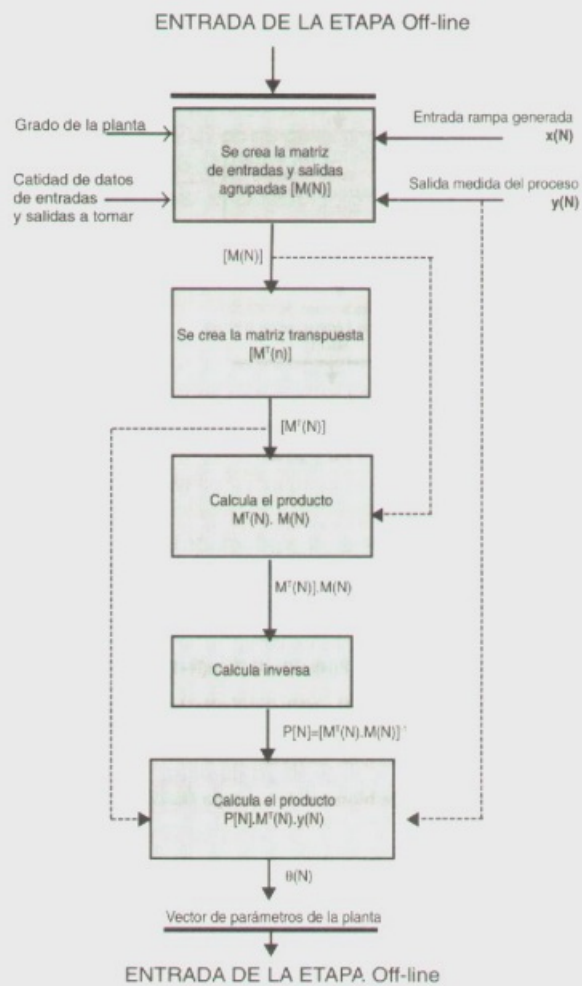
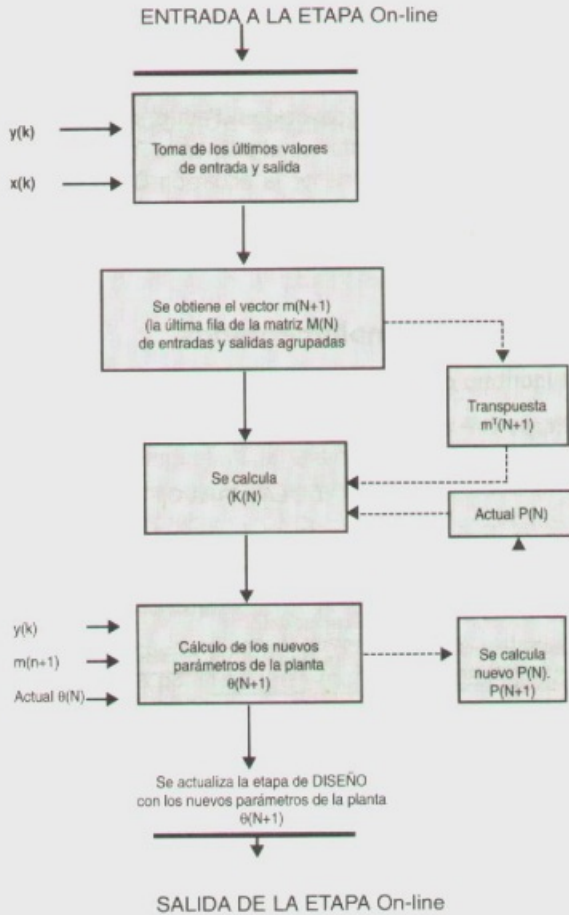


Figura 4. Diagrama de bloques de la etapa off-line

(16) OGATA, K., [11] Cap. 7 p.518.

(17) Ibid, p. 518.

Etapa On-Line



Donde,

$y(k)$, $x(k)$: salida y entrada del proceso en el instante k respectivamente.

$P(N)$ inicial esta dado por: $P(N) = [M(N)T.M(N)]^{-1}$, entregado por la etapa Off-line.

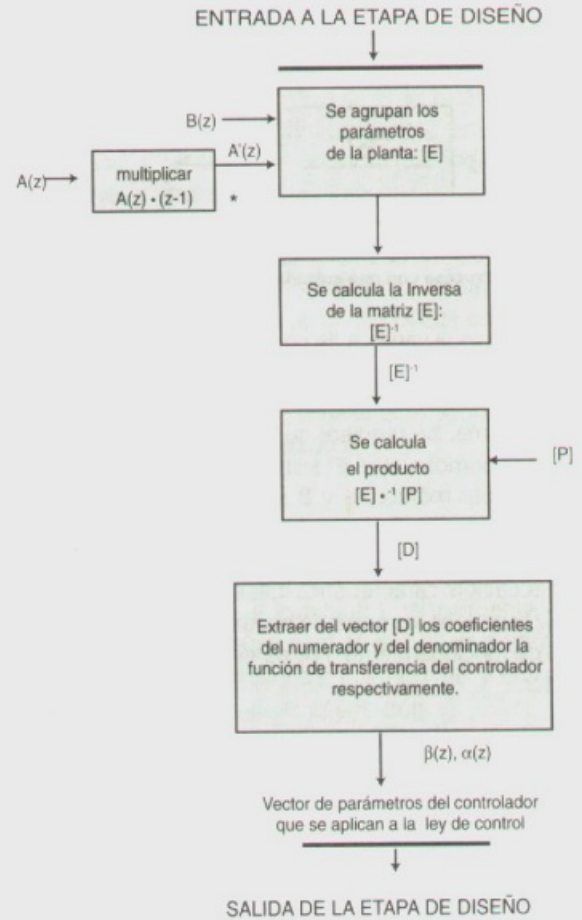
Se calcula $K(N)$ como: $K(N) = P(N)m^T(N+1) [1+m(N+1) P(N)m^T(N+1)]^{-1}$

Se calcula $\theta(N+1)$ como: $\theta(N+1) = \theta(N) + K(N)[y(N+1) - m(N+1)\theta(N)]$

Se calcula $P(N+1)$ como: $P(N+1) = [I - K(N)m(N+1)]P(N)$

Figura 5. Diagrama de bloques de la etapa On-Line

Algoritmo de diseño



$B(z)$: numerador estimado de la función de transferencia de la planta.

$A(z)$: numerador estimado de la función de transferencia de la planta.

$A'(z)$: $A(z)$ ficticia. Arreglo matemático que permite aplicar la ecuación Diofántica

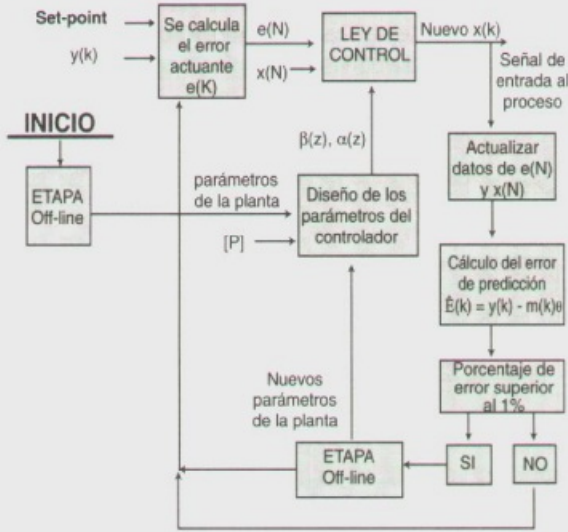
$[P]$: los coeficientes de la ecuación característica deseada.

$\beta(z), \alpha(z)$: numerador y denominador de la función de transferencia del controlador respectivamente.

$(z-1)$ es un factor del denominador del controlador a diseñarse, con lo que se asegura que el sistema controlado sea por lo menos un sistema TIPO 1.

Figura 6. Diagrama de bloques de la etapa de diseño

Algoritmo de control



$y(k)$: última salida del proceso
 $x(k)$: última entrada al proceso
 $X(N) = [x(k), x(k-1), x(k-2), \dots]$
 $e(N) = [e(k), e(k-1), e(k-2), \dots]$
 $m(k)_{\hat{e}}$ es la salida simulada del proceso, usando los parámetros actuales de la planta en el instante k .
 [P]: el vector que contiene los coeficientes de la ecuación característica deseada.
 $\hat{e}(k)$: el error de predicción en el instante k .

Nota: el porcentaje de error se calcula como:

$$\%error = \frac{|y(k) - m(k)_{\hat{e}}|}{|m(k)_{\hat{e}}|} \times 100\%$$

Figura 7. Diagrama de bloques del algoritmo completo de control

Evaluación de la implementación (Validación)

El programa ha sido validado en el Laboratorio de Automática de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, en tres simuladores

de procesos típicos, para evaluar la implementación del controlador Self-Tuning se realizaron pruebas en diferentes procesos que exigen tiempos de muestreo entre 150 milisegundos y 5 segundos, con resultados exitosos.

Una característica importante en el controlador Self-Tuning es la rapidez de convergencia hacia el valor de set-point de la variable controlada (problema del regulador), ante cambios en los parámetros de la planta y/o presencia de ciertos niveles de disturbio. Para comprobar esto se montaron algunos casos extremos que sólo pueden estudiarse sobre una planta simulada (planta analógica PCS 327 Mk2 de la firma Feedback).

Convergencia Ante Variaciones de los Parámetros de la Planta

Descripción de la planta: La planta PCS 327 Mk2 de la firma Feedback simula de manera análoga una planta de primer orden con un retardo variable (planta lenta 1s. y planta rápida 10ms.). Para efectos de estudio se provoca de manera digital sobre la salida del proceso variaciones del 20% en la ganancia de la planta, de tal forma que se tiene una planta híbrida en la cual se pueden manipular el tiempo de respuesta y la ganancia de la misma. Los modelos matemáticos para los casos extremos son:

Planta lenta:

$$G(z) = \frac{0.031z + 0.143}{z - 0.846} \quad \text{Tiempo de muestreo: 150ms.}$$

La respuesta temporal de este sistema ante un escalón unitario arroja que: $t_s = 3.0$ s, y $e_{ss} = 12.9\%$

Planta rápida:

$$G(z) = \frac{0.530z + 0.217}{z - 0.330} \quad \text{Tiempo de muestreo: 150ms.}$$

La respuesta temporal de este sistema ante un escalón unitario arroja que: $t_s = 0.6$ s, y $e_{ss} = 11.8\%$

• **Simulaciones**

Se montaron diferentes casos usando como especificaciones: un tiempo de establecimiento (t_s) de 2.4 s, un sobrepaso menor del 5% y un error de estado estacionario menor del 2%. Con lo que se obtienen los siguientes polos deseados para el sistema controlado:

$$z = .765 \pm j 0.1408$$

Caso 1: Planta lenta y variaciones de la ganancia:

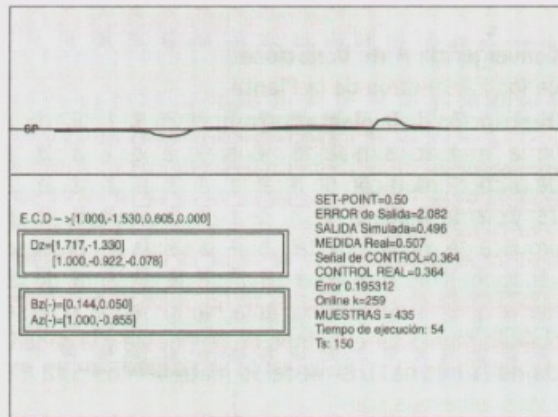


Figura 8. Planta lenta y variaciones de la ganancia

El controlador converge rápidamente y con desviaciones menores al 20% (menor al incremento provocado en la ganancia de la planta).

Caso 2: Planta en modo lento y transición a modo rápido con cambios adicionales en la ganancia.

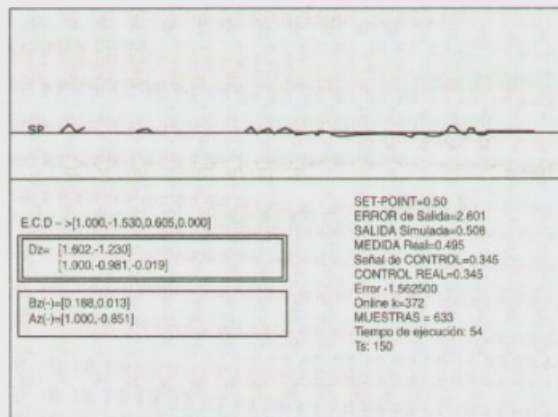


Figura 9. Planta en modo lento y transición a modo rápido con cambios de ganancia.

Se presentan pequeñas oscilaciones (zig-zag) de la señal en el momento en que se altera la dinámica, posteriormente se observan modificaciones más fuertes en las oscilaciones (zig-zag) cuando se adicionan cambios en la ganancia.

Caso 3: Planta en modo lento y transición a modo rápido.

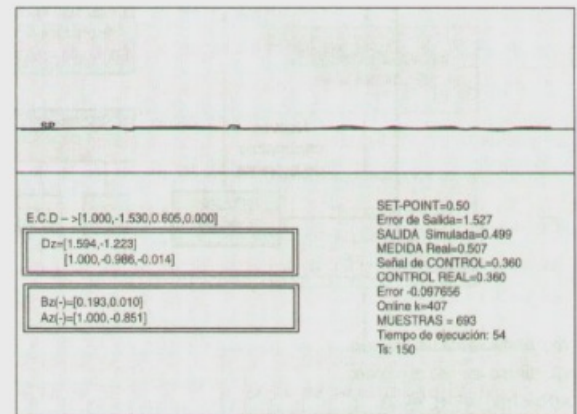


Figura 10. Planta en modo lento y transición a modo rápido.

En este caso, no se observan desviaciones en la variable controlada, lo cual es deseable en un sistema controlado.

Caso 4: Planta en modo rápido con transición a modo lento y cambios bruscos en la ganancia.

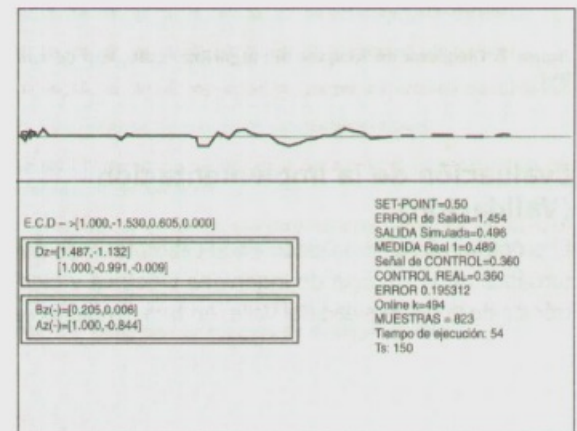


Figura 11. Planta en modo rápido y transición a modo lento con cambios en la ganancia.

El sistema oscila ante los cambios repentinos de la ganancia y converge rápidamente al valor deseado.

Caso 5: Planta en modo rápido y transición a modo lento con cambio en el valor de set-point.

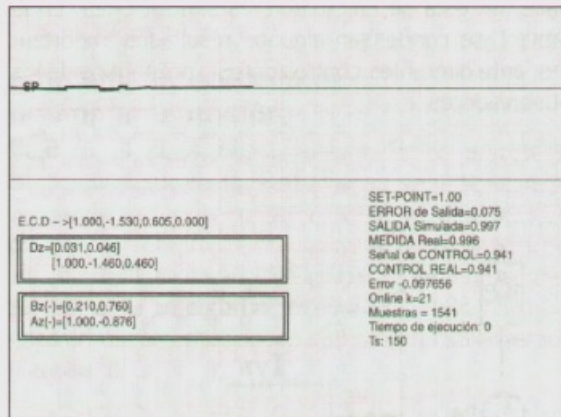


Figura 12a. Planta en modo rápido (antes de la transición a modo lento).

Caso 6: Planta en modo lento y transición a modo rápido con cambio en el set-point.

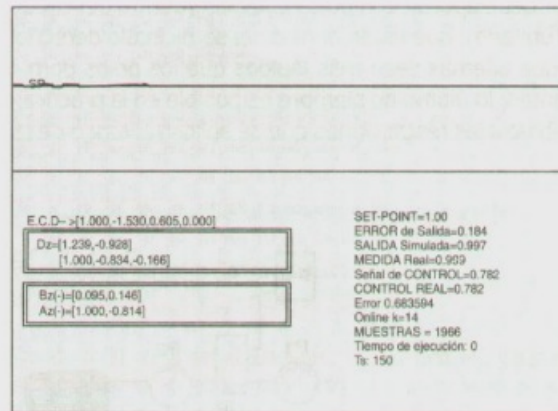


Figura 13a. Planta en modo lento (antes de la transición a modo rápido).

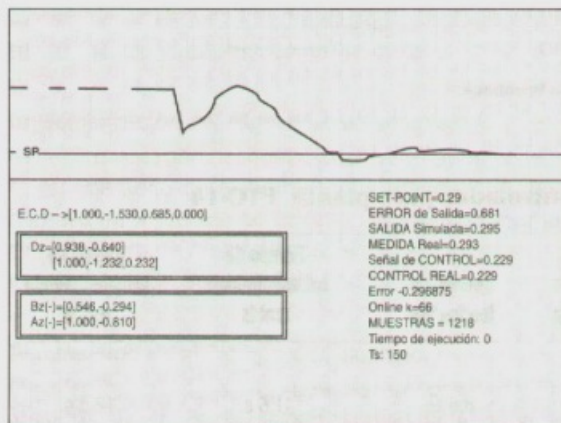


Figura 12b. Planta en modo rápido y transición a modo lento con cambio en set-point.

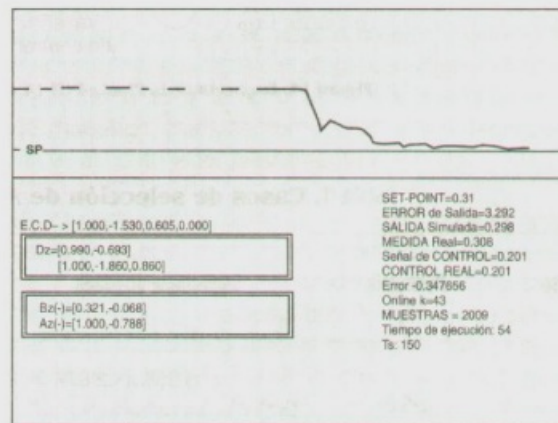


Figura 13b. Planta en modo lento y transición a modo rápido con variaciones en el set-point.

El controlador converge adecuadamente sin importar las variaciones en el valor de set-point. Así, se obtuvo buenos resultados con variaciones de set-point entre 10 y 100%.

Los parámetros de la planta permanecen muy constantes y en la transición empiezan a converger de manera muy lenta.

Comportamiento ante Diferentes Diseños del Controlador

Teóricamente se afirma que el polinomio del observador debe aportar con polos estables (dentro del círculo unitario), que estén dentro del semicírculo derecho y que además sean más rápidos que los polos dominantes; lo último no siempre es posible en la práctica, debido a las restricciones que se aplican al rango de la

señal actuante para cumplir límites físicos. En la figura 14 se ilustra la Planta de Control de Presión PTC-14 del Laboratorio de Automática de la Universidad del Valle, en ésta se efectuaron las simulaciones. En la tabla 1 se condensan algunos resultados importantes, ante diferentes controladores y polinomios de los observadores.

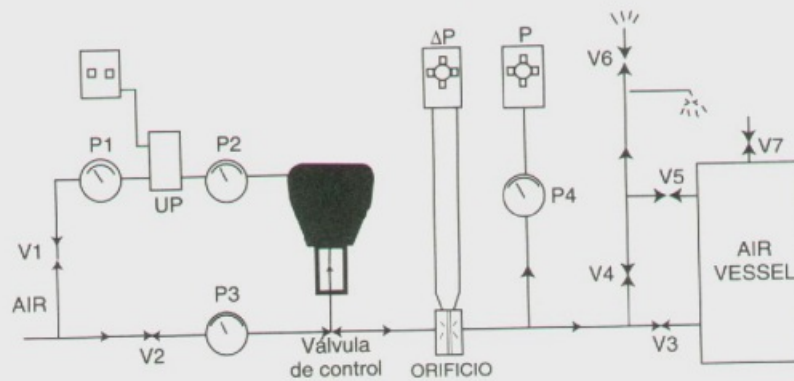


Figura 14. Esquema de la Planta PTC-14 de la Firma Feedback.

Tabla 1. Casos de selección de A_0 y controlador para planta PTC-14

Caso	Polinomio A_1	Controlador diseñado	Sobrepaso teórico M_p	Sobrepaso teórico M_p	Tiempo de establecimiento real t_s	Tiempo de establecimiento real t_s
1	$(z-0.0)$	$D(z) = \frac{3.058 z - 2.678}{z^2 - 0.870 z - 0.130}$	14.1%	8.6%	11.6 s.	12.8 s.
2	$(z-0.4)$	$D(z) = \frac{1.924 z - 1.695}{z^2 - 1.259 z + 0.259}$	15.4%	8.4%	12.0 s.	13.2 s.
3	$(z-0.6)$	$D(z) = \frac{1.356 z - 1.204}{z^2 - 1.454 z + 0.454}$	16.4%	11.2%	12.4 s	13.6 s.
4	$(z-0.8)$	$D(z) = \frac{0.789 z - 0.713}{z^2 - 1.649 z + 0.649}$	17.0%	7.6%	13.5 s.	12.8 s.
5	$(z-0.9)$	$D(z) = \frac{0.505 z - 0.467}{z^2 - 1.747 z + 0.747}$	12.6%	6.4%	14.8 s.	11.6 s

Se resalta de la tabla que el polo más rápido en la teoría ($z=0$), como observador, en el funcionamiento global del sistema Self-tuning, no da la respuesta más rápida ni el sobreimpulso más pequeño en la práctica.

Problemas y soluciones de implementación

Cuando se desarrolla la teoría de los sistemas adaptativos, suelen hacerse algunas simplificaciones, que llevan a obtener consideraciones y limitantes que pueden ser obtenidas mediante la investigación de situaciones idealizadas. Sin embargo, cuando se desarrolla en la práctica un sistema adaptativo hay que encarar muchas situaciones que no son cubiertas por la teoría.⁽¹⁸⁾

Para conseguir un sistema exitoso, el diseñador debe considerar todas las situaciones y combinación de condiciones que pueden ocurrir. Esto es importante para conseguir un sistema seguro, que cubra situaciones de arranque, interrupciones, cambios entre modo manual y automático, entre otros.

Implementación del Algoritmo en Lenguaje C

La implementación del controlador Self-Tuning consiste en una serie de algoritmos que manejan un gran número de matrices; se decidió trabajar con asignación dinámica de memoria para el manejo matricial. La implementación se realizó en Lenguaje C.⁽¹⁹⁾

Sincronismo en el Tiempo de Muestreo

La diferencia en los tiempos de ejecución de los algoritmos de control, cuando se ejecuta la etapa de estimación recurrente, debió corregirse mediante el uso de una rutina que provoca retardos de igual magnitud en los muestreos de las variables físicas. La rutina utiliza el TIMER del procesador del computador para asegurar precisión en los retardos provocados. La rutina implementada como una función en Lenguaje C está configurada de la siguiente manera:

```
void delayed(long retardo)
{
    clock_t inicio, fin;
    inicio = clock();
    do {
        fin = clock();
    } while (retardo >= ((fin-inicio)*1000.0 / CLK_TCK));
}
```

(18) ASTROM, K., Op. cit. p. 402.

(19) Turbo C++ [12].

Adecuación de la Señal Actuante

En el estudio de los sistemas realimentados, se asumen sistemas que responden con acción directa, pero en la práctica hay configuraciones que responden de manera directa e inversa, dependiendo de las características del actuador.

Esto se soluciona acondicionando la señal por software, dependiendo del caso se tiene:

Para acción directa: Señal enviada al proceso = $m(k)$

Para acción inversa: Señal enviada al proceso = $V_{\max} + V_{\min} - m(k)$

Donde $m(k)$ es la señal actuante, V_{\max} el máximo valor de señal admitido por el actuador, y V_{\min} el mínimo valor de señal admitido por el actuador.

Conclusiones

Se inició la etapa de identificación, formando la matriz de entradas y salidas agrupadas mediante la toma de N observaciones, dicha estrategia consigue un trabajo eficiente de la ley de control en los primeros tiempos de muestreo, pues se aprovechan estos datos para iniciar al controlador previamente diseñado.

La formación de la matriz de entradas y salidas agrupadas se puede llevar a cabo mediante la toma de una serie de N observaciones introduciendo a la planta en experimentación una señal tipo Rampa, y no necesariamente mediante una señal pseudoaleatoria. La señal tipo Rampa aplicada a la planta crece hasta alcanzar el valor de referencia, de modo que se obtiene una matriz de mediciones de entradas y salidas agrupadas que forman filas linealmente independientes, logrando solucionar el problema de estimación.

La rutina de identificación recursiva NO trabaja todo el tiempo, ésta permanece apagada mientras el error de estimación $e(k)$, no supere un porcentaje escogido de predicción (el 1% en este trabajo). El cambio de parámetros en el sistema o un ruido blanco elevado hará encender esta etapa.

El método de mínimos cuadrados identifica modelos de sistema equivalentes pero distintos en cada corrida de la rutina, al momento de tratar de identificar o estimar una planta con un grado equivocado de la misma. Esto puede tratarse como un problema cuando se piensa en la posibilidad de que el algoritmo no

converja en algún momento. Con esto, se tiene, que un buen uso del algoritmo de identificación por mínimos cuadrados se da con un conocimiento previo del grado de la planta.

Se recomienda identificar los sistemas con grados iguales en el numerador y denominador de su función de transferencia, con esto se logra empalmar más fácilmente las rutinas de identificación y diseño, las cuales trabajan la función de transferencia de la planta en potencias negativas y positivas respectivamente.

Es aconsejable implementar el algoritmo de diseño por asignación de polos mediante un arreglo matemático que introduce un polo en $z=1$ en la función de transferencia del sistema en red abierta, lo que lleva al sistema a comportarse por lo menos como un sistema TIPO UNO. Esto garantiza que el sistema en estado estable, responde sin presencia de error.

Es importante anotar, que la característica de funcionamiento en red cerrada del sistema controlado, es escogida por el ingeniero de control y no por la máquina; estos criterios difícilmente serán realizados por la máquina. "Lo adaptativo no lo hace óptimo, lo óptimo lo hace el usuario conocedor del sistema".

Se sugiere para aplicaciones industriales el uso del algoritmo Euclidiano, para eliminar posibles factores comunes entre los polinomios del numerador y denominador de la función de transferencia de la planta identificada; aunque se observó la poca posibilidad de este evento.

Finalmente, para conseguir un sistema adaptativo seguro que cubra situaciones de arranque, interrupciones, cambios entre modo manual y automático, el ingeniero de control debe considerar todas las situaciones y combinación de condiciones que puedan ocurrir.

Bibliografía

1. ASTROM, Karl John y WITTENMARK, Bjorn. Adaptive Control. Massachusetts: Eddison-Wesley Publishing Company, 1989.
2. AMORTIGUAMIENTO de las oscilaciones de un generador usando un compensador adaptativo estático de VAR. En: IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 7, Nº 2 (mayo 1992).
3. CONTROL de velocidad adaptivo para un motor primario Diesel. En: IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 8, Nº 3 (septiembre 1993).
4. CONTROLADORES Self-Tuning bilineales para la estabilidad transitoria en sistemas multimáquinas. En: IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 9, Nº 3 (agosto 1993).
5. EYKHOFF, Pieter. System identification, Parameter and state estimation. s.l.: Wiley, 1979.
6. ESTABILIZADOR adaptivo para máquinas sincrónicas. En: IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 8, Nº 1 (septiembre 1993).
7. ESTABILIZADOR adaptativo para máquinas sincrónicas. En: IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 8, Nº1, p.6. Marzo 1993.
8. ESTABILIZADOR Self-Tuning para sistemas de potencia. En: IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.8, Nº3, p.476. Septiembre 1993.
9. GRAUPE, D. Identification of systems s.l.: Kriger, 1975.
10. OLLERO, B., Anibal. Control por computador. Barcelona - México: Marcambo - Alfaomega, 1991.
11. OGATA, Katsuhico. Discrete-time control system. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliff, 1995.
12. TURBO C++ Lenguaje de programación. Borland International, Inc. ver. 3.0. Copyright ©, 1990, 1992.