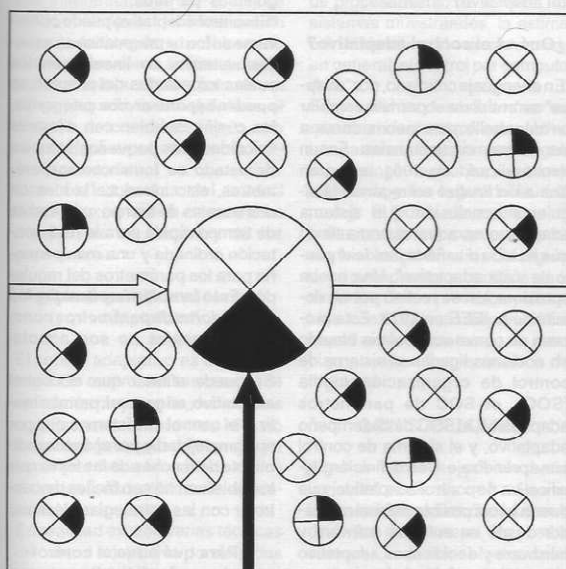


El control adaptativo como una estrategia de control para sistemas no lineales



□ Edinson Franco Mejía
Ingeniero Electricista
Profesor Auxiliar
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle.

RESUMEN

Aunque las técnicas del control adaptativo llevan cuatro décadas de desarrollo y aplicación, aún existe mucho trabajo por realizar en el tema, tanto a nivel teórico como de aplicación. Además, hoy en día los controladores lógicos programables (PLC) involucran algoritmos de

control adaptativo. En general, controladores digitales industriales que son distribuidos por marcas de prestigio internacional, y que se han instalado en nuestras industrias, traen incorporados algoritmos adaptativos y/o la posibilidad de su aplicación, los cuales no se explotan adecuadamente.

Con este escrito se busca aclarar a los ingenieros de control y los que de alguna forma estén vinculados al tema, el concepto y la aplicación del control adaptativo.

Hasta ahora, la mayoría de procesos en las industrias colombianas, se controlan pensando en éste como un sistema lineal, alcanzándose en muchos los casos el objetivo planteado; sin embargo, en aquellas situaciones en los que los procesos involucran fuertes alinealidades o en los que por diversas razones el modelo de la planta presenta variaciones, se hace necesario buscar nuevas alternativas de solución. En este artículo se presentan tres esquemas básicos de implementación de técnicas de control adaptativas.

INTRODUCCION

Es claro que los diseños de controladores realizados con las técnicas clásicas y modernas, para sistemas SISO (una entrada una salida) y para sistemas MIMO (múltiples entradas múltiples salidas),

35

basan su desarrollo en modelo de plantas obtenidos ya sea empíricamente (métodos de identificación), u obtenidos por un arduo trabajo de análisis (métodos de modelización), estos diseños de los controladores presuponen que la planta conocida es de parámetros constantes e invariante. En el caso de sistemas en los que por alguna razón ambiental, por esfuerzos, por envejecimiento o por cualquier otra condición, el modelo de la planta varía, es de preverse que el controlador diseñado no podrá responder adecuadamente para mantener las condiciones en la salida para el cual fue diseñado. Un ejemplo de esto es el caso de una caldera; con el tiempo por condiciones de humedad, de contaminación ambiental, de agrietamiento por accidentes, etcétera, las condiciones de aislamiento de la caldera (citando solo un caso), inevitablemente variarán, esto de hecho conlleva una variación en los parámetros del modelo inicial de la planta, modelo que fue utilizado para realizar el diseño del controlador; otro es el caso clásico que básicamente impulsa el desarrollo de la teoría en control adaptativo, el diseño de controladores automáticos de vuelo (pilotos automáticos) en donde por condiciones como el número "match", la presión con respecto a la altura y velocidad de la aeronave conllevan a variaciones de los parámetros. Además de lo anterior, vemos como hoy los controladores comerciales ofrecidos por diversos fabricantes involucran algoritmos de control adaptativo PID autoajustables y que en algunos casos ya se encuentran funcionando; por tanto, se hace necesario su estudio para llevar a cabo el ajuste y mantenimiento adecuado.

36 L CONTROL ADAPTATIVO

El control adaptativo es un campo fascinante para investigar. Su importancia está, además de las ventajas que posee sobre las técnicas

clásicas, en el amplio campo de aplicación en las industrias.

Como siempre que algo nuevo se presenta, aparecen tres preguntas obligadas:

- 1) Qué es el control adaptativo?
- 2) Para que sirve el control adaptativo?
- 3) Cómo se aplica el control adaptativo?

Estas preguntas son abordadas por Astrom y Whittenmark, [1] y es por ello que para responder a la primera pregunta se toma textualmente, y mediante traducción, la introducción del capítulo titulado, ¿qué es el control adaptativo?

¿Qué es el control adaptativo?

"En el lenguaje cotidiano, por "adaptar" se entiende el permitir cambiar un desarrollo para acomodarse a las nuevas circunstancias. En un foro realizado en 1961 una gran discusión finalizó entregando la siguiente conclusión: "Un sistema adaptativo es aquel sistema físico que ha sido diseñado desde el punto de vista adaptativo". Una nueva aproximación se realizó por un comité de la IEEE en 1973. Este propuso un nuevo vocabulario basado en nociones ligadas al sistema de control de organización media (SOC), el SOC de parámetros adaptativos, el SOC de desempeño adaptativo, y el sistema de control con aprendizaje. Una definición significativa de control adaptativo, que pueda hacer posible mirar el regulador desde un enfoque software y hardware y decidir si es adaptativo o no, es lo que falta. Así parece, no obstante, que como constante queda claro que **una realimentación de ganancia constante, no es un sistema adaptativo.**"

En el párrafo anterior quedan claros los problemas involucrados en la definición del control adaptativo. Son muchas las definiciones que se han hecho al respecto. Zadeh L. A. (1963) recoge muchas de éstas y plantea una definición general. [3]. K.J. Astrom propone una definición

intuitiva: un regulador adaptativo es un regulador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica de los procesos y los disturbios. Ya que la realimentación como tal ha sido introducida para el mismo propósito, inmediatamente aparece la pregunta sobre la diferencia entre el control adaptativo y el control realimentado. El mismo Astrom en su artículo titulado "Theory and application on control adaptive - a survey" [2] complementa estas ideas. Continuando con el texto de la referencia [1] se citan los siguientes párrafos:

"El control adaptativo puede observarse en forma pragmática en aquellos sistemas no lineales en los cuales los estados del proceso se pueden separar en dos categorías, las cuales cambian con diferente velocidad. Los pequeños cambios de estado se toman como parámetros, esto introduce la idea de dos escalas de tiempo: una escala de tiempo rápida para la realimentación ordinaria y una mas pequeña para los parámetros del regulador. **Esto también implica que los reguladores de parámetros constantes lineales no son adaptativos.**"

Se puede afirmar que el control adaptativo, en general, permite realizar el control de sistemas que por su complejidad y por el desconocimiento de muchas de las leyes que lo gobiernan no son fáciles de controlar con las estrategias clásicas.

¿Para qué sirve el control adaptativo?

El control clásico, control por realimentación de la salida, se proyectó como una técnica para controlar las variaciones de la señal de salida esencialmente ante disturbios. Ahora vale preguntar, bajo qué condiciones se aplica el control clásico y bajo cuales el control adaptativo?

Buscando la respuesta, se aclara que el control clásico está pensado

y estructurado para sistemas lineales con parámetros invariantes con el tiempo o con variaciones tan pequeñas que se establece un rango de operación claramente definido. Un sistema en el cual sus parámetros varíen por causas como envejecimiento de sus componentes, por alinealidades de los actuadores, por cambios debidos a las condiciones de operación del proceso, y disturbios no estacionarios actuando sobre el proceso, se conoce en general como un *sistema con parámetros variantes*. En control clásico, si se tiene un sistema inherentemente no lineal, se utilizan técnicas de linealización para poder abordar el problema de diseño, pero con la limitante que el sistema solo puede funcionar en un rango pequeño de señal; ésto es, el sistema de control diseñado solo responderá en el margen de funcionamiento lineal.

Una de las metas del control adaptativo consistirá entonces, en compensar los cambios de los parámetros.

¿Cómo se aplica el control adaptativo?

El control adaptativo es una estrategia de control de un campo de aplicación muy amplio, debido a las condiciones inherentes de no linealidad que el puede manejar y a la característica tan abierta de los sistemas susceptibles de aplicación.

En realidad existen varias técnicas de control adaptativo donde todas y cada una de ellas pretende mantener el sistema en las condiciones de operación deseadas, y en donde el controlador podrá verse como un elemento que dinámicamente se ajusta a las nuevas condiciones de funcionamiento del proceso o sistema.

La aplicación de las técnicas de control adaptativo demandan un conocimiento básico de las estrategias de control clásico, como del manejo de las herramientas infor-

máticas ya que su aplicación se realiza prácticamente mediante herramientas computacionales (computador digital).

Los campos de aplicación del control adaptativo son muy amplios y abarcan desde el control de procesos, control industrial, así como la teleinformática, la robótica y el control de calidad. En general, el control adaptativo está relacionado con otras áreas del conocimiento, tales como sistemas lineales, los sistemas no lineales, el diseño de controladores, la teoría de estabilidad, el control estocástico, manejo de procesamiento de señales, los sistemas muestreados, la estimación e identificación de sistemas y, en general, el control por computador.

En general se describen tres esquemas de control adaptativo:

La ganancia programada (gain scheduling), control por modelo de referencia y los reguladores self-tuning. El punto de arranque es hallar una forma conveniente de cambiar los parámetros del regulador en respuesta a cambios en la dinámica de los procesos y disturbios. Los esquemas difieren únicamente en la forma como se cambian y ajustan los parámetros del regulador.

GAIN SCHEDULING

Algunas veces es posible hallar variables auxiliares que se correlacionen bien con los cambios en la dinámica del proceso. Es posible entonces, reducir los efectos de las variaciones en los parámetros del proceso, cambiando los parámetros del regulador como una función de las variables auxiliares (Ver figura 1). A esta aproximación se le conoce como "Gain Scheduling" (ganancia programada) ya que el esquema inicialmente fue concebido para ajustar cambios en la ganancia del proceso únicamente.

El problema puntual en el diseño de sistemas con "gain scheduling" es hallar las variables auxiliares

adecuadas; normalmente ésto se hace basándose en el conocimiento de la física del sistema.

Cuando se han obtenido las variables programables, los parámetros del regulador se obtienen con un número de condiciones de operación, usando un método de diseño apropiado (por ejemplo, usando la técnica PID).

Se da especial atención a la transición entre las diferentes condiciones de operación. El número de condiciones de operación se incrementa si se hace necesario.

En ocasiones es posible tener programación de la ganancia introduciendo parámetros de dimensión libre normalizada, de tal forma que el modelo normalizado no dependa de las condiciones de operación.

Las medidas auxiliares se usan junto con las mediciones del proceso para calcular las variables de medición normalizadas. La variable de control normalizada se calcula y retransforma antes de ser aplicada al proceso (Kallstrom y colaboradores, 1979).

En algunos casos el cálculo de las variables normalizadas se basa en variables obtenidas por el filtro de Kalman; sin embargo, este sistema es más complejo.

Sistemas adaptativos por modelo de referencia (MRAS)

El esquema de control adaptativo MRAS aparece en la Figura 2. Fue desarrollado inicialmente por Whitaker, Yamron y Kezer (1958), para el problema del servo.

Las especificaciones se dan en términos de un modelo de referencia, el cual dice como debe responder idealmente la salida del sistema a la señal de comando.

Se puede observar del esquema, que el modelo de referencia es parte del sistema de control.

El regulador se puede pensar compuesto de dos bucles: una es la malla interna que está compuesta por los elementos comunes, o sea el regulador y el proceso; la otra

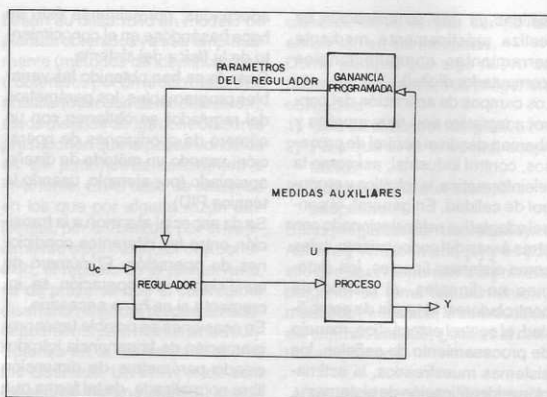


Figura 1. Esquema de control adaptativo "Gain Scheduling".

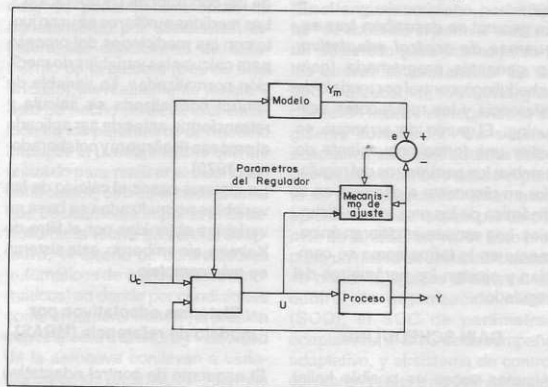


Figura 2. Esquema de control adaptativo MRAS. Esquema directo

ma que se compone del bloque encargado de realizar el ajuste de los parámetros y el bloque que contiene el modelo de referencia. Los parámetros son ajustados de tal forma que el error "e" entre "Ym" y "Y" tienda a cero.

El problema puntual consiste en determinar el mecanismo de ajuste, de tal forma que el error sea llevado a cero y el sistema sea estable. Este problema es no trivial. El MRAS original usó el siguiente mecanismo de ajuste, co-

nocido como la regla MIT.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k e \quad (1)$$

donde:

"e" es el error,
 "θ" es el vector de parámetros ajustables del regulador,
 "k" parámetro que determina la velocidad de adaptación.

Whitaker, Yamron y Kezer, expli-

can la regla 1 como sigue:

Asuma que los parámetros θ cambian mucho más lento que las otras variaciones del sistema; para hacer pequeño el cuadrado del error es razonable cambiar los parámetros en la dirección del gradiente negativo de e^2 . Reescribiendo [1]

$$\dot{\theta}(t) = -k \int e(1) \nabla (\theta) e(s) ds$$

El mecanismo de ajuste puede pensarse como compuesto de tres partes:

- 1- Un filtro lineal para calcular la derivada de la sensibilidad de los procesos de entrada y salida.
- 2- Un multiplicador
- 3- Un integrador.

La regla MIT puede funcionar bien si el parámetro k es pequeño. La medida permitida depende de la magnitud de la señal de referencia. Consecuentemente no es posible dar límites fijos que garanticen la estabilidad.

La regla MIT puede dar un sistema de red cerrado inestable. Es posible obtener reglas modificadas de ajuste usando teoría de estabilidad (similares a la regla MIT), en donde la derivada de la sensibilidad (1) se puede reemplazar por otras funciones.

El esquema de MRAS de la Figura 2 se conoce como un método directo, ya que los parámetros son actualizados directamente.

Reguladores Self-Tuning (STR's)

El método de los STR's se conoce como un método indirecto; en general los esquemas de control adaptativos de alta ganancia robusta, los esquemas de sistemas adaptativos auto-oscilantes, los esquemas de sistemas adaptativos por modelo de referencia etcétera, se conocen como métodos directos.

El regulador adaptativo está conformado por dos mallas. En la malla interior, el proceso y un regulador lineal en la realimentación; la

otra malla se compone de un estimador de parámetros recursivo y un diseñador; el diseñador es el encargado de ajustar los parámetros del regulador. Para obtener buena estimación puede ser necesario incluir señales de perturbación.

En la siguiente figura se puede ver el sistema como una automatización del proceso de modelamiento y diseño, en el cual el modelo del proceso y el control diseñado son actualizados en cada período de muestreo.

De lo anterior puede observarse que el controlador automáticamente "sintoniza" sus parámetros para obtener las propiedades deseadas del sistema en red cerrada. El bloque llamado diseñador representa una solución en línea al problema del diseño para un sistema con parámetros conocidos.

La forma como se plantea el control adaptativo puede pensarse como cualquiera de los tres esquemas presentados anteriormente, además de otros que existen pero que no se mencionan aquí; cada una de las técnicas serán ilustradas en próximos artículos con una aplicación específica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark
ADAPTATIVE CONTROL
Editado por Addison- Westly ,
1989
- [2] Karl Johan Astrom,

THEORY AND APPLICATIONS OF ADAPTATIVE CONTROL - A SURVEY

Automática, volumen 20, 1984.

- [3] Zadeh L. A.,
ON THE DEFINITION OF ADAPTIVITY
Proceedings of the IEEE 51:560-570, March 1963

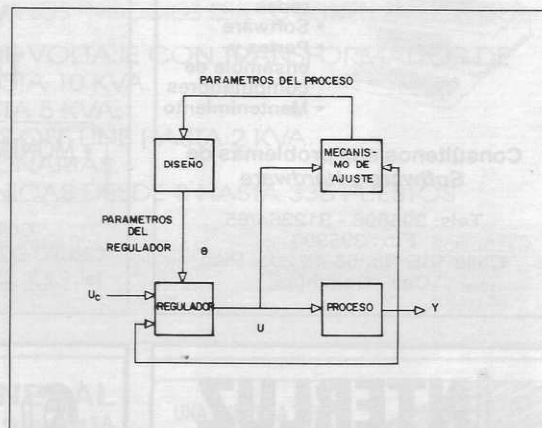


Figura 3. Esquema de control adaptativo PID self-tuning.

*Es más fácil juzgar el ingenio de un hombre por sus preguntas
que por sus respuestas.*

Duc de Levis