

300617
15
24



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERÍA

INCORPORADA A LA U.N.A.M.

AUTOSINTONIZACIÓN DE
CONTROLADORES PID

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

EDUARDO OSUNA OSUNA

ASESOR DE TESIS: ING. GUILLERMO ARANDA PÉREZ

MÉXICO, D.F., 1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1.- ¿ QUÉ ES EL CONTROL ADAPTABLE ?.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Historia del control adaptable.....	4
1.3. ¿ Qué es el control adaptable ?.....	6
1.4. ¿ Porqué el control adaptable ?.....	10
1.5. El problema del control adaptable.....	13
1.6. Teoría del control adaptable.....	14
1.7. Aplicaciones.....	18
Capítulo 2.- ESQUEMAS ADAPTABLES.....	22
2.1. Introducción.....	22
2.2. Control robusto de alta ganancia.....	22
2.3. Sistemas adaptables auto-oscilantes.....	23
2.4. Ganancia programada.....	25
2.5. Regulador autosintonizable.....	27
2.6. Sistemas adaptables con modelo de referencia.....	28
2.7. Estimación de los parámetros en tiempo real.....	29
2.8. Reguladores de sintonización propia.....	30



2.9. Relación entre el modelo de referencia y el regulador de sintonización propia.....	33
2.10. Controladores adaptables directos e indirectos.....	34
Capítulo 3.- MODOS DE CONTROL.....	35
3.1.Introducción.....	35
3.2. Características generales del control on-off.....	36
3.3. Características generales del control proporcional.....	38
3.4. Características generales del control integral.....	46
3.5. Características generales del control derivativo.....	51
3.6. Características generales del control proporcional-integral-derivativo.....	56
Capítulo 4.- DINÁMICA DEL PROCESO Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	60
4.1.Introducción.....	60
4.2. Dinámica del proceso.....	60
4.3. Sintonización de controladores.....	72
Capítulo 5.-AUTOSINTONIZADORES.....	77
5.1.Introducción.....	77
5.2. Métodos de autosintonización.....	78
5.3. Controlador "Exact" de Foxboro.....	86
5.4. Autosintonizador de Satt Control Instruments.....	92



2.9. Relación entre el modelo de referencia y el regulador de sintonización propia.....	33
2.10. Controladores adaptables directos e indirectos.....	34
Capítulo 3.- MODOS DE CONTROL.....	35
3.1. Introducción.....	35
3.2. Características generales del control on-off.....	36
3.3. Características generales del control proporcional.....	38
3.4. Características generales del control integral.....	46
3.5. Características generales del control derivativo.....	51
3.6. Características generales del control proporcional-integral-derivativo.....	56
Capítulo 4.- DINÁMICA DEL PROCESO Y SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	60
4.1. Introducción.....	60
4.2. Dinámica del proceso.....	60
4.3. Sintonización de controladores.....	72
Capítulo 5.- AUTOSINTONIZADORES.....	77
5.1. Introducción.....	77
5.2. Métodos de autosintonización.....	78
5.3. Controlador "Exact" de Foxboro.....	86
5.4. Autosintonizador de Satt Control Instruments.....	92



Indice

CONCLUSIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	103



INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos de los sistemas de control van ligados ampliamente a los avances dentro de la electrónica, de este modo, aquellas teorías que parecían incosteables y tecnológicamente imposibles de realizar, hoy en día, gracias a la rápida evolución de la técnica, se ha hecho accesible su costo apareciendo gran cantidad de controladores dentro de la industria y en el mercado.

Se puede decir que los controladores PID son en realidad la base de gran parte de los sistemas de control, estos controladores han estado presentes dentro de la teoría del control por años y años, aprovechando los avances tecnológicos que se han presentado.

La aparición del microprocesador tuvo un impacto importante dentro de los controladores PID (al igual que en otras áreas de la electrónica), ya que de tener sintonizaciones pobres dentro de los controladores, el microprocesador ofreció la posibilidad de realizar una autosintonización similar a la de un sistema adaptable, tan similar, que algunos autores consideran a la autosintonización como parte del control adaptable.

Es esta misma evolución tan rápida la que ha generado un campo extenso dentro del área de control, imposibilitando a las universidades no solo a actualizar sus programas con la misma velocidad, sino también, provocando que resulte imposible profundizar en



el área de control dentro de una licenciatura.

Es menester entonces, llenar ese vacío, proporcionando un apoyo para aquellos alumnos que se interesen por realizar un estudio adicional a lo que hoy en día se tiene como base dentro de la carrera. La tesis busca servir como guía ilustrativa de como funciona el control dentro de la industria, en ningún momento se busca realizar un análisis matemático detallado, ya que resultaría extenso y escaparía a los propósitos de la investigación.

Dentro de los sistemas que han cobrado auge dentro del control son los sistemas adaptables, los cuales, actualizan los parámetros del controlador continuamente. Se presenta una introducción al control adaptable en el Capítulo 1.

En el Capítulo 2, se exponen diversos esquemas adaptables, incluyendo la autosintonización; proporcionando un visión un poco más profunda de lo que es el control adaptable, dando la oportunidad de realizar una pequeña comparación entre los diversos esquemas.

Como una primera introducción a los controladores PID, el Capítulo 3 contiene los cuatro modos básicos de control (on-off, proporcional, integral y derivativo), ilustrando con ejemplos breves sus principales características.

El Capítulo 4 presenta la sintonización de los controladores con sus etapas: conocimiento de la dinámica del proceso y el diseño del controlador. En ambos casos se



Introducción

tocan dos métodos: respuesta transitoria y respuesta en frecuencia.

Una vez que se preparó al lector con los Capítulos 3 y 4, en el Capítulo 5 se expone la autosintonización, presentando en primera instancia la teoría y a continuación dos controladores comerciales, que a modo de ejemplo ilustran una implantación de toda la teoría.

Como se puede ver, la investigación busca llevar al lector de un bosquejo bastante amplio del control adaptable a un estudio más particular de lo que es la autosintonización.



CAPÍTULO 1

¿ QUÉ ES EL CONTROL ADAPTABLE ?

1.1. INTRODUCCIÓN

En la vida cotidiana, adaptable significa que puede cambiar su comportamiento de acuerdo al medio ambiente que lo rodea. Intuitivamente, un controlador adaptable es aquel que puede cambiar su comportamiento de acuerdo a la dinámica del proceso y a los disturbios externos.

Una definición inicial de un sistema adaptable es la siguiente: un sistema adaptable es cualquier sistema físico que ha sido diseñado con la capacidad de alterar su comportamiento cuando el sistema sufre alteraciones ya sean internas o externas. A simple vista resaltan las ventajas de esta definición. El sistema no sólo responderá a los cambios en el proceso producidos por el ambiente, sino también a los posibles errores de diseño y a las fallas menores de los componentes del sistema.

1.2. HISTORIA DEL CONTROL ADAPTABLE

En los años 50's comenzó una profunda investigación sobre el control adaptable, esto debido a la necesidad de diseñar pilotos automáticos para aviones de alto



¿ Qué es el control adaptable ?

rendimiento. Estos aviones operaban a diversos rangos de velocidades y altitudes, por lo que se encontró que los controladores de ganancia constante y los controladores lineales retroalimentados solamente trabajaban bien en una sola condición de operación. Aquí es donde surge la necesidad de un controlador más sofisticado que tenga un buen desempeño en varios puntos de operación.

En los 60's varias contribuciones a la teoría del control fueron importantes para el desarrollo del control adaptable como son: la teoría de estabilidad, la programación dinámica, se mostraron esquemas nuevos para el control adaptable y para los sistemas con aprendizaje, hubo un gran desarrollo en la estimación de los parámetros y en la identificación de los sistemas.

A principios de los 70's, hubo un nuevo renacimiento del control adaptable cuando se combinaron diferentes esquemas de estimación con algunos métodos de diseño. El comité del IEEE propuso un nuevo vocabulario para definir todo el control adaptable, este nuevo vocabulario incluía términos como: sistema de control auto-organizado ("self-organizing control system" (SOC)), sistema de control auto-organizado con parámetros adaptables ("parameter-adaptive SOC"), sistema de control auto-organizado de desempeño adaptable ("performance-adaptive SOC"), y sistema de control con aprendizaje ("learning control system").

Este tipo de definiciones y de vocabularios no fueron suficientes para poder



¿ Qué es el control adaptable ?

decidir a simple vista si un controlador es o no adaptable. Estos términos aparecieron como consecuencia de que un sistema retroalimentado de ganancia constante no es un sistema adaptable ya que el comportamiento del controlador no se ve afectado por las variaciones de los parámetros del sistema.

El progreso rápido en la microelectrónica ha permitido el desarrollar reguladores adaptables simples y económicos. Hoy en día, el control adaptable se encuentra de nuevo en investigación y desarrollo dentro de las universidades y la industria. Existen ya en el mercado diferentes reguladores adaptables basados en diferentes ideas.

1.3. ¿ QUÉ ES EL CONTROL ADAPTABLE ?

En realidad, el control adaptable es un tipo especial de control retroalimentado no lineal, en el que, los estados del proceso se pueden separar en dos diferentes categorías de acuerdo a la velocidad de cambio. Esto implica dos escalas de tiempo: una escala rápida para el sistema de retroalimentación ordinario y una más lenta para actualizar los parámetros del controlador.

En el control adaptable, se supone que se tiene cierta clase de sistema de control retroalimentado, que indica el desempeño (comportamiento) del sistema para poder medir las variaciones en las condiciones del proceso.

La principal ventaja que ofrece un controlador adaptable sobre un controlador



¿ Qué es el control adaptable ?

convencional, es la de ser capaz de sintonizarse por él mismo hasta el punto óptimo, produciendo en la dinámica del proceso, los cambios necesarios. En realidad, esta es la diferencia más importante para que un sistema pueda llamarse adaptable o no, ya que el sistema debe de tener características de auto-organización que le permitan ajustar sus parámetros, no solamente teniendo en cuenta las variaciones del medio, sino también sus propias variaciones y las del proceso. Esto es, en realidad no altera su comportamiento basandose en un patrón previamente determinado; es por esto, que algunos autores no consideran los controladores de ganancia programada como controladores adaptables, ya que los parámetros se determinan por una tabla sin contar con alguna retroalimentación que proporcione el desempeño del sistema. Un ejemplo claro de esto es el piloto automático de un avión, debido a que su ganancia está basada en la medición directa de la altura de la nave modificandose de acuerdo a las condiciones de presión atmosférica que se definen previamente.

El diseño de los sistemas de control adaptables es conceptualmente simple. Una aproximación aceptable, es la de combinar una técnica para estimar los parámetros del sistema con alguna ley de control que proporciona la relación entrada salida del regulador. Los parámetros estimados se consideran como si fueran los verdaderos parámetros del sistema.

En realidad, la estimación de los parámetros produce una aproximación



¿ Qué es el control adaptable ?

matemática del sistema a controlar. Esta aproximación matemática, junto con la ley de control seleccionada, produce el comportamiento aproximado de lo que puede ser el sistema de control aplicado al proceso real. Con esta aproximación se puede comenzar a generar una serie de algoritmos dependiendo del esquema que se utilizó para estimar los parámetros y del tipo de ley de control que fue usada. Evidentemente no todas las combinaciones (de estimación y leyes) trabajarán bien, por lo que deberemos de concentrarnos en aquellos esquemas que converjan y que muestren propiedades de estabilidad.

Un diagrama general que expone esta aproximación del control adaptable se muestra en la Fig. 1.1. El caso más simple, es el esquema en el que el estimador está en paralelo con el sistema, por lo que toma la entrada de este para poder aplicarla al controlador, el cual, modifica la entrada de ambos para poder comparar su salida y ver fácilmente si el estimador posee un modelo que converja con el sistema. En realidad el estimador proporcionará un comportamiento muy aproximado del proceso.

Si la función de transferencia del proceso se puede identificar en todo momento, se podrá compensar cualquier variación modificando los parámetros del controlador teniendo así un funcionamiento satisfactorio de todo el sistema bajo cualquier alteración externa, interna o del punto de operación.

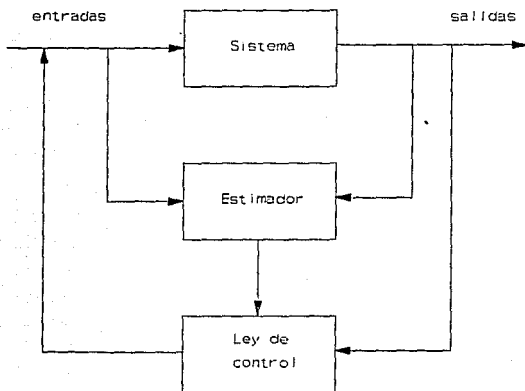


Figura 1.1. Diagrama de bloques de un sistema de control adaptable.

Otro caso que no todos los autores lo consideran como un sistema adaptable, es el de los sistemas con modelo de referencia. En estos sistemas se plantea un modelo a seguir, se compara la respuesta del modelo con la del proceso y la diferencia se aplica como señal de entrada al proceso (Fig. 1.2). Este tipo de sistemas no siempre se considerarán como adaptables ya que en realidad el modelo no posee la capacidad de variar



¿ Qué es el control adaptable ?

sus parámetros. Dentro de los esquemas adaptables propuestos en el Capítulo 2, se considerará un caso con modelo de referencia.

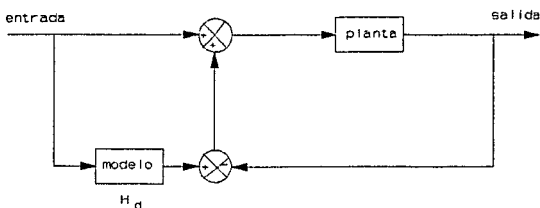


Figura 1.2. Sistema con modelo de referencia.

1.4. ¿ PORQUÉ EL CONTROL ADAPTABLE ?

Uno de los objetivos del control adaptable es el compensar las variaciones de los parámetros del sistema. El regulador más común es el controlador retroalimentado con parámetros fijos o constantes. A través de la retroalimentación es posible disminuir la sensibilidad de los parámetros a las variaciones incrementando la ganancia en el sistema.

El principal inconveniente de los controladores de alta ganancia es, la magnitud de la señal de control y el consiguiente problema de la estabilidad en lazo cerrado. Si hay límites en la incertidumbre de los parámetros del proceso, es posible diseñar controladores robustos incrementando la complejidad del controlador. Para usar esta aproximación es



¿ Qué es el control adaptable ?

necesario conocer la estructura del proceso fielmente y tener limitaciones en las variaciones de los parámetros.

Los principales conceptos de la teoría convencional del control se basan generalmente en sistemas lineales que tienen parámetros constantes. Esta es una buena aproximación para sistemas que son regulados en puntos fijos de operación, ya que si se cuenta con un buen controlador, los disturbios moderados producirán desviaciones pequeñas que no afectaran de manera considerable la respuesta del sistema. Sin embargo, la aproximación con coeficientes lineales constantes no siempre será satisfactoria cuando las condiciones de operación cambien. Esto implica que el sistema retroalimentado con ganancia constante se vuelve insuficiente para resolver algunos problemas de control.

El sistema retroalimentado tiene, por sí mismo, la habilidad de hacer frente a las variaciones de los parámetros. El diseñar un sistema insensible a las variaciones de los parámetros en realidad lleva al concepto de sistema robusto, por lo que el sistema también se vuelve insensible a los errores de diseño.

Encontrar el equilibrio entre la robustez y el desempeño es un elemento importante para el diseño del control. Como se recordará, la función de transferencia en lazo cerrado es:



¿ Qué es el control adaptable ?

$$G_c = \frac{G_o}{1+G_o} = 1 - \frac{1}{1+G_o} = 1 - S$$

donde: G_c = función de transferencia en lazo cerrado,

G_o = función de transferencia en lazo abierto y

S = función de sensibilidad.

entonces: $S + G_c = 1$

Para obtener un buen desempeño en el control es deseable tener una sensibilidad baja, pero S y G_c no pueden ser simultáneamente pequeños, por lo que para tener un buen desempeño la robustez debe ser sacrificada y viceversa.

El elemento clave en el diseño de sistemas de control con ganancia constante es determinar los rangos de frecuencia en los cuales la robustez y el desempeño tienen un equilibrio. La importancia de conseguir este equilibrio es que la incertidumbre a los cambios del modelo se reduce.

De acuerdo a todo lo anterior, se puede decir entonces, que las ventajas del control adaptable son las siguientes:

- Alta capacidad de respuesta en diversos rangos de operación
- Compensar las variaciones producidas por disturbios externos e internos no previstos en el diseño
- Corregir los errores de diseño y de implantación



1.5. EL PROBLEMA DEL CONTROL ADAPTABLE

Los procesos industriales típicos son tan complejos, que las variaciones de los parámetros no pueden determinarse a partir de principios simples. Por tanto, puede ser un aliciente para llevar los esfuerzos de la ingeniería a tener más inteligencia en los controladores. Un controlador más complejo se debe usar en diferentes procesos y el gasto en el desarrollo puede ser absorbido por varias aplicaciones. Sin embargo, debe de quedar en claro que el uso de un controlador adaptable no debe de reemplazar el tener un buen conocimiento del proceso, el cual es necesario para escoger las especificaciones, la estructura del controlador y el método de diseño.

Como una introducción a la presentación de los esquemas adaptables que se exponen en el Capítulo 2, se puede decir que un controlador adaptable contiene:

- Una ley de control con parámetros ajustables
- Una caracterización de la respuesta del sistema en lazo cerrado (modelo de referencia o especificaciones para el diseño)
- Procedimiento de diseño
- Actualización de los parámetros basandose en las mediciones
- Realización de la ley de control

Estas partes son un poco diferentes para cada uno de los esquemas adaptables pero tienen muchas cosas en común.



¿ Qué es el control adaptable ?

El diseño y el análisis de los controladores adaptables pueden tener éxito usando tanto tiempo continuo como discreto. Históricamente, los sistemas adaptables con modelo de referencia (Cap. 2) han sido diseñados para tiempo continuo mientras que los reguladores con sintonización propia (Cap. 2) han sido diseñados para modelos en tiempo discreto. Sin embargo, no debe perderse de vista que los sistemas adaptables con modelo de referencia pueden ser realizados usando modelos en tiempo discreto y también es posible hacer modelos en tiempo continuo con los reguladores con sintonización propia. Algunas investigaciones han usado también modelos híbridos en los que el diseño y el análisis es hecho en tiempo continuo, mientras que la realización se hace en tiempo discreto.

Existe actualmente una brecha entre la teoría y la práctica en el control adaptable. En la teoría es posible el manejar solamente situaciones ideales. Por ejemplo, se asume frecuentemente que el orden de los procesos es conocido. En la práctica se han usado algoritmos complejos: se han introducido ajustes específicos del proceso para manejar posibles dificultades encontradas, a través del análisis o de la experiencia en las aplicaciones.

1.6. TEORÍA DEL CONTROL ADAPTABLE

Los sistemas adaptables son inherentemente no lineales. Su comportamiento es por



¿ Qué es el control adaptable ?

lo tanto completamente complejo, lo cual los hace difíciles de analizar. El avance en la teoría ha sido lento. De hecho, para que exista una teoría completa y coherente hace falta trabajar aún más.

Debido al complejo comportamiento de los sistemas adaptables es necesario considerar muchos puntos de vista. La comprensión de los siguientes temas es de gran ayuda para entender los sistemas adaptables: teoría de sistemas no lineales, estabilidad, identificación de sistemas, estimación recursiva de los parámetros ("recursive parameter estimation"), control óptimo y el control estocástico ("stochastic control").

1.6.1. Teoría de sistemas no lineales

Es interesante encontrar las reglas de ajuste de parámetros más sencillas que puedan ser usadas en los sistemas adaptables.

El hecho de que los sistemas adaptables no sean lineales, tiene muchas consecuencias, por ejemplo, los conceptos de estabilidad para ecuaciones diferenciales no lineales, refieren su estabilidad para una solución en particular. Esto es, existen soluciones estables y no estables para un mismo problema. En consecuencia es en casos excepcionales en los cuales podemos hablar de un sistema estable. Debido a que es difícil obtener resultados globales para sistemas no lineales, frecuentemente es suficiente con tener resultados satisfactorios para casos particulares. Esto significa que las soluciones de



¿ Qué es el control adaptable ?

equilibrio se determinan primero, después el comportamiento particular se obtiene mediante linealización.

La teoría de los sistemas adaptables tiene muchas metas. Es deseable el tener herramientas para analizar sistemas dados así como herramientas para diseñarlos. Un problema típico es el diseñar las reglas de ajuste de los parámetros las cuales nos darán la garantía de la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Como se mencionó al principio, muchas herramientas teóricas pueden ser usadas para este propósito.

1.6.2. Adaptación y sintonización

Es importante el separar los problemas de sintonización de los de adaptación. En los problemas de sintonización se asume que el proceso a ser controlado tiene parámetros constantes pero desconocidos. En el problema de adaptación se asume que los parámetros están variando. Muchos problemas son más fáciles de manejar en el campo de la sintonización. El problema de la convergencia es el investigar si los parámetros convergen a los valores verdaderos.

El problema de la convergencia en el caso adaptable es mucho más difícil porque los valores verdaderos están cambiando. La estimación de los algoritmos es similar para la sintonización y la adaptación.



¿ Qué es el control adaptable ?

1.6.3. Estabilidad

La estabilidad es un requisito básico en un sistema de control. Al diseñar un sistema de control se debe poder predecir el comportamiento dinámico del sistema por el conocimiento de sus partes. La característica más importante del comportamiento dinámico de un sistema es la estabilidad absoluta, es decir, si el sistema es estable o inestable.

Un sistema está en equilibrio si, en ausencia de cualquier perturbación o entrada, la salida se mantiene en el mismo estado. Un sistema de control es estable si la salida regresa a su estado de equilibrio cuando el sistema es sometido a una perturbación.

Se ha dedicado mucho esfuerzo a analizar la estabilidad en los sistemas adaptables. La teoría de la estabilidad ha sido la mayor fuente de inspiración para el desarrollo de los sistemas adaptables con modelo de referencia. Sin embargo, no tiene aplicación con los sistemas de ganancia programada.

1.6.4. Convergencia de los parámetros

La teoría de la estimación de los parámetros proporciona otro punto de vista sobre los sistemas adaptables. Este planteamiento es natural de los reguladores con sintonización propia. El planteamiento tomado es para explorar las condiciones bajo las cuales los parámetros del estimador serán construidos para el sistema adaptable en el que trabajarán.



¿ Qué es el control adaptable ?

Este planteamiento llevará naturalmente hacia las condiciones (en excitación persistente) que aseguren que las señales de entrada cambien lo suficiente. Esto debe entenderse intuitivamente, porque es imposible determinar la dinámica del proceso a partir de un experimento en el que la entrada del proceso es cero o no cambie.

El planteamiento de la estimación de los parámetros también lleva hacia la pregunta respecto a la identificabilidad de las condiciones del sistema bajo las condiciones en lazo cerrado.

1.7. APLICACIONES

Existen numerosas aplicaciones del control adaptable retroalimentado desde mediados de los años 50[´]s. Los primeros experimentos, los cuales usaban realizaciones analógicas, tuvieron muchos problemas en el equipo. Los sistemas desarrollados usando minicomputadoras aparecieron a principios de los años 70[´]s. El número de aplicaciones se incrementó drásticamente con la llegada del microprocesador, cuyo costo las hizo accesibles.

Un gran número de lazos de control industriales están bajo el control adaptable. Esto incluye un amplio rango de aplicaciones en aviación, control de procesos, robótica y otros sistemas de control industriales.

Las técnicas adaptables están siendo usadas en numerosos productos. La ganancia



¿ Qué es el control adaptable ?

programada es el método estándar para el diseño de sistemas de control de vuelo para aviones de alto desempeño, también es usado en procesos industriales. Los sistemas adaptables auto-oscilantes han sido usados en sistemas de control de misiles por largo tiempo. Muchos pilotos automáticos comerciales para dirección de naves están basados en el control adaptable. Existen manejadores de motores adaptables, sistemas adaptables para robots industriales, sistemas adaptables para productos de biomédica. Para aplicaciones de control de procesos existen sistemas adaptables de propósito general como también los hay dedicados o sistemas de propósito especial.

Basado en los productos que han aparecido en el mercado, es claro que las técnicas adaptables han sido usadas en diferentes formas.

A pesar de que el trabajo en auto-sintonizadores inicio después que los trabajos en control adaptable, hoy en día cuentan con aceptación industrial. Una razón para esto es que los auto-sintonizadores son útiles y además son simples de aplicar. Los auto-sintonizadores son una aplicación de los controladores PID en lazo sencillo así como también en los controladores PID en paquetes de control digital directo (DDC). Un regulador ordinario puede ser observado como una automatización de las actividades de un operador de proceso; la auto-sintonización puede ser vista como el siguiente nivel de la automatización en la que las actividades de un ingeniero instrumentista son automatizadas. A pesar de que la auto-sintonización se usa comúnmente en la aplicación



¿ Qué es el control adaptable ?

de reguladores simples, también es útil para reguladores más complicados. Es de hecho un prerequisite para un uso difundido de algoritmos de control avanzados. Un mecanismo auto-sintonizado es frecuentemente necesario para obtener la correcta escala de tiempo y para encontrar el valor de arranque para un controlador adaptable más complejo. La principal ventaja de usar un auto-sintonizador es que simplifica la sintonización drásticamente y esto contribuye a mejorar la calidad del control.

Las técnicas adaptables también se usan para controles adaptables de sistemas con parámetros variables en el tiempo. Existen muchas formas de hacer esto. La interfaz con el operador es importante, ya que los reguladores adaptables también deben de tener parámetros que se deben escoger. La experiencia ha sido que los reguladores sin ningún parámetro de ajuste externo pueden ser diseñados para aplicaciones específicas, donde el propósito del control puede ser formulado a priori. Los pilotos automáticos para misiles y naves son un ejemplo típico. Sin embargo, en muchos casos no es posible especificar el propósito del control a priori. Es al menos necesario decir lo que se espera del regulador. Esto puede hacerse introduciendo botones de sintonización que nos den las propiedades deseadas del sistema en lazo cerrado. Estos botones de sintonización se relacionan con el desempeño. Nuevos tipos de reguladores pueden ser diseñados con este concepto. Por ejemplo, es posible tener un regulador con un botón de sintonización etiquetado con el ancho de banda deseado para el lazo cerrado del sistema. La adaptación



¿ Qué es el control adaptable ?

puede ser también combinada con la tabla de ganancia. Una tabla de ganancia puede usarse para obtener rápidamente los parámetros en la región correcta y la adaptación para una sintonización fina.

Un regulador adaptable es inherentemente no lineal, es más complicado que un controlador de ganancia fija. Antes de tratar de usar el control adaptable, es importante investigar si el problema de control puede ser resuelto por un controlador de ganancia constante. En las aplicaciones del control adaptable hay muchos casos donde un controlador de ganancia constante puede trabajar tan bien como un controlador adaptable.

No es posible juzgar la necesidad del control adaptable a partir de las variaciones de la dinámica del lazo abierto cuando está más allá del rango de operación. Hay muchos casos en los cuales un controlador de ganancia constante puede funcionar bien con variaciones considerables en la dinámica del sistema. Sin embargo, para algunos problemas es requerido frecuentemente solamente un modesto esfuerzo para obtener un regulador adaptable de propósito general para trabajar bien.



CAPITULO 2

ESQUEMAS ADAPTABLES

2.1. INTRODUCCIÓN

El control adaptable, cuenta con diversos esquemas para solucionar los diferentes problemas de diseño que se originan durante el análisis de un proceso que estará sujeto a controladores adaptables.

Las ideas expuestas para cada esquema proporcionan sus características básicas, su factibilidad de implantación, además de las necesidades y precauciones a tomar durante su implantación.

2.2. CONTROL ROBUSTO DE ALTA GANANCIA ("Robust High-gain control")

El diagrama de bloques del regulador robusto de alta ganancia se presenta en la Fig. 2.1.

Como se puede ver es un controlador retroalimentado de alta ganancia que provoca que la salida y siga la señal de referencia y_m más allá del ancho de banda del proceso, el cual cambia con la dinámica del proceso.

El modelo proporciona el desempeño deseado en la trayectoria directa. Si el ancho



de banda del modelo es menor que el ancho de banda del proceso y la dinámica del proceso cambia, la salida y responderá a la señal U_c como una especificación del modelo, es decir, el desempeño del sistema estará dado por el modelo.

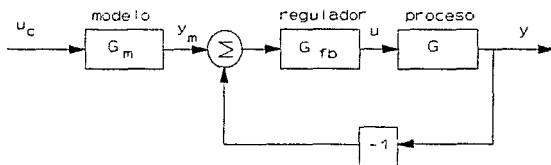


Figura 2.1. Diagrama de bloques de un sistema robusto de alta ganancia.

El problema es el diseñar el lazo de retroalimentación y el modelo de la trayectoria directa de tal forma que la estabilidad y el desempeño se mantengan a pesar de las variaciones del proceso.

El sistema que se presenta en la Fig. 2.1, es llamado: "sistema de dos grados de libertad" ya que la estabilidad y el desempeño están en función de la ganancia y el ancho de banda, respectivamente.

2.3. SISTEMAS ADAPTABLES AUTO-OSCILANTES ("Self-oscillating Adaptive Systems SOAS's")

El sistema adaptable auto-oscilante tiene la misma estructura que el sistema de



alta-ganancia. Sin embargo, el ancho de banda del lazo de retroalimentación, se ajusta automáticamente para ser lo más grande posible. El diagrama de bloques se muestra en la Fig. 2.2.

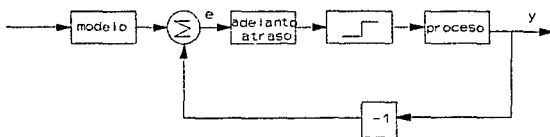


Figura 2.2. Diagrama de bloques de un sistema adaptable auto oscilante.

El lazo de alta ganancia se mantiene introduciendo un relevador en el lazo de retroalimentación, esto crea un ciclo de oscilación limite ("limit cycle oscillation").

Es importante notar que el sistema siempre estará excitado por el ciclo de oscilación limite. La frecuencia de esta oscilación puede estar influenciada por el filtro adelanto-atraso. La amplitud de la oscilación puede ajustarse cambiando la amplitud del relevador. En realidad, el ciclo de oscilación limite se establece para mantener dos polos del lazo cerrado sobre el eje imaginario ($j\omega$), de tal forma, que el lazo se mantenga estable a pesar de la alta ganancia.

Hay muchas variaciones del sistema básico de control adaptable auto-oscilante. Algunos tienen la intención de ajustar la amplitud del ciclo limite mediante una



retroalimentación. Sin embargo, si la amplitud del relevador es demasiado pequeña, la respuesta a las señales de referencia serán muy lentas. También existen otros sistemas que suprimen las oscilaciones del relevador por medio de una señal digital.

2.4. GANANCIA PROGRAMADA ("Gain Scheduling")

El control adaptable no es la solución para todos los problemas de control, por esto es apropiado el conocer algunas alternativas al control adaptable. La ganancia programada es una clase especial de adaptación en lazo abierto que modifica los parámetros del regulador.

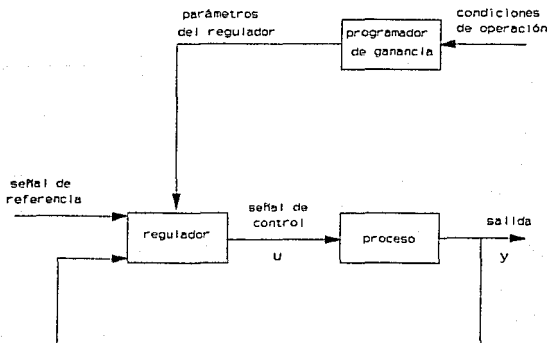


Figura 2.3 Diagrama de bloques de un sistema con ganancia programada.



En algunos sistemas existen variables auxiliares que se relacionan con la dinámica del proceso. Si estas variables se pueden medir, se podrán utilizar para cambiar los parámetros del regulador. Esta aproximación se llama ganancia programada, debido a que este esquema fue usado originalmente para ajustar los cambios en la ganancia del proceso. El diagrama de bloques de un sistema con ganancia programada se muestra en la Fig.2.3.

La ganancia programada es una compensación en lazo abierto que puede ser vista como un sistema con control retroalimentado en el que las ganancias de retroalimentación se ajustan por medio de la compensación en la trayectoria directa o en la prealimentación. Esta no es una retroalimentación del desempeño (comportamiento) del sistema a lazo cerrado, que compense un error en la selección de la ganancia.

El concepto de una ganancia programada se originó del desarrollo de los sistemas de control de vuelo. En esta aplicación la velocidad (el número de Mach) y la presión dinámica se miden por medio de un sensor de aire y se utilizan como entradas a la tabla de ganancia.

En procesos de control de producción, la velocidad de producción se puede escoger frecuentemente como la variable de la tabla, ya que las constantes de tiempo y los atrasos son normalmente inversamente proporcionales a la velocidad de producción.

Como se mencionó en un principio, existe una controversia sobre si las tablas de ganancia son en realidad sistemas de control adaptable, debido a que los parámetros son



cambiados en lazo abierto. Sin embargo, las tablas de ganancia son una técnica muy usual para reducir los efectos de la variación de los parámetros.

2.5. REGULADOR AUTOSINTONIZABLE ("Autotuning")

El controlador PID simple es adecuado en muchas aplicaciones. Estos controladores se sintonizan tradicionalmente usando experimentos y reglas empíricas muy simples. Muchas técnicas adaptables aplican controladores PID y especialmente métodos para sintonización automática.

La sintonización se basa usualmente en un método experimental, en el que se aplican señales de prueba como escalones o pulsos. También se utilizan disturbios naturales (simulados). Los parámetros del regulador se pueden determinar a partir de experimentos usando las reglas estándares para la sintonización de controladores PID.

Una clase especial de autosintonizadores se obtiene usando relevadores retroalimentados ("relay feedback"). La información sobre la dinámica del proceso se obtiene a partir del ciclo de oscilación límite obtenido. Este tipo de auto-sintonización está relacionado con el sistema adaptable auto-oscilante.

Una ventaja de la auto-sintonización es que puede ser iniciada y supervisada por un operador. La confiabilidad del proceso puede ser tan simple como ajustar los parámetros continuamente.



El regulador auto-sintonizable se expone a detalle en el capítulo 5.

2.6. SISTEMAS ADAPTABLES CON MODELO DE REFERENCIA ("Model-reference Adaptive Systems", MRAS)

El sistema adaptable con modelo de referencia fue propuesto originalmente para resolver problemas en los que las especificaciones están dadas en función de un modelo de referencia. Este modelo indica cómo la salida del proceso deberá responder de manera ideal a la señal de referencia. El diagrama de bloques del sistema se muestra en la Fig. 2.4.

En este caso el modelo de referencia está en paralelo con el sistema en lugar que en serie, como en el sistema adaptable auto-oscilante. El regulador consiste en dos lazos: un lazo interno, que es un lazo ordinario de retroalimentación compuesto por el proceso y el regulador. Los parámetros del regulador se ajustan por medio del lazo externo, de forma que el error entre la salida del proceso y la salida del modelo y_m tienda a ser pequeña. De esta forma, el lazo externo es un lazo regulador.

El modelo de referencia tiene dos ideas básicas: el desempeño del sistema es especificado por el modelo y los parámetros del regulador se ajustan basándose en el error entre el modelo de referencia y la salida del sistema.

La clave del problema es el determinar el mecanismo de ajuste que haga estable



al sistema y que haga al error igual a cero.

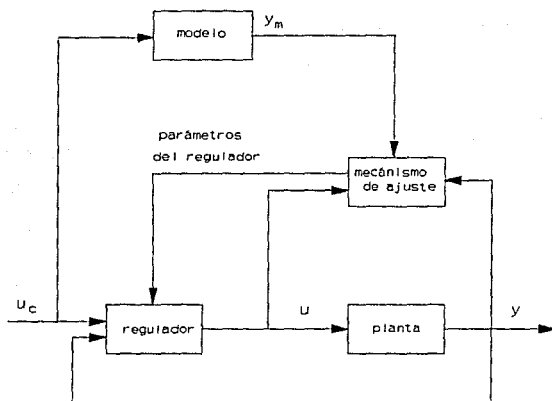


Figura 2.4. Diagrama de bloques del sistema adaptable con modelo de referencia.

2.7. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN TIEMPO REAL ("Real-Time Parameter Estimation")

La determinación en línea de los parámetros del proceso es un elemento clave en el control adaptable. Es parte importante del regulador con sintonización propia (Fig. 2.5) y también se encuentra explícito en el sistema con modelo de referencia. En los sistemas



adaptables, la estimación de los parámetros es parte de la identificación del sistema.

Los elementos importantes en la identificación del sistema son la selección de la estructura del modelo, el diseño del experimento y la estimación de los parámetros. En los sistemas adaptables la identificación del sistema se hace automáticamente, por lo que es importante conocer y entender todos los aspectos del sistema. Los problemas de identificación se simplifican si los parámetros del modelo son lineales.

En el control adaptable los parámetros del proceso cambian continuamente por lo que es necesario tener métodos de estimación que actualicen los parámetros recursivamente. En la resolución de los problemas de identificación es muy importante el validar los resultados. Esto es más importante para los sistemas adaptables ya que, como ya se mencionó, la identificación se hace automáticamente.

Un estimador de tiempo real es una parte central en muchos de los controladores adaptables. Hay muchas alternativas para hacer un estimador de tiempo real, tanto para tiempo continuo como para discreto.

2.8. REGULADORES DE SINTONIZACIÓN PROPIA ("Self-tuning regulators", STR's)

Los esquemas anteriores se llaman métodos directos, porque las reglas de ajuste, indican directamente como se deben ajustar los parámetros del regulador. Un esquema



diferente se obtiene si los parámetros del proceso se actualizan y los parámetros del regulador se obtienen a partir de la solución del problema de diseño.

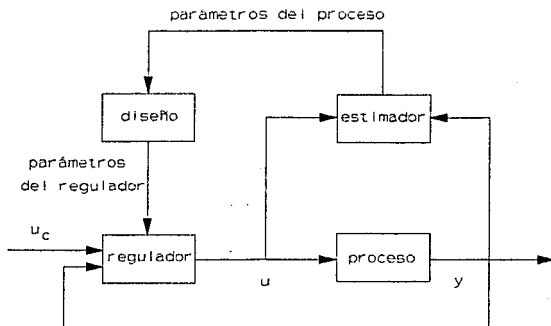


Figura 2.5. Diagrama de bloques de un regulador con sintonización propia.

En los sistemas adaptables se asume que los parámetros del regulador se ajustan en cada instante. Esto implica que los parámetros del regulador siguen los cambios del proceso. Sin embargo, es difícil analizar las propiedades de convergencia y estabilidad de estos sistemas. Para simplificar el problema se puede suponer que el proceso tiene parámetros constantes pero desconocidos. Cuando el proceso es conocido, el procedimiento de diseño especifica un conjunto de parámetros del controlador. El



controlador adaptable deberá de converger a los valores de estos parámetros aún cuando el proceso es desconocido. Un controlador con estas características es llamado regulador con sintonización propia para enfatizar que el controlador automáticamente sintoniza los parámetros para obtener las propiedades deseadas del sistema en lazo cerrado.

El diagrama de bloques se muestra en la Fig. 2.5.

El regulador adaptable puede ser visto como una composición de dos lazos. El lazo interno consiste en la señal del proceso y un regulador lineal retroalimentado. Los parámetros del regulador se ajustan por medio del lazo externo, el cual está compuesto por un estimador recursivo de los parámetros y los cálculos de diseño.

Para obtener mejores estimaciones es necesario introducir señales de perturbación (ruido), esto no se muestra en la Fig. 2.5 con la idea de hacer más simple el diagrama.

Es importante notar que el sistema puede ser visto como una automatización del modelado del proceso y el diseño, en el que el modelo del proceso y el diseño del control se actualizan en cada periodo de muestreo.

El bloque llamado "diseño" en la Fig. 2.5, representa una solución en línea a un problema de diseño para un sistema con parámetros conocidos. Esta es la parte fundamental del problema de diseño. Este mismo problema puede asociarse con la mayoría de los esquemas de control adaptable, pero frecuentemente es tomado indirectamente.



Para evaluar los esquemas de control adaptable, es útil encontrar el problema fundamental de diseño, porque este dará las características del sistema bajo las condiciones ideales cuando los parámetros son conocidos exactamente.

El esquema de sintonización propia es muy flexible con respecto a la elección del problema fundamental de diseño y los métodos de estimación. Se pueden analizar muchas combinaciones. Los parámetros del regulador se actualizan indirectamente a través de los cálculos de diseño en el sintonizador propio de la Fig. 2.5. En algunas ocasiones es posible reparametrizar el proceso de tal modo que el modelo puede ser expresado en función de los parámetros del regulador. Esto nos da una simplificación significativa del algoritmo porque los cálculos de diseño se eliminan. Debido a esto el bloque "diseño" de la Fig. 2.5 desaparece y los parámetros del regulador son actualizados directamente.

2.9. RELACIÓN ENTRE EL MODELO DE REFERENCIA Y EL REGULADOR DE SINTONIZACIÓN PROPIA

El modelo de referencia se originó a partir de un problema determinado y el regulador de sintonización propia a partir de un problema estocástico de regulación. A diferencia de sus distintos orígenes, es claro de acuerdo a la Fig. 2.4 y Fig. 2.5, que están muy relacionados. Ambos sistemas tienen dos lazos de retroalimentación. El lazo interno es una retroalimentación ordinaria del proceso con un regulador. El regulador



tiene parámetros ajustables, los cuales se ajustan por el lazo externo. Los ajustes se basan en las salidas y entradas del proceso. Sin embargo, los métodos de diseño para el lazo interno y la técnicas usadas para ajustar los parámetros en lazo externo son diferentes. En el modelo de referencia los parámetros del regulador se actualizan directamente. En el regulador con sintonización propia los parámetros del regulador se actualizan indirectamente por medio de los cálculos de diseño y la estimación de los parámetros. Esta diferencia es, sin embargo, no fundamental porque el regulador con sintonización propia puede ser modificado de tal forma que los parámetros del regulador sean actualizados directamente.

2.10. CONTROLADORES ADAPTABLES DIRECTOS E INDIRECTOS

En la exposición del sistema adaptable con modelo de referencia y en el regulador de sintonización propia se señaló que hay una elección sobre lo que hay que estimar. En los algoritmos directos, los parámetros del controlador se actualizan directamente. Si los parámetros del controlador se obtienen indirectamente por medio de un procedimiento de diseño (Fig. 2.5), se usa el término algoritmo indirecto. Sin embargo, algunas veces es posible reparametrizar el modelo del proceso de tal modo que es posible usar un controlador directo o uno indirecto (cualquiera de los dos).



llevar la variable controlada al valor deseado.

Un modo de control es una respuesta particular de un controlador a los cambios en el error o en la variable controlada. Las cuatro respuestas básicas son: on-off (dos posiciones), proporcional, integral y derivativo.

Muchas variantes se han desarrollado para solucionar problemas específicos de control. En el futuro, la flexibilidad de los algoritmos digitales incrementarán la especialización y diversidad de los controladores, sin embargo, los sistemas de control simples estarán basados en estos cuatro modos básicos de respuesta.

3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONTROL ON-OFF

El control on-off o de dos posiciones es la forma más simple de respuesta en un lazo de control. La Fig. 3.1, muestra el desempeño de un proceso en el cual se calienta un líquido.

Una función de control on-off tiene solamente dos valores de salidas posibles (on, 100%; off, 0%), y solo considera la señal de error (no es necesario ajustar ningún parámetro). En el ejemplo, el controlador cierra la válvula de paso cuando la temperatura es mayor que el punto de ajuste (Fig. 3.1b). Debido a los tiempos muertos y los atrasos en el proceso, la temperatura sigue incrementándose a pesar de que la válvula ya fue cerrada, decreciendo posteriormente. Cuando la temperatura esta por debajo del punto de



CAPITULO 3

MODOS DE CONTROL

3.1. INTRODUCCIÓN

El entendimiento de los diversos modos de un controlador es esencial para tener una aplicación exitosa del control retroalimentado. En un controlador retroalimentado debe seleccionarse la acción de control apropiada para establecer una retroalimentación negativa. De este modo, el controlador podrá resolver el problema de control manejando su salida de acuerdo a la señal de error para obtener un balance entre todos los disturbios del proceso y la variable controlada. Una vez seleccionado el modo de control apropiado, el siguiente objetivo será establecer la magnitud de la respuesta del controlador.

Un controlador en un lazo retroalimentado debe tomar en cuenta todos los disturbios predecibles que pueden influir en las mediciones de la variable que se intenta controlar. En el mejor de los casos, las características dinámicas del resto del lazo producirán un retraso y una distorsión en la señal que utiliza el controlador para reducir el error. Visto de esta forma, parecería que el controlador es impuesto sobre el proceso, pero en realidad la relación entre el controlador y el proceso es biunívoca. De aquí que las características de la señal de salida del controlador sean cruciales para que se pueda

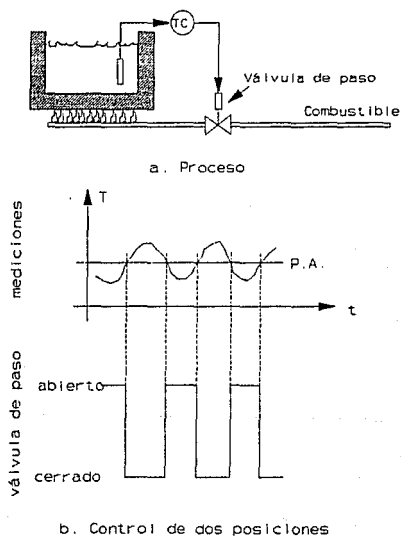


Figura 3.1. Comportamiento del control on-off.

ajuste, el controlador abre la válvula de paso. De nuevo, los tiempos muertos y los atrasos en el proceso no permiten un cambio instantaneo en la temperatura, esta comienza



a incrementarse hasta ser mayor que el punto de ajuste y el ciclo comienza entonces a repetirse.

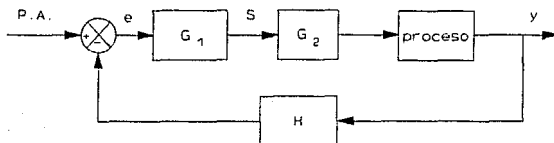
Los ciclos son la condición normal de un sistema que se encuentra bajo el control on-off. Esta limitante existe porque con solo dos salidas posibles, el controlador no podrá solucionar el problema de control exactamente.

La principal desventaja del control on-off es el ciclo límite constante, pero la principal ventaja es el bajo costo.

3.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONTROL PROPORCIONAL

Por definición, el controlador proporcional ideal tiene para la función de transferencia $G1$ de la Fig. 3.2, el valor de una simple ganancia constante K_p ; esto es, la señal de control S es directamente proporcional a la señal de error e .

En el campo del control de procesos, el término "banda proporcional" (PB) se usa para especificar el ambiente del controlador. Una banda proporcional del 10% significa que un cambio del 10% en la señal de entrada del controlador producirá un cambio a escala total (100%) en la salida del controlador. La relación de conversión es entonces: $K_p = 100/PB$, suponiendo que las señales de entrada y la salida del controlador son el mismo tipo de variable física (voltaje o presión de aire, etc).



donde: G_1 es el modo de control
 G_2 es el elemento final de control

Figura 3.2. Diagrama de bloques generalizado de un sistema de control retroalimentado.

La Fig. 3.3, es una representación gráfica de la acción proporcional. Sin importar como esta acción se produce (neumática, analógica o digitalmente), este efecto debe verse como un vector de dos puntas que se encuentra pivoteado en el centro (para un $PB=100\%$) y moviéndose a lo largo de dos escalas: una de error y una de salida. Los cambios en la variable controlada producirán un error ($\text{error} = \text{punto de ajuste} - \text{variable controlada}$), el cual moverá el extremo izquierdo del vector a dicho error produciéndose el consiguiente movimiento del extremo derecho del vector hacia el valor de salida del controlador. La Fig. 3.3, muestra una salida para una acción proporcional inversa (incremento-decremento), si la acción se cambia a directa (incremento-incremento), la



salida del controlador se invierte.

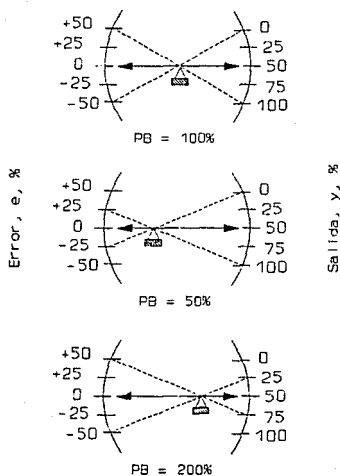


Figura 3.3. Comportamiento de la acción proporcional.

La banda proporcional y la ganancia G (K_p), indican la fuerza con que responderá el controlador al error. La ubicación del pivote fija el valor de salida del controlador.



La Fig. 3.3, también ilustra el concepto de polarización proporcional ("proporcional bias"). Sin importar el valor de PB, la salida del controlador será 50% cuando el error sea cero. La polarización proporcional indica el valor alrededor del cual el controlador podrá variar su salida para reducir el error. Esta polarización proporcional puede ajustarla el operador del proceso.

Como se aprecia en la Fig 3.3, un cambio en el error producirá inmediatamente una respuesta en la señal de salida, lo que indica que el control proporcional no presenta atrasos en su respuesta. Además, para cada valor de error, corresponde un valor a la salida, es decir, es una relación uno a uno entre el error y la salida. Esta es una limitante fuerte en el desempeño del control proporcional.

Un controlador real tendrá, por supuesto, una dinámica mayor, pero se supone que esta es despreciable comparada con otras dinámicas del sistema. De esta forma el modo de control suena razonable: la señal de control se hará proporcional al error del sistema, errores grandes producirán una respuesta más fuerte del sistema que los errores pequeños.

A diferencia de un controlador con relevador (controlador on-off), un controlador proporcional puede variar en modos continuos la energía y/o el material enviado al proceso que se controla. Esta es exactamente lo que se necesita, en vez de tener el ciclo de un lado a otro entre dos (o tres) niveles fijos. De este modo, aunque el comportamiento del ciclo limite es tolerado en los sistemas de control on-off, esto nunca



será en un sistema de control proporcional. Lo que no significa que los sistemas de control proporcional nunca sean inestables, definitivamente pueden ser inestables, sin embargo, la estabilidad no deberá aceptarse y el sistema deberá ser rediseñado para que sea estable. Esta estabilidad (que le falta al ciclo límite) es la principal ventaja del control proporcional sobre el on-off. Algunas desventajas del control proporcional con respecto al on-off, es la mayor complejidad y el mayor costo.

El control proporcional presenta un error en estado estacionario no cero. Tal error en estado estacionario (algunos lo llaman "offset" o "corrimiento") es por supuesto, no un defecto fatal, sino una especificación realista sobre el desempeño del controlador. Sin embargo, otros modos de control (principalmente el integral), teóricamente podrán remover este error en estado estacionario, por lo que este aspecto del comportamiento del control proporcional es significativo cuando se escoge un modo de control. Este error en estado estacionario podrá entenderse mejor analizando el siguiente ejemplo:

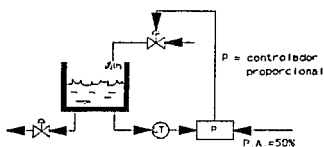
Supongase que se tiene un proceso en el que se controla el nivel de agua (Fig. 3.4a). Para controlar el nivel, el controlador deberá balancear el flujo de salida y el flujo de entrada manipulando el flujo de entrada. Este proceso requiere una acción inversa. Ambos flujos varían desde 0 a 100%, el punto de ajuste del controlador es 50% y la banda proporcional es de 100%.

Como punto de inicio, el flujo de salida es igual al 50% (Fig. 3.4b) y el nivel se

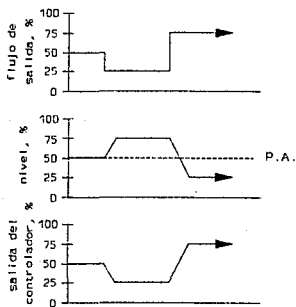


Modos de control

encuentra en el punto de ajuste, por lo que la salida del controlador también estará al 50%, el flujo de salida será entonces igual al flujo de entrada y el nivel se mantendrá constante.



a. Proceso



b. Comportamiento del proceso

Figura 3.4. Proceso sometido a control proporcional.



Posteriormente, el flujo de salida se reduce a un 25%. Debido a que el flujo de salida es menor al flujo de entrada, el nivel del tanque comienza a aumentar, por lo que el error es negativo. Observando el comportamiento de la salida del controlador en la Fig 3.3, cuando $PB=100\%$, se puede apreciar que cuando el error se hace negativo, producirá un decremento en la salida del controlador. Este decremento en la salida del controlador producirá una reducción en el flujo de entrada (esta acción es inmediata al cambio en el flujo de salida). Esta acción llevará gradualmente al flujo de entrada a un equilibrio con el flujo de salida con lo que el nivel del tanque se estabilizará.

El controlador no podrá regresar al punto de ajuste, aunque el nivel del tanque sea constante. Esta diferencia es el error de estado estacionario. De igual manera el error se produce si se incrementa a un 75% el flujo de salida, ya que el nivel caerá a un 25% del punto de ajuste (Fig.3.4b), presentandose de nuevo el error de estado estacionario.

Este error se presenta porque la polarización proporcional es fija. Cambiar esta polarización proporcional para que la respuesta del controlador pueda regresar al punto de ajuste se llama "reset manual".

En la Fig. 3.5 se muestra el efecto de diferentes bandas proporcionales en la respuesta del controlador:

- Caso A. El controlador no responde. La señal de control cae a un nuevo estado estacionario

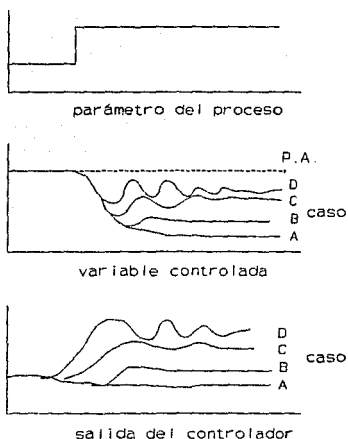


Figura 3.5. Efectos de la banda proporcional.

- Caso B. La respuesta proporcional es demasiado débil, presentando un error en estado estacionario muy grande
- Caso C. La banda proporcional es correcta. La respuesta del controlador es lo suficientemente fuerte para causar una oscilación de un cuarto de onda
- Caso D. La banda proporcional es demasiado estrecha. La sobreacción causa



una oscilación excesiva en la salida del proceso

La señal de control que da el modo proporcional se representa como:

$$S = K_p e + C$$

donde: S es la señal de control.

Kp es la ganancia proporcional.

e es el error del sistema.

C es el offset de la señal de control.

3.4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONTROL INTEGRAL

Cuando los operadores del proceso se dan cuenta de la existencia del error en estado estacionario debido a cambios en el valor deseado (punto de ajuste) y/o disturbios, pueden corregirlo cambiando el punto de ajuste del controlador hasta que el error desaparezca, aplicando un reajuste manual. El control integral es una forma de remover el error en estado estacionario sin la necesidad del reajuste manual y, de hecho, algunas veces es llamado reajuste automático. Se encontrará que el control integral puede ser usado sólo o en combinación con otros modos de control; en realidad, el control proporcional-integral es el modo más común.

La razón por la cual el control proporcional sufre de los errores en estado



estacionario es porque los cambios en el punto de ajuste y/o en los disturbios, requerirán un nuevo valor de la señal de control (flujo de energía y/o material del proceso) para poder obtener el equilibrio bajo las nuevas condiciones de operación. Ya que, en un controlador proporcional, la señal de control es proporcional al error del sistema, un nuevo valor de la señal de control es posible solo si el error no cero existe.

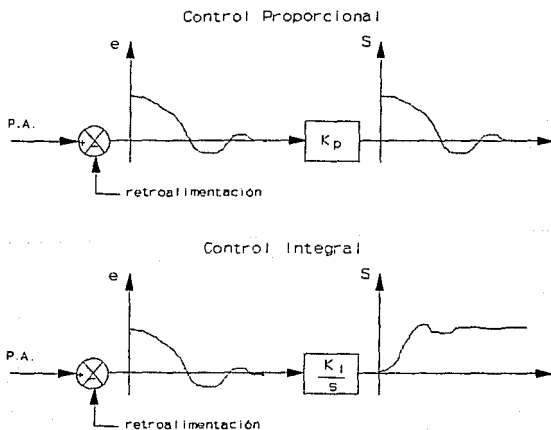


Figura 3.6. Comparación entre el control integral y el proporcional.

Se necesita un controlador que pueda dar cualquier salida fija que se necesite



(dentro del rango de diseño) cuando la entrada es cero (el error del sistema). Un integrador es capaz de dar exactamente este comportamiento. En la Fig. 3.6, se hace una comparación del control proporcional con el control integral.

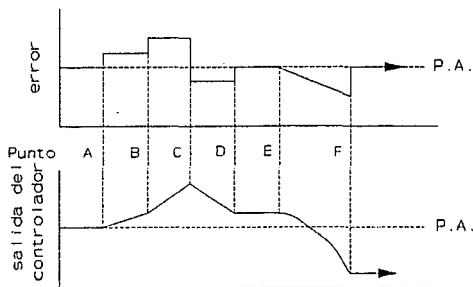


Figura 3.7. Respuesta del control integral al error.

La acción integral debe ser combinada con la acción proporcional para eliminar el offset cuando es inaceptable. Al igual que el modo proporcional, el modo integral responde al error. Sin embargo, el modo integral se basa en el principio de que la respuesta debe ser proporcional tanto al tamaño como a la duración del error.

La respuesta del controlador integral a una señal de error se muestra en la Fig.



3.7. Analizando esta Fig., se encuentra lo siguiente:

- Inicialmente, mientras el error es igual a cero, la salida permanece constante en un valor que depende de la historia del error. Los errores medidos producirán lo siguiente:
- Punto A: Un error constante aparece, el controlador integral maneja su salida a un incremento constante que es proporcional al tamaño del error, tanto tiempo como el error permanezca constante
- Punto B: El tamaño del error se incrementa, por lo que el controlador responde con una salida que posee un incremento más rápido
- Punto C: La señal de error cambia, el controlador responde manejando la salida en sentido contrario
- Punto D: El error regresa a cero. El controlador mantiene su salida al valor en el cual el error es cero
- Punto E: El error se incrementa de una manera constante. El controlador maneja su salida con un incremento continuo
- Punto F: El error regresa a cero. El controlador mantiene su salida al valor en cual el error se hizo cero

En el anterior análisis se puede ver la propiedad más importante del modo



integral, que es la capacidad de manejar cualquier salida hasta que el error sea cero (cuando el valor de la variable de control sea el punto de ajuste). Esta es la razón por la cual el modo integral elimina el offset producido por el modo proporcional.

A pesar de que el control integral es muy útil para quitar o reducir los errores en estado estacionario, tiene unos efectos indeseables como son el reducir la velocidad de respuesta y degradar la estabilidad. La reducción de la velocidad de respuesta es más fácil de ver en el dominio del tiempo, donde un escalón de entrada (un cambio repentino) a un integrador, causa una rampa de salida, por lo que es un cambio más gradual. La degradación de la estabilidad es más notoria en el dominio de la frecuencia (criterio de Nyquist) donde el integrador reduce el margen de fase al añadir 90 grados de atraso en cada frecuencia, rotando la curva

$$\frac{B}{E}(i\omega)$$

hacia la región inestable cerca del punto -1; donde B es la señal de retroalimentación y E es el error del sistema.

Ocasionalmente un efecto integrador aparece naturalmente en algún elemento del sistema (actuador, proceso, etc.) además del controlador. Estos integradores gratuitos pueden también ser efectivos en reducir los errores en estado estacionario.

A pesar de que los controladores con un solo integrador son los más comunes,



dobles (y ocasionalmente triples) integradores se usan para resolver problemas difíciles de errores en estado estacionario, aunque requieran de un mayor cuidado en la estabilidad.

La señal de control que nos da el modo integral se puede representar como:

$$s = \frac{1}{T_i} \int e dt$$

donde: T_i es el tiempo de integración.

$1/T_i$ es el reajuste ("reset").

3.5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONTROL DERIVATIVO

A pesar de que los controles on-off, proporcional e integral pueden ser usados con sus efectos individuales en un controlador práctico, se puede encontrar que varios modos de control derivativo son usados en combinación con algunas leyes de control básicas. Esto es porque el modo derivativo produce efectos no correctivos para cualquier error constante sin importar que tan grande es, por lo que permitirá cualquier error en estado estacionario. Normalmente no se encontrarán modos derivativos aislados en un controlador, más bien se encontrará en combinación con otros modos de control.

Aunque el modo derivativo es útil en la solución de una amplia variedad de problemas de diseño, una de las más importantes contribuciones es el aumentar la



estabilidad de los sistemas. Si el problema es la estabilidad absoluta o relativa, el control derivativo es frecuentemente la solución.

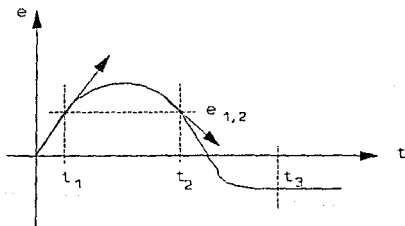
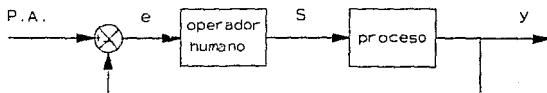


Figura 3.8. Control derivativo con manipulación humana.

Esta estabilización o aspecto de amortiguamiento del control derivativo se puede entender de la siguiente forma: al igual que la invención del control integral fue estimulada por cambiar el reajuste manual de los operadores del proceso a un reajuste automático, el hardware del control derivativo, debe ser visto como un intento de imitar la respuesta humana a los cambios de la señal de error.



En la Fig. 3.8, se supone que el operador del proceso tiene un indicador que le proporciona el error e del sistema y tiene, por medio de un dispositivo, la oportunidad de manipular la variable de control S para tratar de llevar el error del sistema a cero. Es importante preguntar si el operador será capaz de producir el mismo valor de S en el tiempo t_1 y en el tiempo t_2 (un controlador proporcional puede hacerlo exactamente). Se puede inferir que un efecto correctivo fuerte deberá ser aplicado en el tiempo t_1 , mientras que uno de menor intensidad deberá ser aplicado en el tiempo t_2 , esto debido a que el error en t_1 ($e_{1,2}$) se está incrementando mientras que en el tiempo t_2 está decreciendo (nótese que es el mismo $e_{1,2}$).

Es evidente que el ojo y cerebro humano no nota la tendencia oblicua de la curva. Esta tendencia oblicua es una razón de cambio del error (de/dt), por lo que es deseable tener un mecanismo que produzca la misma respuesta humana pero que sea sensible a la derivada del error. Sin embargo, como muchos modos de control, no se debe de usar individualmente, ya que no corrige los errores estacionarios o constantes como en el tiempo t_3 , ya que la razón de cambio es cero. Es por esto que se debe de combinar con algún otro modo de control que sense estos errores en estado estacionario.

La respuesta del control derivativo a los cambios del error se muestra en la Fig. 3.9. La razón de cambio que produce el control derivativo debe verse como una relación entre la cantidad de cambio del error y el tiempo en el cual se produce ese cambio.



Analizando la Fig. 3.9 se tiene lo siguiente:

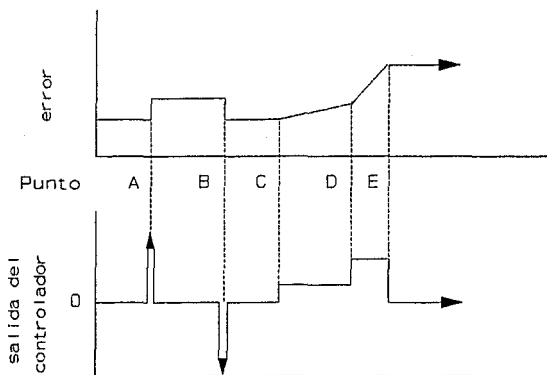


Figura 3.9. Respuesta del modo derivativo a la señal de error.

- Punto A: Se produce un cambio en el error. Debido a que el cambio en el error es un escalón (el tiempo de cambio es cero), el controlador derivativo responde con un impulso (la acción del controlador es incremento-incremento). Como el error vuelve a ser constante, el controlador hace cero su salida
- Punto B: Se produce un cambio negativo instantáneo en el error. El controlador



Modos de control

responde con un impulso negativo

- Punto C: El error se incrementa de manera constante. El controlador responde con una constante que es proporcional a la razón de incremento del error
- Punto D: La razón de cambio del error se incrementa. La salida del controlador se incrementa proporcionalmente
- Punto E: El error se vuelve constante, lo que produce que la salida del controlador regrese a cero

Como se puede apreciar, la respuesta derivativa no está relacionada con el valor absoluto del error. Cuando el error es constante (cero u otro valor), la señal de salida del controlador es cero. Cuando el error presenta un cambio, el controlador responde a ese cambio.

Al incorporar modos derivativos a un proceso que presenta atrasos ayuda a corregirlos. Debido a que la acción derivativa es inversa a la acción integral, al generar una respuesta derivativa, se genera un adelanto dentro del controlador, con lo que se acorta el periodo de oscilación presente. El control derivativo también incrementa la ganancia del controlador y aumenta su tiempo de respuesta.

La principal desventaja del modo derivativo es su alta sensibilidad al ruido, ya que pequeños errores producidos por el ruido producirán cambios importantes en la respuesta



del controlador. Es por esto, que la reducción en el periodo de oscilación no representa un beneficio grande. El modo derivativo no debe ser aplicado en lazos ruidosos. Es recomendable aplicar filtros a las señales que presentan muchos escalones, evitándose así las respuestas impulsivas del controlador derivativo.

La señal de control que da un controlador derivativo puede ser descrita de la siguiente manera:

$$s = T_d \frac{de}{dt}$$

donde: T_d es el tiempo de adelanto ("rate").

3.6. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

La combinación de estos tres modos básicos de control puede mejorar todos los aspectos del desempeño del sistema (estabilidad, velocidad de respuesta, errores en estado estacionario, etc), y es el método básico más completo disponible como plataforma para un controlador de propósito general. La fuerza y aceptación que ha tenido el control PID a través de los años y del mundo, son un claro testimonio de las fuertes bases de estas acciones fundamentales de control.

Si se analizan controladores electrónicos o controladores neumáticos analógicos,



Modos de control

su versión digital basada en microprocesadores o los lazos de control individuales realizados en una computadora de propósito general, tienen aplicaciones exitosas del control proporcional, proporcional-integral, proporcional-derivativo y proporcional-integral-derivativo. Esta simplicidad es tal vez la base de la fuerza de los modos PID. Todo esto se puede justificar con más de una propuesta teórica en diversos campos, de cualquier forma, a pesar de que nuevas y muy útiles leyes de control sigan apareciendo, el modo PID seguirá cumpliendo indudablemente un tarea central en cualquier sistema de control.

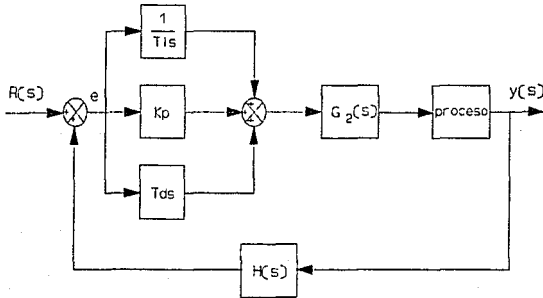


Figura 3.10. Modo de control PID.

La Fig. 3.10, muestra la idea final de un modo de control PID a partir de la Fig.



3.2, en la que se muestra solamente el bloque del modo de control sin especificar alguno.

Muchos problemas simples de control pueden manejarse muy adecuadamente con controladores PID, con tal que los requerimientos no sean muy elevados. El algoritmo PID está agrupado en la forma de los reguladores estándar para control de procesos y es también la base de muchos sistemas de control hechos para casos particulares. Este algoritmo es:

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(s) ds + T_D \frac{de}{dt}$$

donde: u es la variable de control.

e es el error definido como: $e = U_c - y$, donde U_c es el valor de referencia y y es la salida del proceso.

El algoritmo actualmente usado presenta muchas modificaciones. Es práctica común permitir que la acción derivativa opere solamente sobre la salida del proceso. Puede ser ventajoso permitir que la acción proporcional actúe solamente sobre una fracción del valor de referencia. La acción derivativa se reemplaza por medio de una aproximación que reduce la ganancia a altas frecuencias. La acción integral se modifica de tal forma que no se sostiene la integración cuando la variable de control se satura. También son tomadas precauciones para que no existan transitorios cuando el regulador



Modos de control

es conmutado de manual a automático o cuando los parámetros se cambian.

Los parámetros esenciales a ser ajustados son K_p , T_d y T_i . A este ajuste se le llama entonamiento del controlador.



CAPITULO 4

DINÁMICA DEL PROCESO Y SINTONIZACION DE CONTROLADORES

4.1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de sintonización de controladores constan básicamente de dos partes: determinar un modelo que ilustre la dinámica del proceso y el cálculo de los parámetros del controlador usando algún método de diseño. Muchas técnicas de sintonización están basadas en esta aproximación. Conocer las técnicas para determinar la dinámica del proceso es un buen respaldo para entender la sintonización de los controladores.

4.2. DINÁMICA DEL PROCESO

A continuación se ilustran varios métodos para conocer la dinámica del proceso:

4.2.1. Método de respuesta transitoria

La dinámica de un proceso se puede determinar a partir de la respuesta del proceso a pulsos, escalones, rampas u otras señales determinadas.

Si se tiene un lazo de control con un regulador, la respuesta al escalón puede determinarse de la siguiente manera: esperar a que el proceso se encuentre estable, colocar el controlador en manual, producir un cambio escalón en la salida del



controlador, graficar la respuesta del proceso al escalón.

En la Fig. 4.1, se muestra este método en donde se puede observar la salida del controlador y la respuesta del proceso. El tiempo que transcurre desde que el escalon se produce en la salida del controlador hasta que la variable de control comienza a incrementar su valor es el tiempo muerto.

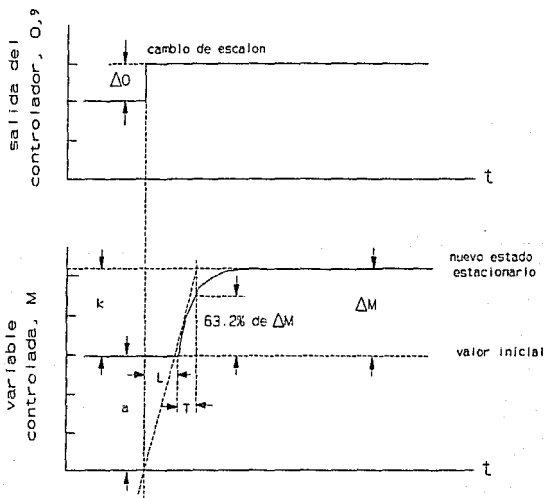


Figura 4.1. Respuesta transitoria de un proceso típico.



La variable controlada cambiará hasta un valor final que es el nuevo estado estacionario y que es producto del cambio escalón en la entrada del controlador. La respuesta al escalón es monótona si no decrece con el tiempo. Muchos procesos industriales tienen respuesta monótona al escalón. La respuesta ilustrada en la Fig. 4.1, muestra tres parámetros: la ganancia k , la constante de tiempo T y el tiempo muerto L .

Un sistema con una respuesta al escalón como la que se muestra en la Fig. 4.1, puede tener una función de transferencia aproximada de este tipo:

$$G(s) = \frac{k}{(1+sT) e^{-sL}}$$

donde: k es la ganancia estática.

L es el tiempo de retardo.

T es la constante de tiempo.

El principal inconveniente del método de respuesta transitoria es su sensibilidad a los disturbios porque depende de los experimentos en lazo abierto. Las desventajas esenciales del método son que puede ser muy difícil conocer el tamaño del escalón en la señal de control y determinar si el estado estable ha sido afectado, es decir, se necesita un amplio conocimiento del proceso para conocer su sensibilidad. El escalón deberá ser tan grande hasta que la respuesta sea claramente perceptible bajo el ruido pero no tan



grande que la producción sea perturbada. Los disturbios también influirán significativamente en el resultado.

4.2.2. Métodos de respuesta en frecuencia

Si se considera un sistema lineal estable, con una señal de entrada al sistema senoidal, la señal de salida del sistema será también senoidal. Esta señal de salida tendrá la misma frecuencia que la señal de entrada, solamente la fase y la amplitud serán diferentes. Esto significa que bajo condiciones estacionarias, la relación entre la señal de entrada y la señal de salida puede ser descrita por dos números: el cociente entre la amplitud de la señal de entrada y la señal de salida (a) y la fase entre la señal de entrada y la señal de salida (phi). Es necesario conocer el valor de a y de phi para todas las frecuencias w , esto es, las funciones $a(w)$ y $phi(w)$. Es conveniente ver a y phi como la magnitud y el ángulo de un número complejo:

$$G(j\omega) = a(\omega) e^{i(\phi)(\omega)}$$

La función $G(jw)$ se llama la función de la respuesta en frecuencia del sistema.

La función de amplitud será:



$$a(\omega) = |G(i\omega)|$$

y la función de fase será:

$$\phi(\omega) = \text{arg}(G(i\omega))$$

El número complejo $G(i\omega)$ se puede representar por un vector de longitud $a(\omega)$ que forma el ángulo $\phi(\omega)$ con el eje de las x . Cuando la frecuencia va de 0 a infinito, el punto final del vector describe una curva en el plano, esta curva se llama curva de frecuencia o curva de Nyquist.

La curva de Nyquist proporciona una descripción completa del sistema. Si se usan diferentes frecuencias para la señal de entrada, la curva de Nyquist puede obtenerse. Normalmente, es suficiente conocer solo partes de la curva de Nyquist. Es particularmente interesante conocer el rango de frecuencias cercanas a la frecuencia que proporciona una fase de $G(i\omega)$ de -180 grados, llamada frecuencia de corte ω_c , el punto correspondiente en la curva de Nyquist es el llamado punto crítico. El valor de $G(i\omega_c)$ se usa para algunos métodos de sintonización.

La Fig. 4.2, muestra la respuesta de un sistema a una senoidal, graficándose su curva de Nyquist.

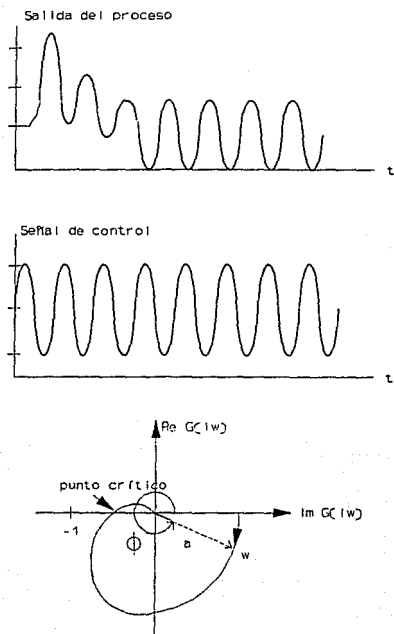


Figura 4.2. Respuesta de un sistema a una senoidal.



4.2.3. Método de balance de armónicas

De todos los métodos analíticos desarrollados para los sistemas no lineales, este es uno de los más prácticos y útiles. Es un método aproximado, pero la experiencia con sistemas reales y las simulaciones en computadora muestran un adecuado comportamiento de este método en muchos casos. El método de armónicas es también llamado método de la función descriptiva.

El método predice si el ciclo de oscilación límite existirá o no y proporciona una estimación numérica de la frecuencia de oscilación y de la amplitud cuando el ciclo límite se predice. Básicamente el método es una extensión aproximada de los métodos de respuesta en frecuencia para sistemas no lineales.

El primer paso (teórico, ya que en la práctica difícilmente se logrará) en el estudio de la función descriptiva es remover el elemento no lineal del sistema de control para que pueda ser estudiado por separado. Con el dispositivo no lineal separado, se le aplica a su entrada una señal senoidal:

$$A_1 \sin \omega t$$

y usando las características dadas de no linealidad, se determina cual será la señal de salida. La salida puede tomar diferentes formas dependiendo de la naturaleza de la no linealidad; sin embargo, esta salida es generalmente periódica pero no senoidal. Un elemento lineal, producirá una señal senoidal pura a su salida, con una frecuencia igual



a la frecuencia de entrada. (Ver Fig. 4.3).

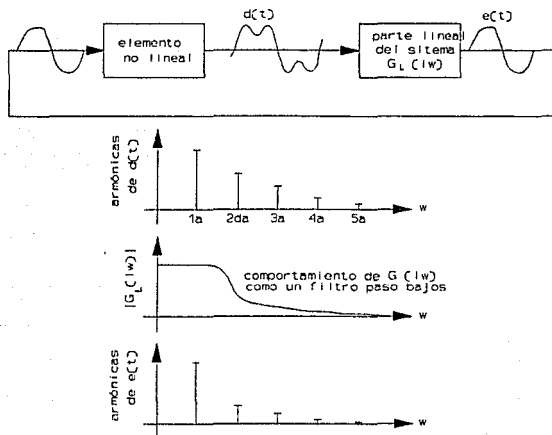


Figura 4.3. Respuesta senoidal de un elemento lineal y un no lineal.

La suposición principal en el análisis de la función descriptiva, es que la forma no senoidal de la salida del elemento no lineal, después de haber recorrido todos los elementos del lazo de control, será parecida a una forma senoidal al regresar a la entrada del elemento no lineal. Esta entrada senoidal es consistente con la respuesta del elemento no lineal a una señal de entrada senoidal cuando el elemento se separó del sistema de



control.

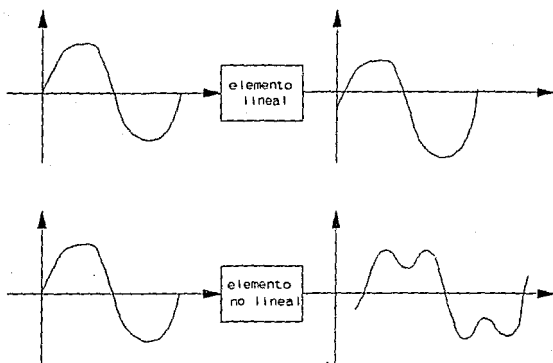


Figura 4.4. Comportamiento del filtro paso-bajos supuesto en la función descriptiva.

Si se analiza la forma de onda de la entrada al dispositivo no lineal en términos de la representación de las series de Fourier, se requerirá que la componente de la primera armónica (frecuencia fundamental) sea mucho más fuerte que cualquiera de las otras armónicas. Este requerimiento se pide, porque durante el recorrido a través de los elementos lineales del sistema la señal de salida del elemento no lineal sufrirá los efectos de un filtro paso-bajos sobre sus armónicas más grandes con respecto a la primera armónica (la primera armónica será tomada como base para realizar el filtrado). Cuando



la parte lineal $GL(i\omega)$ del sistema posee suficiente fuerza en el efecto de filtrado, la suposición inicial sobre forma de la onda de salida del elemento no lineal cuando regrese a la entrada de este elemento será válida. La Fig. 4.4, ilustra este concepto.

En el método de la función descriptiva se considera la no linealidad como un elemento por separado donde su salida se aproxima tomando solo la componente de la primera armónica

$$A_0 \text{sen}(\omega t + \phi)$$

de su serie de Fourier. Esto dará una onda senoidal pura con la misma frecuencia de señal senoidal de entrada. Se podrá entonces tomar la relación

$$\frac{A_0 \phi}{A_i 10^0}$$

como una aproximación de la función de transferencia del elemento no lineal. Esta aproximación se llama función descriptiva. Esta difiere de una función de transferencia de un sistema lineal, en que tiene un valor numérico el cual varía con la amplitud de la señal de entrada A_i , y en que puede o no depender de la frecuencia ω . Esta función descriptiva puede ser combinada con la función de transferencia senoidal ordinaria del resto del sistema, para obtener la función completa de lazo abierto $(B/E)(i\omega)$; es importante notar que se tendrá una $(B/E)(i\omega)$ diferente para cada amplitud A_i . Se puede comprobar la estabilidad de todas las $(B/E)(i\omega)$ diferentes usando el criterio de Nyquist.



Si alguna de estas indica inestabilidad en el lazo cerrado, se podrá predecir que el sistema puede tener un ciclo limite y estimar su amplitud y frecuencia.

Dentro de estos métodos de respuesta en frecuencia, existe un método basado en un relevador retroalimentado. La idea básica es la observación de que muchos procesos tendrán oscilaciones cíclicas limitadas bajo un relevador retroalimentado. Considere un sistema retroalimentado simple formado por una parte lineal con función de transferencia $G(s)$ y una retroalimentación con un relevador ideal. Se asume que el sistema es lineal excepto la parte del relevador (controlador on-off). El diagrama de bloques se muestra en la Fig. 4.5.

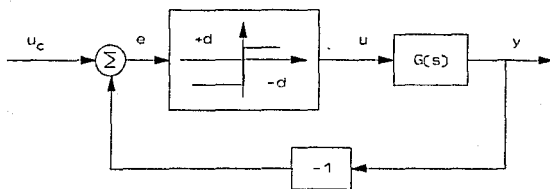


Figura 4.5. Sistema lineal con control de relevador.

La función descriptiva para el controlador on-off de la Fig. 4.5., se podrá obtener de la siguiente forma: se considera que $U_c=0$. La condición aproximada para la oscilación se puede determinar como sigue: se supone que es un ciclo limite con periodo



Tu y frecuencia

$$\omega_u = \frac{2\pi}{T_u}$$

de tal forma que la salida del relevador es una onda cuadrada simétrica y periódica. Si la amplitud del relevador es d , la expansión en serie de Fourier de la salida del relevador muestra que la componente de la primera armónica tiene una amplitud de

$$\frac{4d}{\pi}$$

Se asume además que la dinámica del proceso tiene características de un paso bajos y la contribución de la primera armónica domina la salida. La señal de error tiene una amplitud de:

$$a = \frac{4d}{\pi} |G(i\omega_u)|$$

La condición para la oscilación es

$$\arg G(i\omega_u) = -\pi$$

$$K_u = \frac{4\pi}{\pi a} = \frac{1}{|G(i\omega_u)|}$$

donde K_u puede ser vista como la ganancia equivalente del relevador para transmisión de



señales senoidales con amplitud a . La condición es además que el sistema lineal mostrado en la Fig. 4.5., tenga una curva de Nyquist que intersecte el eje real negativo. La amplitud a y la frecuencia de oscilación ω_u se obtienen de las ecuaciones mencionadas arriba. La frecuencia del ciclo limite se ajusta automáticamente además a la frecuencia ω_u en la cual el lazo abierto de la dinámica del proceso tiene un atraso de fase de 180. El periodo correspondiente se llama periodo fundamental ("ultimate period"). El parámetro K_u es llamado ganancia fundamental ("ultimate gain"). Físicamente, esta es la ganancia que conduce al sistema al límite de la estabilidad bajo un control proporcional puro.

La amplitud del ciclo limite de oscilación puede especificarse introduciendo un bloque en la retroalimentación que ajuste la amplitud del relevador. La histéresis en el relevador es útil para hacer el sistema menos sensible al ruido.

4.3. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

Una vez conocida la dinámica del proceso, es posible determinar los parámetros de los controladores. Un controlador PI se describe por medio de dos parámetros (K y T_i) un controlador PID por tres parámetros (K , T_i , T_d). Existen varios métodos para obtener dichos parámetros, se presentan dos métodos clásicos a partir de la respuesta transitoria y de la respuesta en frecuencia del proceso.



4.3.1. Método de respuesta transitoria de Ziegler-Nichols.

Una forma simple para determinar los parámetros de un regulador PID basado en los datos de la respuesta al escalón fue desarrollado por Ziegler y Nichols y fue publicado en 1942. El método usa solo dos de los parámetros mostrados en la Fig. 4.1., nombrados a y L . Los parámetros del regulador son dados por la Tabla 4.1.

Controlador	K_c	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4L$
PI	$0.9/a$	$3L$		$5.7L$
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$3.4L$

Tabla 4.1. Método de respuesta al escalón de Ziegler-Nichols.

La regla de sintonización de Ziegler-Nichols fue desarrollada por simulaciones empíricas de muchos sistemas diferentes. La regla tiene la desventaja de que se dá para sistemas de lazo cerrado, esto frecuentemente produce un amortiguamiento pobre. Sistemas con mejores amortiguamientos se pueden obtener modificando los valores numéricos en la Tabla 4.1. Usando parámetros adicionales, también es posible determinar si la regla de Ziegler-Nichols es aplicable. Si se determina la constante de tiempo T , una regla empírica establece que la regla de Ziegler-Nichols es aplicable si $0.1 < L/T < 1$.



Para valores grandes de L/T es ventajoso usar reglas de control que compensen los tiempos muertos. Para valores pequeños de L/T un mejor desempeño se puede obtener con compensadores de alto orden. Es posible también usar más reglas de sintonización basándose en tres parámetros.

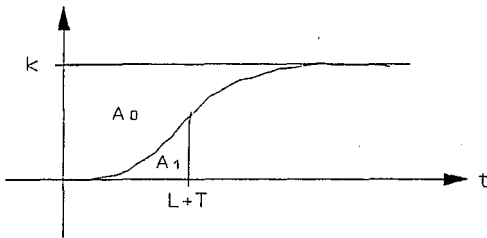


Figura 4.6. Método de área para determinar L y T .

El parámetro k puede obtenerse a partir de la relación de los cambios estáticos de entrada y salida en estado estable. Para determinar L , k y T , hay un método simple, basado en las mediciones de área (ver Fig. 4.6).

El área A_0 se determina primero. Donde:

$$T+L = \frac{A_0}{k}$$

El área A_1 bajo la respuesta al escalón en el tiempo $T+L$ se determina de la



siguiente forma:

$$T = \frac{eA_1}{k}$$

donde e es la base del logaritmo natural.

Si se obtiene un buen regulador sintonizador, los amortiguamientos y la frecuencia natural del lazo cerrado del sistema pueden determinarse también a partir de la respuesta transitoria en lazo cerrado.

4.3.2. Método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols

Este método se basa también en una simple caracterización de la dinámica del proceso. El diseño se basa en el conocimiento del punto en la curva de Nyquist de la función de transferencia del proceso donde la curva se intersecta con la parte negativa del eje real (Fig. 4.2). Este punto se caracteriza por los parámetros T_u y K_u (analizados anteriormente).

Una regla simple para escoger los parámetros de los reguladores PID se concibe idealmente, con la determinación de K_u y T_u por el método del relevador (Fig. 4.4). Las características del controlador están dadas en la Tabla 4.2.

Estos parámetros dan un sistema de lazo cerrado con un amortiguamiento bastante bajo. Sistemas con mejor amortiguamiento pueden obtenerse con ligeras modificaciones



a los números de la tabla.

Controlador	K_c	T_i	T_d	T_p
P	$0.5K_u$			T_u
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$		$1.4T_u$
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$	$0.85T_u$

Tabla 4.2. Parámetros del regulador obtenidos por medio del método de lazo cerrado de Ziegler-Nichols.

Hasta este momento solo dos parámetros han sido extraídos del experimento del relevador. Más información se puede obtener, cambiando el punto de ajuste durante el experimento del relevador, es posible determinar la ganancia estática del proceso k . El producto kK_u puede ser usado para evaluar que tan apropiado es el control PID con sintonización Ziegler-Nichols. Una regla es que el método Ziegler-Nichols puede ser usado si $2 < kK_u < 20$. Valores menores a 2 indican que se debiera usar una ley de control que compense el tiempo muerto. Valores mayores a 20 indican que se puede obtener un mejor desempeño con un algoritmo de control más complejo.

Los datos obtenidos a partir del experimento del relevador también se pueden usar para estimar la función de transferencia en tiempo discreto usando métodos de identificación de sistema.



CAPITULO 5

AUTOSINTONIZADORES

5.1. INTRODUCCIÓN

Los esquemas adaptables, como el modelo de referencia y el regulador de sintonización propia, requieren información a priori sobre la dinámica del proceso. Es particularmente importante conocer las escalas de tiempo, las cuales son críticas para determinar los intervalos adecuados de muestreo y filtrado. La importancia de la información a priori fue reconocida durante mucho tiempo pero llegó a ser aparente en conexión con el desarrollo de los controladores adaptables de propósito general. Muchos procesos fueron forzados a introducir modos pre-sintonizados para ayudar a obtener la información inicial requerida. La importancia de esta información inicial también apareció como consecuencia de los esfuerzos para desarrollar técnicas para sintonización automática para controladores PID simples. Dichos reguladores, los cuales son un estándar en la construcción de bloques para la automatización industrial, se usan en sistemas de control con un rango amplio de constantes de tiempo.

A partir del punto de vista de los usuarios, sería ideal el tener una función en la que el regulador pudiera ser sintonizado simplemente oprimiendo un botón. Aunque los esquemas adaptables convencionales semejan el ser una herramienta ideal para dar una



sintonización automática, fueron encontrados inadecuados porque requerían de un conocimiento inicial sobre las escalas de tiempo. Técnicas especiales para la sintonización automática de reguladores simples por tanto, se desarrollarán. Estas técnicas también son útiles para obtener una pre-sintonización de sistemas adaptables más complejos; las cuales pueden ser vistas como métodos robustos sin terminar que proveen cierta información. Es ideal complementarlos con métodos adaptables más sofisticados.

Combinando métodos para determinar la dinámica del proceso con los métodos de diseño de los controladores PID, se pueden obtener métodos automáticos de sintonización para controladores PID. Existen controladores con estas características que han aparecido en el mercado, gracias al desarrollo de la microelectrónica que ha hecho posible incorporar los programas necesarios para la autosintonización a un costo razonable.

5.2. MÉTODOS DE AUTOSINTONIZACIÓN

El diagrama de bloques de un controlador PID con autosintonización se muestra en la Fig. 5.1. Cuando se desarrolla la sintonización, se introduce un lazo extra. Este lazo consiste en un esquema de identificación del proceso y un procedimiento de diseño que calcula los parámetros del PID. Se añade una señal de perturbación (v) para asegurar la excitación correcta del proceso, la sintonización puede desarrollarse tanto en lazo cerrado



Autosintonizadores

como en lazo abierto. El procedimiento de sintonización se caracteriza por:

1. El modelo fundamental del proceso
2. El procedimiento de identificación
3. El método de diseño

Debido a que existen muchos procedimientos de identificación y diseño, hay muchas formas de desarrollar un autosintonizador. Los autosintonizadores también pueden caracterizarse por los modos de operación, la sintonización puede ser desarrollada por una demanda del operador o puede iniciarse automáticamente.

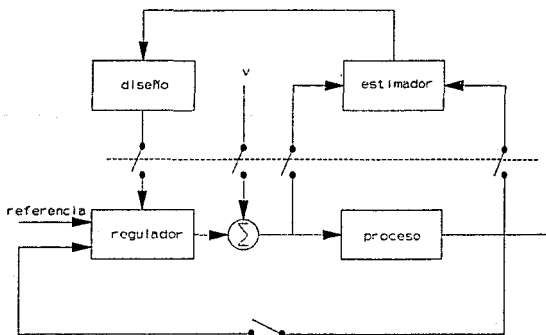


Figura 5.1. Diagrama de bloques de un controlador PID con sintonización automática.



5.2.1. Métodos basados en respuesta transitoria

Los autosintonizadores pueden basarse en el análisis de la respuesta transitoria de un lazo abierto o un lazo cerrado. El método más común se basa en la respuesta al escalón o al pulso.

5.2.1.1. Sintonización en lazo abierto

Un modelo simple del proceso puede obtenerse a partir de un experimento de respuesta transitoria en lazo abierto. Un escalón o un pulso se alimenta a la entrada del proceso y la respuesta se mide, si se usa un pulso para la prueba, el proceso debe incluir un integrador; es necesario que el proceso se encuentre en equilibrio cuando la prueba se inicia. En un principio, solo uno o dos parámetros deben ser fijados a priori: la amplitud y la duración del pulso y/o la amplitud del escalón; estos parámetros deben escogerse de tal forma que la respuesta sea visible por encima del nivel de ruido, pero no tan grande que las no linealidades del proceso se hagan significativas.

Muchos métodos pueden usarse para extraer las características del proceso a partir del experimento de respuesta transitoria. Los métodos de respuesta transitoria se usan frecuentemente como un modo de presintonización en dispositivos sintonizadores más complicados. La ventaja principal del método es que requiere del conocimiento de poca información a priori. La desventaja principal es su sensibilidad a los disturbios. Esta



desventaja no es tan importante si solamente se usa en la fase de presintonización.

5.2.1.2. Sintonización en lazo cerrado

La sintonización automática basada en el experimento de respuesta transitoria puede desarrollarse en línea. Los escalones o pulso se introducen en la señal de referencia, pueden introducirse por medio del controlador para propósitos de identificación. Existen también autosintonizadores que no introducen ningún disturbio transitorio, en lugar de esto, disturbios largos causados por cambios en el punto de ajuste o por disturbios en la carga se detectan y la respuesta en lazo cerrado se considera. El controlador EXACT de Foxboro, el cual se describe más adelante, es un ejemplo de este esquema.

Debido a que las características de la respuesta transitoria en lazo cerrado son la meta para el diseño, es deseable basar los métodos de sintonización directamente en las propiedades de la respuesta transitoria en lazo cerrado. Es fácil dar las especificaciones de diseño en términos de la respuesta transitoria en lazo cerrado, por ejemplo: amortiguamiento, constantes de tiempo en lazo cerrado, etc. La desventaja es que la relación entre estas especificaciones y los parámetros del PID es normalmente confusa y complicada.



5.2.2. Métodos basados en respuesta en frecuencia

Debido a que los métodos de respuesta en frecuencia pueden también usarse para determinar la respuesta en frecuencia, los autosintonizadores pueden basarse en esta metodología.

5.2.2.1. Método del relevador

En los métodos tradicionales de respuesta en frecuencia, la función de transferencia de un proceso se determina midiendo la respuesta en estado estable a una senoidal de entrada, la dificultad de este método es que la frecuencia apropiada para la señal de entrada se debe especificar. Un método especial en donde la frecuencia apropiada de la señal de entrada es generada automáticamente fue descrito en el Capítulo 4. La idea básica parte de la observación de que muchos procesos tendrán oscilaciones de ciclo límite bajo un relevador retroalimentado. Las propiedades esenciales del proceso se pueden determinar a partir de las características del ciclo límite, y se pueden calcular los parámetros del regulador PID. La Fig. 5.2, muestra un diagrama de bloques de un autosintonizador con relevador.

Cuando se requiere la sintonización, el switch se conmuta a T, lo cual implica que el relevador retroalimentado está activado y el regulador PID desconectado; el sistema empieza a oscilar; el periodo y la amplitud de la oscilación se determinan cuando se



obtiene una oscilación estable, con lo cual se puede obtener la frecuencia fundamental y la ganancia fundamental (principal); Los parámetros del PID se calculan y el controlador PID se conecta automáticamente al proceso, realizando el control con los nuevos parámetros.

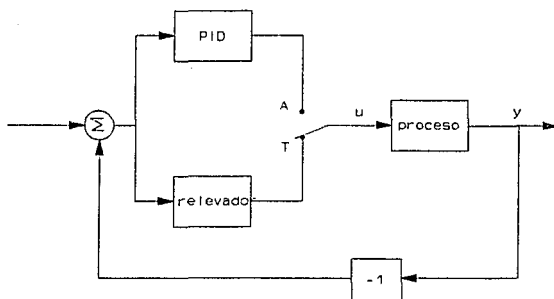


Figura 5.2. Diagrama de bloques de un auto-sintonizador con relevador.

Este dispositivo de sintonización tiene un parámetro que debe ser especificado a priori: la amplitud inicial del relevador. El lazo de retroalimentación que se forma en la medición de la amplitud de la oscilación a la amplitud del relevador puede usarse para asegurar que la salida permanece razonablemente cerca de los límites durante la oscilación. También es útil para introducir histéresis en el relevador, esto reduce los



efectos del ruido en la medición e incrementa el periodo de la oscilación. Con la histéresis existe, sin embargo, otro parámetro que debe fijarse automáticamente basado en la medición del nivel de ruido. Es importante ver que no es necesario el conocimiento a priori de la escalas de tiempo debido a que la frecuencia de corte se determina automáticamente.

En este método, una oscilación, con una frecuencia adecuada, se genera por la no linealidad estática, aun cuando la constante de tiempo del proceso sea desconocida. Por lo tanto, este método no solo es adecuado como un dispositivo sintonizador, puede usarse también en una fase de presintonización con otros procedimientos de sintonización donde la constante de tiempo del sistema deba ser conocida, v.gr.: para decidir el periodo adecuado de muestreo.

5.2.2.2. Métodos en línea

El análisis de respuesta en frecuencia puede usarse también para sintonización en línea de controladores PID. Introduciendo filtros pasobandas se puede conocer, el contenido de la señal a diferentes frecuencias. A partir de este conocimiento, el modelo del proceso se podrá identificar en términos de puntos sobre la curva de Nyquist. La elección de las frecuencias en el filtro pasobandas es crucial en este tipo de autosintonizadores. Esta selección puede simplificarse utilizando los procedimientos de



5.3. CONTROLADOR EXACT DE FOXBORO

Este controlador se basa en un análisis de la respuesta transitoria del lazo cerrado del sistema a cambios en el punto de ajuste o disturbios en la carga y en los métodos tradicionales de sintonización de Ziegler-Nichols.

5.3.1. Modelado del proceso

El sistema de Foxboro se basa en la determinación de las características dinámicas del proceso a partir de un transitorio, lo cual genera un error. Si los parámetros del controlador son razonables, se obtendrá una respuesta transitoria del error como la mostrada en la Fig. 5.3.

Para detectar cuando un disturbio ocurrió y para detectar los picos E1, E2 y E3 así como el período T_p , se usa lógica heurística. La lógica heurística utilizada se ilustra en la Fig. 5.4. La estimación del proceso es simple, esta se basa, sin embargo, en suponer que los disturbios son escalones o pulsos cortos. El algoritmo puede dar una estimación errónea si los disturbios son dos pulsos cortos, esto se debe a que T_p será estimado como la distancia entre los pulsos. Esto también requiere que el lazo este cerrado con el controlador y se tenga una respuesta estable. La presintonización se introduce entonces para obtener la información requerida.

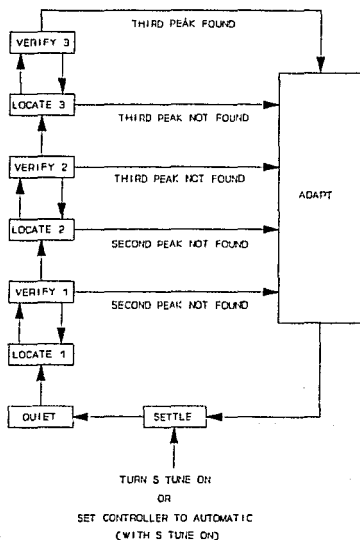


Figura 5.4. Lógica heurística usada en el sistema EXACT de Foxboro para determinar las características del transitorio en lazo cerrado.

5.3.2. Diseño del control

El diseño del control se basa en las especificaciones de amortiguamiento, el



sobretiro [overshoot] y las razones T_i/T_p y T_d/T_p , donde: T_i es el tiempo de integración, T_d es el tiempo de derivación y T_p es el periodo de oscilación.

El amortiguamiento se define como:

$$d = \frac{e_3 - e_2}{e_1 - e_2}$$

y el sobretiro como:

$$z = \frac{e_2}{e_1}$$

En casos típicos se requiere que tanto d como z sean menores a 0.3. De las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se obtiene (Tabla 4.2):

$$\frac{T_d}{T_p} = \frac{0.5}{0.85} \quad \text{y} \quad \frac{T_i}{T_p} = \frac{0.12}{0.85}$$

Estas razones pueden ser modificadas basandose en estudios empíricos en el controlador EXACT de Foxboro. Estas son calculadas a partir de los tiempos muertos y de las constantes de tiempo dominantes. Valores pequeños se escogen para un proceso con tiempos muertos dominantes y valores grandes se seleccionan para procesos con tiempos de atraso dominantes. Los detalles no han sido publicados.

Los valores de default para el máximo sobretiro y el máximo amortiguamiento son 0.5 y 0.3 respectivamente. Ambos parámetros pueden ser especificados por el operador.



El sobretiro debe estar en el rango de 0 a 1 y el amortiguamiento en el intervalo de 0.1 a 1.

5.3.3. Información a priori y presintonización

El procedimiento de presintonización requiere de información a priori sobre los parámetros del controlador: K , T_i y T_d . También se requiere información sobre la escala de tiempo del proceso. Esta se usa para determinar el máximo tiempo que la lógica heurística esperará para el segundo pico. Algunas mediciones sobre el ruido del proceso también son necesarias para determinar cuando un disturbio ha ocurrido y para fijar las tolerancias en la lógica heurística. Existen otros parámetros que deben ser fijados de manera opcional: el amortiguamiento (d), el sobretiro (z), el factor de derivación y los límites de los parámetros del controlador. En el controlador también hay números de salvaguarda (dispositivo de seguridad), por ejemplo, no se permite que los parámetros cambien demasiado cuando se da un ajuste.

Este es también un modo de presintonizado que puede usarse para inicializar los parámetros del controlador. Este modo se activa de la siguiente forma: el controlador se coloca en modo manual; entonces, el modo de presintonizado se activa, generando una respuesta al escalón; el tamaño del escalón puede escogerse lo suficientemente grande para causar un cambio en el valor de la medición de al menos el 2.5%, el valor de



default para el escalón es del 8%; el tiempo muerto y la constante de tiempo se determinan a partir de la respuesta al escalón; el tiempo muerto estimado se utiliza para determinar el tiempo de integración, el tiempo de derivación y el máximo tiempo de espera; la ganancia del controlador se determina a partir del tiempo muerto y la constante de tiempo; finalmente, el nivel de ruido se determina a partir de las mediciones pico a pico en estado estable. El modo de presintonización debe usarse solo cuando el proceso se encuentra en estado estable.

5.3.4. Interfaz con operador

La Fig. 5.5 ilustra la parte frontal del controlador. Todos los datos al controlador se le dan usando botones en la parte frontal. Tres botones tienen funciones fijas, mientras que los otros cinco son botones multifuncionales. Todos los parámetros disponibles al operador se dan en un diagrama de estructura jerárquica. Los botones multifunción se usan para moverse en diferentes direcciones dentro del diagrama y para cambiar los valores de los parámetros. Algunos parámetros de singular importancia se mencionan a continuación:

- NB: Banda de ruido. La sintonización se activa cuando el error excede el doble de la banda de ruido
- WMAX: Máximo tiempo de espera. Este es el máximo tiempo que el algoritmo



espera por el segundo pico

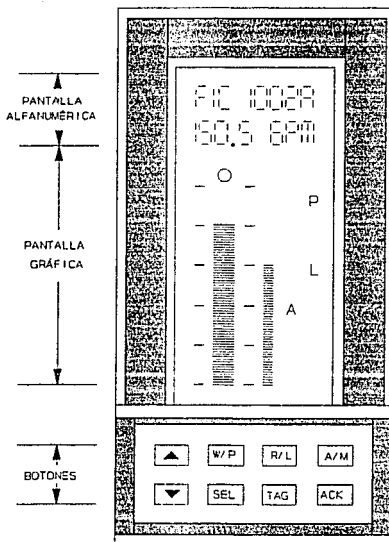


Figura 5.5. Panel frontal del controlador EXACT de Foxboro.

• DMP: Máximo amortiguamiento permitido. Se puede escoger en el rango de



0.1 a 1; el default es de 0.3

· OVR: Máximo sobretiro permitido. Se puede escoger en el intervalo de 0 a 1; el default es de 0.5

· CLM: Límite de cambio. Limita los parámetros del controlador dentro de cierto rango. Expresado como un múltiplo de los datos iniciales de P, I y D. El valor de default es de 10

· DFCT: Factor de derivación. Permite que la influencia derivativa se reduzca o se incremente por medio del factor DFCT. El valor de default es de 1. Puede escogerse en un intervalo de 0 a 1. Si se fija DFCT=0 el resultado es un controlador PI

· BUMP: Tamaño del escalón en la fase de presintonización. El valor de default es del 8%

5.4. AUTOSINTONIZADOR DE "SATT CONTROL INSTRUMENTS"

El autosintonizador fabricado por "Satt Control Instruments" se basa en la estimación de un punto sobre la curva de Nyquist, usando el método de las oscilaciones del relevador y en una modificación del método Ziegler-Nichols para determinar los parámetros del controlador.

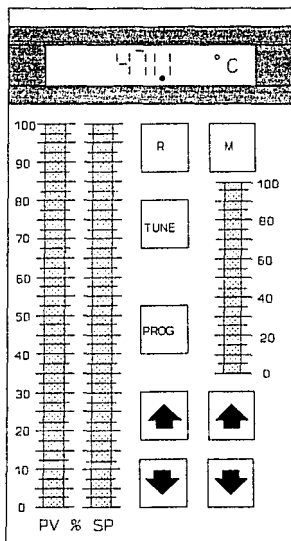


Figura 5.6. Controlador ECA-40. Saft Control Instruments.

El autosintonizador viene en dos diferentes versiones. Una versión es un pequeño sistema DDC para control de procesos industriales llamado SDM-20. El sintonizador



puede conectarse para sintonizar cualquier lazo del sistema. La otra versión es un controlador de lazo sencillo llamado ECA-40, donde los modos normales de operación manual y automático han sido aumentados con un tercer modo, un modo de sintonización. El ECA-40 se muestra en la Fig. 5.6. La sintonización se activa a una demanda del operador.

5.4.1. Modelado del proceso

La estimación de los parámetros se hace por medio del método del relevador discutido en el Capítulo 4. El relevador tiene una histéresis que se fija automáticamente, basado en una determinación de la medición del nivel de ruido. La amplitud del relevador también se ajusta automáticamente para dar una amplitud de la oscilación prescrita. La determinación de la amplitud y del período se basa en una detección del pico sencillo y del cruce por cero.

La sintonización se desarrolla de la siguiente forma (ver Fig. 5.2): el proceso se lleva al punto de operación deseado, ya sea por medio del operador en el modo manual o por el modo automático (previamente seleccionado); cuando el lazo está estable, el operador oprime el botón de sintonización; después de un periodo corto, cuando el nivel del ruido ha sido medido automáticamente, un relevador con histéresis se introduce en el lazo, por lo que el controlador PID es temporalmente desconectado (ver Fig. 5.2). La



histéresis del relevador se determina automáticamente a partir del nivel de ruido.

El relevador con histéresis ocasiona que el sistema oscile. Durante la oscilación, la amplitud del relevador se ajusta de tal forma que el nivel deseado de la amplitud de la oscilación se logre. Cuando se obtiene una oscilación con amplitud y periodo constante, el experimento del relevador se interrumpe. La ubicación del punto correspondiente a la frecuencia de oscilación puede calcularse a partir de la amplitud de la oscilación y de las características del relevador. Los parámetros del PID se determinan entonces y el controlador PID se activa.

5.4.2. Diseño del control

El diseño del controlador se basa en un procedimiento modificado de Ziegler-Nichols. Se realiza una prueba para determinar si la acción derivativa se requiere. Se ha encontrado en la práctica que la acción derivativa se usa frecuentemente y esto mejora el desempeño. Existen, sin embargo, excepciones, como el control de nivel, donde la acción derivativa no debiera usarse. Se ha encontrado que el procedimiento de identificación es muy efectivo en detectar los casos.

El autosintonizador también tiene ganancia programada. Esta provisto de una tabla en la que se almacena una variable que ejemplifique las condiciones de operación y los correspondientes parámetros del controlador. También tiene una característica para



realizar cambios automáticos entre diferentes parámetros del controlador.

5.4.3. Interfaz con el operador

El valor inicial de la amplitud del relevador es el valor de default, el cual es adecuado para muchas aplicaciones de control. Este parámetro no es crítico ya que es ajustado después del primer medio período para dar una amplitud admisible a la oscilación del ciclo límite. La operación del autosintonizador es después muy simple. Para usar el sintonizador, el proceso se lleva al equilibrio fijando la señal de control constante en modo manual. La sintonización se activa oprimiendo el botón de sintonización. El controlador se conmuta automáticamente al modo automático cuando la sintonización esta completa.

El ancho de la histéresis se fija automáticamente, basado en las mediciones del nivel de ruido del proceso. La amplitud del relevador se controla de tal forma que la oscilación se sostenga al nivel mínimo por encima del nivel de ruido.

Los siguientes son algunos de los parámetros que deben fijarse por el operador:

1) Diseño del control [1, 2, 3]. El diseño deseado del lazo de control puede diferir del procedimiento de default del autosintonizador. Si se escoge el diseño 1, se obtendrá una respuesta rápida. El diseño 2, es el diseño de default. El diseño 3 proporciona una respuesta más lenta. El diseño del control puede cambiarse antes o



después de la sintonización.

2) Reset [Yes/No]. Alguna información de la sintonización se guarda y se usa para las siguientes sintonizaciones, incluyendo el nivel de ruido, la amplitud inicial del relevador y el periodo de la oscilación. Si un cambio más grande se da en el lazo de control, por ejemplo, si el controlador se mueve a otro lazo, el operador puede borrar la información del sintonizador.

3) Amplitud inicial del relevador. En algunos lazos muy sensibles, el escalón inicial de entrada en el experimento del relevador debe ser muy largo. Entonces, el escalón inicial puede fijarlo el operador.

4) Referencia para la ganancia programada. Los cambios entre los diferentes valores de los parámetros del controlador PID en la tabla de ganancia programada pueden desarrollarse con diferentes señales como referencia para la ganancia programada. La programación puede basarse en la señal de entrada, en la señal de salida u otra señal externa. La ganancia programada se activa solo cuando la señal de referencia se configura.

5.4.4. Ejemplo

Las propiedades del autosintonizador se ilustran en la Fig. 5.7. El ejemplo se tomó de una fábrica de papel donde el nivel del recipiente de la pulpa de la madera se



controla. Originalmente, solo se usa control proporcional. Esto provoca un error en estado estacionario entre el nivel deseado y el nivel actual, como se muestra en la Fig. 5.7. La sintonización dura aproximadamente 2 minutos y dá como resultado un controlador PI. Este es un ejemplo de como un autosintonizador puede decidir cuando el modo derivativo no es apropiado para ciertos procesos. La inclusión del modo integral en la función de control remueve el error en estado estacionario. La respuesta del sistema a los cambios de escalón en el punto de ajuste también muestran que los parámetros seleccionados para el controlador son apropiados.

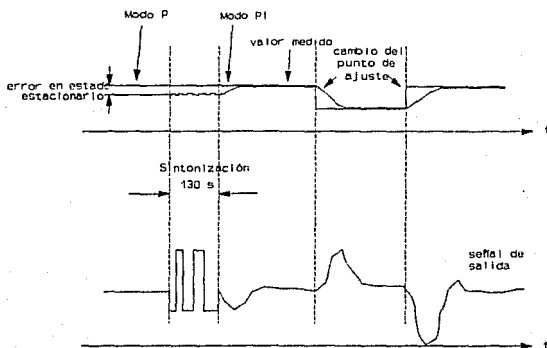


Figura 5.7. Resultados obtenidos usando el ECA-40 en una aplicación de control de nivel.



CONCLUSIONES

Las técnicas adaptables pueden encontrarse en muchos procesos industriales. Muchos lazos de control son sintonizados automáticamente por distintos dispositivos autosintonizadores. Las técnicas adaptables pueden utilizarse de diferentes formas y existen muchas formas para diseñar un controlador adaptable o un dispositivo de sintonización automática.

El uso de dispositivos de autosintonización ofrece numerosas ventajas: la sintonización automática es más rápida que la sintonización manual; el tiempo asignado para la instalación de un nuevo proceso decrece; los controladores PID pueden sintonizarse con mayor precisión; cuando el controlador es sintonizado manualmente, el modelado del proceso y el diseño son generalmente pobres; la sintonización automática normalmente provoca que los reguladores PID trabajen con acción derivativa, la parte derivativa se excluye generalmente en las sintonizaciones manuales; la sintonización automática también implica que la sintonización se realiza sistemáticamente; etc. Debido a estas y otras muchas ventajas, no resulta difícil suponer que en el futuro los controladores PID seguirán siendo un estándar dentro de la industria.

Los diferentes modos de autosintonización se pueden diferenciar de acuerdo a los procedimientos de identificación y de diseño utilizados. En esta investigación se



Conclusiones

presentaron dos métodos básicos: respuesta transitoria y respuesta en frecuencia.

Los dispositivos de autosintonización disponibles en el mercado, se diferencian también en la cantidad de información a priori que necesitan. Para el operador, es muy importante tener un autosintonizador que sea fácil de operar. La información que necesita el dispositivo para operar, se convierte entonces en una variable importante a considerar. Autosintonizadores y controladores adaptables basados en métodos que requieran demasiada información a priori, frecuentemente necesitarán una fase de presintonización que ayuden al operador a escoger y suministrar la información requerida. Debido a que los controladores PID son sencillos, un dispositivo de sintonización no debe llevar a un controlador en el que los parámetros sean más difíciles de fijar.

La estructura del controlador PID se ha usado siempre desde que se introdujeron los controladores neumáticos. Resulta interesante cuestionar: ¿porqué continuar con esta estructura hoy en día cuando las computadoras permitirían una estructura más general y más compleja?, se pueden citar muchas razones como las siguientes: es un esquema muy conocido y útil que proporciona muchas formas de sintonización manual, la simplicidad del controlador proporciona una ventaja para lazos que no requieren un controlador sofisticado. Pero también existen algunos inconvenientes: esta estructura simple proporciona un controlador con un comportamiento limitado, lazos de control con tiempos muertos grandes o con otras complejidades en la dinámica del proceso son difíciles de



Conclusiones

controlar eficientemente con controladores PID. Un argumento fuerte en contra de los controladores PID cuando la sintonización se realiza por medio de una computadora, es que no existe razón para utilizar tan pocos parámetros, claro, este argumento solo sería válido para lazos en los que el control lo realiza totalmente una computadora, ya que si el operador quiere tener la posibilidad de apagar la parte adaptable del controlador y realizar los ajustes manualmente, la estructura del controlador deberá ser simple.

Diferentes clases de controladores son útiles para diferentes clases de usos y de problemas de control. Un ingeniero con un buen conocimiento de control, seguramente preferirá un controlador avanzado en el que se pueda ajustar el control de diferentes formas, es decir, querrá un controlador que parezca una caja de herramientas, donde el operador diseñe la estructura del controlador. Para un ingeniero de conocimiento medio en el área de control, un PID seguramente será una elección correcta, sin embargo, no podrá controlar procesos con largos tiempos de atraso y modos de oscilación, será útil entonces, adicionar una trayectoria directa y una tabla de ganancia.

Con la introducción de las técnicas adaptables, se puede ver una primera fase que puede analizarse como la habilidad del sistema para conocer el proceso. En lugar de tener un controlador con sintonización manual en el lazo de control, se usa una computadora con propiedades más sofisticadas. Este controlador incluye un conocimiento del proceso que se está controlando. Este conocimiento se obtiene del operador, pero también puede



Conclusiones

obtenerse automáticamente en línea a partir del desempeño del control usando una técnica adaptable. En este momento se puede ver solo el comienzo del desarrollo de estas técnicas, con los sistemas expertos, el siguiente nivel del control del conocimiento del proceso sera construido.



BIBLIOGRAFÍA

1. GRAHAM, C. Goodwin; SANG SIN, Kwai,
Adaptive Filtering prediction and control.
Ed. Prentice-Hall,
EUA, 1984.
2. ASTRÖM, Karl Johan; WITTENMARK, Björn,
Adaptive Control.
Ed. Addison-Wesley Publishing Company,
EUA, 1989.
3. ASTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore,
Automatic Tuning of PID Controllers.
Instrument Society of America,
EUA, 1988.



Bibliografía

4. DOEBELIN, Ernest O.,
Control System Principles.
Ed. John Wiley & Sons,
EUA, 1985.

5. OGATA, Katsuhiko,
Ingeniería de Control Moderna.
Ed. Prentice-Hall,
México, 1980.