

ESTABILIZACIÓN ROBUSTA DE PLANTAS INTERVALO CON RETARDO DE TIEMPO

Tesis de Calidad Categoría Licenciatura Premio Universitario 2008

Ing. María del Carmen Reyes Nuñez y Dr. Gerardo Romero Galván

RESUMEN

En este trabajo de investigación se presenta una nueva metodología para sintonizar controladores PID (proporcional, integral y derivativo) aplicado a procesos que presentan incertidumbre en sus parámetros. Esta incertidumbre es representada por plantas intervalo, las cuales describen matemáticamente el proceso que se desea controlar. La metodología de sintonización está basada en el uso de las reglas bien conocidas de Ziegler y Nichols, que son generalizadas para sistemas que presentan incertidumbre paramétrica, siendo ésta la aportación principal del trabajo de investigación. Además, se considera un retardo de tiempo en la salida del sistema, el cual puede representar retardo inherente en el modelo matemático o retardo de tiempo provocado por retraso en el tiempo de cómputo de dispositivos, sensores o actuadores. La metodología empleada se basa en la construcción del *Value Set* (gráfica en el plano complejo que representa el comportamiento dinámico en el dominio de la frecuencia de un sistema físico) para la ecuación característica del sistema, el cual, ayudado por el Principio de Exclusión de Cero, proporciona una herramienta gráfica muy sencilla, mediante ella se pueden obtener los parámetros (Ganancia última) y (Período último) con los que es posible sintonizar el controlador PID para el sistema con incertidumbre y retardo de tiempo.

Lo anterior evita que la incertidumbre paramétrica presente en los procesos provoque inestabilidad en el sistema sintonizado.

ABSTRACT

In this work it is presented a new method to tune PID controllers for processes that have uncertainty in its parameters. This uncertainty is represented by interval plants, which mathematically describes the process to be controlled. The tuning methodology is based on the use of well-known rules of Ziegler and Nichols, which are generalized to systems that have parametric uncertainty, which is the main contribution of the research. Furthermore, it is a tizme delay in the system output, which may be due to an inherent delay in the mathematical model or time delay caused by delay in the computation time for devices, sensors or actuators. The methodology is based on the construction of the "Value Set" for the characteristic equation of the close loop control system, which, aided by the Zero Exclusion Principles, it provides a simple graphical tool by which you can obtain the parameters (ultimate gain) and (ultimate period), and with this parameters it is possible to tune the PID controller for the system with uncertainty and time delay. This prevents that the system loses stability due to the parametric uncertainty.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el control ha sido una necesidad para el hombre que trasciende hasta nuestros días. El regular la temperatura de una habitación, el desplazamiento de un automóvil, el control del tráfico, la dirección de un avión, el posicionamiento de un satélite, el equipo médico, los procesos químicos e industriales, generan uno de los problemas más importantes que se han presentado a través del tiempo. Este problema es el control del funcionamiento de las máquinas, instalaciones y dispositivos mecánicos, debido a que dichos dispositivos no podrían ser regulados manualmente; puesto que la mayoría de los procesos demandan alto grado de precisión, velocidad, exactitud, entre muchas otras cosas, factores que son imposibles de lograr para el hombre. Además, muchos procesos representan un riesgo para el ser humano y su medio ambiente, dando lugar al origen de sistemas de control automático (Cesca e Ingaramo, 2006). Un sistema de control se define como un conjunto de elementos interrelacionados de tal manera que pueda regular o dirigir a otro sistema o a sí mismo (Dorf, 1989).

Los dispositivos de control de las máquinas desarrolladas durante la Revolución Industrial se generaron por prueba y error. Fue hasta mitad del siglo pasado, durante la Segunda Guerra

Mundial (Dorf, 1989) que se implementaron las matemáticas para el análisis y diseño de sistemas de control, dando inicio a la teoría de control, y con ella el control automático se transformó en una tecnología con respaldo científico.

El estudio de los sistemas de control automático en la actualidad está clasificado en tres aspectos importantes: análisis, síntesis y diseño. La primera parte se basa en obtener las propiedades cualitativas y cuantitativas de los sistemas de control (Díaz, 2006). La segunda plantea estrategias de control que ayuden a la estabilización del sistema. Por último, el diseño determina las estrategias de control necesarias para cumplir con los requerimientos de un sistema y tener un buen desempeño, empleando métodos para disminuir la sensibilidad a errores, aumentar la velocidad de la respuesta transitoria del sistema, etc.

Este trabajo de investigación está orientado al diseño de sistemas de control automático; en particular, considera la sintonización de controladores PID usando el método de "Ziegler and Nichols" (Astrom y Hagglund, 1995) para sistemas que tienen incertidumbre paramétrica de tipo intervalo.

Un problema importante en el diseño de sistemas de control ha sido la imprecisión de los modelos matemáticos que representan el sistema dinámico. En las últimas décadas, se ha buscado resolver este problema mediante la introducción de nuevas técnicas de control; las principales son:

-*Control adaptable*: se encarga de monitorear posibles variaciones en los parámetros de un sistema de control para adaptar los parámetros del controlador, de tal forma que el sistema en lazo cerrado mantenga un buen desempeño.

-*Control estocástico*: busca compensar las imprecisiones del modelo, agregando señales aleatorias en la entrada y la salida.

-*Control robusto*: considera incertidumbre paramétrica y dinámica

en el modelo matemático, y ésta es tomada en cuenta cuando se realiza el diseño de los compensadores.

En este trabajo se aborda la técnica de control robusto paramétrico para garantizar el buen desempeño de un sistema de control cuando se presenta incertidumbre en sus parámetros.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad existen diversos tipos de sistemas de control, entre los que se encuentran: los sistemas de control de tiempo continuo y de tiempo discreto, sistemas de control variante e invariante en tiempo, sistemas de control lineales y no lineales (Kuo, 1996; Levine, 2000). Todos ellos requieren de un modelo matemático para representar el comportamiento del sistema real. Los modelos matemáticos de los procesos físicos reales son obtenidos bajo numerosas suposiciones, las cuales provocan generalmente que su comportamiento dinámico difiera del proceso real. Lo anterior se realiza con el objeto de simplificar los modelos matemáticos para su análisis. Esta diferencia, entre el comportamiento dinámico del modelo matemático y el proceso físico real, afecta al sistema, inclusive al grado de volverlo inestable. Una forma de tomar en cuenta esas diferencias entre el modelo matemático y el proceso físico real, es mediante la inclusión de incertidumbre en los parámetros del modelo matemático; considerando esta incertidumbre para el análisis. Di-

cho planteamiento recibe el nombre de control robusto paramétrico y es la línea que se desarrolla en este trabajo. Como un punto adicional se agrega un retardo de tiempo en el sistema de control, tal como se muestra en la figura 1.1.

Donde $G(s, q, r)$ representa una planta intervalo, es decir una función de transferencia que contiene incertidumbre en sus parámetros. El término e^{-hs} representa un retardo de tiempo que puede ser debido al tiempo que tarda en procesar la señal o puede ser inherente al proceso físico. Tomando en cuenta la complejidad que presenta el modelo matemático al incluir estos parámetros, resulta difícil mantener al sistema estable. En consecuencia, con la finalidad de mantener y mejorar la estabilidad del sistema es necesario introducir un elemento más, conocido como controlador. Para que el controlador realice adecuadamente su función, es necesario que esté bien sintonizado, de tal manera que el sistema se mantenga estable, aún con la presencia de incertidumbre y/o retardos de tiempo. Son varios los métodos por los cuales se logra sintonizar un controlador PID; sin embargo, dichos métodos no consideran los parámetros inciertos y retardos de tiempo que se presentan en el sistema. No obstante, este trabajo se basa en el método desarrollado por Ziegler y Nichols. En consecuencia, se presenta la necesidad de contar con una nueva alternativa que logre sin-

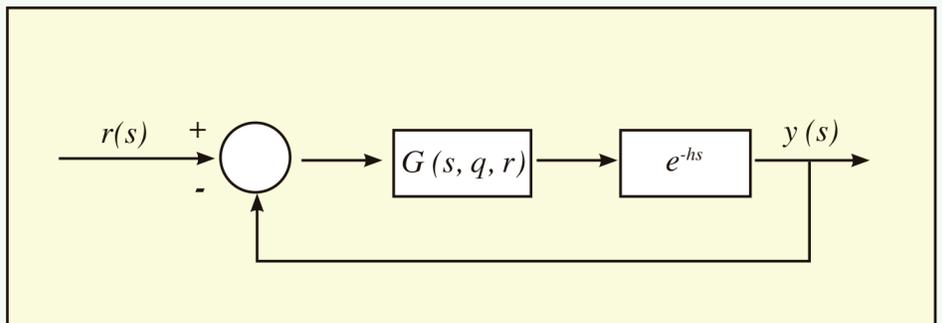


FIGURA 1.1

Diagrama de bloques de una planta intervalo con retardo de tiempo.

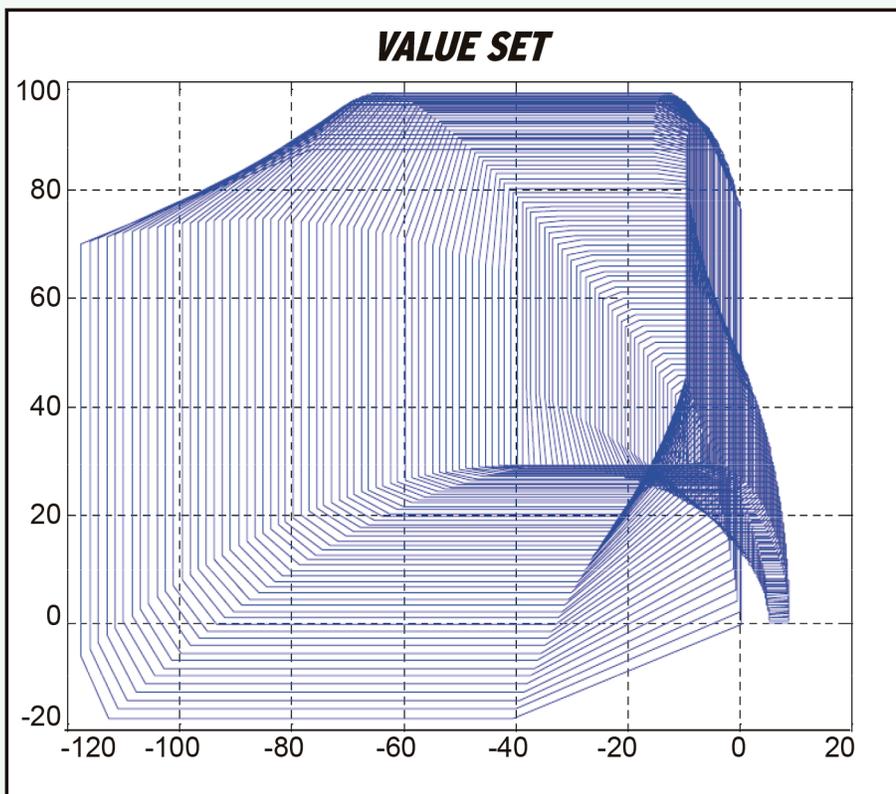


FIGURA 2.1

Al inspeccionar una gráfica a través del “Value Set” de un sistema particular es posible verificar la propiedad de estabilidad.

tonizar el controlador, tomando en cuenta la incertidumbre paramétrica y los retardos de tiempo que se presentan en dicho sistema; garantizando así, un sistema de control con estabilidad pese a las variaciones que pueda sufrir el sistema en un momento dado.

3. METODOLOGÍA

Con el fin de proporcionar beneficios útiles para la sociedad, los sistemas de control se han ido expandiendo rápidamente a todas las áreas y actividades en las que el ser humano se ve involucrado. Por tal motivo, se requiere que dichos sistemas sean controlados lo mejor posible, para que su comportamiento sea el adecuado. Cuando los sistemas presentan una deficiencia en su funcionamiento, ésta podría generar consecuencias catastróficas; tanto para la industria, la economía, el medio ambiente y los seres humanos. Por ejem-

plo, el controlador de una planta nuclear o el de un avión, son sistemas en los cuales su inestabilidad podría causar grandes pérdidas, no sólo económicas, sino también humanas. Por esta razón es fundamental encontrar nuevas formas para garantizar la estabilidad de los sistemas de control.

En este trabajo se propone una metodología basada en el concepto del “Value Set”, donde se incorpora incertidumbre de tipo intervalo en los parámetros de la función de transferencia; además de agregar un retardo de tiempo al sistema, el cual también se considera incierto. Estas dos consideraciones permiten contemplar posibles omisiones realizadas cuando se obtuvo el modelo matemático.

Existen varias publicaciones que han abordado el problema de estabilización robusta de sistemas inciertos (Barmish, B.R., Hollot, C.V., Graus, F.J. y

Tempo, R. (1992) en el cual emplean un compensador de primer orden en una planta intervalo, implementando el “Value Set” como metodología; de igual manera se utiliza el “Value Set” (Romero, 1997) para una planta intervalo con retardo de tiempo. Es importante mencionar que es posible verificar la propiedad de estabilidad por simple inspección de una gráfica a través del “Value Set” (figura 2.1).

Los objetivos alcanzados en este trabajo de investigación se describen a continuación:

1. Obtención de un método gráfico para la sintonización de controladores PID para sistemas lineales con incertidumbre paramétrica y retardo de tiempo incierto.
2. Desarrollo de un conjunto de programas en lenguaje *Matlab* que permiten elaborar las gráficas del método anterior.
3. Utilización del método para resolver el problema de estabilización robusta de sistemas lineales con retardo de tiempo.

4. RESULTADOS

Primero se procede a obtener la función de transferencia del diagrama de bloques del sistema de control de una planta intervalo con retardo de tiempo en retroalimentación unitaria (Fig. 3) donde $p(q)$ es la planta intervalo, descrita por:

$$p(q) = \frac{n(q)}{d(r)}$$

Como se mencionó anteriormente, se emplean las reglas básicas de sintonización en las cuales se determina que las ganancias $KK_{i,y}$ del controlador PID son igualadas a cero, dejando solamente la ganancia proporcional K_p como un valor fijo K , hasta obtener la ganancia última K_u . Una vez que se obtiene la función de transferencia, ésta se introduce dentro de la función “retvsro.m” del programa de *Matlab*, obteniéndose el “Value Set” del sistema correspondiente. Posteriormente se busca el valor de K_p en el momento en que el “Value Set” toque

el cero del plano complejo, registrando el valor de la K_u y la frecuencia última T_u en la cual el sistema se encuentra oscilando. Con estos datos se hace uso de las siguientes ecuaciones para obtener la sintonización en el peor de los casos del sistema de control:

$$\begin{aligned} KK_{pu} &= 0.6 \\ KK_{iu} &= 0.5 \\ KK_{au} &= 0.125 \end{aligned}$$

5. APLICACIONES

Los resultados fueron aplicados al sistema de control de inclinación de un avión Concorde (Dorf, 1989) figura 4.1, considerando que la ecuación del modelo del avión se ve afectada por incertidumbre paramétrica, la cual es causada por los coeficientes aerodinámicos debido a las condiciones de vuelo tales como la altura, presión, velocidad, etc. Aunque se desconoce exactamente cuál de estas condiciones puede afectar en mayor grado la estabilización del avión, se conocen los intervalos de dicha incertidumbre, que se encuentra dentro de la función de transferencia del modelo del avión. Como se ha mencionado, se desea estabilizar el sistema de control de inclinación; para ello se requiere que dicho controlador esté bien sintonizado, de tal forma que el sistema se logre mantener estable aún con la presencia de incertidumbre y de retardos de tiempo. Sin embargo, los métodos con los que se cuenta actualmente no permiten considerar incertidumbre ni retardos de tiempo, por tal razón, se emplea el método del

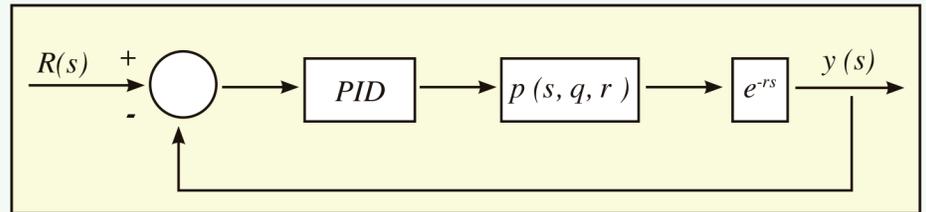


FIGURA 3.1

Diagrama de bloques de un sistema de control con un controlador PID de una planta intervalo.



FIGURA 4.1

Fuente: <http://allbestpictures.com/>

“Value Set” como un método alternativo para la sintonización tomando en cuenta la incertidumbre paramétrica que presenta el sistema de control.

Primero se obtiene la función de transferencia del sistema de control, tomando en cuenta la incertidumbre que presenta el modelo del avión y el retardo de tiempo que tenga. Posteriormente, siguiendo las reglas básicas de sintonización, se le da un valor fijo al controlador PID; el cual representa sólo la ganancia proporcional del controlador K_p , hasta obtener la ganancia

última K_u . Estos valores se codifican en lenguaje *Matlab*, bajo la siguiente función “retvsro.m”. Dicha función genera el “Value Set” correspondiente, obteniéndose con éste, los siguientes parámetros de sintonía:

$$\begin{aligned} K_p &= 0.5882 \\ K_i &= 0.2565 \\ K_d &= 0.3371 \end{aligned}$$

Estos parámetros del controlador permiten obtener un buen desempeño en el control de la inclinación del avión, aun y cuando se presente la incertidumbre en los parámetros, evitando el riesgo de perder la estabilidad por causa de variación en los mismos. Es importante resaltar que al trabajar con sistemas de control tan complejos que requieren un alto grado de estabilidad, no tanto por cuestión de costos o de productividad, más bien por las vidas que dependen de estos sistemas de control, y al utilizar un medio de transporte aéreo tal como lo es un avión, se tiene la necesidad de garantizar la estabilización robusta del mismo. ||

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astrom, K.J. y Hagglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, Instrument Society of America.
- Barmish, B.R., Hollot, C.V., Graus, F.J. y Tempo, R. (1992). “Extreme Point Results for Robust Stabilization of Interval Plants with First Order Compensators”, en *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37 (6): 707-714.
- Cesca, M.R. e Ingaramo, A.P. (2006). “Control Automático y Control de Procesos.

- Perspectiva Histórica*”. [en línea] consultado el 21 agosto del 2006 en <http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Regimen/Tpoa.pdf>
- Díaz, I. (2006). *Estabilidad Robusta de Sistemas Diferencia Diferencial de Segundo Orden*. Tesis de Ingeniería Electrónica. Reynosa, Tamaulipas: Universidad Autónoma de Tamaulipas, UAM Reynosa-Rodhe.
- Dorf, R. (1989). *Sistemas Modernos de Control*, 2ª ed. Wilmington, D. EUA: Addison-Wesley

- Iberoamericana.
- Kuo, B.C. (1996). *Sistemas de Control Automático*. 7ª ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Levine, W.S. (2000). *Control System Fundamentals*. CRC Press.
- Romero, G. (1997). *Análisis de Estabilidad Robusta para Sistemas Dinámicos con Retardo*. Tesis de Doctorado. Monterrey, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.