

SINTONIZACION DE CONTROLADORES PID POR GRADIENTE ESTOCÁSTICO DESCENDENTE

Ruiz Varela Oscar Ramsés, González Rojo Sergio A., Gómez Parra Ana Luisa
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Ave. Tecnológico #2909, Chihuahua, Chih. México. C.P. 31310
+52 (614) 2-01-2000
Servicios Educativos del Estado de Chihuahua
Antonio de Montes #4700, Chih, Chih Mexico C.P. 31200
(614) 2-91-335
orruiz@itch.edu.mx, grojo@itch.edu.mx, ana.gomez@seech.edu.mx

RESUMEN.

Se presenta una estrategia de sintonización de PID usando los principios del Método Montecarlo, donde la búsqueda de valores óptimos se obtiene de manera aleatoria, a base de numerosos intentos. Se sugiere utilizar el método de Gradiente Estocástico Descendente (SDG en inglés) debido a que la implementación de métodos alternativos requieren un análisis de la planta a controlar, lo cual implica un modelado que conlleva imprecisiones. Luego se implementa un desarrollo matemático que implica condiciones como la presencia de retardo en la respuesta al escalón (Ziegler Nichols lazo abierto y otros), o un orden elevado de la planta (Ziegler Nichols lazo cerrado). El SDG utiliza los parámetros de sintonización K, Td, Ti, Tf como las entradas, y los valores de Margen de Ganancia, Margen de fase, como valores objetivo. El SDG se basa en valores aleatorios que se aplican como entrada, se evalúa el resultado, se mide la variación o disminución del error, y se calcula por el gradiente si el valor dirige los resultados en la dirección correcta. Luego se ajustan los valores iniciales con un algoritmo que determina el tamaño de la modificación. Se muestran los resultados del algoritmo.

Palabras Clave: PID, sintonización de parámetros, SDG.

ABSTRACT.

It is presented a tuning strategy for PID using Montecarlo's method basic idea, where the searching of optimum values is resolved through random search, evaluating numerous attempts. Its suggested to use Stochastic Descendent Gradient (SDG), due to alternative methods requires a previous analysis of subject plant to control, what implies to a modeling process that can leave to imprecisions. Next, it requires a mathematical analysis that defines such conditions as system delays in step response (open loop Ziegler Nichols and others), or a higher order plant (closed loop Ziegler Nichols). SDG uses tuning parameters K, Td, Ti, Tf as inputs, and gain margin, phase margin, overshoot as objective values. SDG bases on applying random values as inputs, error output is calculated, and it uses gradient function to know if new value its in right direction. After that, intial values are updated through an algorithm that calculates size of value changes. Algorithm results are shown.

Keywords: PID, parameters tuning, SDG.

1. INTRODUCCION.

Basado en un estudio de más de once mil controladores en la industria de refinación, química, pulpa y papel, el 97% de los controladores son PID[1].

En el CERN, Consejo europeo para la investigación nuclear, el sistema criogénico LHC (Large Halon Collider) emplea alrededor de 5000 controladores PID distribuidos a lo largo de los 27 kilómetros del acelerador. La sintonización manual de este conjunto de controladores se vuelve una tarea impráctica, recurriendo a un sistema de sintonización automática [3].

Los dos ejemplos anteriores indican la importancia de los controladores PID actualmente, en todas las áreas, desde la aplicación común como la industria química, y en soluciones científicas como el acelerador de partículas del CERN.

Si bien el uso de controladores PI, PD o PID son una solución muy conocida y aplicada, que proporciona desempeños aceptables o muy buenos, existen aspectos de su operación que siguen mejorando, como lo implican las 46 variantes de configuraciones PID, y 408 métodos de sintonización [4].

Los objetivos de diseño para los controladores PID son;

- Seguimiento del valor de referencia por la salida del sistema
- Rechazo de perturbaciones y ruido en la variable controlada [4].

El seguimiento del valor de referencia se logra por la combinación en las acciones de los componentes del controlador PID: la parte proporcional modifica de forma imprecisa la acción de control para aproximar a cero la diferencia entre la salida deseada y la obtenida. La parte integral ralentiza el sistema pero permite eliminar por completo el error en estado estable. La parte diferencial aumenta la velocidad de respuesta.

El rechazo de las perturbaciones se logra permitiendo un margen de variación en la operación del sistema, sin alterar permanentemente el resultado de error cero.

La solución de las siguientes ecuaciones determinan los valores para la selección de parámetros del controlador [2]

$$\text{ángulo } G(j\omega_g) + \text{ángulo } K(j\omega_g) = \varphi_d - \pi \quad (1)$$

$$|G(j\omega_g) K(j\omega_g)| = 1 \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) son básicamente el criterio de estabilidad de Bode.

Siendo ω_g la frecuencia de cruce (magnitud=1), Φ_d el margen de fase.

Generalmente un margen de fase aceptable, 45° , indica un buen valor de rechazo a las perturbaciones. Lo que se ve reflejado como un sobre impulso pequeño.

2. DISEÑO DE CONTROL PARA UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN

Para un motor de corriente directa con aspas, con una constante de fuerza contra electromotriz c_e de 85×10^{-3} Volt Seg/rad, una resistencia interna R de 0.55 Ohms, inductancia interna L de 25×10^{-3} Henrios, momento de inercia del rotor J de 0.06 kg m^2 , el momento de inercia de las aspas J es de 0.03 kg m^2 , y la resistencia viscosa debido a la resistencia del aire y la fricción de baleros b es de 0.05 Newton metro seg/rad, la función de transferencia del motor es la ecuación (3)

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{c_e}{(J*L)s^2 + (J*R + L*b)s + (R*b + c_e^2)} \quad (3)$$

sustituyendo valores obtenemos la ecuación (4)

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0.085}{0.00225 s^2 + (0.05075)s + (0.034725)} \quad (4)$$

Para un controlador PID en forma serial con filtro, usamos la ecuación (5),

$$\begin{aligned} G_{pid} &= k \left(1 + \frac{1}{T_i*s} \right) \left(1 + \frac{T_d*s}{T_f*s+1} \right) \\ &= k \left(\frac{T_i*s+1}{T_i*s} \right) \left(\frac{T_f*s+1+T_d*s}{T_f*s+1} \right) \\ &= k \left(\frac{T_i*s+1}{T_i*s} \right) \left(\frac{(T_f+T_d)*s+1}{T_f*s+1} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Con un margen de fase de 60° y a una frecuencia de cruce de 1 rad/seg.

Dado que no posee retardo en lazo abierto, no es elegible para sintonizar por Ziegler-Nichols (ni Lopez, ni Rovira, ni λ , ni Rivera Morari) en lazo abierto. Ver figura 1 [6].

Se prueba intentando aplicar el método de Ziegler-Nichols en lazo cerrado, que requiere que la planta sea de orden superior. Se considera la función de transferencia de lazo cerrado, mostrada en la ecuación 6, con controlador proporcional, retroalimentación unitaria,

$$\frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{0.085 K_p}{0.00225 s^2 + (0.05075)s + (0.119725)} \quad (6)$$

Se aumenta la ganancia tratando de obtener la oscilación, pero dado que el sistema es de orden dos, y no posee retardo, no se consigue oscilación. Ver figura 2.

Fig 1. Resp escalon L Abierto

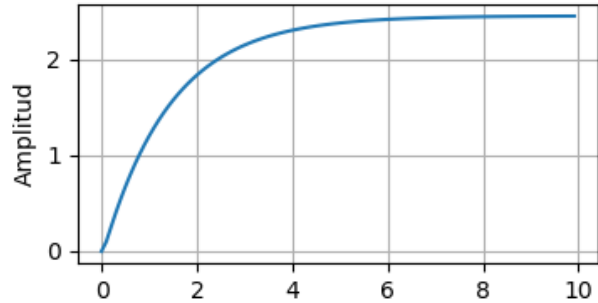
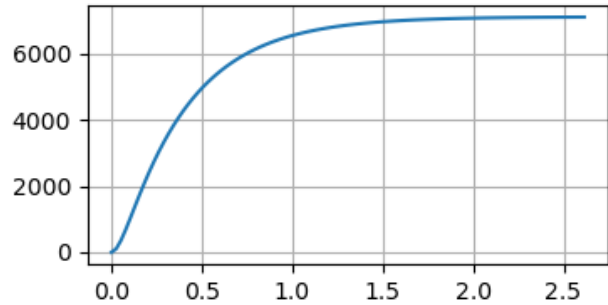


Fig 2. Resp L Cerrado $k_p=1000$



Por lo que básicamente se realizará de manera experimental, pero con el método del gradiente estocástico descendiente (SGD).

SGD es una técnica utilizada en el entrenamiento de redes neuronales y máquinas de soporte vectorial. Aunque el método lleva un componente de aleatoriedad para la selección de nuevos valores, posee varios recursos que le dan sentido al entrenamiento, tales como función costo, paso de aprendizaje, y evalúa la dirección del avance para tratar de determinar si se avanza en la dirección correcta. Como cualquier SGD, el algoritmo debería evitar que se caiga en mínimos locales, a menos que no se realicen suficientes intentos [7].

Se parte de la función de transferencia, considerando valores de inicialización para las constantes: $K_p=1$, $T_i=0.1$, $T_d=0.4$, $T_f=0.1$.

La función de transferencia para el controlador PID con filtro, considerando las constantes anteriores queda como indica la ecuación 7:

$$G_{pid} = \frac{10(0.5s+1)}{s} \quad (7)$$

La función de transferencia de lazo abierto del motor con el controlador PID se expresa en la ecuación 8:

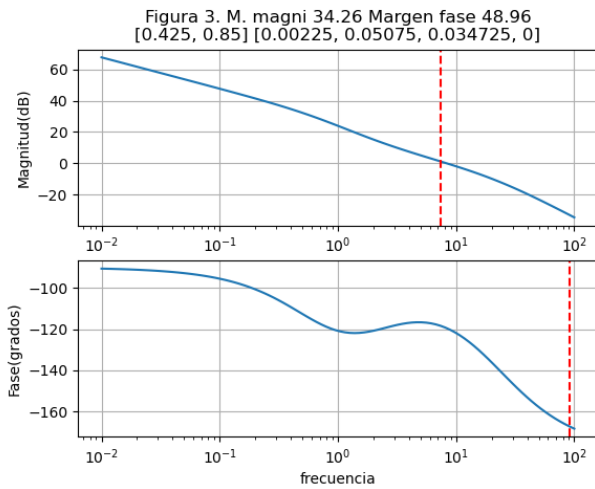
$$G(s) = \frac{0.425s+0.85}{0.00225s^3+0.05075s^2+0.034725s} \quad (8)$$

La función de transferencia de lazo cerrado con retroalimentación unitaria, con el control PID y los valores iniciales se obtienen calculando a partir de la ecuación 8, quedando la ecuación 9:

$$\frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{(0.17s+0.85)}{(2.25e-3s^3+0.05075s^2+0.2047s+0.85)} \quad (9)$$

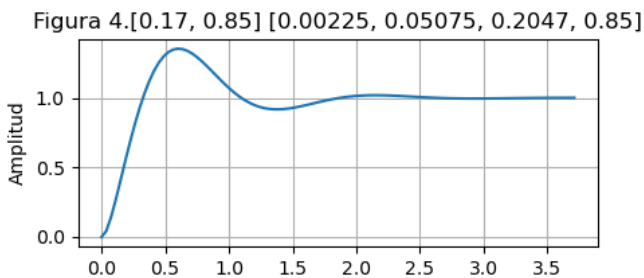
La ecuación 8 posee los siguientes polos reales $z_1=-21.84$, $z_2=-0.7063$, $z_3=0$. Tiene un polo en el origen y el resto en el lado izquierdo del plano complejo. Por lo tanto es de fase mínima y se puede analizar con el criterio de estabilidad de Bode [8].

El margen de magnitud y margen de fase para el sistema de la ecuación 8 (lazo abierto) según el criterio de estabilidad de Bode se muestra en la figura 3:



En la figura 3 se observa un margen de fase amplio. Es un sistema de fase mínima de segundo orden (planta únicamente) y de tercer orden con el controlador PID con filtro pasa bajas, con polos reales. Se observa una respuesta sub amortiguada en la figura 4.

La respuesta al escalón para el sistema en lazo cerrado de la ecuación 9 se muestra en la figura 4:



El sobretiro indicado en la figura 4 es de 40%. Se logra un error de estado estable de cero, como es de esperar en un PID, con un tiempo de establecimiento de 2 segundos.

3. GRADIENTE ESTOCASTICO DESCENDENTE.

La ecuación 10 que describe la operación del SDG, contiene los parámetros η : tasa de aprendizaje, y : función costo, Φ :

salida real ante la entrada, x : entrada aleatoria, $\Delta\omega$: variación del peso con esa muestra. [7]

$$\Delta\omega = \eta(y(i) - \Phi(i))x(i) \quad (10)$$

$$\omega_{t+1} = \omega_t + \Delta\omega \quad (11)$$

Se aprecia la semejanza del método de Gradiente descendente con el método numérico de Newton Raphson para encontrar raíces de ecuaciones, con la salvedad que SDG aplica en ecuaciones típicamente multidimensionales, lo que implica la operación de gradiente en lugar de derivada. Ambas empiezan con un valor aleatorio, y van modificando ese valor de acuerdo al producto de la variación de la función costo por el valor de x en la entrada. Ecuación 11.

Típicamente SDG es un método iterativo, como la mayoría de las técnicas de inteligencia artificial, para lo cual se requiere realizar la operación de cálculo de manera automatizada.

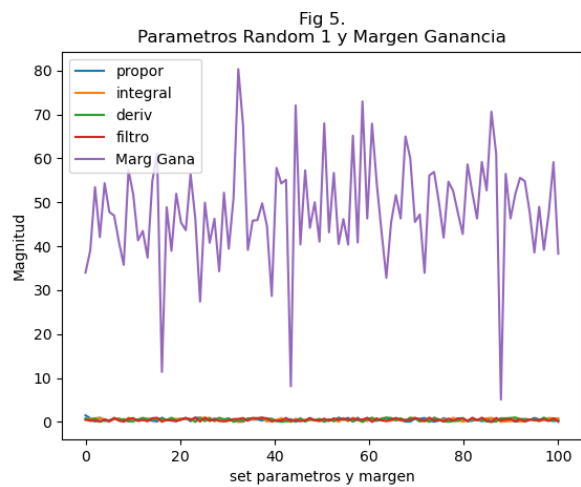
4. IMPLEMENTACION.

Se implementó una aplicación en Python de 300 líneas para producir cálculos del Margen de Ganancia (MG) y Margen de Fase (MF) de manera iterativa. Se variaron los parámetros K , T_i , T_d , T_f y se calcularon en cada época los valores de MG y MF.

Se hicieron 500 cálculos para valores aleatorios entre 0 y 1 para la variación de parámetros del controlador. Misma cantidad en el rango de 0 a 10 y lo mismo de 0 a 100.

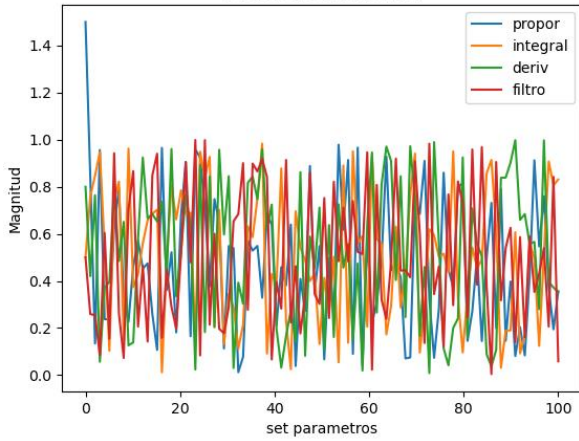
Se muestran las gráficas con algunos resultados. Las gráficas se muestran con conjunto de 100 valores, por claridad.

La figura 5 muestra el conjunto de parámetros del controlador PID en la parte inferior, y el Margen de Ganancia en la parte superior. Los parámetros variaron de 0 a 1. Se observa que existen varios mínimos y máximos locales para el MG.



La figura 6 da el detalle de las mismas combinaciones de parámetros de la figura 5, para valores entre 0 y 1, sin mostrar el MG.

Fig 6.
 Parametros Random 1

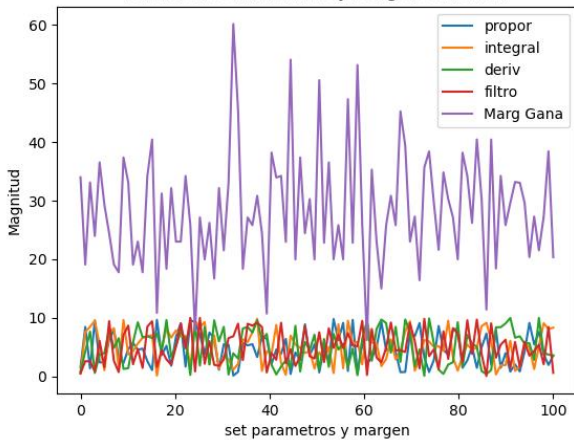


Resalta en la figura 6 la primera combinación de parámetros, con un valor en $k=1.5$, fuera del rango definido para esa gráfica.

Se dejó intencionalmente para indicar que un valor fuera de rango sobresale inmediatamente.

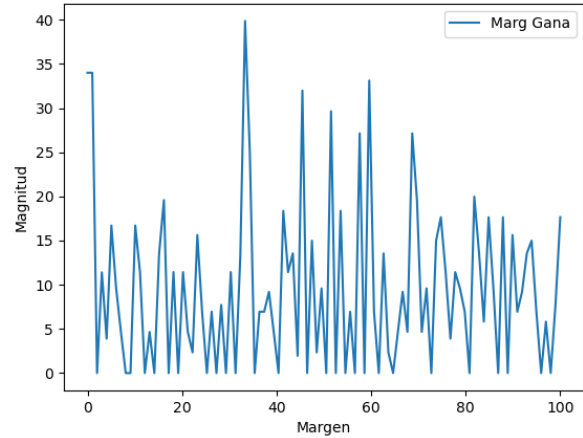
La figura 7 muestra la comparación de valores en los parámetros y el MG. Los parámetros oscilaron entre 0 y 10.

Fig 7.
 Parametros Random 10 y Margen Ganancia



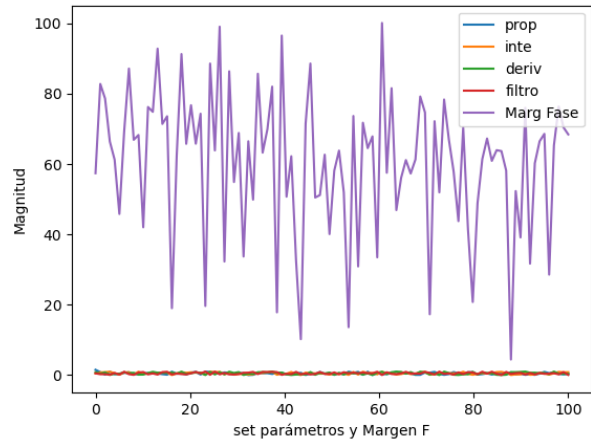
Por claridad, la figura 8 muestra únicamente la magnitud del MG. Los parámetros oscilaron entre 0 y 100.

Fig 8.
 Random 100 y Margen Ganancia

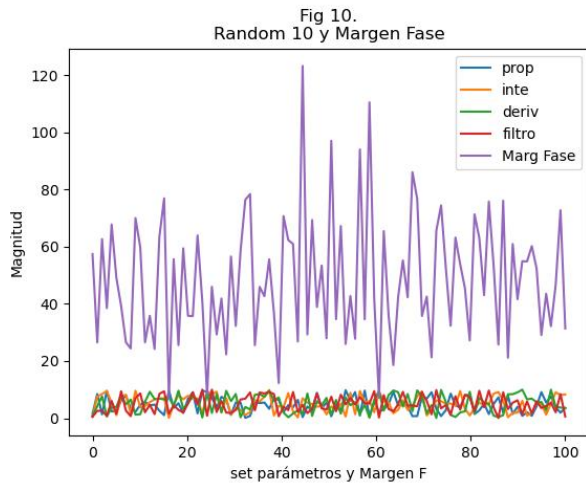


El margen de Fase para cálculos con valores de parámetros entre 0 y 1 se muestra en la figura 9:

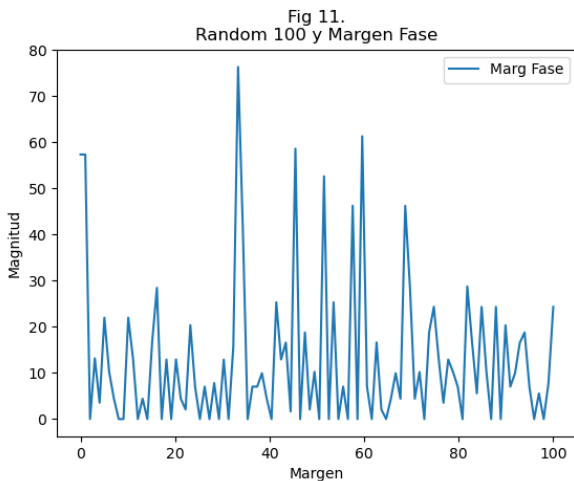
Fig 9.
 Random 1 y Margen Fase



La figura 10 muestra los valores de la fase para la combinación de parámetros del controlador en el el rango de 0 a 10,



La figura 11 muestra los valores de la fase únicamente, para la combinación de parámetros del controlador en el el rango de 0 a 100,



5. CONCLUSIONES.

Las gráficas sugieren varios máximos y mínimos locales. No se mostraron todos los valores, pero resaltan combinaciones como $k=0.224$, $T_i=0.9326$, $T_d=0.9457$, $T_f=0.0227$, $MG=67.923$, $MF=100.1038$.
 $k=0.8213$, $T_i=0.5998$, $T_d=0.7221$, $T_f=0.00872$, $MG=48.7134$, $MF=123.096$.
 $k=0.0634$, $T_i=0.000425$, $T_d=0.1973$, $T_f=0.8956$, $MG=44.1940$, $MF=179.9442$

Con márgenes de fase arriba de 100, y márgenes de ganancia a partir de 44, para valores de parámetros inferiores a la unidad, se reconoce un desempeño bastante bueno. No se encontró mejor combinación.

El barrido que se realizó en rangos desde 0 hasta 100 no da margen a mejores combinaciones.

Los cálculos se realizaron en un tiempo cercano a 6 mins 45 segundos por cada 500 iteraciones.

Considerando siempre que se realizó para un sistema con una planta de segundo orden.

6. TRABAJO FUTURO.

Existen varias vertientes para continuar el trabajo de sintonización de esta manera.

Una es trabajar con una planta real, sin modelo matemático disponible, estimar parámetros iterativamente para el PID y definir un objetivo menos amplio, como un margen de fase máximo.

Esto requiere una planta que permita trabajar con desempeños muy pobres como peor escenario durante el proceso de sintonización.

Una segunda vertiente es automatizar completamente el proceso de sintonización, aunque varios autores se quejan de que los métodos de este tipo caen en desempeños 20 a 30% debajo del valor óptimo.

Referencias.

- [1] K Astrom, R Murray. Feedback Systems, an introduction for scientists and engineers. 2nd edition. 2019. Chapter 8.
- [2] A Karimi, D Garcia, R Longchamp . PID controllers design using Bode's integrals. 2002 page 4
- [3] B Bradu, E Blanco, R Marti, F Tilaro. Automatic PID performance monitoring applied to LHC cryogenics. ICALEPCS 2017.
- [4] S Bucz, A Kozáková. Advanced Methods of PID Controller Tuning for Specified Performance. Intechopen. 2018.
- [5] I Diaz B. Apuntes sistemas automáticos. Universidad de Oviedo. 2006. Tema 7.
- [6] M J De la Fuente. Sintonía de reguladores PID. Universidad de Valladolid. Apuntes, 2002, pag 78
- [7] S Raschka. Python Machine Learning. Packt Publishing. 2015.
- [8] H. W. Bode. Network analysis and feedback amplifier design. D. van Nostrand Company. 1945. Pag 263.