

IDENTIFICACIÓN EN LAZO CERRADO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

A. Aguado Behar¹, A. del Pozo Quintero¹, A. Gómez Infante¹

¹ Departamento de Control Automático, Instituto de Cibernética, Matemática y Física aguado@icmf.inf.cu

RESUMEN

La identificación en lazo cerrado de sistemas continuos es un problema de optimización no lineal que resulta de difícil solución mediante métodos convencionales. En este trabajo se propone el uso de algoritmos genéticos (AG) para esta tarea y se muestra mediante simulaciones que los modelos obtenidos pueden reproducir fielmente el comportamiento de la planta, aun en el caso de sistemas inestables o que presentan algún tipo de no-linealidad. Estos modelos pueden utilizarse para el ajuste de los parámetros de reguladores PID utilizando un método también basado en AG, como se muestra en dos ejemplos: un sistema inestable en lazo cerrado y otro de alto orden con retardo. La metodología propuesta se aplica también a la identificación del modelo AC5A de la IEEE, que incluye una no-linealidad del tipo saturación, para unidades de generación eléctrica.

Palabras claves: Algoritmos genéticos, ajuste de parámetros de reguladores PID, identificación en lazo cerrado de sistemas continuos, modelo AC5A de unidades de generación eléctrica.

CLOSED LOOP IDENTIFICATION USING GENETIC ALGORITHMS

ABSTRACT

Closed loop identification of continuous systems is a difficult to solve optimization problem when conventional methods are used. The introduction of a genetic algorithm (GA) to face this problem is proposed. Simulations implemented shows that the models obtained are capable to reproduce the behavior of the system, even in the case of non linear or unstable system. The model also can be used to tune the parameters of the PID regulator using a GA based method, as shown in two examples. The methodology proposed in this work is also applied in the identification of the model AC5A of IEEE. This model, used in power generation plants, presents a non linearity of saturation type.

Key words: AC5A model, Closed – loop system identification, Genetic Algorithms, PID tuning.

INTRODUCCIÓN

La identificación en lazo cerrado de sistemas cobra importancia particular cuando la realización de experimentos en lazo abierto resulta peligrosa o imposible, eso explica el amplio tratamiento en la literatura de este tema^{1, 2, 3}. La gran mayoría de los métodos propuestos se enfocan en la identificación de modelos discretos tales como el ARX, ARMAX u otros similares y utilizan el método de mínimos cuadrados o alguna de sus modificaciones. No obstante, en muchas aplicaciones tales como la sintonización de

reguladores o la realización de estudios de simulación fuera de línea, los modelos continuos son preferibles o incluso necesarios.

Otros trabajos más recientes, que pueden considerarse como antecedentes más cercanos de esta contribución, utilizan algoritmos genéticos (AG) asociados al problema de la identificación en lazo cerrado. Por ejemplo, en⁴ se utiliza un AG para determinar los parámetros de una función conmutadora que perturba a la referencia y a partir de los datos obtenidos se realiza la identificación en lazo cerrado

utilizando el método de la variable instrumental. En ⁵ se utiliza un AG como una primera etapa de optimización global, en la identificación de modelos en el espacio de estados con estructura mínima, antes de utilizar otro método de optimización local para la estimación final de los parámetros.

El enfoque que proponemos en este trabajo, difiere de los mencionados en que se trata básicamente de la identificación en lazo cerrado de modelos continuos entrada-salida a partir de experimentos sencillos y poco perturbantes como son el escalón, suavizado eventualmente mediante un filtro de primer orden o secuencias binarias pseudo aleatorias de pequeña amplitud.

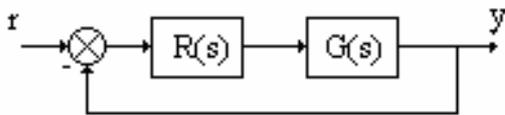


Figura 1. Sistema de control por realimentación.

En la figura 1 se representa un sistema de control por realimentación en el que la planta y el regulador se caracterizan mediante las funciones transferenciales continuas $G(s)$ y $R(s)$. La función transferencial en lazo cerrado correspondiente es:

$$H(s) = \frac{R(s)G(s)}{1 + R(s)G(s)} \quad (1)$$

Si $R(s)$ y $G(s)$ son cocientes de polinomios en s , incluyendo la posibilidad de un retardo puro en $G(s)$ aproximado mediante una función de Padé ⁶, tenemos entonces:

$$H(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{P_m s^m + \Lambda p_1 s + p_0}{q_n s^n + \Lambda q_1 s + q_0} \quad (2)$$

Los coeficientes p_i y q_i son funciones de los parámetros de la planta y del regulador (P_G) y (P_R):

$$p_i = f_i(P_R, P_G) \quad i = 0, 1, \dots, m. \quad (3)$$

$$q_i = g_i(P_R, P_G) \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (4)$$

donde $f_i(\cdot)$ y $g_i(\cdot)$ son funciones no lineales conocidas.

Si aplicamos una función escalón o una secuencia binaria pseudo aleatoria (PRBS) a la referencia $r(t)$, la respuesta $y(t)$ del sistema $H(s)$ puede calcularse mediante:

$$y(t) = L^{-1}(H(s)L(r(t))) \quad (5)$$

donde L denota a la transformada de Laplace y L^{-1} su inversa.

Sea $y_m(kT)$ una muestra experimental de la salida, medida con un período de muestreo T suficientemente pequeño. Es posible entonces plantear el siguiente problema de optimización para determinar los parámetros del sistema en lazo cerrado:

$$\min_{p_i, q_i} J = \sum_{k=1}^{k=N} (y(kT) - y_m(kT))^2 \quad (6)$$

donde N es suficientemente grande.

Para resolver este problema no lineal, se propone una metodología basada en un algoritmo genético (AG) que imita los mecanismos evolutivos de las especies biológicas, a fin de aprovechar sus conocidas propiedades de generalidad, flexibilidad y atracción intuitiva ^{7,8}.

La metodología propuesta será usada, en primer lugar, para identificar algunos parámetros del modelo AC5A, utilizado por la IEEE para simular la dinámica de unidades de excitación-generación eléctrica. El modelo AC5A es un modelo continuo, de alto orden y que presenta una no-linealidad de tipo saturación. Por razones de seguridad, los experimentos de identificación deben realizarse en condiciones de lazo cerrado.

Como una extensión de la metodología propuesta, se mostrará además en el trabajo, que algunos problemas asociados de optimización no lineal, en particular el ajuste en lazo cerrado de parámetros de reguladores PID en casos difíciles, tales como sistemas inestables en lazo cerrado o de alto orden, pueden ser ventajosamente resueltos utilizando un enfoque similar basado en AG.

CARACTERÍSTICAS DEL ALGORITMO GENÉTICO UTILIZADO

El AG seleccionado para la presente aplicación, tiene las siguientes características:

- Los individuos o cromosomas se codifican con números reales ⁹, de tal forma a cada gen corresponde un valor real.
- Una operación de "ranking" ¹⁰ asigna a cada individuo x un número natural de acuerdo con el valor asociado del criterio $J(x)$, de tal forma que a valores menores de $J(x)$ corresponden números mayores. Entonces para cada individuo x se define un nuevo valor $J'(x)$ correspondiente a su número de orden y que representa el grado de ajuste de dicha solución. Por ejemplo, si tenemos una población de tres individuos y los valores de J correspondientes a cada uno de ellos son $J1 = 10$, $J2 = 5$ y $J3 = 1$, los valores del criterio transformado serían: $J'1 = 1$, $J'2 = 2$ y $J'3 = 3$, o sea el tercer individuo es el que tiene el grado de ajuste máximo.
- Se utiliza una operación de selección conocida como muestreo universal estocástico ¹⁰, según la cual, la probabilidad de supervivencia de un individuo se calcula mediante la ecuación (7), en la que N_{ind} representa al número de individuos.

$$P(x_i) = \frac{J'(x_i)}{\sum_{j=1}^{N_{ind}} J'(x_j)} \quad (7)$$

d) El cruzamiento de los cromosomas se efectúa mediante un operador de recombinación intermedio¹¹ definido mediante la siguiente transformación:

$$\begin{aligned} x'_1 &= \alpha_1 x_1 + (1 - \alpha_1) x_2 \\ x'_2 &= \alpha_2 x_2 + (1 - \alpha_2) x_1 \end{aligned} \quad 8)$$

$$\alpha_1, \alpha_2 \in [0, 1]$$

donde:

- α_1, α_2 son números aleatorios distribuidos uniformemente que se generan para cada cromosoma.
- La probabilidad de cruzamiento se escoge como $pc = 0.9$.

e) La mutación de un cromosoma seleccionado aleatoriamente con probabilidad pm se calcula mediante:

$$x'_i = x_i (1 + 0.2 \text{ randn}) \quad 9)$$

donde randn es un número aleatorio distribuido normalmente con media cero y varianza 1. Para la presente aplicación se selecciona $pm = 0.4$.

f) Se utiliza el concepto de “elitismo” durante la ejecución del AG, es decir, la mejor solución obtenida en cualquier generación, se mantiene inalterable en la generación siguiente, hasta que aparezca una mejor. De esta forma se evita que una solución muy buena que haya aparecido aleatoriamente en las primeras generaciones, se pierda al aplicarse los operadores genéticos.

IDENTIFICACIÓN EN LAZO CERRADO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

En lo que sigue, se aplicará una metodología basada en un AG para resolver el problema de optimización planteado en la ecuación (6). En primer lugar se define una población de parámetros IG de tamaño $Nind$ que se genera inicialmente en forma aleatoria, sometida a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} I_G \max &\geq I_G \geq I_G \min \\ I_G^j &= I_G^j \min + (I_G^j \max - I_G^j \min) \text{ rand} \end{aligned} \quad 10)$$

$$j = 1, \Lambda, Nind$$

Aquí, rand es un número aleatorio distribuido en el intervalo $[0, 1]$. Para cada individuo, de la población existe:

- una función transferencial:

$$H(s)^j = \frac{P(s)^j}{Q(s)^j} = \frac{p_m^j s^m + \Lambda p_1^j s + p_0^j}{q_n^j s^n + \Lambda q_1^j s + q_0^j} \quad 11)$$

- una respuesta temporal:

$$y(t)^j = L^{-1}(H(s)^j L(r(t))) \quad 12)$$

- y una función de error:

$$J^j = \sum_{k=1}^{k=N} (y_m(kT) - y(kT))^2 \quad 13)$$

Los coeficientes p_i^j, q_i^j se calculan mediante las funciones conocidas f_i y g_i :

$$p_i^j = f_i(P_R, P_G^j) \quad 14)$$

$$q_i^j = g_i(P_R, P_G^j) \quad 15)$$

Si se cumple que:

$$J_{\min}^j = J^i \quad 16)$$

entonces la solución del problema de identificación será:

$$P_G \text{opt} = P_G^i \quad 17)$$

Puesto que el tamaño del espacio de búsqueda inicial es desconocido, el algoritmo genético puede repetirse un número arbitrario de veces $Nrepet$. Generalmente resulta ventajoso reducir el espacio de búsqueda en las iteraciones sucesivas de tal forma que en cada nueva iteración, el espacio se restringe a la vecindad de la solución óptima encontrada en la anterior. Por ejemplo, podemos hacer lo siguiente:

$$P_G \max = (1 + \alpha) P_G \text{opt} \quad 18)$$

$$P_G \min = (1 - \alpha) P_G \text{opt}$$

donde α es un número pequeño, por ejemplo en el intervalo $[0.2, 0.5]$.

En lo que sigue se presenta un ejemplo de la aplicación de esta metodología. Consideremos un sistema de segundo orden inestable que se describe mediante la función transferencial:

$$G(s) = \frac{c_0}{d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad 19)$$

siendo sus parámetros:

$$c_0 = 5, \quad d_2 = 50, \quad d_1 = -15 \quad 20)$$

Supongamos que este sistema se encuentra controlado mediante el regulador PID continuo:

$$R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{Ti s} + \frac{Td s}{1 + \beta Td s} \right) \quad 21)$$

con parámetros:

$$Kp = 10, \quad Ti = 100, \quad Td = 0.8, \quad \beta = 0.01 \quad 22)$$

En la figura 2 se muestra la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado ante un escalón de amplitud 1, atenuado mediante un filtro de primer orden con constante de tiempo 1, aplicado a la referencia.

Muestreando la respuesta con un período $T=0.05$ segundos se genera una muestra de datos de longitud $N = 201$.

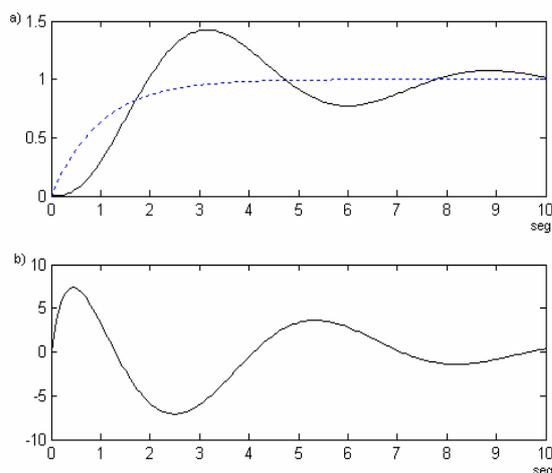


Figura 2. (a) Respuesta del sistema en lazo cerrado ante escalón filtrado de amplitud 1 aplicado a la referencia, (b) comportamiento del control.

La función transferencial del sistema en lazo cerrado tiene la siguiente estructura:

$$H(s) = \frac{p_2 s^2 + p_1 s + p_0}{q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s + q_0} \quad (23)$$

Los parámetros de $H(s)$ pueden ser fácilmente calculados a partir de $G(s)$ y $R(s)$ si estas son conocidas. Para aplicar el método de identificación basado en un AG, se define en primer lugar una población con la composición:

$$P_G^j = (c0^j \quad d2^j \quad d1^j) \quad (24)$$

$j = 1, \Lambda, Nind$

También debe determinarse el espacio de búsqueda inicial, que puede ser arbitrariamente grande. Por ejemplo:

$$\begin{aligned} P_G \text{ max} &= [100 \quad 100 \quad 100] \\ P_G \text{ min} &= [0 \quad -100 \quad -100] \end{aligned} \quad (25)$$

Los parámetros del AG, cuya selección no es crítica, fueron fijados para el presente ejemplo, con los valores:

$$\begin{aligned} Nind &= 400, \quad Nogen = 5, \quad Nrepet = 5 \\ pc &= 0.9, \quad pm = 0.4, \quad \alpha = 0.5 \end{aligned} \quad (26)$$

donde $Nind$ es el número de individuos, $Nogen$ el número de generaciones y $Nrepet$ el número de repeticiones del AG.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos. Como puede apreciarse, las estimaciones son muy próximas a los valores reales de los parámetros. La respuesta transitoria del sistema identificado en lazo cerrado con el regulador PID, que se omite en aras de la brevedad, es prácticamente idéntica a la mostrada en la figura 2.

Tabla 1: Comparación de los valores reales de los parámetros con los identificados

	c0	d2	d1
--	-----------	-----------	-----------

Real	5	50	-15
Identificado	5.11	50.68	-14.59

El método de identificación propuesto en este ejemplo es prácticamente insensible a la presencia de ruido en las mediciones. En efecto, para un nivel de ruido gaussiano con varianza 0.04, se obtuvieron las siguientes estimaciones de los parámetros:

$$c0 = 5.09, \quad d2 = 50.87, \quad d1 = -15.6112 \quad (27)$$

Estos resultados son sólo ligeramente peores que los obtenidos sin ruido. En la figura 3, se superponen la respuesta real con ruido y la obtenida con el modelo identificado.

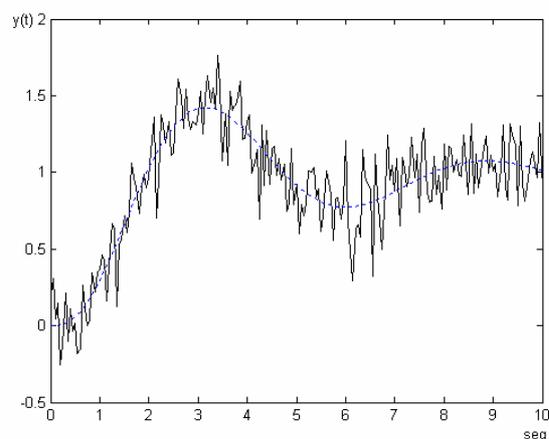


Figura 3. Respuestas en lazo cerrado del sistema real con ruido y del sistema identificado.

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN SISTEMAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Las metodologías de identificación de unidades de generación eléctrica reportadas en la literatura se basan generalmente en experimentos realizados en lazo abierto¹² y utilizan alguna modificación del método de mínimos cuadrados¹³. Estos enfoques dan como resultados versiones discretas de los modelos^{12, 14}.

En esta sección se ilustrarán las posibilidades que ofrece la metodología basada en un AG, para obtener soluciones aceptables para este problema. Se usará el modelo tipo AC5A, adoptado como estándar por la IEEE¹⁵ como base para el presente estudio y que se ofrece aquí, en una representación tipo Simulink, en la figura 4.

Puesto que este modelo presenta una no linealidad del tipo saturación, se usará una señal PRBS de pequeña amplitud como señal de perturbación, a fin de garantizar que el sistema permanezca en la zona lineal. El objetivo es identificar los parámetros:

Ka, Ta – Parámetros del amplificador.

Ke, Te – Parámetros del excitador.

K_g, T_g – Parámetros del generador.

Los parámetros del PID (K_p, K_i, K_d y T_d) se suponen conocidos así como los parámetros de la red de adelanto (K_f, T_f1, T_f2 y T_f3) que regula la salida del amplificador.

En primer lugar definimos una población para el AG, cuya composición es la siguiente:

$$P_s^j = (K_a^j \ T_a^j \ K_e^j \ T_e^j \ K_g^j \ T_g^j) \quad j = 1 \wedge N_{ind} \quad 30)$$

La respuesta del sistema a una PRBS de amplitud $[-1, 1]$ que se muestra en la figura 5, confirma que las excursiones de la salida son muy pequeñas, lo que significa que el sistema se encuentra operando en la zona lineal.

La Tabla 2 resume los resultados de la identificación usando un AG con los siguientes parámetros:

$$N_{ind}=400, \ N_{ogen}=5, \ N_{repet}=5, \quad pc=0.9, \ pm=0.4, \ \alpha = 0.5 \quad 31)$$

Claramente, existen considerables diferencias entre algunos parámetros reales y los identificados, en particular para las ganancias K_a y K_e . No obstante, resulta evidente de las figuras 6 y 7, que las respuestas a escalones de diferente amplitud son muy próximas, independientemente del hecho de que la segunda respuesta fue obtenida en condiciones de saturación activa.

Tabla 2: Parámetros reales e identificados

	Ka	Ta	Ke	Te	Kg	Tg
Real	1	0.2	1	0.58	1	5
Ident.	1.25	0.28	0.72	0.61	1.07	5.3

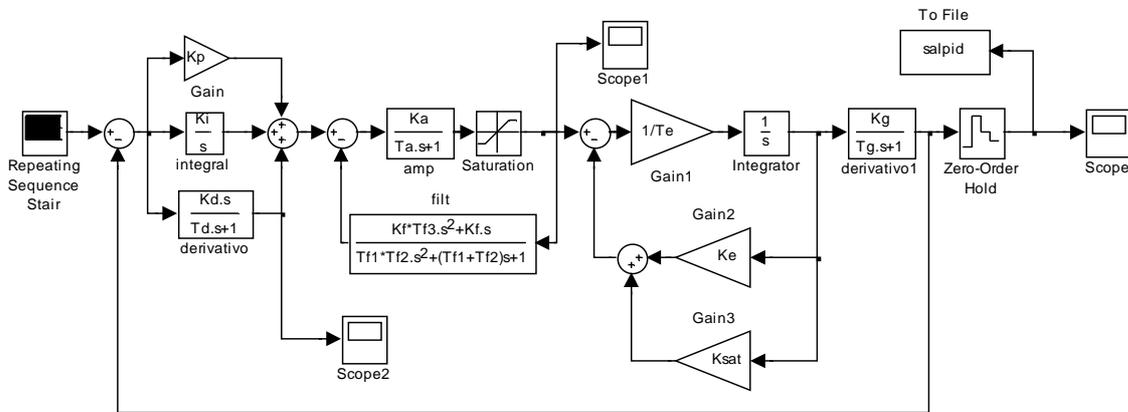


Figura 4. Representación mediante Simulink del modelo AC5A de unidades de excitación-generación eléctrica controlado mediante un PID.

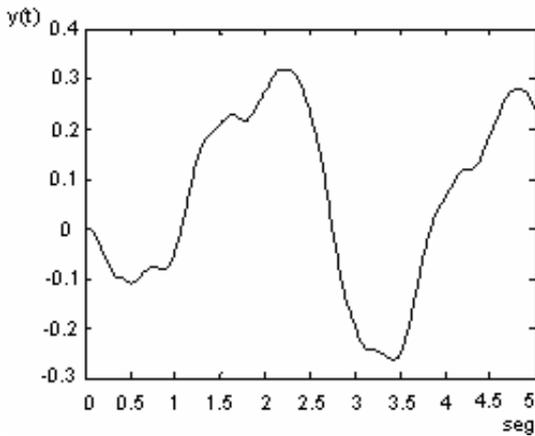


Figura 5. Respuesta del sistema a una PRBS.

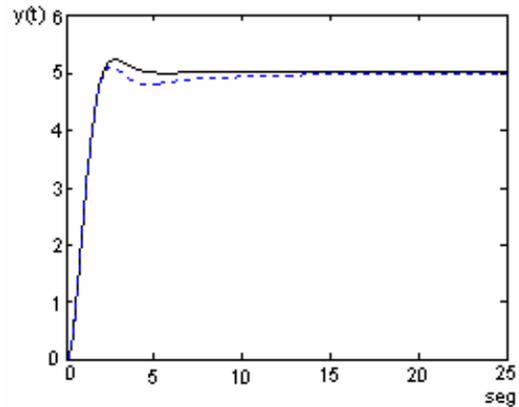


Figura 6. Respuestas a un escalón de amplitud 5 del sistema real (línea continua) y el identificado sin saturación (línea de puntos).

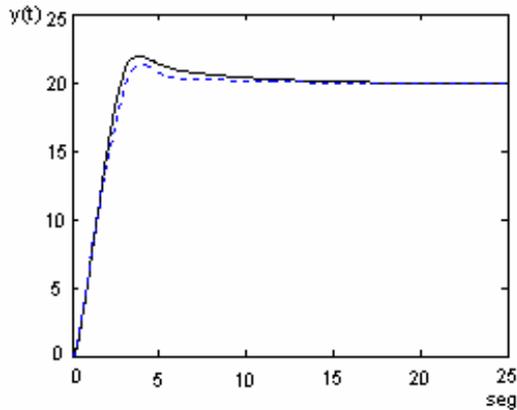


Figura 7. Respuestas a un escalón de amplitud 20 del sistema real (línea continua) y el identificado con saturación (línea de puntos).

AJUSTE DE PARÁMETROS DE UN REGULADOR PID MEDIANTE UN MODELO DE ORDEN REDUCIDO

En esta sección se mostrará como los problemas de ajuste de parámetros en lazo cerrado de reguladores PID continuo y discreto, pueden formularse como problemas de optimización no lineal que se resuelven utilizando una metodología basada en un AG, muy próxima a la explicada en la sección anterior.

Desde hace mucho tiempo se conoce un conjunto de métodos de ajuste de reguladores PID, que han sido aplicados más o menos exitosamente tanto en el caso continuo como en el discreto. Entre ellos podemos mencionar el venerable método de Ziegler y Nichols, el de Cohen y Cohn y el de Smith y Murriel¹⁶. Más recientemente ha cobrado popularidad el debido a¹⁷.

Todos los métodos mencionados, no obstante, requieren la desconexión del lazo de control y la realización de experimentos más o menos traumáticos. En algunos casos, en particular si el sistema es inestable en lazo abierto o si se encuentra en la frontera de estabilidad, tales experimentos no son posibles o resultan peligrosos.

Utilizando la metodología propuesta de identificación basada en un AG, es posible identificar un modelo de segundo orden más retardo, incluso en condiciones de lazo cerrado. Este modelo generalmente ofrece una aproximación suficientemente buena de sistemas de alto orden con o sin retardo y sirve de base para el ajuste de los parámetros de reguladores PID. Este enfoque tiene al menos dos ventajas con respecto a los métodos tradicionales:

- La mayoría de los métodos conocidos utilizan un modelo aun más simple, de primer orden más retardo., como aproximación del sistema controlado.
- El experimento de identificación requerido puede realizarse sin desconectar el lazo de control.

A continuación se propone una solución sistemática al problema de sintonización de reguladores PID, usando el método basado en un AG y comenzando con el caso continuo.

Es necesario inicialmente obtener los siguientes datos:

- La respuesta al escalón de la salida del lazo, obtenida mediante la aplicación de un cambio en escalón de la referencia, eventualmente suavizado mediante algún filtro simple, por ejemplo de primer orden, cuya amplitud sea tan pequeña como sea posible, teniendo en cuenta el nivel de ruido en las mediciones.
- El signo de la ganancia del proceso.

Consideremos de nuevo la función transferencial continua de un regulador PID, que repetimos a continuación:

$$R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{Ti s} + \frac{Td s}{1 + \beta Td s} \right) \quad (32)$$

donde $\beta \ll 1$.

La función transferencial (32) puede también ser expresada en la siguiente forma más compacta:

$$R(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (33)$$

donde

$$B(s) = b_2 s^2 + b_1 s + 1 \quad (34)$$

$$A(s) = a_2 s^2 + a_1 s \quad (35)$$

y

$$\begin{aligned} b_2 &= Ti Td (1 + \beta), \quad b_1 = (Ti + \beta Td) \\ a_2 &= \beta Ti Td, \quad a_1 = Ti \end{aligned} \quad (36)$$

Consideremos ahora el siguiente modelo de segundo orden más retardo:

$$G(s) = \frac{K m e^{-rs}}{c_2 s^2 + c_1 s + 1} = \frac{K m e^{-rs}}{C(s)} \quad (37)$$

Como es bien conocido, la función exponencial que representa el retardo, puede ser adecuadamente aproximada mediante una de las llamadas funciones de Padé⁶ que son cocientes de polinomios en s , cuyo grado determina la calidad de la aproximación. Las pruebas experimentales que hemos realizado hasta el momento nos permiten determinar que, para el propósito que se persigue, la función de Padé de tercer grado ofrece una aproximación suficiente. Denotemos entonces como $Pade(s,r)$ a una función de Padé de tercer grado, cuya función transferencial es (38):

$$Pade(s,r) = \frac{d_3(r)s^3 + d_2(r)s^2 + d_1(r)s + d_0(r)}{f_3(r)s^3 + f_2(r)s^2 + f_1(r)s + f_0(r)} = \frac{D(s)}{F(s)}$$

La función transferencial (37) puede entonces expresarse aproximadamente como:

$$G(s) \approx \frac{KmD(s)}{C(s)F(s)} \quad 39)$$

La función transferencial de lazo cerrado de $G(s)$ con el regulador PID será entonces:

$$H(s) = \frac{KmB(s)D(s)}{A(s)C(s)F(s) + KmB(s)D(s)} \quad 40)$$

La respuesta transitoria a una función escalón $u(t)$ de amplitud U aplicada en la referencia del lazo de control, puede expresarse mediante:

$$y_m(t) = L^{-1}\left(\frac{H(s)}{s}U\right) \quad 41)$$

y puede generalmente medirse mediante un experimento simple que genera la muestra de datos $y_m(kT)$ para $k = 1, \dots, N$, que sirve como la información de entrada para la identificación del modelo de segundo orden más retardo $G(s)$.

Debemos ahora definir una población de parámetros de tamaño $Nind$ para el modelo $G(s)$, que es en este caso:

$$x^j = [K_m^j, c_2^j, c_1^j, r^j] \quad 42)$$

$$j = 1 \Lambda Nind$$

sometida a las restricciones:

$$x_{max} \geq x^j \geq x_{min} \quad 43)$$

Para cada individuo x^j de la población, corresponde una función transferencial del modelo:

$$G(s)^j = \frac{Km^j D(s)^j}{C(s)^j F(s)^j} \quad 44)$$

así como una función transferencial en lazo cerrado:

$$H(s)^j = \frac{Km^j B(s)^j D(s)^j}{A(s)^j C(s)^j F(s)^j + Km^j B(s)^j D(s)^j} \quad 45)$$

y una respuesta al escalón:

$$y^j = L^{-1}\left(\frac{H(s)^j}{s}U\right) \quad 46)$$

Formulamos de nuevo el problema de minimización no lineal:

$$J_{min} = \min_j J^j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} (y_m(kT) - y^j(kT))^2 \quad 47)$$

$$j = 1 \Lambda Nind$$

sujeto a las restricciones definidas en la ecuación (43), que puede ser ventajosamente resuelto mediante un AG. Si tenemos que:

$$J_{min} = J^i \quad 48)$$

entonces:

$$H^j_{opt} = H^i \quad 49)$$

$$x^j_{opt} = x^i = [K_{mopt} \ c_{2opt} \ c_{1opt} \ r_{opt}]$$

que es el resultado del problema de identificación.

A partir del modelo de segundo orden identificado es posible ahora formular el problema del ajuste óptimo de los parámetros del PID.

Consideremos una población de parámetros cuya composición es definida como:

$$x^j = [K_p^j, T_i^j, T_d^j, \beta^j] \quad 50)$$

$$j = 1 \Lambda Nind$$

Para cada individuo en (50) existe una función transferencial en lazo cerrado:

$$H(s)^j = \frac{Km_{opt} B(s)^j D(s)_{opt}}{A(s)^j C(s)_{opt} F(s)_{opt} + Km_{opt} B(s)^j D(s)_{opt}} \quad 51)$$

Podemos entonces plantear el siguiente problema de optimización (52):

$$J_{min} = \min_j J^j = \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^{k=N} (r(kT) - y(kT))^2 + w \max(y(kT)) \right)$$

con restricciones como las definidas en (43). El término $r(kT)$ es la referencia muestreada, que en este trabajo se selecciona como la salida de un modelo de referencia de primer orden, suficientemente suave para evitar excursiones intolerables en la variable de control. La constante de tiempo del modelo de referencia debe seleccionarse adecuadamente en dependencia de la dinámica del sistema a controlar. El coeficiente w sirve para penalizar cualquier sobre cresta que puede aparecer en la respuesta en lazo cerrado. Este problema de optimización puede resolverse, de nuevo, utilizando un AG en forma similar a la solución del problema de identificación. Es decir:

$$H^j_{opt} = H^i \quad 53)$$

$$x^j_{opt} = x^i = [K_{popt} \ T_{iopt} \ T_{dopt} \ \beta_{opt}]$$

A continuación se ilustrará el método propuesto mediante dos ejemplos: El primero consiste en ajustar los parámetros del PID que controla al sistema de segundo orden inestable presentado en la Sección 3 mientras que en el segundo se ajustarán los parámetros correspondientes a un sistema de 4to orden más retardo deficientemente controlado.

Ejemplo 1. Consideremos de nuevo el sistema de segundo orden inestable definido por:

$$G(s) = \frac{c_0}{d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad 54)$$

con parámetros:

$$c_0 = 5, \ d_2 = 50, \ d_1 = -15 \quad 55)$$

La respuesta de este sistema a un escalón unitario filtrado, controlado por el PID continuo con los parámetros definidos en la ecuación (22), es excesivamente oscilatoria como se muestra en la figura 2.

La identificación en lazo cerrado de este sistema resultó en los parámetros dados originalmente en la Tabla 1 y que se repiten a continuación:

$$\begin{aligned} c_{0_{opt}} &= 5.11, \quad d_{2_{opt}} = 50.68, \\ d_{1_{opt}} &= -14.59, \quad r_{opt} = 0 \end{aligned} \quad (56)$$

Las fronteras del espacio de búsqueda para los parámetros del PID se seleccionan, en forma bastante arbitraria, en la forma:

$$x_{\min} = [50 \ 50 \ 50 \ 1] \quad (57)$$

$$x_{\max} = [0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (58)$$

Los parámetros encontrados para el PID óptimos con respecto al criterio (52), para $w = 1000$, fueron:

$$\begin{aligned} Kp_{0_{opt}} &= 3.88, \quad Ti_{opt} = 81.6, \\ Td_{opt} &= 42.4, \quad \beta_{opt} = 0.009 \end{aligned} \quad (59)$$

La respuesta obtenida con los nuevos parámetros, se muestra en la figura 8.

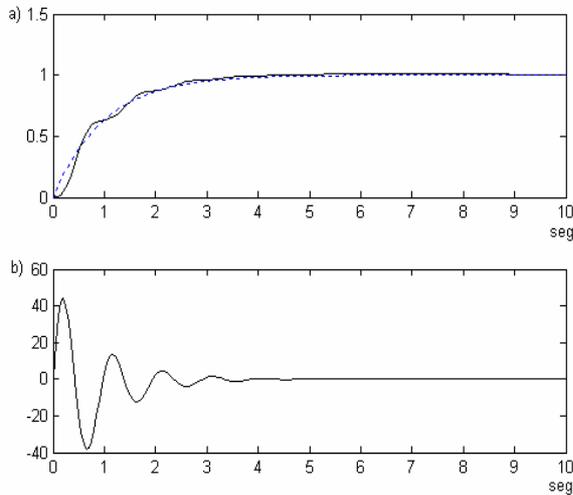


Figura 8. (a) Respuesta óptima en lazo cerrado con penalización de sobre-cresta y $w = 1000$, (b) variable de control.

Ejemplo 2. Consideremos a continuación el siguiente sistema de 4to orden más retardo:

$$P(s) = \frac{e^{-5s}}{(3s+1)(5s+1)(8s+1)(12s+1)} \quad (60)$$

controlado en forma ineficiente mediante un regulador PID continuo con parámetros:

$$Kp = 0.5, \quad Ti = 10, \quad Td = 0.1, \quad \beta = 0.1 \quad (61)$$

cuya respuesta a un escalón filtrado mediante un filtro de primer orden con constante de tiempo I , se muestra en la figura 9.

Para obtener un modelo de 2do orden más retardo aproximado de este sistema, utilizamos un AG, con los parámetros:

$$N_{ind}=500, \quad pc=0.9, \quad pm=0.4, \quad N_{gen}=5 \quad (62)$$

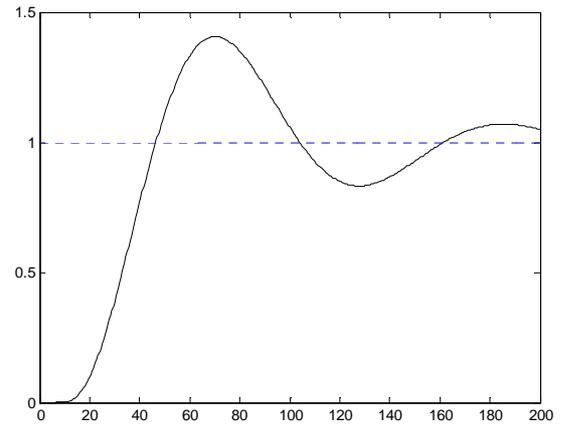


Figura 9. Respuesta en lazo cerrado de sistema de 4to orden más retardo

Definimos ahora una población de posibles soluciones con la composición dada en la ecuación (42). El espacio de búsqueda se restringe inicialmente mediante:

$$x_{max} = [30 \ 30 \ 30 \ 30] \quad (63)$$

$$x_{min} = [0 \ -30 \ -30 \ 0] \quad (64)$$

En la definición del espacio de búsqueda, solamente se utiliza el conocimiento del signo de la ganancia del proceso. (Km en el intervalo $0-30$). Los rangos para los parámetros restantes, se define arbitrariamente. El espacio de búsqueda puede restringirse en cada nueva repetición del AG, tal como se muestra en la ecuación (18), con α en este caso igual a 0.5 .

Los resultados obtenidos en la etapa de identificación del modelo de 2do orden, son los siguientes:

$$Km = 0.93, \quad c2 = 19.86, \quad c1 = 20.1, \quad r = 12.71 \quad (65)$$

En la figura 10 se superponen las respuestas en lazo abierto del sistema original y del modelo de 2do orden aproximado. A partir del modelo aproximado, la sintonización del regulador PID se resuelve usando un AG con los parámetros definidos en (62) y haciendo 5 repeticiones. El espacio de búsqueda para este problema, que refleja la incertidumbre inicial sobre la solución óptima, se define de la manera siguiente:

$$x_{max} = [100 \ 100 \ 100 \ 1] \quad (66)$$

$$x_{min} = [0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (67)$$

Se utiliza como señal de prueba en la referencia, un escalón unitario suavizado mediante un filtro de primer orden con constante de tiempo I , a fin de atenuar en lo posible, las oscilaciones iniciales de la variable de control. Los parámetros del PID, obtenidos mediante la minimización del criterio (52), con el coeficiente de peso $w = 5$, son los siguientes:

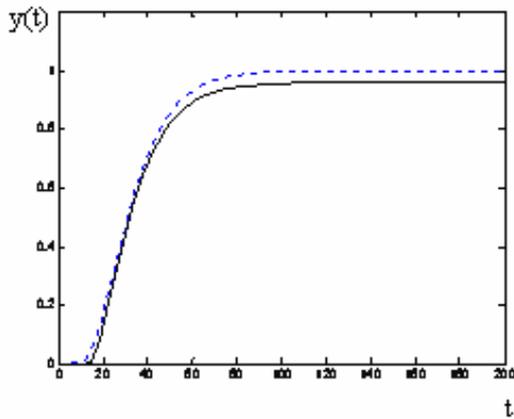


Figura 10. Respuestas en lazo abierto del modelo de 2do orden (línea continua) y del sistema original de 4to orden.

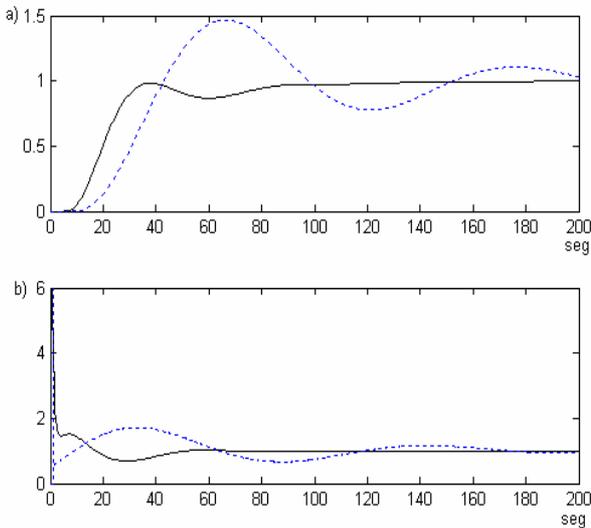


Figura 11. Respuestas del sistema antes (línea de puntos) y después (línea continua) del ajuste de los parámetros. (a) Salidas, (b) variables de control

$$K_p = 1.33, T_i = 10.24, T_d = 6.36, \beta = 0.053 \quad (68)$$

Estos parámetros difieren considerablemente de los originales definidos en (61). En la figura 11 se muestran superpuestas las respuestas en lazo cerrado, antes y después de que los parámetros han sido sintonizados.

AJUSTE DE PARÁMETROS DE REGULADORES PID DISCRETOS

Vamos a considerar ahora el ajuste de parámetros de reguladores PID discretos que controlan a sistemas continuos. Este es un problema de mucho interés práctico, teniendo en cuenta que la mayoría de los reguladores actuales se basan en la tecnología digital. El regulador PID discreto, en su forma de posición, puede definirse en la forma siguiente:

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{T_c}{T_i} \sum_{i=1}^t e(i) + \frac{T_d}{T_c} (e(t) - e(t-1))) \quad (68)$$

donde T_c es el período de muestreo.

Es posible entonces escribir la siguiente función transferencial en transformada Z equivalente:

$$R(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{r_2 z^2 + r_1 z + r_0}{z-1} \quad (69)$$

donde

$$\begin{aligned} r_2 &= K_p (1 + T_c/T_i + T_d/T_c) \\ r_1 &= K_p (1 + 2 * T_d/T_c) \\ r_0 &= K_p T_d / T_c \end{aligned} \quad (70)$$

Consideremos también el siguiente modelo de segundo orden más retardo expresado en forma de una función transferencial discreta, que será utilizada para representar al proceso controlado:

$$G(z) = K_m G_1(z) \quad (71)$$

donde G_1 es una función transferencial normalizada, de manera que:

$$G_1(z) = \frac{g_1 z + g_0}{z^r (z^2 + q_1 z + q_0)}, \quad G_1(1) = 1 \quad (72)$$

Los coeficientes de G_1 están entonces ligados por la relación:

$$q_1 = g_0 + g_1 - q_0 - 1 \quad (73)$$

La función transferencial en lazo cerrado del modelo aproximado de segundo orden con el regulador PID discreto, está dada por:

$$\frac{y(z)}{r(z)} = H(z) = \frac{R(z)G(z)}{1 + R(z)G(z)} \quad (74)$$

donde y representa a la salida y r a la referencia.

La función transferencial en lazo cerrado $H(z)$ es un cociente de polinomios en z donde el numerador es de grado 3 y el denominador de grado $r+3$, donde r es el número de períodos de retardo.

Formulamos ahora el problema de estimar los parámetros K_m , r , g_0 , g_1 y q_0 del modelo discreto definido en (71), usando el procedimiento basado en un AG y el criterio definido en (13).

En este último, $y_m(kT)$, $y(kT)^j$ de nuevo representan las respuestas en lazo cerrado a un escalón aplicado en la referencia, del sistema y del individuo j de la población de parámetros.

Un individuo de la población de tamaño N_{ind} tiene ahora la composición:

$$x^j = [g_0^j \quad g_1^j \quad q_0^j \quad K_m^j \quad r^j] \quad (75)$$

donde r^j debe ser un número entero. Como en el caso continuo, una vez que la solución óptima del problema de identificación es obtenida, es posible acometer la búsqueda de los parámetros óptimos de un regulador discreto PID, usando un AG. La composición de los individuos para este Segundo problema se define ahora como:

$$x^j = [K_p^j \ T_i^j \ T_d^j] \quad (76)$$

y el criterio a ser minimizado es el mismo que en (52). Para ilustrar los resultados que pueden obtenerse en el caso de un regulador discreto, usamos ahora como ejemplo, el mismo sistema de cuarto orden más retardo definido mediante la ecuación (60). Supongamos que ese sistema es controlado mediante un regulador PID discreto con parámetros:

$$K_p = 0.008, T_i = 1000, T_d = 1, T_c = 1 \quad (77)$$

La respuesta al escalón de este sistema en lazo cerrado es claramente oscilatoria, como se observa en la figura 12. La aplicación del método de ajuste de reguladores PID discretos usando un AG, con los parámetros dados en (62) y $w = 0.75$ genera el resultado también mostrado en la figura 12. Los parámetros sintonizados del PID son:

$$K_p = 0.0076, T_i = 1601.3, T_d = 0.052, T_c = 1 \quad (78)$$

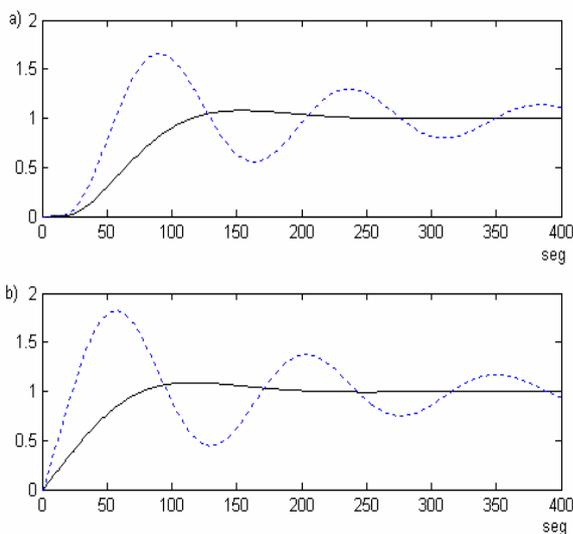


Figura 12. Respuestas en lazo cerrado de un sistema continuo de 4to. orden antes y después de sintonizado el PID discreto. (a) Salidas, (b) variables de control.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha formulado una metodología para la identificación de sistemas continuos en condiciones de lazo

cerrado basada en el uso de un algoritmo genético. La metodología fue probada, en condiciones de simulación, en la identificación de un sistema continuo inestable en lazo abierto, en la obtención de un modelo reducido de segundo orden a partir de otro de orden superior, así como en la identificación de algunos parámetros del modelo AC5A de la IEEE, para unidades de generación eléctrica, el cual presenta una no linealidad del tipo saturación. En todos los ejemplos mencionados, se obtuvieron resultados satisfactorios.

Se ha comprobado, además, que con una ligera extensión de la metodología propuesta, es posible resolver ventajosamente los problemas de sintonización de reguladores PID continuos y discretos, un tema de indudable interés práctico.

La metodología propuesta, no obstante, es susceptible de ser mejorada y ampliada, lo que requerirá, sin dudas, un amplio estudio experimental, incluyendo su utilización en condiciones reales.

REFERENCIAS

1. **FORSSELL U. Y LJUNG L.** (1999): Closed-loop identification revisited *Automatica* 35(7) pp. 1215-1241.
2. **LJUNG L. Y FORSELL U.** (1999): An alternative motivation for the indirect approach to closed loop identification, *IEEE Trans-action of Automatic Control*, AC-44(11) pp. 2206-2209.
3. **VAN DEN HOF P.M.J.** (1998): Closed-loop issues in system identification, *Annual Reviews in Control*, Vol. 22 pp. 173-186.
4. **MOHAMED VALL O.M. Y RADHI M.** (2005): Using Genetic Algorithms in Closed Loop Identification of the Systems with Variable Structure Controller, *Proceedings of Word Academy of Sciences, Engineering and Technology*, vol 7, pp 1307-1311.
5. **WHORTON, M.S.** (2004): Closed Loop System Identification with Genetic Algorithms, *Preprints of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, pp 16-19, Providence Rhode Island.
6. **BUTCHER J.C.** (2002): The A-stability of methods with Padé and generalized Padé stability functions, *Numerical Algorithms*, 31(4), pp. 47-58.
7. **BACK T.** (1996): *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford University Press, New York.
8. **GOLDBERG E.** (1989): *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley.
9. **MICHALEWICZ Z.** (1996): *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Program*, Springer series Artificial Intelligence, 3rd edition, Springer.
10. **BAKER E.** (1987): Reducing bias and inefficiency in the selection algorithms, *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, Grefenstette, Vol. 1, pp. 14-21.
11. **MUHLENBEIN H. Y SCHLIERKAMP V. D.** (1993): Predictive models for the breeder genetic algorithm in continuous parameter optimization, *Evolutionary Computation*, The MIT Press 1(1), pp. 25.
12. **KUNDUR P.** (1994): *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc.

13. **BOTERO H.A., RAMÍREZ J.M.** (2005): A methodology for excitation systems identification, Proceedings International Conference on Industrial Electronics and Control Applications, ICIECA 2005.
14. **YUAN Y.H. Y CHUAN-SHENG, S.L** (1996): Experience with identification and tuning of excitation system parameters at the second nuclear plant of Taiwan Power Company, IEEE Transaction on Power Systems, 11(2) pp. 747-753.
15. **IEEE** (1992): Recommended practice for excitation system models for power systems stability studies, IEEE Power Engineering Society, IEEE std 421.5.
16. **SMITH C.L.** (1972): Digital Computer Process Control, Intext Educational Publishers, San Francisco.
17. **ASTROM K.J. Y HAGGLUND T.** (1984): Automatic tuning of simple regulators, Preprints 9th IFAC World Congress, pp. 267-272, Budapest, Hungary.

AUTORES

Alberto Aguado Behar: Ingeniero en Control Automático, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular del Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF), Profesor Titular del ISPJAE, email: aguado@icmf.inf.cu, tlf.: 832-0319. Investiga en temas de identificación y control avanzado de sistemas en el Dpto. de Control Automático del ICIMAF. Imparte docencia en la maestría de automática del ISPJAE

Abelardo del Pozo Quintero: Ingeniero en Control Automático, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular del Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF), Profesor Titular del ISPJAE, email: pozo@icmf.inf.cu, tlf.: 832-0319. Investiga en temas de robótica y control avanzado de sistemas en el Dpto. de Control Automático del ICIMAF. Imparte docencia en la maestría de automática del ISPJAE.

Alfredo Gómez Infante: Ingeniero en Control Automático, Investigador Auxiliar del Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF), Profesor Auxiliar del ISPJAE, email: alfredo@icmf.inf.cu, tlf.: 832-0319. Investiga en temas de identificación y control avanzado de sistemas en el Dpto. de Control Automático del ICIMAF.

En esta última sección se incluirá una breve reseña del autor o autores que debe incluir:

Nombre y Apellidos, título Universitario, Grado científico, categoría docente y/o de investigador, centro de trabajo, dirección postal, número de teléfono y FAX, correo electrónico y una nota breve sobre su labor actual.