

---

# Teoría de control para sistemas informáticos

---

## *Control theory for computing systems*

Félix Armando Fermín Pérez

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática

fferminp@unmsm.edu.pe

---

### RESUMEN

La teoría de control realimentado es una disciplina basada en las matemáticas y de amplio uso en ingeniería. Los controladores en lazo cerrado son fundamentales para el buen funcionamiento y gestión de los sistemas informáticos y de las redes de datos, pero sucede que los profesionales de la informática por lo general se enfocan en el diseño personalizado de estos controladores para cada caso en especial, con técnicas ad hoc. La teoría de control proporciona un enfoque sistemático para diseñar controladores estables, que eviten fuertes oscilaciones, que logren sus objetivos con exactitud, y que tengan rápida respuesta estabilizándose alrededor del valor final en estado estacionario. En este artículo se proporciona una breve introducción a los fundamentos de la teoría de control para los profesionales del área de la computación e informática, que centran sus actividades en aplicaciones de gestión de servidores web, servidores de bases de datos, servidores de correo electrónico, sistemas en tiempo real y otros.

**Palabras clave:** teoría de control, control realimentado, gestión autónoma, servidor web

### ABSTRACT

Feedback control theory is a discipline based on mathematics and widely used in engineering. Closed-loop controllers are essential for the proper operation and management of computer systems and data networks, but it happens that computer science practitioners usually only focus on the custom design of these controllers for each particular case, with ad hoc techniques. Control theory provides a systematic approach to design stable feedback control, preventing large fluctuations, reaching their targets with accuracy, and with fast response that enables them to quickly stabilize around the final steady-state value. This article provides a brief introduction to the fundamentals of control theory for computer science practitioners that focus their activities in applications with web server systems, database systems, email systems, systems real time and others.

**Keywords:** control theory, feedback control, autonomic management, web server

---

## INTRODUCCIÓN

La teoría de control es una disciplina sistematizada, basada en las matemáticas, ampliamente utilizada en diversos ámbitos de las ingenierías clásicas, como la ingeniería mecánica, eléctrica, aeronáutica y otros; en las que es útil para analizar y diseñar lazos de control, generalmente realimentados, con la finalidad de regular las características de cualquier sistema [2].

En estas áreas de la ingeniería, se conoce que la teoría de control proporciona un enfoque sistemático para diseñar sistemas de control en lazo cerrado, que tengan como principales características el ser estables, el evitar fuertes oscilaciones, el ser exactos en los valores de salida deseados, y en responder rápidamente a los cambios de la carga de trabajo, estabilizándose en corto tiempo alrededor del valor final del estado estacionario. En la literatura especializada, se puede hallar abundante información de su aplicación en las ingenierías clásicas, pero en menor medida, de su aplicación en sistemas informáticos, como los servidores web, de correo electrónico y de base de datos. Inicialmente, en el área de los sistemas informáticos, su uso se enfocó en las redes de comunicación de datos para controlar el flujo de datos [3] y en el diseño de versiones mejoradas de TCP/IP [4], por ejemplo.

Por otro lado, cabe mencionar que la gestión automática de servidores informáticos es una línea de investigación relativamente reciente, que promueve el uso de sistemas de control en lazo cerrado para controlar automáticamente una determinada variable de salida, mediante la manipulación adecuada de los niveles de CPU o de memoria del servidor informático, o para lograr los tiempos de respuesta pactados mediante el control de las prioridades de programación, la reasignación de memoria o la reasignación del ancho de banda. En este sentido, existe un creciente interés en ir un poco más allá de las tareas de control automático, hacia la gestión autónoma, que es parte de la "computación autónoma" o también denominada "computación autónoma", a semejanza de cómo funciona el sistema nervioso autónomo humano. Pero, lo que aún acontece, es que los profesionales de informática, por lo general, utilizan un procedimiento ad hoc para el diseño de controladores realimentados, a menudo con resultados no deseados, esto es, con fuertes oscilaciones o lentas adaptaciones a los cambios en las cargas de trabajo,

y donde la gestión está aún fuertemente supeditada al control y gestión manuales.

El artículo está organizado de manera tal que en la sección 2 se proporciona los conceptos fundamentales de la teoría de control realimentado y en la sección 3 se describen sus limitaciones; lo referente a la metodología de aplicación de la teoría de control a sistemas informáticos forma parte de la sección 4, y finalmente en la sección 5, se describen las conclusiones.

## TEORÍA DE CONTROL REALIMENTADO

La teoría de control realimentado es el mecanismo básico mediante el cual los sistemas de cualquier tipo, sean éstos, mecánicos, eléctricos o biológicos, mantienen su equilibrio u homeostasis [0]. Ogata [5] menciona que la teoría de control trata de controlar, regular, gobernar, comandar automáticamente las características estáticas y dinámicas de funcionamiento de sistemas de cualquier tipo. Astrom [6], otro de los principales propulsores de la teoría de control, establece que lo mágico de la realimentación es que se puede crear un sistema que funcione bien con componentes que funcionan pobremente, además de hacerlo insensible a ruidos o perturbaciones, y a variaciones en los componentes que constituyen el sistema bajo estudio.

La teoría de control es un enfoque sistemático de análisis y diseño de controladores, que se fundamenta en el uso de las matemáticas. Utiliza conceptos tales como el de función de transferencia, que relaciona la salida y entrada de un sistema en particular para estudiar sus propiedades. Estudia la estabilidad de un sistema, mediante la determinación de la convergencia de la señal de la salida del sistema cuando la entrada también lo es. Se asocia al concepto de exactitud en el logro del valor planteado de la señal de salida del sistema, cuando se aproxima lo más posible al valor de la señal de entrada, aunque en realidad lo que se mide generalmente para fines de control es el denominado error de estado estacionario, definida como la diferencia entre el valor de referencia, lo que se desea, y el valor real de la salida, lo que en realidad se obtiene. Otras características de la aplicación de la teoría de control tiene que ver con, por ejemplo, el tiempo de establecimiento que muestra lo rápido que converge el sistema en estudio, o el tiempo de subida que muestra la velocidad de respuesta, y están relacionadas al comportamiento temporal del sistema [2].

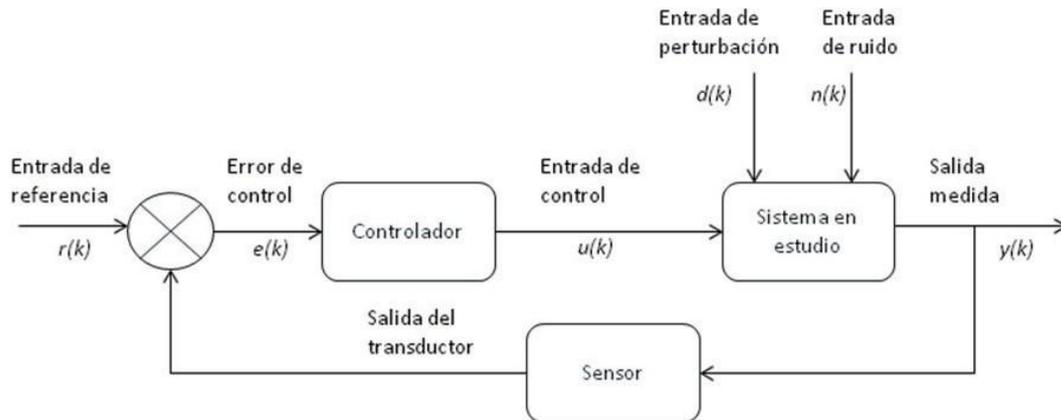


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de control realimentado. (Hellerstein et., al 2004).

Por lo general, como se muestra en la Figura 1, al sistema en estudio se le agrega un elemento denominado "controlador", que dinámicamente ajusta el comportamiento de uno o más elementos, basado en los valores de las mediciones tomadas a la variable de salida del mismo sistema bajo estudio. En resumen, lo que se hace es manipular estos otros elementos mediante el controlador para así lograr las salidas deseadas que son iguales a las entradas de referencia, esto es, a los objetivos planteados.

### Componentes de un sistema de control realimentado

Los elementos o componentes esenciales de un sistema de control en lazo cerrado son los mostrados en la Figura 1, donde el tiempo es discreto y se denota como  $k$ , en tanto que las señales son funciones del tiempo [6y7]. Estos componentes se describen a continuación:

- La entrada de referencia  $r(k)$ . Es el valor deseado de la salida medida o transformaciones de éstas, tales como por ejemplo, la utilización de CPU. Algunas veces a la entrada de referencia también se le conoce como la salida deseada o el punto de ajuste.
- El error de control  $e(k)$ . Es la diferencia entre la entrada de referencia y la salida medida.
- La entrada de control  $u(k)$ . Es el ajuste de uno o más parámetros que manipulan el comportamiento del sistema en estudio y puede ajustarse dinámicamente.
- El controlador. Determina el ajuste del valor de la entrada de control necesaria para alcanzar el valor

de la entrada de referencia. El controlador calcula los valores de la entrada de control basada en los valores actuales y pasados del error de control.

- La entrada de perturbación o disturbio  $d(k)$ . Es cualquier cambio que afecte la manera en la que la entrada de control influye sobre la salida medida, por ejemplo, alguna actividad concerniente con la ejecución de programas antivirus o alguno otro que sobrecargue al sistema.
- La salida medida  $y(k)$ . Es una característica medible del sistema en estudio, por ejemplo podría ser la utilización de CPU, la asignación de memoria o incluso el tiempo de respuesta.
- La entrada de ruido  $n(k)$ . Modifica el valor de la salida medida a la salida del sistema en estudio. También se le conoce como ruido del sensor o ruido de medición.
- El sensor o transductor. Transforma la salida medida de manera que pueda ser comparada con la entrada de referencia, mediante alguna acción de filtrado o suavizado de la señal.
- El sistema en estudio. Es el sistema informático a ser controlado.

En una arquitectura de control de lazo cerrado, como el mostrado en la Figura 1, se trata de obtener una señal de salida,  $y(k)$ , del sistema de control realimentado, que sea de similar valor al de la señal de la entrada de referencia,  $r(k)$ , mediante la acción de una señal de control,  $u(k)$ , que a la vez es la señal de salida del controlador y es la resultante del manipuleo de la señal de error,  $e(k)$ , por el algoritmo implementado en dicho controlador. Es importante anotar que, el funcionamiento de estos sis-

temas de control realimentado siempre se encuentran bajo la influencia negativa de la señal de perturbación  $d(k)$  y de la señal de ruido  $n(k)$ , pero que no son afectados por ellas si es que se diseña un controlador con las características adecuadas para rechazar su influencia, en el rango de operación de estas señales de entrada no deseadas.

### Objetivos de los sistemas de control

Los controladores en general, se diseñan con algún determinado propósito u objetivo de control, tales como los mencionados por Astron [6]:

- Control regulatorio, para asegurar que la salida medida sea igual o cercana a la entrada de referencia. Por ejemplo, en un clúster de tres servidores web, la entrada de referencia podría ser que la utilización de un servidor web debería mantenerse en 66% para manejar eventualidades, y si se agrega un cuarto servidor web al clúster, pues cambiar la utilización a un valor mayor, por ejemplo a 75%. El enfoque se basa en modificar la entrada de referencia frecuentemente, de modo que también se le conoce como control de seguimiento.
- Rechazo a perturbaciones o disturbios, para asegurar que las perturbaciones no actúen sobre el sistema afectando de manera significativa a la salida medida. Por ejemplo cuando se ejecutan programas antivirus u otros que sobrecarguen al servidor web, tratar de mantener en por ejemplo 66% la utilización del sistema. El enfoque está centrado en los cambios en la entrada perturbadora, y no en la entrada de referencia.
- Optimización, para obtener el mejor valor posible de la salida medida. Por ejemplo, cuando se optimiza el ajuste del valor de Max Clients en un servidor web Apache, para minimizar los tiempos de respuesta utilizando controladores difusos.

### Propiedades de los sistemas de control

Al diseñarse controladores para sistemas informáticos deberían considerar a varias propiedades de los sistemas de control, que según Hellerstein *et al.* [2] son las siguientes:

- Se dice que un sistema es “estable” para cualquier entrada delimitada, si la salida también lo es. La estabilidad es por lo general, la primera característica

a determinar en el diseño de sistemas de control, ya que si los sistemas son inestables no se les podrá utilizar en aplicaciones críticas.

- Se dice que un sistema de control es “exacto”, si la salida medida converge o se acerca lo suficiente al valor de la entrada de referencia al utilizar control regulatorio o de rechazo a perturbaciones, o cuando la salida converge a un valor óptimo en el caso de objetivos de optimización. Los sistemas exactos son fundamentales para asegurar que los objetivos de control se cumplan, por ejemplo, al diferenciar servicios entre clases de servicio oro o plata y asegurar que el rendimiento sea maximizado sin exceder las restricciones del tiempo de respuesta requeridos. Por lo general no se cuantifica la exactitud sino que se mide la inexactitud. Para los sistemas de control en estado estacionario, su inexactitud o error de estado estacionario es el valor del error de control  $e(k)$  en ese estado.
- El sistema tiene “cortos tiempos de establecimiento” si converge rápidamente a su valor de estado estacionario. Esto es particularmente importante para rechazar las perturbaciones en presencia de cargas de trabajo que varían en el tiempo, de manera que la convergencia se obtiene antes que cambien las cargas de trabajo.
- El sistema debería lograr sus objetivos de manera tal que no haya sobrepicos, ya que estos tratan de incrementar la variabilidad de la salida medida.

La mayoría de las aplicaciones de la teoría de control se basa en la adecuada consideración de las propiedades de estabilidad, exactitud, tiempo de establecimiento y sobrepico. En sistemas informáticos, se desea que la salida del sistema de control realimentado tienda a un valor conocido, aunque podría no ser constante debido a la naturaleza estocástica del sistema; por ejemplo, los sistemas informáticos tienen regiones de operación, que dependen de la combinación de las cargas de trabajo y de los parámetros de configuración, en los que funcionan aceptablemente y otras regiones en las que no. Así, al hablar de estabilidad, se hace referencia a la estabilidad de un sistema dentro de una determinada región de operación. Si un sistema es inestable no será de utilidad, ya que sus tiempos de respuesta serán muy grandes y altamente variables.

En general, las propiedades de los sistemas de control realimentado se utilizan en análisis y diseño:

- Análisis, que consiste en determinar si el sistema es estable, así como también, en medir y/o estimar el error en estado estacionario, el tiempo de establecimiento, y el sobrepico máximo.
- Diseño, u objetivos de diseño, que consiste en construir un sistema de control realimentado con los valores deseados de error en estado estacionario, tiempo de establecimiento y sobrepico máximo.

### LIMITACIONES DE LA TEORÍA DE CONTROL

La aplicación de la teoría de control a los sistemas informáticos ha tomado especial importancia y utilidad en los últimos años, pero es necesario anotar que, según Zhu *et al.* [8], también posee limitaciones, Como las mencionadas a continuación:

- 1) La mayoría de las relaciones halladas en los sistemas informáticos son no lineales, lo cual dificulta su modelado matemático. En contraste con la teoría clásica de control que es más intuitiva, accesible y fácil de comprender para la mayoría; la teoría de control no lineal y la teoría de control adaptativa son mucho más difíciles de comprender y de poner en práctica.
- 2) La falta de modelos basados en principios físicos obliga a utilizar un enfoque empírico para inferir los modelos de entrada-salida de los sistemas informáticos. Sin embargo, este enfoque requiere de experimentos controlados, ya que, por ejemplo, los datos recolectados de los sistemas de producción son difíciles de utilizar para el modelado, porque a menudo carecen de suficiente rango de excitación para identificar todas las correlaciones relevantes.
- 3) La mayoría de problemas clásicos de control son formulados como problemas de seguimiento, esto es, el controlador mantiene la salida en cierto valor de referencia. Sin embargo, esto puede no ser apropiado para todos los problemas de diseño en sistemas informáticos, por ejemplo, si un objetivo importante es minimizar los tiempos de respuesta promedio de un servidor en lugar de mantenerlo en un cierto valor, no se dispone aún de metodologías de diseño que garanticen el logro de la estabilidad del diseño.
- 4) La teoría clásica de control solo trata con entradas continuas, mientras que la mayoría de sistemas informáticos tiene variables de entrada que toman solo valores discretos. Para sistemas con valores

de entrada discretos y numéricos, es posible diseñar controladores asumiendo variables de entrada continua, sin embargo, este enfoque puede sufrir de inestabilidades e ineficiencias debido a errores de cuantización. Si el sistema en estudio posee valores de entradas lógicas, entonces puede ser adecuado estudiar la teoría de control de eventos discretos.

- 5) La mayoría de sistemas informáticos no han sido diseñados para ser controlables; por ejemplo, los parámetros de configuración de muchas aplicaciones no pueden ser modificados en tiempo de ejecución, prohibiendo incluso el control en línea de estos parámetros. Más aún, la mayoría de sensores utilizados para recolectar datos del funcionamiento de sistemas informáticos realiza mediciones en unidades de minutos, haciendo muy difícil diseñar controladores que respondan a los cambios en escalas de tiempos muy cortos. Para que los sistemas informáticos puedan ser controlados dinámicamente se hace necesario que los sensores y actuadores sean parte integral de los diseños de estos mismos sistemas informáticos.

### METODOLOGÍA DE APLICACIÓN A SISTEMAS INFORMÁTICOS

La metodología de aplicación de la teoría de control realimentado a sistemas informáticos, mostrada en la Figura 2, consta de dos fases denominadas en general como fase de identificación de sistemas, y fase de diseño del controlador.

Por lo general, para hallar el modelo matemático de un sistema informático se emplea un enfoque empírico, que hace uso de datos recopilados del funcionamiento del sistema mismo, en un periodo de tiempo, también se le conoce como "identificación de sistemas", en el que debe identificarse los parámetros de entrada y salida del sistema en estudio, para luego construir un modelo paramétrico como el ARX, por ejemplo, basándose en técnicas estadísticas de autoregresión, tal como la siguiente ecuación:

$$y(k+1) = A y(k) + B u(k) \quad (1)$$

- donde  $y(k)$  : variable de salida  
 $u(k)$  : variable de entrada  
 $A, B$  : parámetros de autorregresión  
 $k$  : muestra k-ésima.

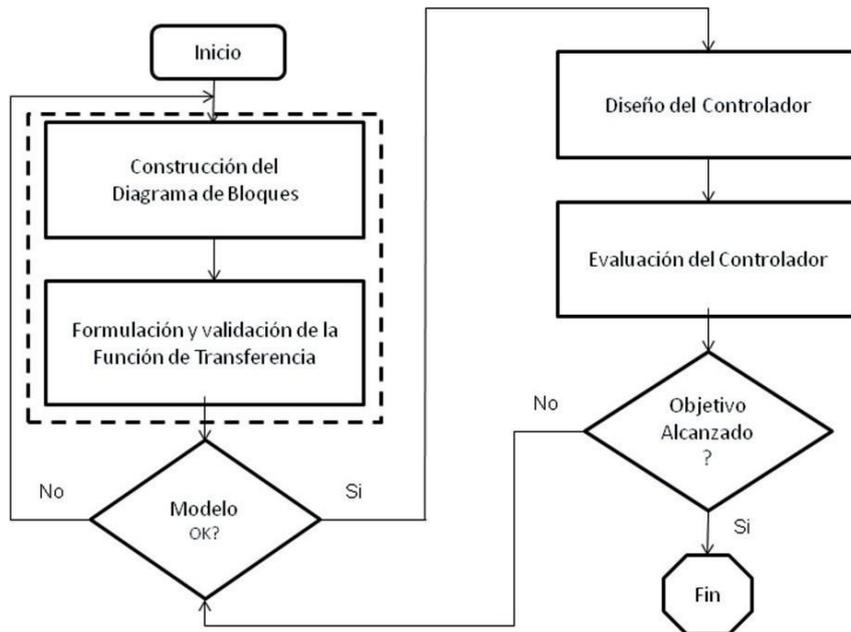


Figura 2. Metodología de aplicación de la teoría de control. (Hellerstein, 2004)

Debe notarse además que este enfoque empírico trata al sistema en estudio como una caja negra de manera que no afecta la complejidad del sistema o la falta de conocimiento experto. Incluso cuando se actualicen las versiones del software bastaría con estimar nuevamente los parámetros del modelo.

Hellerstein *et al.* [2] proponen realizar la identificación del sistema de la siguiente manera:

1. Especificar el alcance de lo que se va a modelar en base a las entradas y salidas consideradas.
2. Diseñar experimentos y recopilar datos que sean suficientes para estimar los parámetros de la ecuación diferencial lineal del orden deseado.
3. Estimar los parámetros del modelo utilizando las técnicas de mínimos cuadrados.
4. Evaluar la calidad de ajuste del modelo. Si la calidad del modelo debe mejorarse, entonces debe revisarse uno o más de los pasos anteriores.

Para el diseño del controlador, se puede utilizar el clásico controlador proporcional, integral y derivativo o controlador PID, pero debido a la naturaleza estocástica, no lineal de los sistemas informáticos, en los últimos años se ha estado investigando sobre la aplicación de técnicas de inteligencia artificial como la lógica difusa y las redes neuronales, de manera que el controlador a

diseñar podría ser uno basado en lógica difusa o algún otro basado en redes neuronales [9].

## CONCLUSIONES

La teoría de control puede proporcionar una arquitectura y un fundamento analítico matemático para la implementación de sistemas controlados y gestionados de manera autónoma.

La aplicación de la teoría de control a sistemas informáticos aún es un reto mayor, ya que debe desarrollarse modelos confiables, implementarse sensores y actuadores adecuados a los cortos tiempos de respuesta requeridos.

La característica estocástica, no lineal, de los sistemas informáticos las hace adecuadas para la utilización de técnicas de inteligencia artificial, como la lógica difusa y las redes neuronales, principalmente en el diseño del controlador.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Lewis. 1992. *Applied Optimal Control and Estimation*. USA: Prentice-Hall.
- [2] J. Hellerstein, Y. Diao, S. Parekh, D. Tilbury. 2004. *Feedback control of computing systems*, USA: IEEE/Wiley-Interscience.

- [3] S. Keshav, Control-theoretic approach to flow control. ACM SIGCOMM Computer Communication Review [En línea], 1991, 21(4): 3-15. Disponible en <http://doi.acm.org/10.1145/115994.115995>
- [4] C. Hollot, V. Misra, D. Towsley, W. Gong. A control theoretic analysis of RED. Proceedings of IEEE INFOCOM 2001 [En línea], 2001, 3: 1510-1519. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1109/INFCOM.2001.916647>
- [5] K. Ogata. 1998. *Ingeniería de control moderna*, 3.<sup>a</sup> ed., México: Prentice Hall Hispanoamericana SA.
- [6] K. Astrom, Challenges in Control Education. Symposium on Advances in Control Education, [En línea], 2006. Disponible en <http://www.ib.cnea.gov.ar/~instyct/ArticulosVarios/Astrom-enACE2006-Madrid.pdf>
- [7] Z. Liu, C. Xia. 2008. *Performance Modeling and Engineering*. USA: Springer Science + Business Media LLC.
- [8] X. Zhu, M. Uysal, Z. Wang, S. Singhal, A. Merchant, P. Padala, K. Shin. 2009. *¿What Does Control Theory Bring to Systems Research?*, Hewlett-Packard Laboratories, University of Michigan.
- [9] R. Fontaine, P. Laurencot, A. Aussem, Mixed Neural and Feedback Controller for Apache Web Server, SETIT 2009, 5th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, Túnez.