

Sistemas de Control y Proceso Adaptativo. Reguladores y Comunicación

1. Control Predictivo Adaptativo Experto

Como se ha indicado, los controladores PID están presentes en la gran mayoría de procesos de control. Sin embargo, este tipo de controladores necesitan de ajustes manuales que, en ocasiones, pueden no ser completamente efectivos para el desempeño de la función requerida.

Con posterioridad se desarrollaron los denominados sistemas expertos, con los que se realizaba esta labor de ajuste. Este tipo de sistemas debía diseñarse expresamente para cada proceso, siendo muy sensibles a los cambios que se produjeran sobre éste y, por lo tanto, difíciles y costosos en su desarrollo y mantenimiento.

En la década de los 70 se ideó el principio de control adaptativo predictivo, cuya innovación consiste en hacer la salida predicha del proceso igual a la deseada, mediante un modelo de predicción que puede ser ajustado automáticamente en tiempo real (adaptativo). Este tipo de control pierde eficacia con las evoluciones del proceso debido a que se pierde eficacia en la adaptación.

En 2001 se patentó una nueva metodología que combina el control adaptativo predictivo con el control experto. En este modelo se parte de una serie de valores de consigna que son introducidos en un bloque con el que se genera la salida deseada. Esta salida deseada es introducida en el modelo predictivo, generándose la señal de control. La señal de control a su vez gestiona al modelo adaptativo, el cual realimenta tanto a la generación de la señal deseada, informando sobre la desviación de la señal de salida sobre la deseada y procediendo este bloque a generar una nueva salida deseada, como el modelo predictivo, para hacer que el error de predicción se minimice. Además un bloque experto actúa sobre la generación de la señal deseada, el modelo predictivo y el modelo adaptativo, cambiando sus condiciones de operación en función de las necesidades del proceso.

1.1. Control Predictivo: Predictor Smith

En la vida real, las plantas a controlar presentan retardos o tiempos muertos provocados por retardos en sensores y actuadores, el número de sistemas conectados en serie etc., que generan complicaciones para los sistemas de control ya que se retrasan la detección de perturbaciones y/o la acción de control, o esta se realiza en base a errores que ya han quedado desfasados y no son actuales. Esto provoca un desfase en la respuesta tanto mayor cuanto mayor es la frecuencia, provocando que la ganancia se reduzca y se pueda llegar a la inestabilidad en bucle cerrado. Una solución para intentar resolver el problema pasa por desintonizar el control PID, pero esta no es una solución adecuada.

El concepto de control predictivo fue introducido en 1974 y puede definirse como el "control que, basándose en un modelo del proceso, hace que la salida dinámica del proceso predicha por un modelo sea igual a una salida dinámica deseada, convenientemente elegida".

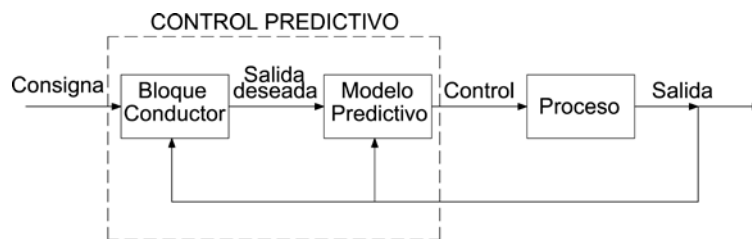


Figura 1: diagrama de bloques básico del control predictivo

El predictor de Smith trata de solucionar el problema del control en los sistemas con retardo. En este caso lo que se pretende es crear un modelo predictivo de la salida (proceso) y utilizarlo para la realimentación, eliminando así el retraso.

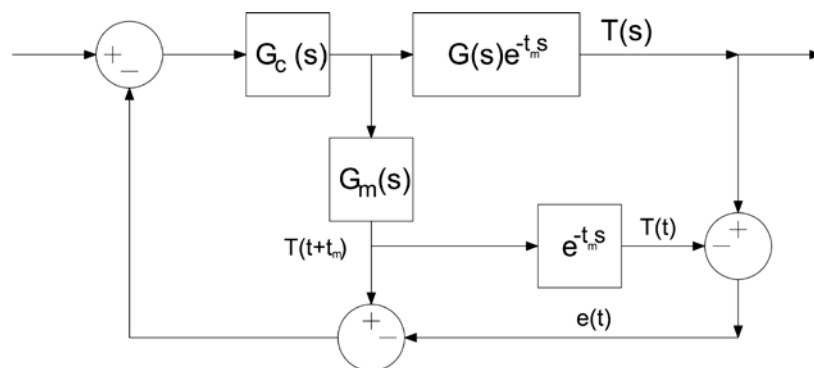


Figura 2: modelo del predictor Smith

Como se observa en la figura, en un proceso con retardo $e^{-t_m s}$, a partir de la acción de control $G_c(s)$ se genera el modelo predictivo $G_m(s)$; por un lado, a este modelo predictivo se le aplica el retraso de la planta y se realimenta con la salida de ésta, obteniéndose el error de predicción $e(t)$ y por otro se realimenta con $e(t)$ con lo que el error de predicción se elimina del modelo predictivo. El modelo de planta en este caso es $G_m(s)e^{-t_m s}$. La función de transferencia en bucle cerrado del sistema será:

$$G_{LC}(s) = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G_m(s)} e^{-t_m s}$$

Como se puede apreciar el retraso $e^{-t_m s}$ tiene de módulo la unidad, por lo que no implica ni ganancia ni atenuación, sin embargo su fase es $-t_m \omega$, por lo tanto, a mayor frecuencia mayor desfase. Al introducirse tanto desfase, el margen de ganancia se reduce, pudiendo llegar a provocar la inestabilidad del sistema.

El modelo predictor de Smith es una estructura de control avanzada muy popular para resolver el problema del control de sistemas con retraso. Fue desarrollado para sistemas continuos, pero es más adecuado para sistemas digitales.

En el predictor Smith se genera un modelo predictivo que puede ser erróneo. En este caso, el error de modelado será:

$$\Delta G(s) = G(s)e^{-t_m s} - G_m(s)e^{-t_m s}$$

y la función de transferencia en bucle cerrado será:

$$G_{LC}(s) = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G_m(s) + G_c(s)\Delta G(s)} e^{-t_m s}$$

Se observa que el error de modelado afecta al polinomio característico y por lo tanto a la estabilidad en lazo cerrado. Sin embargo, como el término del denominador que depende del error de modelado también se ve afectado por $G_c(s)$, se puede corregir el problema desintonizando el controlador.

El modelo predictivo de Smith necesita de una correcta sintonía. Para ello el controlador puede ser del tipo PI ya que el sistema sin retardo es un bucle

rápido, en el que T_i se elige de forma que permita cancelar el polo del proceso y K_c en función de la constante de tiempo que se desee para el proceso.

- **Predictor PI:** es una simplificación del predictor Smith, aplicable en procesos cuya dinámica es tan rápida frente al retraso que se puede aproximar por una ganancia más un retraso. Se tiene un modelo de planta igual que en el predictor de Smith $G_m(s)e^{-t_m s}$ y un modelo "rápido" $G_m(s)=K_p$.

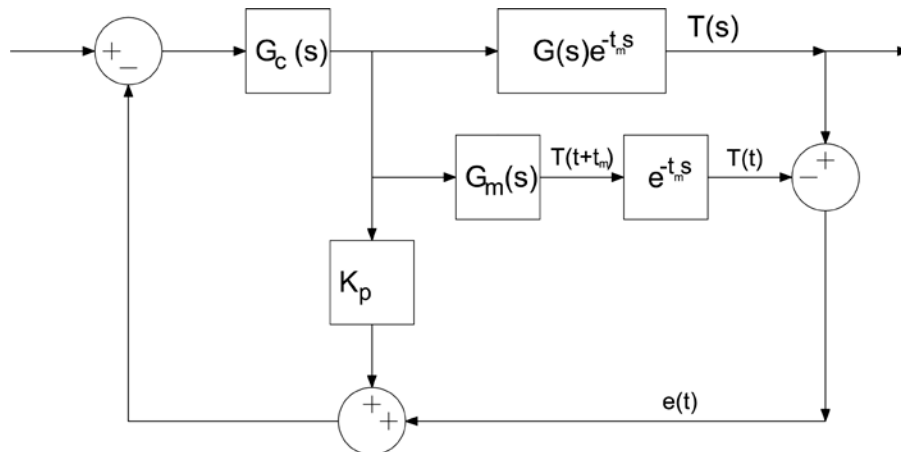


Figura 3: modelo del predictor PI

- **Control PI predictivo:** es otra simplificación del predictor de Smith. Se utiliza en procesos con gran retraso. Es un modelo de primer orden con controlador del tipo PI. Se tiene menos parámetros de sintonía.

1.2. Técnicas adaptativas

Las técnicas adaptativas surgieron para tratar procesos que variaban en el tiempo o que estaban sometidos a distintas condiciones de operación.

El modelo predictivo es una solución incompleta porque no puede predecir los cambios naturales que se producen en las variables o perturbaciones del entorno de operación de los procesos reales y que modifican su dinámica, por lo tanto, la precisión en la predicción de la salida del proceso a partir de un modelo de parámetros fijos no puede ser garantizada. Esto implica que se hace necesaria la adaptación del modelo predictivo a estas variaciones o perturbaciones para conseguir un control más satisfactorio.

Son varias las técnicas adaptativas, entre las que se encuentran la sintonía automática, la planificación de ganancia y la adaptación.

- **Sintonía automática:** es ampliamente utilizada en controladores PID. La sintonía automática se puede incorporar en el propio controlador o en dispositivos externos conectados al lazo de control solo durante el proceso de sintonía. En este último caso es necesario facilitar a estos dispositivos características concretas del controlador utilizado, por lo que deben estar diseñados para trabajar con controladores de diversos fabricantes.
- **Planificación de ganancia:** es una técnica utilizada en procesos no lineales, procesos con variaciones en el tiempo o aquellos con condiciones de operación variables. Para su correcta utilización es necesario encontrar una serie de variables medibles que sean representativas del proceso. Esta técnica, combinada con la sintonía automática simplifica enormemente el trabajo de diseño ya que permite medir la variable en diferentes condiciones de operación, almacenar estos valores en una tabla y, mediante la autosintonía, determinar los parámetros del controlador cuando el sistema funciona en torno a ese punto de operación.

Cuando las variaciones en la dinámica del proceso no son predecibles las técnicas anteriormente descritas no son suficientes, siendo necesario recurrir a la adaptación.

1.3. Sintonía automática y adaptación

La sintonía automática es el método por el que el controlador se sintoniza automáticamente o a petición del usuario y se basa en la técnica adaptativa. La mayoría de los controladores comerciales incorporan algún método de sintonía automática (*auto-tuning*).

Este proceso consta de tres pasos:

- Generación de una perturbación que permita conocer la dinámica del proceso.
- Evaluación de la respuesta a esta perturbación.
- Cálculo de los parámetros del controlador.

Se distinguen dos tipos de sintonía según el enfoque utilizado: el enfoque basado en los modelos y el enfoque basado en las reglas.

Existen diversos métodos de sintonía automática:

- Método de la respuesta al salto: Una vez que se activa la función de auto sintonía, el regulador pasa el control a manual y da un salto a la variable manipulada. Según la respuesta que presente el proceso, identifica un modelo de primer orden con retardo, a partir del cual calcula, mediante tablas, la nueva sintonía del regulador.

- Método del relé: Si se activa la función de autosintonía, se conecta un relé en lugar del PID, que provoca oscilaciones controladas en el proceso, de tal forma que permitan la identificación de las características dinámicas del mismo.

- Método EXACT: su nombre deriva de *EXact Adaptive Controller Tuning*. La sintonía se realiza de forma continua en lazo cerrado. Si el error excede de unos determinados límites, se identifica un nuevo modelo del proceso mediante el reconocimiento de patrones preestablecidos. El regulador calcula la nueva sintonía en tiempo real usando tablas modificadas de Ziegler-Nichols y reglas preestablecidas.

No todos los malos comportamientos de un lazo de control pueden ser corregidos mediante la sintonía automática ya que en muchos casos esos malos comportamientos pueden deberse a un mal diseño, a mala colocación de los sensores/actuadores, desgaste de algunos elementos, etc., por lo que la sintonía automática, si no se utiliza correctamente, puede llevar a resultados erróneos.

- Control adaptativo: la adaptación es el mecanismo por el que el controlador es capaz de cambiar sus parámetros para responder a un cambio en las condiciones de operación o en las características del proceso. Con este método los parámetros del controlador se adaptan automáticamente para actualizarse con respecto a las características cambiantes del proceso.

Los tipos más comunes de sistemas de control adaptativo son:

- Control adaptativo programado: consiste en programar antes de su uso los cambios requeridos en el controlador para que pueda adaptarse a las diferentes situaciones en las que tiene que operar.

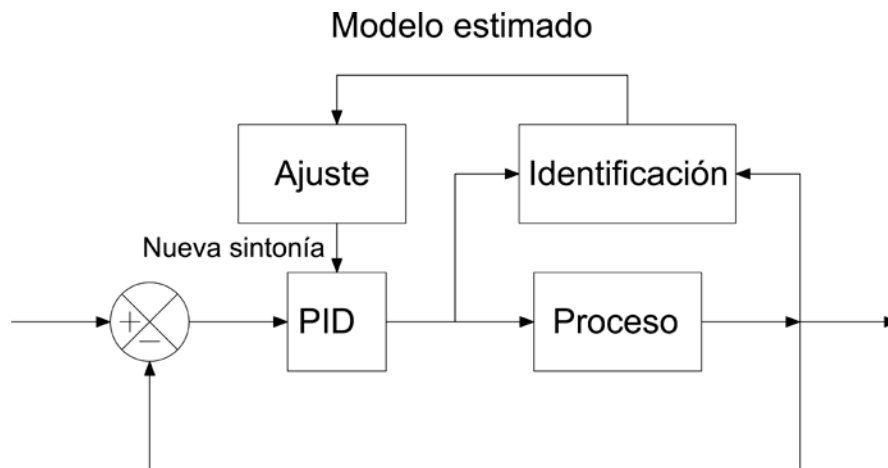


Figura 4: modelo de control adaptativo

Por lo tanto se necesita conocer previamente el proceso y tener una cuantificación de cómo deben cambiarse los parámetros del controlador ante los cambios conocidos en las características del proceso. Una forma de hacerlo sería mediante la construcción de tablas con los valores que deben tomar los parámetros del controlador ante diferentes valores de las variables de entrada y salida del sistema.

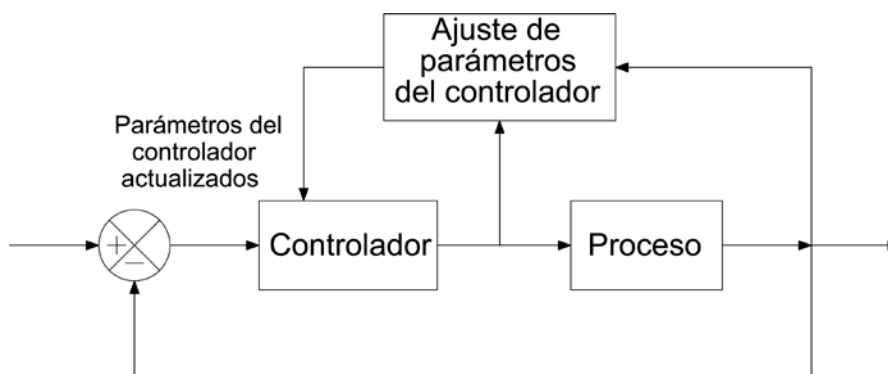


Figura 5: modelo de control adaptativo programado

- Control adaptativo con modelo de referencia: el componente clave en este tipo de control adaptativo es el modelo de referencia. Cada modelo de referencia debe reflejar cómo el sistema debe responder a los cambios que se produzcan. El programa de adaptación suele ser un algoritmo que optimiza los parámetros de una determinada función objetivo para el control.

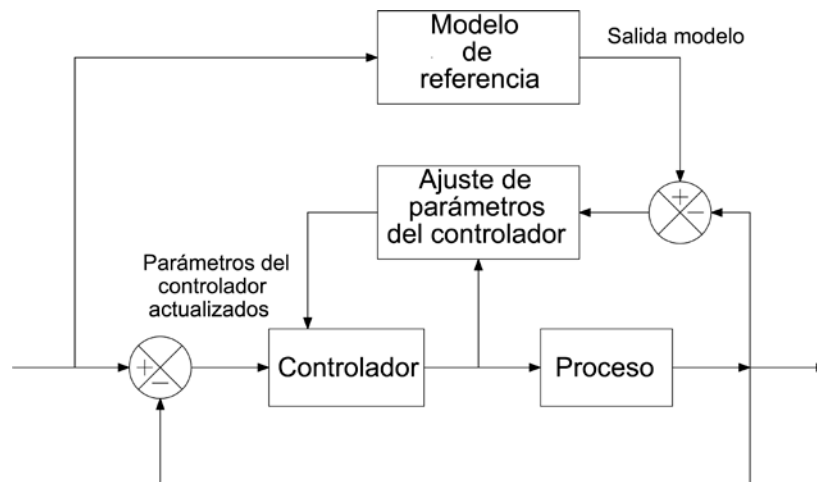


Figura 6: ejemplo de control adaptativo con modelo de referencia

- Control adaptativo auto sintonizable: en este tipo de controladores se toman continuamente valores de entrada y salida, para estimar en línea y recursivamente los valores de los parámetros de un modelo aproximado del proceso. Así, los cambios que ocurren con el tiempo en el sistema real (no lineal) son modelados mediante un proceso lineal, cuyos parámetros van cambiando con el tiempo para ajustarse lo máximo posible al sistema real.

Dado que la estimación del modelo determinará la efectividad del controlador, el aspecto más importante de este tipo de controladores está en disponer de una técnica de estimación de parámetros lo suficientemente robusta y que permita obtener buenos resultados.

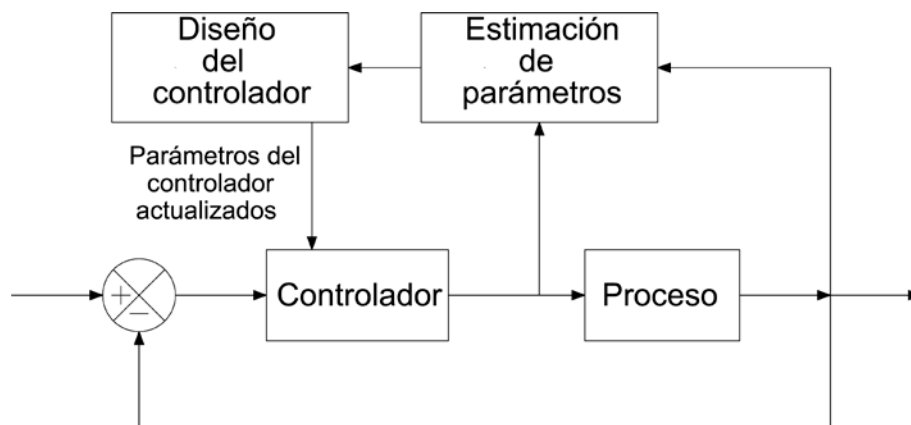


Figura 7: control adaptativo auto sintonizable

1.4. Métodos basados en modelos

Los métodos de sintonía automática suelen realizarse en base a una derivación de un modelo del proceso. Existen diversos tipos de modelos, entre

ellos los basados en respuestas transitorias, respuesta en frecuencia y estimación de parámetros.

- Métodos basados en respuesta transitoria: se pueden basar en el análisis de la respuesta en lazo abierto, generalmente para realizar una presintonía del sistema de control, o en lazo cerrado, que representará mejor la respuesta del sistema de control en condiciones reales de uso. La mayoría se basa en el análisis de la respuesta a una señal escalón o pulso, aunque se pueden utilizar otro tipo de perturbaciones
- Métodos de respuesta en frecuencia: suelen utilizarse para determinar la dinámica del proceso. Para conocer la frecuencia apropiada para su análisis se puede utilizar el método del relé, que lleva al sistema a una oscilación límite. Variando la amplitud y la histéresis del relé permite conocer varios puntos del diagrama de Nyquist. Otra forma de analizar la respuesta en frecuencia es mediante el método en línea, en los que se introduce un filtro paso banda que permite determinar el contenido de la señal a diversas frecuencias y determinar así los puntos correspondientes del diagrama de Nyquist.
- Método de estimación de parámetros: consiste en estimar una serie de parámetros para determinar un modelo de bajo orden con el que poder calcular los parámetros del controlador. Los auto sintonizadores de este tipo pueden trabajar variando los parámetros por lo que pueden trabajar como controladores adaptativos que varían los parámetros del controlador continuamente. Una de sus principales ventajas es que no requieren un tipo de señal concreta de excitación; por contra suelen necesitar de una pre sintonía que puede realizarse según los métodos anteriores.

1.5. Métodos basados en reglas

Con estos métodos se trata de imitar la sintonía manual basada en la experiencia previa. Se realiza el mismo proceso para el análisis de la respuesta del sistema ante una perturbación que en los métodos basados en modelos, pero el ajuste de los parámetros del controlador se realiza no en función de un modelo, sino en función de algunas reglas conocidas.

Para poder llevar a cabo la sintonía automática con estos métodos es necesario determinar una serie de parámetros de la respuesta que permitan determinar la regla adecuada para llevar a cabo el ajuste (sobre oscilación, razón de decaimiento, etc.). Sin embargo, aunque es fácil determinar reglas para decidir si estos parámetros deben modificarse, no lo es tanto saber en qué porcentaje debe hacerse esta modificación, por lo que son métodos más adecuados para sistemas con adaptación continua, donde se realizan pequeños cambios de ajuste con cada transitorio. Presentan la desventaja de que, si se producen dos cambios en la consigna o en la perturbación de carga en muy poco tiempo, puede resultar en una regla de sintonía errónea.

1.6. Control experto

El control adaptativo predictivo ha demostrado un funcionamiento satisfactorio en una gran variedad de procesos, siempre que haya una relación causa-efecto que determine el comportamiento dinámico del proceso y que esta pueda ser identificada y gestionada por un modelo. Sin embargo esto no es siempre así. En ocasiones ocurre que la variable de salida puede llegar a una situación en la que su comportamiento no se deba a una causa-efecto determinada, generalmente en los márgenes extremos de operación de la variable de trabajo, por lo que no puede ser identificada por un modelo del proceso. En consecuencia, el control adaptativo predictivo, al igual que otros métodos, tiene unos límites de aplicación.

El control experto permite hacer uso del conocimiento previo que se tiene de un proceso para llevar a cabo su control, generalmente mediante la aplicación de reglas, de esta forma el controlador puede tomar decisiones sobre el control que permitan mejorar su función. De esta forma se puede conocer el comportamiento de la planta en determinadas situaciones que escapen al control adaptativo predictivo. El sistema debe ser capaz de interpretar la información recibida de la planta y decidir qué tipo de acciones debe llevar a cabo en base a las reglas que conoce. La complejidad del sistema estriba en cómo se realiza el proceso de toma de decisiones.

Como mejora del control experto ha sido desarrollado el sistema de control adaptativo predictivo experto (ADEX), en el que se combinan la predicción de la

señal de control, con la adaptación y el control experto basado en reglas en función de las necesidades de respuesta.

Ante un rango de operación de la variable de trabajo, el control ADEX divide dicho rango en diferentes dominios de control adaptativo predictivo (AP) y de control experto (EX), aplicando el control adecuado a cada dominio. En los dominios AP la dinámica de proceso puede ser identificada mediante un control adaptativo. En los dominios expertos el control manual puede ser más robusto y eficiente que el control adaptativo.

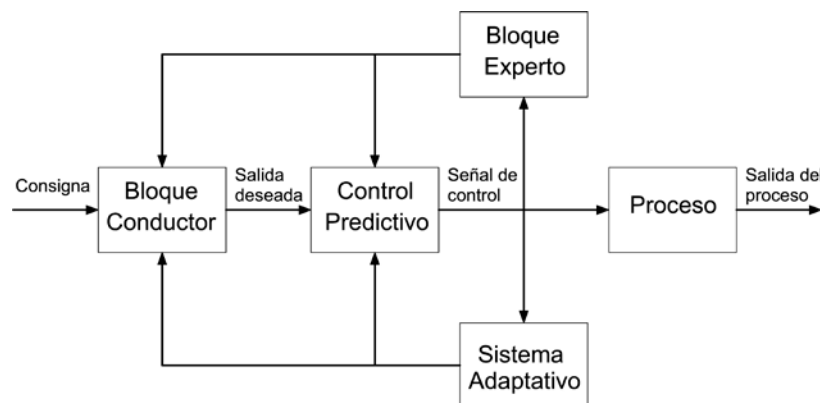


Figura 17: diagrama de bloques del control predictivo adaptativo experto. Fuente: ADEX

Como se aprecia en el diagrama de bloques de un control AEX, existe un bloque experto capaz de determinar y modificar el funcionamiento del bloque de control, del bloque conductor y del mecanismo de adaptación en función de la información que recibe de las variables del proceso.

El bloque de control actuará inicialmente con un modelo predictivo, calculando el control predictivo a aplicar. Si se debe aplicar un control experto, este bloque actuará como un sistema basado en reglas, imitando la actuación de un operador humano.

El bloque conductor recibe las indicaciones pertinentes del bloque experto para determinar criterios de rendimiento para generar la trayectoria más conveniente en los dominios adaptativos. Por ejemplo, dependiendo de los lejos que esté el dominio de la consigna puede preferirse un cambio más rápido o lento del proceso.

El mecanismo de adaptación recibirá del bloque experto la indicación de cuando conviene o no activar la adaptación de los parámetros del modelo AP en función de las condiciones de operación. Por ejemplo, si se conocen cambios importantes en la dinámica del proceso en diferentes dominios de operación, el bloque experto puede ayudar al mecanismo de adaptación en la elección de los parámetros del modelo AP cuando se produce un cambio en la salida del proceso entre los diferentes dominios.

Referencias

- J. M. Martín, Control Adaptativo Predictivo Experto.
- Nevado, Conceptos Básicos de Filtrado, Estimación e Identificación.

Enlaces de interés

http://www.control-class.com/Tema_8/Slides/Tema_8_Predictor_de_Smith.pdf

<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/Laboratorio/5.EjemploPredictorSmith.pdf>

http://dea.unsj.edu.ar/control3/teor%C3%ADa/capitulo6_predictor.pdf

<http://www.mathworks.es/es/products/control/examples.html?file=/products/demos/shipping/control/smithdemo.html>

<http://www.enm.bris.ac.uk/anm/workshop-a/programme/control-talks/gawthrop.pdf>

<http://es.scribd.com/doc/6631155/T8-Estructuras-Avanzadas-Predictor-Smith>

<http://www.isa.cie.uva.es/~maria/pids.pdf>

<http://www.uclm.es/profesorado/marodrigo/pdf/cap/cap5.pdf>

<http://web.usal.es/~sebas/PRACTICAS/PRACTICA%207.pdf>