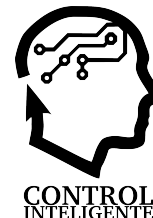




## XVII Simposio CEA de Control Inteligente

27-29 de junio de 2022, León



### Metodología de reducción del tiempo de ajuste de controladores PID autoajustables basado en hiperesferas

Michelena, A.<sup>a,b,\*</sup>, Zayas-Gato, F.<sup>b</sup>, Jove, E.<sup>a,b</sup>, Quintián, H.<sup>b</sup>, Casteleiro-Roca, J.L.<sup>b</sup>, Calvo-Rolle, J.L.<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Universidad de A Coruña, CITIC. Campus de Elviña, s/n, 15008, A Coruña, España.

<sup>b</sup>Universidad de A Coruña, CTC. Departamento de Ingeniería Industrial. Avda. 19 de febrero s/n, 15405, Ferrol, A Coruña, España.

**To cite this article:** Michelena, A., Zayas-Gato, F., Jove, E., Quintián, H., Casteleiro-Roca, J.L., Calvo-Rolle, J.L. 2022. Metodología de reducción del tiempo de ajuste de controladores PID autoajustables basado en hiperesferas. XVII Simposio CEA de Control Inteligente.

#### Resumen

Hoy en día, los controladores adaptativos son ampliamente utilizados en el control de una gran variedad de procesos industriales. En ese tipo de controladores destacan los reguladores PID autoajustables, por ser una solución robusta y de fácil implementación. Sin embargo, este tipo de controladores suelen caracterizarse por tener elevados tiempos de estabilización debido al proceso de identificación que ejecutan en paralelo. Por ello, en el presente trabajo de investigación se presenta un método basado en el uso de hiperesferas y centroides para reducir los tiempos de ajuste y mejorar el rendimiento del lazo de control en los algoritmos PID autoajustables.

*Palabras clave:* Controlador PID, Centroides, PID autoajustable, Identificación online, RLS

#### Methodology for reducing tuning time in self-tuning PID controllers based on hyperspheres

#### Abstract

Nowadays, adaptive controllers are widely used to control a wide variety of industrial processes. In this kind of controllers self-tuning PID highlight for being a robust and easy implementation solution. However, this type of controllers are usually characterized by large settling times, due to the identification process they execute in parallel. Therefore, this research work presents a method based on hyperspheres and centroids to reduce settling times and improve control loop performance in self-tuning PID algorithms.

*Keywords:* PID controller, Centroids, Self-tuning PID, Online identification, RLS

#### 1. Introducción

En la actualidad, los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) son ampliamente empleados en procesos industriales por su alta robustez y fácil implementación. Se estima que más del 90 % de los procesos continuos emplean estos reguladores como elemento de control (Zayas-Gato et al., 2020). Pese a sus facilidades de integración en múltiples sistemas, para conseguir un buen rendimiento de este tipo de controladores, y para optimizar el proceso de control, es necesario el ajuste óptimo de sus parámetros de funcionamiento: ganancia proporcional, integral y derivativa.

Tradicionalmente, el ajuste de las constantes del PID se realizaba de forma manual y empírica empleando diferentes méto-

dos y criterios de sintonía. En sistemas lineales o en aquellos sistemas no lineales pero que operan en un mismo punto de operación, este ajuste manual resulta un proceso válido. Sin embargo, cuando se trata de sistemas no lineales, en los que las dependencias funcionales cambian al variar el punto de operación, el ajuste manual no resulta útil, ya que deben realizarse diferentes procesos de sintonización para cada punto de trabajo.

Por otro lado, la mayoría de los sistemas industriales sufren variaciones temporales, debido al desgaste de sus componentes, etc. Por esta razón, para mantener un buen rendimiento del controlador, es necesario el reajuste de los parámetros del PID después de un determinado tiempo de funcionamiento. Por todo ello, y con el objetivo de solventar los problemas expuestos anteriormente, se desarrollaron técnicas y algoritmos adaptati-

\*Autor para correspondencia: alvaro.michelena@udc.es  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

vos, como los PID's autoajustables (Bobál et al., 2005), que, de forma automática, y a partir de los pesos de la función de transferencia del sistema, son capaces de ajustar las constantes del regulador. Por ello, estos controladores requieren de un sistema de identificación con el que obtener los valores (pesos) de la función de transferencia que describe la dinámica del sistema.

En cuanto al proceso de identificación uno de los métodos mayormente empleados es el método de mínimos cuadrados recursivos (RLS por sus siglas en inglés, Recursive Least Squares), el cual destaca por ser un método de identificación en tiempo real (Islam and Bernstein, 2019). El método de identificación RLS junto con el empleo de PID autoajustables son una combinación frecuente ya que llegan a conseguir un buen rendimiento. Sin embargo, el elevado tiempo de convergencia del proceso de identificación del RLS, el cual se inicializa con valores aleatorios de la función de transferencia, provoca elevados tiempos de establecimiento y acciones de control no deseadas al inicio del proceso.

Para reducir los tiempos de estabilización, se propusieron diferentes métodos, como el Gain Scheduling (Rugh and Shamma, 2000). Sin embargo, este método puede no considerarse adaptativo puesto que no puede adaptarse a las variaciones temporales del sistema.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, en el presente artículo se presenta un método basado en hiperesferas generadas con cada uno de los parámetros de transferencia para un punto de operación, con las que obtener sus centroides para inicializar el proceso de identificación y reducir el tiempo de establecimiento de los PID's autoajustables. Así mismo el valor de los centroides también sirve para sintonizar el controlador.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: después de la presente sección, el caso de estudio y los métodos empleados son expuestos. La sección 3 recoge una detallada descripción de la propuesta planteada, mientras que en la sección 4 se describen los resultados. Por último, la sección 5 recoge las conclusiones y trabajos futuros.

## 2. Materiales y métodos

En la presente sección se describe tanto la planta sobre la que se ha desarrollado la investigación, como los métodos empleados que intervienen en la solución propuesta.

### 2.1. Planta de control de nivel

El laboratorio de Optimización y Control de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol (EPIF) de la Universidad de A Coruña (UDC), cuenta con diversas plantas o maquetas que simulan los procesos industriales más comunes. Una de estas maquetas es la planta de control de nivel Figura 1.

La planta de control de nivel está conformada por dos tanques dispuestos a diferentes alturas. El tanque inferior sirve de depósito de agua y para alimentar a la bomba centrífuga, que es la encargada de bombear el agua al depósito superior, en donde se realiza el control de nivel. Para ello, este depósito dispone de un sensor de ultrasonidos en su parte superior con el que medir el porcentaje de líquido almacenado.

La bomba centrífuga está controlado por un variador de frecuencia que se encarga de fijar la velocidad del motor, y de esta manera controlar el caudal de agua impulsado.

Por otro lado, la descarga de agua entre el depósito superior e inferior se realiza a través de un tubo que dispone de una llave de paso manual y una servopilotada, con la que regular también el caudal de salida del depósito superior.

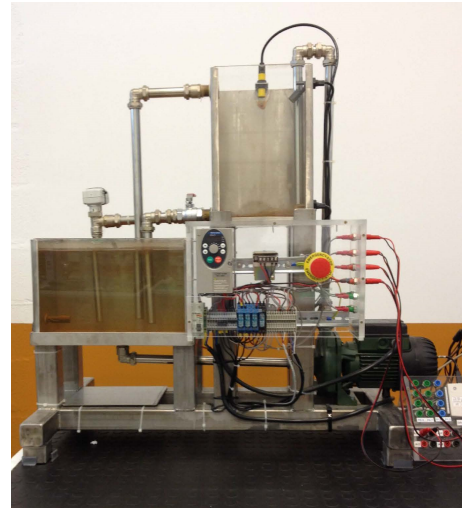


Figura 1: Planta de control de nivel

Tanto para el proceso de adquisición de señales, como para la ejecución de los algoritmos de control, se emplea una placa BeagleBone Black junto con una pequeña placa de acondicionamiento de señales con la que adaptar las tensiones de trabajo del sistema con las de la propia BeagleBone. En la Figura 2 se recoge un esquema de la planta junto a los dispositivos de control y adquisición de datos.

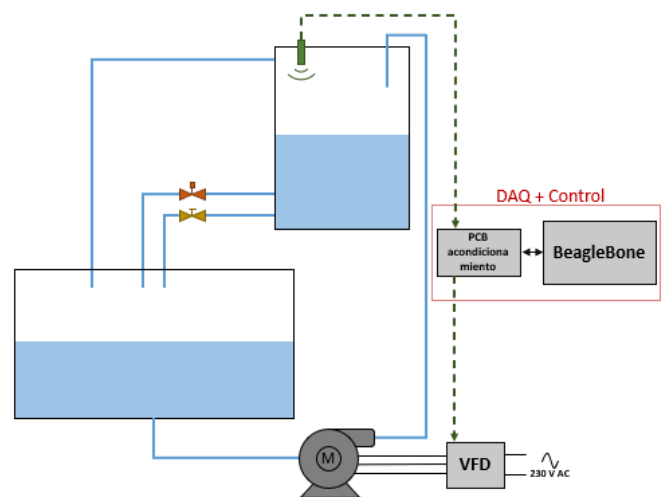


Figura 2: Esquema de la planta de control de nivel

Este sistema es el idóneo para desarrollar los diferentes experimentos planteados y comprobar la validez de la propuesta desarrollada, puesto que el sistema de control de nivel corresponde con un sistema no lineal y variante en el tiempo.

#### 2.1.1. Mínimos cuadrados recursivos (RLS)

El método de Mínimos Cuadrados Recursivos (RLS) es uno de los métodos de identificación paramétrica más empleados,

por su simplicidad y rapidez frente a otros métodos de identificación, lo que le permite trabajar en tiempo real (online) sobre una gran cantidad de aplicaciones (Liu and Li, 2016; Shen et al., 2020; Li et al., 2016).

El objetivo del método RLS es la obtención de un conjunto de parámetros (pesos de la función de transferencia) que, aplicados a la ecuación lineal de partida, sean capaces de predecir, junto con los valores de entrada, el valor de salida del sistema con un error mínimo. La iteración de este proceso se basa en la optimización de la función de coste, en este caso, en la minimización del error de predicción.

El RLS es un algoritmo recursivo, por lo que el sistema tiene en cuenta de la misma manera todos los datos de entradas y salidas almacenados. Por ello, con el objetivo de detectar variaciones del sistema a lo largo del tiempo, resulta fundamental dar mayor importancia, a las últimas mediciones obtenidas (valor de entradas y salidas) ya que son las señales que mejor representan la dinámica actual del sistema. Por ello este algoritmo integra un factor de olvido,  $\lambda$ , usualmente con valores  $\lambda \in [0,8, 1]$  (Zhang et al., 2013), que sirve para controlar la “memoria” del algoritmo. El valor de memoria es inversamente proporcional al valor de  $\lambda$ , es decir, cuanto menor sea su valor mayor será la memoria del algoritmo y viceversa. Así mismo, cuanto menor es la “memoria” del algoritmo mayor es su sensibilidad, lo que puede producir errores de identificación a causa del ruido. Por contra, valores altos de  $\lambda$  provocan que el proceso de identificación se vuelva más robusto pero más lento, pudiéndose presentar deficiencias a la hora de detectar variaciones en el sistema de estudio (Ciochina et al., 2009).

### 2.1.2. PIDs autoajustables

Los reguladores PID autoajustables son un tipo de controlador PID que no necesita un ajuste previo de sus constantes de funcionamiento  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , sino que estas se calculan de forma automática en función de los pesos de la función de transferencia del sistema a controlar.

En la actualidad hay una gran variedad de PIDs autoajustables basados en diferentes teorías o técnicas. En la presente investigación se emplearán 2 métodos distintos de autoajuste para comprobar la funcionalidad de la propuesta desarrollada. Estos métodos son: PID autoajustable basado en margen de fase prefijado y PID autoajustable basado en asignación por polos.

- PID autoajustable basado en margen de fase prefijado: que como su propio nombre indica se basa en fijar el margen de fase del sistema a  $60^\circ$  (Behar and Iranzo, 2003; Vargas Tamani, 2013).
- PID autoajustable basado en asignación por polos: que busca modificar el sistema en cadena cerrada fijando un polo triple en la zona de estabilidad de  $z^{-1}$  (Behar and Iranzo, 2003).

## 3. Propuesta planteada

En general, el método diseñado se ejecuta sobre un lazo de control que incluye tres componentes diferentes: controlador PID autoajustable, algoritmo de identificación RLS y el método basado en hiperesferas propuesto. El esquema del lazo de control completo se presenta en la Figura 3.

Teniendo en cuenta el lazo de control presentado en la Figura 3, el módulo RLS de identificación se encarga de obtener unos parámetros de la función de transferencia cada determinado tiempo (tiempo de muestreo). En este caso, el algoritmo RLS identificará los parámetros para una función de segundo orden con retardo, ya que es la función de transferencia que mejor se ajusta a la mayoría de los sistemas, Ecuación 1.

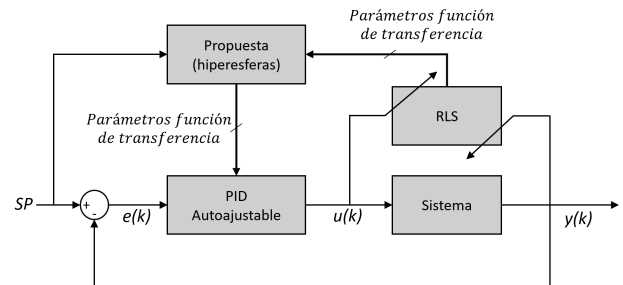


Figura 3: Esquema de la propuesta planteada

$$G_p(z^{-1}) = \frac{b_0 z^{-k}}{1 - a_0 z^{-1} - a_1 z^{-2}} \quad (1)$$

Los parámetros identificados son incorporados al módulo de hiperesferas que almacena los datos y que, en función del punto de operación seleccionado y de las hiperesferas almacenadas, obtiene unos nuevos parámetros semilla, que son enviados al PID autoajustable para adaptarse a la dinámica del sistema y generar una nueva señal de control.

### 3.1. Módulo propuesto basado en hiperesferas

Con el objetivo de mejorar la comprensión de la propuesta planteada, la explicación se divide en dos subsecciones.

**Ejecución inicial.** En esta primera etapa, el problema se divide en puntos de operación específicos de nivel de llenado del depósito desde el 10 % hasta el 90 %, en incrementos del 10 %. Para cada uno de estos puntos de operación específicos se esperó hasta alcanzar el estado estacionario, y así obtener los mejores parámetros del controlador PID mediante RLS. Una vez alcanzado el estado estacionario se almacenan 200 muestras para la obtención de la hiperesfera asociada a ese punto de operación. A partir de estas hiperesferas se pueden calcular sus correspondientes centroides.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de hiperesferas en  $\mathbb{R}^3$  para 3 puntos de funcionamiento distintos.

La ejecución inicial únicamente tiene que ser ejecutada una sola vez y acaba cuando se obtienen las hiperesferas para todos los puntos de funcionamiento seleccionados.

**Ejecución en operación.** Una vez ejecutado el procedimiento inicial y con el sistema en funcionamiento, si se fija un valor de consigna de un punto de funcionamiento de la etapa inicial, entonces, los pesos de la función de transferencia y, en consecuencia, los parámetros del controlador se obtienen calculando el centroide de la hiperesfera asociada a ese punto de trabajo. Por otro lado, si se requiere un valor de consigna diferente, entonces para inicializar el algoritmo RLS se utiliza el valor del centroide de la hiperesfera más cercana almacenada. Cuando

se alcanza el estado estacionario es necesario crear una nueva nube de datos relacionada con ese punto de funcionamiento.

El método propuesto actualiza las hiperesferas para cada tiempo de muestro, teniendo en cuenta que cada hiperesfera está conformada por las últimas 200 muestras obtenidas para un determinado punto de operación. De esta manera se consigue una adaptabilidad total de la propuesta.

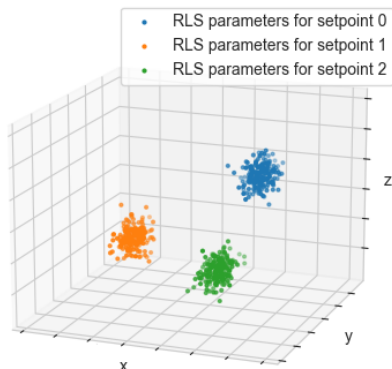


Figura 4: Ejemplo hiperesferas en sistemas no lineales

#### 4. Descripción de los experimentos realizados y resultados obtenidos

Para comprobar la funcionalidad de la propuesta diseñada, se realizaron diferentes experimentos sobre la planta de nivel descrita. El método se probó con los dos controladores recogidos en el Apartado 2.1.2 y para diferentes valores de consigna.

En primer lugar, la propuesta del centroide se probó implementando el PID autoajustable de margen de fase prefijado. En la Figura 5 se compara el rendimiento del lazo de control con la propuesta del centroide, gráfico superior, y el rendimiento del PID sin la propuesta, gráfico inferior.

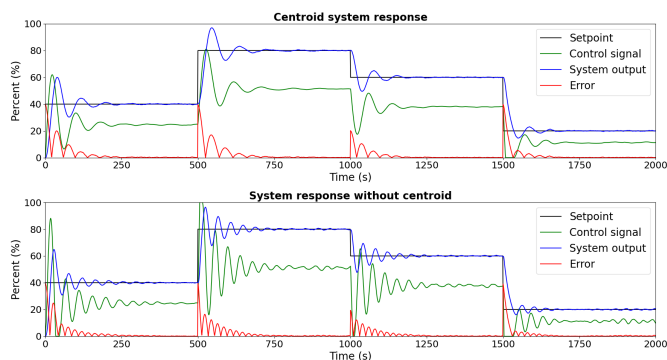


Figura 5: Resultados obtenidos con el PID autoajustable basado en margen de fase prefijado

Como se puede observar en la Figura 5, la propuesta planteada reduce el tiempo de estabilización en una media de 20 segundos en comparación con el lazo de control sin la propuesta basada en hiperesferas. Además, el empleo de esta junto con el cálculo de los centroides reduce la sobreoscilación de la señal de control y de la señal de salida del sistema. Esto es especialmente notable en valores superiores al 40% del nivel del tanque.

En la Figura 6, se muestran los resultados al aplicar el método propuesto junto con el PID autoajustable basado en asignación de polos.

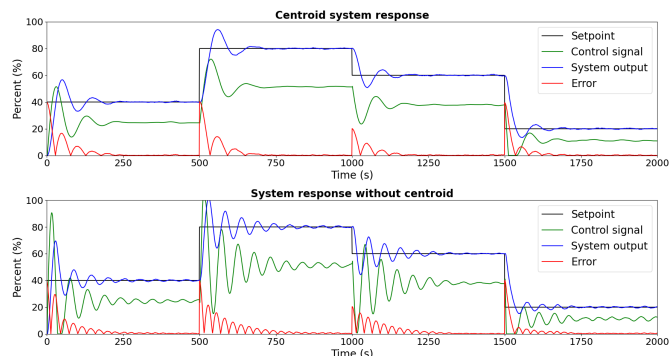


Figura 6: Resultados obtenidos con el PID autoajustable basado en asignación de polos

Como se puede observar en la Figura 6, y al igual que ocurre en el caso del PID autoajustable basado en margen de fase prefijado, al aplicar la propuesta sobre el lazo de control, se consigue una reducción en el tiempo de estabilización de hasta 50 segundos, así como una señal de control mucho más suave, sobretodo en los valores más altos del nivel de llenado.

#### 5. Conclusiones y trabajos futuros

En el presente trabajo se presenta un método adaptativo basado en el empleo de hiperesferas y el cálculo de centroides con el que reducir el tiempo de establecimiento y mejorar el rendimiento de los PID autoajustables. La funcionalidad del método se comprobó con dos algoritmos diferentes de PID autoajustable: PID autoajustable con asignación de polos y PID autoajustable con margen de fase preestablecido. Con ambos PIDs, la integración del método propuesto redujo el tiempo de establecimiento entre 20 y 50 segundos. Así mismo se consiguió mejorar y suavizar la señal de control generada.

Por otro lado, el método propuesto, supone una solución de fácil implementación que puede trabajar con algoritmos tradicionales robustos, por lo que el conocimiento de estos algoritmos se utiliza en la solución propuesta. Además, debido a su simplicidad, el método propuesto no necesita muchos recursos computacionales y espacio de memoria por lo que puede ser ejecutado en una gran variedad de sistemas embebidos.

En cuanto a los trabajos futuros, destacar que esta investigación se encuentra en una fase muy incipiente. Se comprobará la funcionalidad del método con otros algoritmos de autoajuste para comprobar su rendimiento. Además, se estudiará la posibilidad de detectar anomalías mediante el cálculo de la distancia entre el centroide calculado y el punto obtenido por el algoritmo de identificación. Por último, se plantearán otras contribuciones con las que reducir los tiempos de establecimiento y mejorar el rendimiento de estos algoritmos y se compararán con la presentada en este artículo.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y las Co-

municaciones (CITIC), como Centro de Investigación del Sistema Universitario de Galicia, financiado por la Consellería de Educación, Universidade e Formación Profesional de la Xunta de Galicia a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y la Secretaría Xeral de Universidades (Ref. ED431G 2019/01).

## Referencias

- Behar, A. A., Iranzo, M. M., 2003. Identificación y control adaptativo. Pearson Educación.
- Bobál, V., Böhm, J., Fessl, J., Macháček, J., 2005. Self-tuning PID Controllers. Springer.
- Ciochina, S., Paleologu, C., Benesty, J., Enescu, A. A., 2009. On the influence of the forgetting factor of the rls adaptive filter in system identification. In: 2009 International Symposium on Signals, Circuits and Systems. IEEE, pp. 1–4.
- Islam, S. A. U., Bernstein, D. S., 2019. Recursive least squares for real-time implementation [lecture notes]. IEEE Control Systems Magazine 39 (3), 82–85.
- Li, Z., Nikolaidis, T., Nalianda, D., 2016. Recursive least squares for online dynamic identification on gas turbine engines. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 39 (11), 2594–2601.
- Liu, Z., Li, C., 2016. Recursive least squares for censored regression. IEEE Transactions on Signal Processing 65 (6), 1565–1579.
- Rugh, W. J., Shamma, J. S., 2000. Research on gain scheduling. Automatica 36 (10), 1401–1425.
- Shen, T., Ren, W., Han, M., 2020. Quantized generalized maximum correntropy criterion based kernel recursive least squares for online time series prediction. Engineering Applications of Artificial Intelligence 95, 103797.
- Vargas Tamani, B. E., 2013. Controlador pid autoajustable basado en un margen de fase prefijado.
- Zayas-Gato, F., Quintián, H., Jove, E., Casteleiro-Roca, J.-L., Calvo-Rolle, J. L., 2020. Diseño de controladores PID. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións.
- Zhang, H., Gong, S.-j., Dong, Z.-z., 2013. On-line parameter identification of induction motor based on rls algorithm. In: 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, pp. 2132–2137.