

Controlador Neuro-Robusto para sistemas no lineales



Iván Machán-González *
Hilario López-García*
José Luis Calvo-Rolle **

Doctor Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Industrial
Doctor Ingeniero Industrial

* Universidad de Oviedo. Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Campus de Viesques, Edificio 2 – 33204 Gijón (Asturias). Tfno: +34 985 182532. machonivan@uniovi.es; hilario@uniovi.es

** Universidad de A Coruña. Dpto. de Ingeniería Industrial. Escuela Politécnica de Ferrol. Avda. 19 Febrero, s/n – 15403 Ferrol (A Coruña). Tfno: +34 981337400. jcalvo@cdf.udc.es

Recibido: 04/10/2010 • Aceptado: 14/03/2011

Neuro-robust controller for non-linear systems

ABSTRACT

- This work shows a new method to obtain the tuning parameters of a controller based on PID topology in standard format in order to lead the controlled system to a stable state. This technique is based on the well known Gain Scheduling method. Firstly, the system is identified for each key operating point obtaining the corresponding transfer functions by means of least squares techniques. Then the stability structures are calculated using the transfer functions aiming to train an artificial neural network which prevents the system from becoming unstable. Finally, the proposed method is experimentally verified on a laboratory plant.
- **Keywords:** neural networks, robust control, PID, non-linear systems.

RESUMEN

Este trabajo muestra un nuevo método para obtener los parámetros de ajuste de un regulador basado en el controlador tipo PID en su formato estándar, con el objetivo de situar la planta que se pretende controlar en una región de funcionamiento estable. Esta técnica subyace en el conocido método *Gain Scheduling*. En primer lugar el sistema es identificado para cada punto de operación significativo obteniendo las funciones de transferencia correspondientes mediante mínimos cuadrados. Después, empleando las funciones de transferencia, se hallan las estructuras de estabilidad con el objetivo de programar una red neuronal artificial, cuyo fin es prevenir que el sistema pase a ser inestable. El método propuesto es verificado experimentalmente sobre una planta de laboratorio.

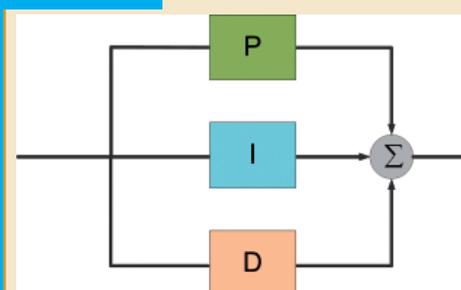
Palabras clave: redes neuronales, control robusto, PID, sistemas no lineales.

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería de control de procesos es necesario trabajar constantemente, con el fin de obtener nuevos métodos de regulación para

mejorar las topologías vigentes [1-3]. Esta demanda de aplicaciones en control es debida, entre otras, a la gran cantidad de posibilidades que están siendo empleadas a día de hoy.

A pesar del ritmo frenético de avances y descubrimientos de diferentes alternativas de regulación y control, ha sido imposible hasta el momento desbancar técnicas populares como el “tradicional” regulador PID. Desde el desarrollo de este controlador por Nicholas Minorsky [4, 5] en el año 1922, numerosos estudios han sido realizados sobre él.



Regulador PID

El PID es el regulador más universal de la teoría de control. Proporciona una señal de actuación que opera sobre la planta a controlar, correspondiente a la suma de acciones del error de tipo: proporcional, integral y derivativa.

Existen numerosas técnicas de control de procesos en cualquier campo, donde se han introducido innovaciones, como puede ser la inteligencia artificial [6]. Pese a ello, la inmensa mayoría de los lazos de control implementados emplea controladores de tipo PID, elevando el porcentaje de utilización entorno a un 90% [7]. El regulador PID tradicional se sigue empleando masivamente debido a razones de diversa índole como son: robustez, fiabilidad, simplicidad, tolerancia a fallos, etc. [8].

Las fórmulas desarrolladas para extraer los términos, que en ocasiones son empíricas, siempre están orientadas a optimizar una determinada especificación. Se ha de tener en cuenta que a menudo, cuando los parámetros se han obtenido para mejorar una característica concreta, ocurre que dicha mejora será en detrimento de otra. En el procedimiento habitual de ajuste de un controlador, tras la medición de características de la respuesta, será necesario proceder a la obtención de los parámetros mediante las expresiones, y seguidamente proceder a un ajuste fino mediante técnicas de prueba-error.

En control de procesos, a pesar de que se disponga de un sistema con un carácter no lineal, es usual que se requiera que ciertas especificaciones sean iguales en los diferentes puntos de operación en los que se trabaja. Si se opera con reguladores tipo PID, será necesario disponer de valores de parámetros de ajuste diferentes en cada una de las zonas de funcionamiento. Este aspecto puede ser solucionado con el uso de controladores PID de tipo adaptativo, y en algún caso predictivo [9-12]. En su implementación a menudo el operador se encuentra con soluciones costosas e íntimamente ligadas con el tipo de proceso que se pretende regular, y además suele ser complejo establecer una teoría genérica para ese tipo de controladores.

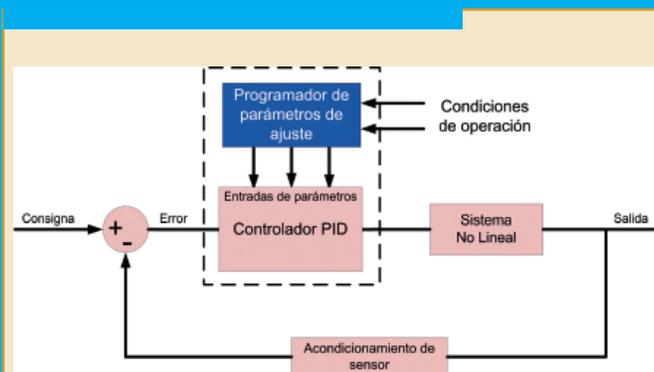
Algunos de los inconvenientes que conlleva el uso de controladores adaptativos convencionales en ocasiones pueden ser paliados exitosamente con el uso de controladores PID basados en la técnica de *Gain Scheduling*. Esta metodología es relativamente sencilla de implementar y normalmente se obtienen resultados altamente satisfactorios.

El concepto de *Gain Scheduling* aparece a comienzos de los años 90 [13], y se encuentra incluida por algunos investigadores en la familia de los controladores adaptativos [9].

Para poder llevar a cabo la implementación de la técnica de *Gain Scheduling* es necesario poder seleccionar variables significativas del sistema que permitan definir el punto de operación en el que se esté trabajando. A continuación es necesario dividir todo el rango de operación de la planta en zonas donde el comportamiento pueda ser considerado lineal. Seguidamente se obtendrán los parámetros de ajuste del controlador que permitan disponer de especificaciones similares a lo largo de todo el rango de operación de la planta.

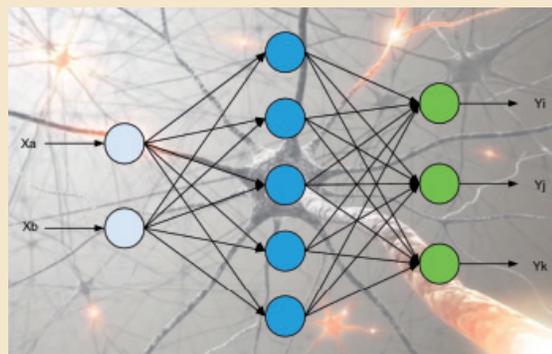
Aunque no existe un procedimiento sistemático para las tareas mencionadas, a menudo el primer paso de selección de variables consiste en tomar aquellas que pueden ser medidas de forma sencilla. El segundo paso suele ser mucho más complicado, pues no es tarea sencilla establecer las fronteras de los rangos de operación, y en ocasiones para un mismo sistema unos rangos no tienen absolutamente nada que ver con los otros. Si lo que se hace es seleccionar puntos concretos de operación en lugar de buscar rangos lineales, ocurre que el sistema puede ser estable en ellos para los parámetros hallados, pero no tiene por que serlo entre los puntos seleccionados para esos valores. Es un reto dentro de esta técnica, y por tanto carece de una solución simple, y cuando esta existe, está usualmente particularizada: es por ello que ha sido y sigue siendo motivo de estudio por investigadores [14-16].

A menudo los operadores humanos de planta que se encuentran al cargo, pese a que la técnica de *Gain Scheduling* selecciona los parámetros adecuados, poseen los privilegios para poder modificarlos con el objetivo de mejorar las especificaciones de la planta. Debido a este hecho la combinación de parámetros asignados por el operador pueden llevar a la planta a un estado de inestabilidad no deseado. El método propuesto trata de prevenir que el sistema se vuelva inestable pese a la asignación de valores a parámetros que lo provocarían.



Gain Scheduling

El método de "Gain Scheduling" en teoría de control es utilizado para el control de sistemas no lineales. Los resultados alcanzados con él son altamente satisfactorios en muchos casos, pese a estar basados en controladores de tipo lineal.



Red neuronal artificial

Las Redes Neuronales Artificiales son una gran área de la Inteligencia Artificial que consiste en una máquina con elementos neuronales de procesamiento paralelo, de tal forma que el comportamiento global emule de la forma más fiel posible a los sistemas neuronales animales.

El camino que se plantea para solucionar el problema está basado en el empleo de redes neuronales artificiales. Con la ayuda de las redes neuronales artificiales, en esencia, el método identifica si los parámetros programados en tiempo real por el operador humano llevarían la planta a la inestabilidad, y, si ese es el caso, no lo permite y son reemplazados por una combinación que aseguraría la estabilidad para ese punto de operación concreto en el que se encuentre trabajando.

El documento se estructura comenzando con la descripción de la topología de regulador empleada en el experimento, seguidamente se hace una descripción de la implementación sobre una planta experimental de laboratorio de tipo no lineal sobre la que se realizan las pruebas de la técnica propuesta, finalmente se redactan las conclusiones.

2. CONTROLADOR PID

Existen múltiples formas para representar el controlador PID, pero sin embargo la expresión más común es la indicada en la Ecuación 1.

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Donde 'u' es la variable de control y 'e' es el error resultante de 'e=Y_{sp}-y' (diferencia entre la referencia dispuesta a la entrada y la salida medida del proceso). Así, la variable de control es la suma de tres términos: el término P, el cual es proporcional al error, el término I, que es proporcional a la integral del error, y el término D, que es proporcional a la derivada del error. Los parámetros de ajuste del controlador son: la ganancia proporcional K, el tiempo integral Ti y el tiempo derivativo Td.

La representación en diagrama de bloques del controlador PID de la expresión anterior (comúnmente conocido como formato estándar) [7, 8], se tiene en la Figura 1.

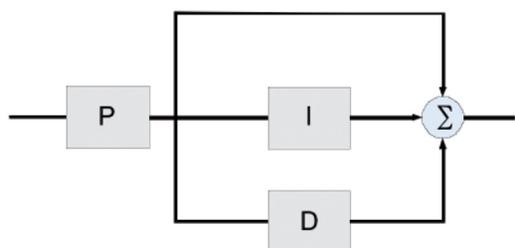


Fig. 1: Controlador PID en formato estándar

Existen multitud de procesos en la industria cuyo funcionamiento no es adecuado para determinadas aplicaciones. Este problema es a menudo resuelto empleando controladores PID con los cuales se obtienen ciertas especificaciones óptimas para el proceso que se esté

intentando controlar. El ajuste de este controlador es realizado mediante la variación de los términos correspondientes mencionados anteriormente.

3. TOPOLOGÍA PROPUESTA DE CONTROLADOR

La dinámica del sistema cambia con las condiciones de operación del proceso. Estas variaciones pueden ser debidas, por ejemplo, a las bien conocidas no linealidades inherentes del sistema. Es posible modificar los parámetros de control, mediante la monitorización de las condiciones de operación de la planta y el posterior establecimiento de reglas para seleccionar la combinación adecuada. La metodología de partida consistirá en primera instancia en la aplicación del método de *Gain Scheduling*, para lo cual es necesario en primer lugar analizar el comportamiento en puntos significativos de interés y, a continuación, establecer reglas para programar las ganancias adecuadas en el controlador. De esta forma, será posible mantener determinadas especificaciones relativamente constantes a lo largo de todo el rango de operación de la planta. La base de conocimiento de reglas programada deduce los parámetros de ajuste del controlador una vez que se conocen las condiciones de operación. El método de *Gain Scheduling* puede ser considerado como un tipo de realimentación no lineal de un tipo especial. Posee un controlador lineal cuyos parámetros son seleccionados dependiendo de las condiciones de operación, cuyas reglas son extraídas y programadas. La idea es relativamente simple, pero su implementación no es sencilla de llevar a cabo en sistemas de control no basados en computador.

A pesar de que se implemente el *Gain Scheduling*, se plantea en este trabajo ofrecer la posibilidad al operador humano de modificar los parámetros de ajuste del controlador con el fin de mejorar la operación del proceso. Esta idea se representa de forma esquemática en la Figura 2.

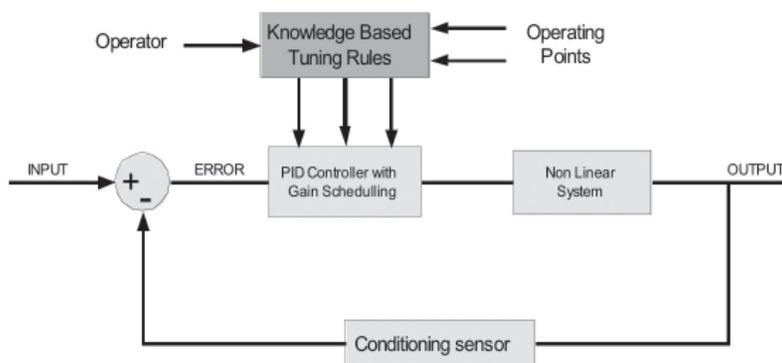


Fig. 2: Topología tradicional de Gain Scheduling modificada

La propuesta que se presenta dispone por tanto de nuevas entradas correspondientes a parámetros del controlador programados por el operador de forma manual, que serán sustituidos por los que la base de conocimiento de *Gain*

Scheduling programaría para el caso de que el operador los desee modificar. En ese caso el esquema de la propuesta planteada (Figura 3) incorpora una red neuronal artificial cuyo fin es detectar si la combinación de parámetros introducida por el operador llevaría a la planta a un estado de funcionamiento inestable. Si fuese así, la red neuronal restauraría la combinación de parámetros correspondiente al punto de operación en el que se esté trabajando, asegurando de esta forma que el sistema no se vuelva inestable. Tal y como se puede observar en la figura, la red neuronal posee dos estados posibles a la salida, si la combinación del operador es estable deja pasar los parámetros al controlador, si fuese inestable dejaría pasar los de la base de conocimiento.

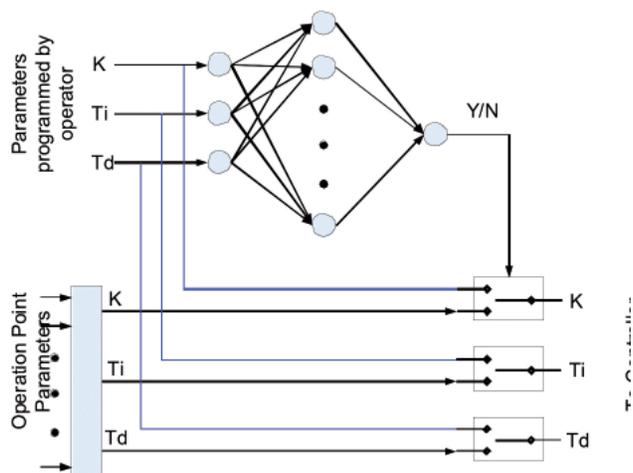


Figura 3: Estructura propuesta

4. CONCEPTO DE ESTRUCTURAS DE ESTABILIDAD

Es necesario disponer de datos suficientes para entrenar la red neuronal. Para ello y con el fin presentado en el apartado anterior, se emplean las estructuras de estabilidad o inestabilidad, que son estructuras de datos que delimitan los dos estados en términos absolutos, sin tener en cuenta valores concretos de especificaciones que pueda tomar el funcionamiento del sistema. Para obtener las estructuras se han dispuesto los tres parámetros del controlador en sendos ejes de coordenadas y, para cada coordenada, se representa un estado de estabilidad o inestabilidad, obteniendo de este modo un volumen tridimensional de estabilidad o inestabilidad. El resultado es un volumen perfecto con una transición absoluta sin que los dos estados puedan coexistir. Para la obtención de las estructuras se seleccionarán puntos de operación representativos en los cuales se realizará una identificación de la planta. Con la función de transferencia hallada se implementa un lazo de control de tipo PID, en el que se hace un barrido de combinaciones de los parámetros comprobando si el sistema es estable o no. Representando todos los puntos de un estado (estabilidad o inestabilidad) se obtienen las estructuras. De esta forma se obtienen las estructuras cuyas formas dependen de la función de

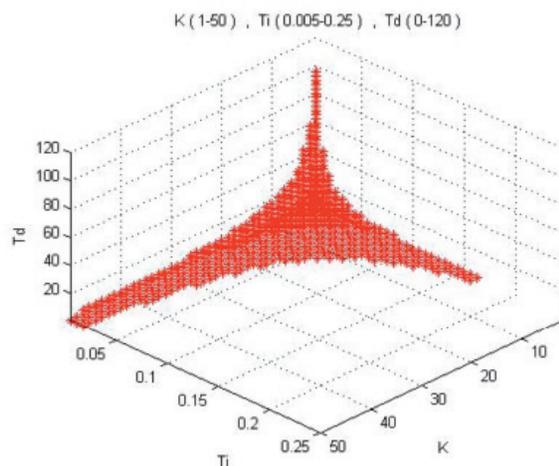


Fig. 4: Ejemplo de una estructura de estabilidad

transferencia de la planta a controlar. Existe abundante literatura relacionada con el problema de la estabilidad robusta que describe este concepto de forma clara. [17-23]. Un ejemplo de una estructura de estabilidad es mostrado en la Figura 4.

Se ha realizado un estudio de la respuesta ante entrada escalón de un sistema en puntos aleatorios en la zona limítrofe de transición entre estabilidad e inestabilidad (Figura 5), dos de ellos localizados en el borde en la zona estable (dentro de la estructura), y dos de ellos también en el borde en la zona inestable (fuera de la estructura).

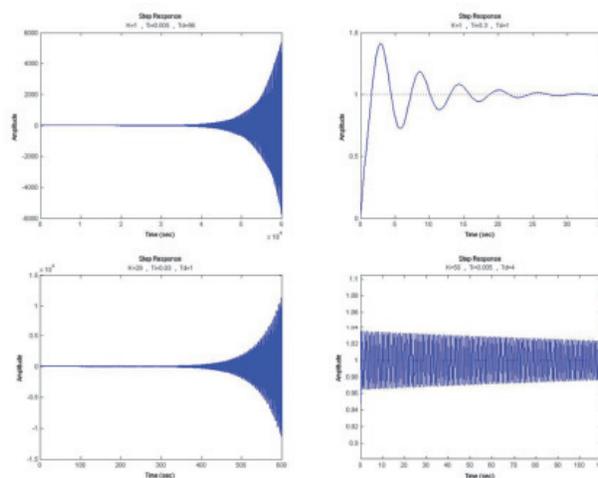


Fig. 5: Respuesta del sistema ante entrada escalón en las zonas limítrofes de funcionamiento

La obtención de las estructuras de estabilidad no siempre es posible. Sólo puede ser obtenido en aquellos casos en que la función de transferencia es conocida, o en sistemas en los que es posible pasarlo a la zona de estabilidad sin consecuencias no deseadas.

Es esencial denotar que las estructuras de estabilidad o inestabilidad están perfectamente separadas; nunca pueden

coexistir los dos estados. De esta forma se convierte en una herramienta que permite ser empleada en diferentes métodos de detección de áreas prohibidas de operación en sistemas regulados con controladores PID. En el ensayo de las combinaciones ejemplo de la Figura 5 se puede observar que para combinaciones estables la salida ante entrada escalón converge, sin embargo las inestables no. Se trata, por tanto, de una herramienta muy potente en el ámbito de los controladores autoajustables, cuyas ganancias están constantemente cambiando para adaptarse al proceso, con esta herramienta se previene que el sistema se haga inestable.

5. SISTEMA USADO PARA VERIFICAR EL MÉTODO PROPUESTO

La verificación del sistema propuesto se realiza sobre una pequeña planta de proceso de laboratorio que permite realizar un control de nivel de líquido en tanque. En la Figura 6 se muestra una fotografía del sistema así como un esquema representativo del mismo.

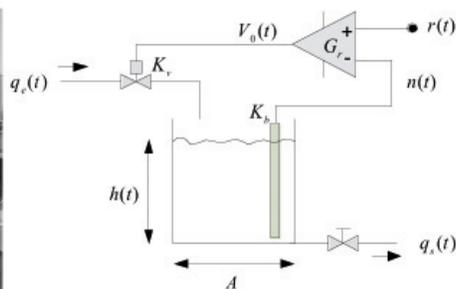


Fig. 6: Fotografía y esquema de la planta de laboratorio

El sistema consiste en un depósito, alimentado en su parte superior a través de una válvula proporcional, que será controlada para mantener el nivel de agua constante en el mismo, mientras se está vaciando a través de una restricción de salida. Las características del depósito son las que se indican seguidamente:

- A: Sección transversal del depósito (0.0063617m²)
- h: Nivel del líquido en el depósito (0-1 en tanto por uno)
- q_e: Caudal de entrada al depósito, que se encuentra limitado entre 0 y 0.000122455m³/s
- q_s: Caudal de salida del depósito (m³/s)
- a: Sección transversal de la restricción de salida (0.0001m²)
- g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

El regulador se implementa virtualmente en *Matlab/Simulink*. La interface de las señales de la planta se hace con una tarjeta de adquisición de datos. Como señal de consigna la planta recibe el nivel de líquido deseado en el tanque y la señal de control proporcionada por el regulador actúa sobre

la válvula proporcional, controlando el caudal de entrada al depósito.

5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

Las condiciones de operación del sistema son infinitas y por tanto habrá que seleccionar un número finito de posibilidades. En este sentido es necesario realizar una estimación coherente de la cantidad de puntos suficientes para conseguir buenos resultados. Una posibilidad es escoger una cantidad razonable de valores equidistantes y observar los cambios en los parámetros para cada caso. Si los cambios entre valores consecutivos son muy elevados es posible que sea preciso tomar valores intermedios.

Existen características propias del tanque como pueden ser el área de la base que no van a cambiar, independientemente del punto de operación en el que se esté operando. Para este caso el único parámetro que definirá el punto de operación es el nivel de líquido en el tanque. Es importante destacar que en condiciones de campo se pueden dar factores que lleven a tener en cuenta parámetros diferentes además del considerado en este trabajo. Teniendo en cuenta la planta piloto de laboratorio y los rangos de valores que puede tomar el nivel de líquido en el tanque se establecen las condiciones de operación mostradas en la Tabla I.

Nivel de líquido
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%

Tabla I: Puntos de trabajo seleccionados

Como se ha podido apreciar en las pruebas finales, los rangos de valores de nivel del tanque considerados son suficientes para cubrir el rango de operación del sistema.

5.2. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PARA CADA UNO DE LOS PUNTOS DE OPERACIÓN

En la fase de obtención de los parámetros del controlador para cada uno de los puntos de operación, para mayor sencillez, se ha dispuesto en la implementación práctica del controlador virtual, la posibilidad de seleccionar el realizar la realimentación mediante un bloque tipo relé o con un controlador tipo PID. Se hace de esta forma con el fin de facilitar la obtención de los parámetros del controlador mediante el método de Relay-Feedback que será expuesto seguidamente de forma resumida.

5.2.1. Método de Relay Feedback

Se trata de un método alternativo al tradicional método de Ziegler-Nichols [24 – 28], cuyo objetivo es hallar la

ganancia crítica 'Kc' y el periodo de oscilación sostenida 'Tc' del sistema. El método de *Relay-Feedback* es desarrollado por Aström y Hägglud [9, 29, 30], y consiste en llevar al sistema a un estado de oscilación mediante la adición de un relé (Figura 7).

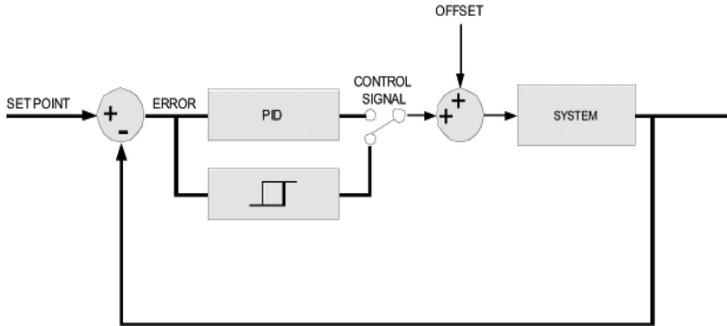
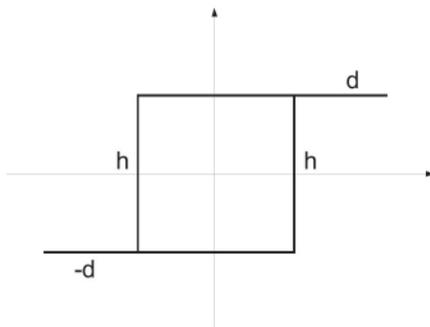


Fig. 7: Esquema típico de implementación del Relay-Feedback

En el experimento es conveniente emplear un relé con histéresis cuyas características son las mostradas en Figura



8, una amplitud 'd' y un ancho de la ventana de histéresis 'h'.

Fig. 8: Histéresis implementada en el relé

Una vez implementado el esquema de la Figura 7 se procede de la siguiente forma para obtener los parámetros mencionados de la respuesta del sistema Kc y Tc:

- Con la realimentación realizada a través de un controlador PID con cualquier valor de parámetros poner en funcionamiento el sistema hasta alcanzar el régimen permanente, anotando valores de la señal de control y salida del proceso.
- Seguidamente se realiza la realimentación mediante el relé. Como consigna se da el valor de la salida del proceso y como offset el valor de la señal de control del paso anterior.
- El proceso se pone en funcionamiento con las indicaciones realizadas en el paso anterior, y se aguarda hasta que la salida sea.
- Se anotan los dos parámetros indicados en la Figura 9 Tc y a.

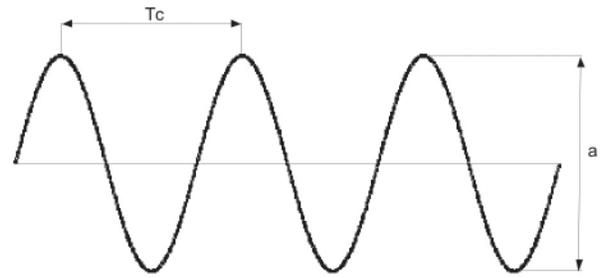


Fig. 9: Parámetros a anotar en el estado de oscilación

- La ganancia crítica del proceso Kc es determinada con la Expresión 2.

$$K_C = \frac{4d}{\pi \sqrt{a^2 - h^2}} \quad (2)$$

El método de *Relay Feedback* tiene la gran ventaja que se puede realizar en el punto de consigna en el que se esté operando, y se puede realizar en cualquier instante.

5.3. PROCEDIMIENTO SEGUIDO PARA LA PLANTA DE PRUEBAS

5.3.1. Obtención de los parámetros Kc y Tc

Para el caso particular mostrado en este trabajo, no es necesario implementar la histéresis mencionada en la explicación del método de *Relay-Feedback* con un valor de ventana, dado que se está trabajando con un sistema relativamente lento. En su lugar se ha implementado un comparador simple (Figura 10) que resulta ser suficiente.

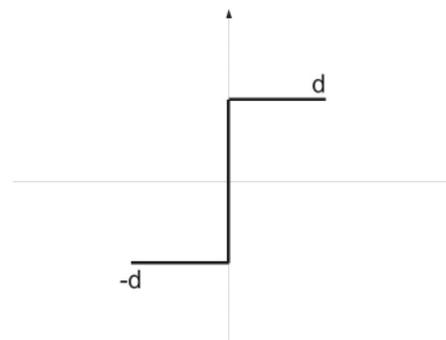


Fig. 10: Histéresis para la planta de pruebas

Para la Expresión 2 se tendrá por tanto que el valor de h es cero y el valor de d es 0.5. Se establece una consigna de 0.5 (50% de nivel), y en ese caso el *offset* no será necesario dando un valor de cero a esa entrada. Bajo esas condiciones el sistema se pone en marcha, y se obtiene como resultado la salida mostrada en la Figura 11.

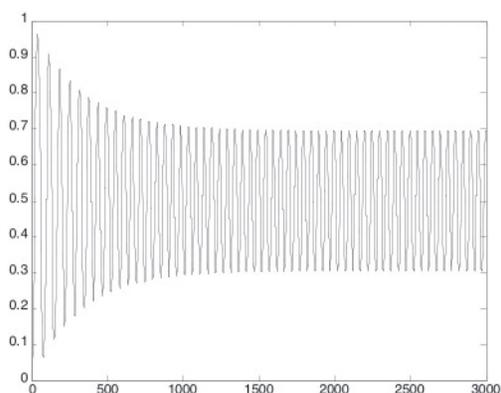


Fig. 11: Resultado de aplicación de Relay-Feedback en el punto de trabajo

Es necesario poner atención en la zona final de la gráfica, donde la oscilación se ha estabilizado: se toma en ese punto el periodo de oscilación T_c y con la expresión indicada previamente se obtiene el parámetro K_c .

5.3.2. Obtención de los parámetros iniciales del controlador PID

Con los valores de la respuesta obtenidos en el paso anterior, es posible hallar los parámetros de ajuste del controlador, mediante la aplicación directa de fórmulas, obteniendo de este modo los tres términos K , T_i y T_d . Es deseable realizar un ajuste para cambios en la carga (rechazo a perturbaciones).

Si se tiene en cuenta esto las expresiones para ajustar el controlador de Ziegler-Nichols en lazo cerrado pueden ser aplicadas. Son fórmulas pioneras para la obtención de los parámetros del controlador de forma empírica y están optimizadas para el criterio de cambios en la carga. La especificación que se trata de obtener es de caída de la sobreoscilación en un cuarto, lo que significa que ante una perturbación el amortiguamiento en la segunda oscilación tiene $\frac{1}{4}$ de valor del que se produce en la propia perturbación. Dichas expresiones se muestran en la Tabla 2.

K	$= 0.6 \times K_c$
T_i	$= 0.5 \times T_c$
T_d	$= 0.125 \times T_c$

Tabla 2: Fórmulas de Ziegler-Nichols para lazo cerrado

5.3.3. Ajuste fino del controlador

A los parámetros obtenidos en el párrafo anterior es posible que sea necesario someterlos a un ajuste fino, dado que los resultados pueden no ser óptimos.

En esta tarea delicada de ajuste es necesario indicar que no se ha de saturar la salida del controlador en ningún instante en la medida de lo posible. Además, es necesario adquirir un compromiso con un exceso de ganancia proporcional, lo que

da lugar a una rápida respuesta y un nivel de sobreoscilación no demasiado alto. Esto aparentemente puede parecer ideal, pero bajo esas condiciones la válvula proporcional está constantemente fluctuando lo que da lugar a su deterioro en un reducido periodo de tiempo.

Como conclusión, se tratará de conseguir salidas graduales, sin saturaciones o cambios repentinos como la que se puede observar en la Figura 12.

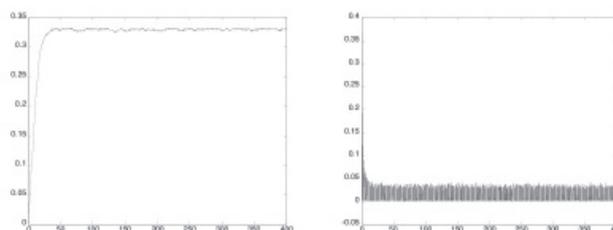


Figura 12: Ejemplo de nivel de líquido y valor de la señal de control hacia la válvula

5.3.4. Parámetros obtenidos para cada caso

Teniendo en cuenta todos los aspectos comentados en los apartados anteriores, se obtienen los valores de los parámetros del controlador con el correspondiente ajuste fino para cada uno de los puntos de operación indicado previamente. En todos los caso se han obtenido bajo un criterio de mínima sobreoscilación y máxima velocidad con las restricciones presentadas previamente. Los parámetros alcanzados son los que se muestran en la Tabla 3.

Nivel	K	T_i	T_d
10%	3.2	22	3.1
20%	3.0	27	3.9
30%	2.8	30	4.3
40%	2.5	33	4.6
50%	2.1	35	4.8
60%	2.0	36	5.1
70%	1.9	39	5.2
80%	1.6	40	5.3
90%	1.1	41	5.4

Tabla 3: Parámetros del controlador para cada punto de operación

5.3.5. Implementación de la red neuronal

Pese a que la red neuronal artificial tipo MLP (*Multi Layer Perceptron*) no es la mejor topología de red para clasificación, se ha empleado en este trabajo por obtenerse resultados satisfactorios. Dada la gran variedad de formas presentes en cada uno de los puntos de trabajo y teniendo en cuenta que estas no se adaptan a una función concreta, se ha optado por este método de clasificación frente a otros como *discriminantes lineales Fisher* o *árboles de decisión con poda*. Con ellos se obtienen errores de clasificación mayores que con el empleo de las redes neuronales, sobre

todo con los primeros. En primer lugar, ha sido necesario obtener la función de transferencia para cada punto de operación considerado. Para ello todas las funciones de transferencia de la planta se han obtenido por mínimos cuadrados mediante el método *ARX* empleando para ello la Toolbox de identificación de *Matlab*. Una vez que se dispone de las funciones de transferencia se obtienen las estructuras de estabilidad correspondientes, y con los puntos de esa estructura se lleva a cabo el entrenamiento de la red neuronal. Para cada punto de operación se obtendrá, por tanto, una red neuronal que posee una capa oculta, oscilando el número de neuronas en la capa oculta entre 6 y 8 para los puntos de operación considerados. La estructura de la red ha sido adoptada tras múltiples pruebas con diferentes números de neuronas en la capa oculta (las pruebas se ha realizado entre 4 y 9 neuronas) para cada una de las redes neuronales.

La función de activación de las neuronas en la capa oculta es de tipo tangente hiperbólica, excepto en la capa de salida en la que se ha empleado una función escalón. Una vez seleccionada la configuración se muestran las diferentes características obtenidas en el aprendizaje mediante el método de *backpropagation*. Los entrenamientos se han realizado en rangos entre 400 y 700 épocas, con un error al final del entrenamiento menor al 1% en todos los casos. Las redes neuronales artificiales han sido entrenadas offline, sin embargo la comprobación del correcto funcionamiento se ha llevado a cabo online.

6. IMPLEMENTACIÓN DEL MONTAJE Y VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS

La implementación del sistema ha sido realizada usando el entorno *Matlab/Simulink*, entre otras razones por haber empleado las redes neuronales artificiales. Para operar con la planta se ha optado por el uso de una tarjeta de adquisición de datos de *National Instruments* cuyo modelo es USB-6008 12-bits 10 KS/s Multifunction I/O. Esta tarjeta es automáticamente reconocida por el software *Matlab*, y es relativamente sencillo interactuar con ella. El esquema del proceso es implementado en *Simulink* con un diagrama como el que se muestra en la Figura 13.

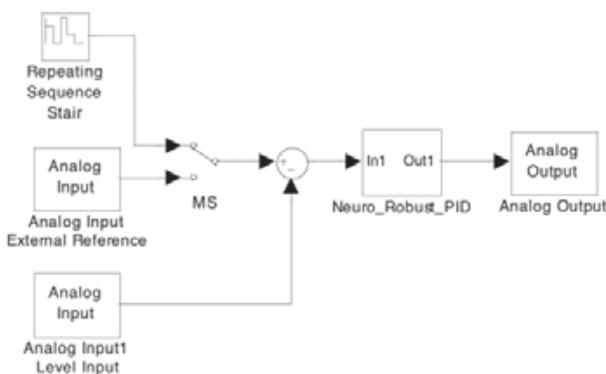


Fig. 13: Sistema implementado en Simulink

Existen dos posibilidades para indicar el punto de consigna. La primera de ellas es la generación de una secuencia de valores que se repite en el tiempo. La otra es indicar el valor de consigna mediante el uso de un voltaje externo (Analog Input Block Diagram). Por ello será necesario seleccionar entre una u otra posibilidad de introducción de consigna.

Para la lectura de los valores instantáneos de nivel de líquido en el tanque se usa un sensor de nivel por ultrasonidos cuya salida analógica se encuentra entre 0 y 10 voltios para el 0% y 100% de nivel respectivamente. Dicho sensor es conectado a una de las entradas de la tarjeta de adquisición de datos en modo diferencial (Analog Input 1). El siguiente paso es implementar el controlador previamente descrito, creando para ello el diagrama de bloques de la Figura 14.

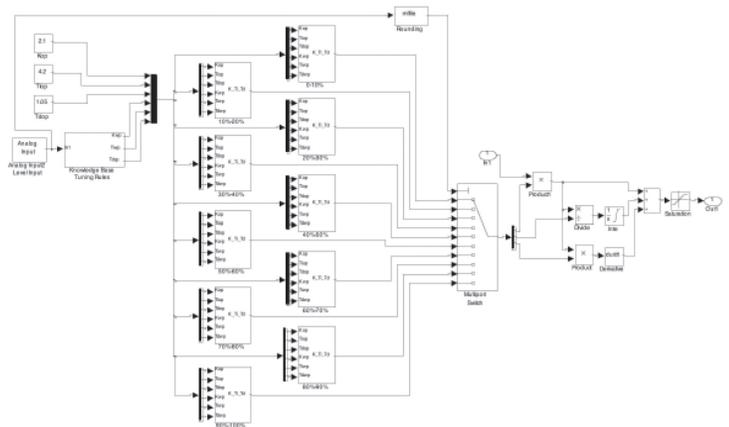


Fig. 14: Controlador implementado

Tal y como se puede observar en la Figura 14, lo que se ha hecho es integrar un controlador tipo PID cuyos parámetros son las salidas de un 'Multiport Switch', a su vez sus entradas dependerán del nivel de tanque leído por el sensor a través de la entrada analógica 2 y de los parámetros programados por el operador. En el esquema hay 10 bloques (*Range Blocks*), uno por cada rango de nivel (0%-10%, 10%-20%,..., 90%-100%), e internamente posee el esquema de la Figura 15.

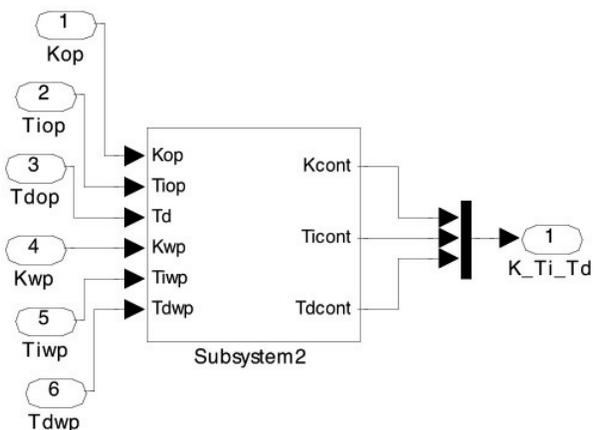


Fig. 15: Esquema interno de cada Range Block

A su vez dentro de cada 'Range Block' hay otro bloque 'Subsystem2', internamente posee el esquema de la Figura 16, que es la topología presentada en la Figura 3 implementada en Simulink de Matlab. En la Figura 17 se presenta la estructura de la red en simulink.

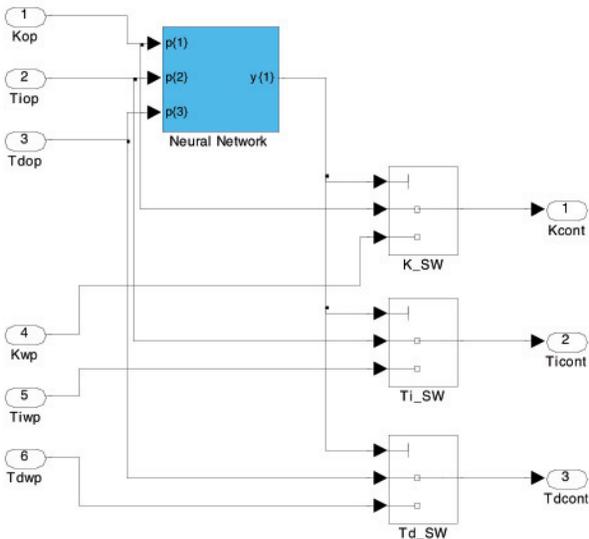


Fig. 16: Subsystem2 de la Figura 15

los toma como no válidos, y si se programa una secuencia en el bloque 'Repeating sequence Stair' de la Figura 13, el método selecciona los parámetros de controlador adecuados al punto de operación en el que se encuentre. Como ejemplo de ello se tiene la Figura 17, en la que se muestra la consigna indicada (trazo discontinuo) y la respuesta del sistema para ella. Se observa que la dinámica no varía en exceso pese a estar en diferentes puntos de operación.

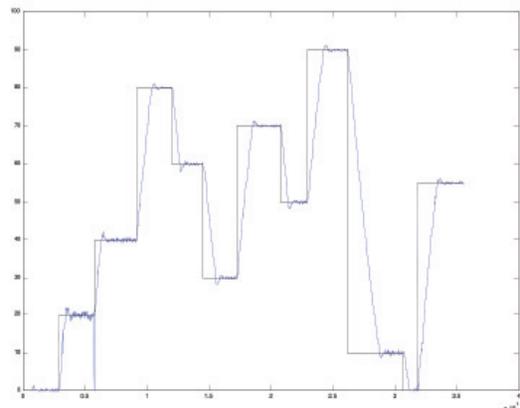


Fig. 18: Ejemplo de funcionamiento de la planta a lo largo del rango de operación con valores de parámetros del sistema (tiempo en milisegundos).

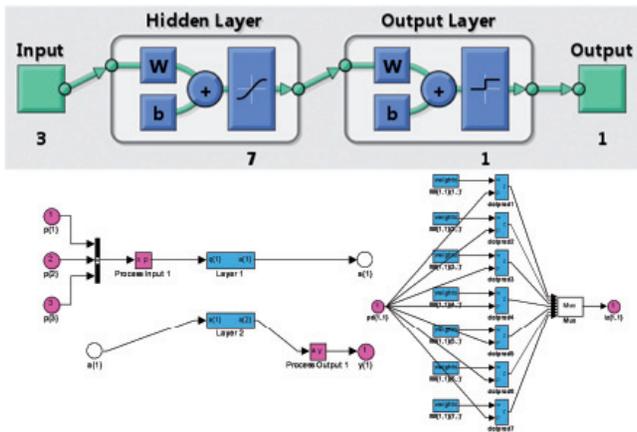


Fig. 17: Estructura de la red

Los pines In1 y Out1 de la Figura 14 son los pines del bloque Neuro_Robust_PID de la Figura 13, cuya señal de control se dispone en la salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos, para actuar directamente sobre la válvula proporcional.

De este modo, el controlador implementado puede seleccionar los parámetros más apropiados para el punto en el que se está operando. Cuando el operador modifica los parámetros, el sistema propuesto los evalúa, y, si con ellos pasase a ser inestable, serán reemplazados por otros apropiados a ese punto de operación en el que se encuentre, garantizando de este modo la estabilidad. Si se indican unos parámetros de controlador de operador nulos, el sistema

Se muestra a continuación mediante un ejemplo gráfico en la Figura 18 el funcionamiento del método. Se fija una consigna a la planta, y una vez que está estabilizada la respuesta, se cambia a otro valor de consigna habiendo cambiado los parámetros del controlador a unos valores no deseados. Para el caso de la gráfica de la izquierda no se emplea el método en que las redes neuronales descartarían la combinación si fuese peligrosa. En cambio en la gráfica de la derecha se aplica la técnica. Tal y como se puede observar la respuesta es mucho más satisfactoria para este segundo caso.

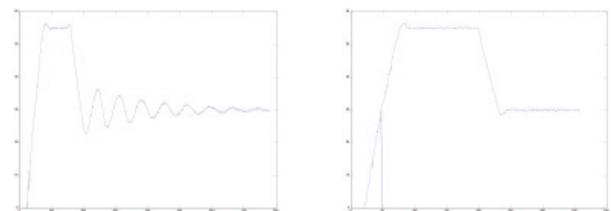


Fig.19: Ejemplo de empleo de la red neuronal para detectar combinaciones de parámetros peligrosas. Izquierda sin método, derecha con el.

7. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta un nuevo modelo de controlador caracterizado por conservar las prerrogativas que concede el tradicional PID en el que está basado, así como la posibilidad de aplicarlo a sistemas de carácter no lineal manteniendo especificaciones invariables en todo el rango de trabajo. Está dotado, además, de la posibilidad de que un

operador humano de planta por razones de diversa índole modifique manualmente los parámetros del controlador con el objetivo de conseguir unas especificaciones determinadas, con la seguridad en todo momento de que el sistema no pase a una zona de funcionamiento no deseada de inestabilidad.

La propuesta realizada en esta investigación es una opción a tener en cuenta en sistemas no lineales que trabajen en todo el rango de operación, y que pueda ser dividido en zonas con un comportamiento lineal en las que el control con un regulador PID sea factible. Es por tanto una alternativa a diferentes tipos de controladores autoajustables. Es necesario resaltar que no es una solución sencilla de realizar, pero con los dispositivos de control programables actuales y con las herramientas computacionales existentes, el trabajo se vuelve comparativamente simple.

Tras múltiples pruebas de la técnica propuesta sobre la planta de laboratorio en la que se ha ensayado en los diferentes puntos de trabajo, los resultados obtenidos son satisfactorios y cuando el operador humano con el ánimo de obtener otras especificaciones de funcionamiento introduce combinaciones de parámetros peligrosas, el sistema es robusto y no permite que este se vuelva inestable restaurando la combinación programada de seguridad para el punto de operación en el que se encuentre. Considerando el tamaño del depósito en el que se produce un rápido llenado y un rápido vaciado del mismo, es necesario indicar que la técnica ha funcionado de forma muy satisfactoria, se resalta además que las especificaciones temporales son muy similares en todos los puntos de operación tras diferentes cambios llevados a cabo en el nivel de líquido, hecho muy importante para el caso de funcionamiento sin modificación de parámetros.

8. AGRADECIMIENTOS

Nuestro sincero agradecimiento a la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA) por su financiación en el proyecto SensorControlPilot "Implementation of sensor based on-line control of pickling lines" con referencia RFSP-CT-2007-00046.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Calvo-Rolle JL, Alonso-Alvarez A, Ferreiro-García R. "Using Knowledge Engineering in a PID Regulator in Non Linear Process Control" *Ingeniería Química*, Vol. 32, p. 21-28, 2007
- Machon-Gonzalez, I. Lopez Garcia, H. "End-point detection of the aerobic phase in a biological reactor using SOM and clustering algorithms", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 19, no.1, p. 19-28, February 2006
- Haber-Guerra R, Alique-López J, Haber Haber R, Villena Salinas P. "Diseño e implementación rápida de controladores inteligentes" *DYNA Ingeniería e Industria*, Vol. 83-8, p. 459-466, Nov. 2008
- Mindell DA. "Between human and machine: Feedback, Control, and Computing before Cybernetics" Johns Hopkins Paperbacks edition, 2004. 439p. ISBN 0-8018-6895-5
- Bennett S. "Nicolas Minorsky and the automatic Steering of Ships", *Control System Magazine*, Vol 4-4, p. 10-15, 1984

- Moradi MH. "New techniques for PID Controller Design" Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'01 Denver, USA, p. 764-769, 2001
- Astrom KJ, Hagglund T. "PID controllers: Theory, Desing and Tuning" ISA 2^o ed. Research Triangle Park. 2006. 343p. ISBN 978-1-55617-516-9
- Feng YL, Tan KC. "PIDeasyTM and automated generation of optimal PID controllers" Third Asia-Pacific Conference on Control&Measurement China p. 29-33. August 1998
- Astrom KJ, Wittenmark B. "Adaptive Control". Addison Wesley Publishing Company. 1989. 574p. ISBN 0-201-55866-1
- Astrom KJ, Hagglund T. "The future of PID control", *Control Engineering Practice* Vol. 9-11 p. 1163-1175. 2001
- Morari M, Zafiriou E. "Robust Process Control", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989. 512p. ISBN 0-137-82153-0
- Camacho EF, Bordons C. "Model Prediction Control in the Process Industry, in: Advances in Industrial Control", Springer- Verlag, Berlin, 1995. 405p. ISBN: 1-85233-694-3
- Rugh WJ. "Analytical Framework for Gain Scheduling" *IEEE Control System Magazine*. Vol 11-1 p. 79-84, Jan.1991
- Clement B, Duc G. "An interpolation Method for Gain Scheduling" Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. p. 1310-1315, Florida Dec.2001
- Lu WM, Zhou K, Doyle JC. "Stabilization of LFT systems" *IEEE Trans. on Aut. Cont.* Vol 2-11 p. 1239-1244, 1991
- Hiramoto K. "Active Gain Scheduling: A Collaborative Control Strategy between LPV Plants and Gain Scheduling Controllers" 16th IEEE International Conference on Control Applications. p. 385-390, Singapore, Oct.2007
- Gaston R, and Safonov M. "Exact calculation of the multiloop stability margin", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 33-2 p. 156-171, 1988
- Barmish B. "New tools for robustness of linear systems", Macmillan Publishing Company, 1994
- Keel LH and Bhattacharyya SP. "Robust, Fragile, or Optimal" *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.2-4, p.1307-1313, 1997
- Canale M, Fiorio G, Malan S and Taragna M. "Robust tuning of PID controllers via uncertainty model identification", *European Journal of Control*, Vol.5, No.2, p. 316-328, 1999
- Voda A and Landau ID. "Applications of the KLV method for the auto-calibration of PID controllers" in Proc. of the 2nd IEEE Conference on Control Applications, p.829-834, 1993
- Dorato P, Yang W and Abdallah C. "Application of quantifier elimination theory to robust multi-objective feedback design", *Journal of Symbolic Computation*, Vol. 11, p.1-6, 1995
- Silva GJ, Datta A, Bhattacharyya SP. "PID controllers for time-delay systems" Birkäuser Boston 2005. 348p. ISBN: 0-817-64266-8
- Zhuang M and Atherton D. "Tuning PID controllers with integral performance criteria", in: Control'91, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, 1991.
- Cominos P and Munro N. "PID controllers: recent tuning methods and design to specifications", *IEE Proceedings Control Theory and Applications* Vol.149-1 p. 46-53, 2002
- Astrom KJ, Hagglund T, Panagopoulos H. "Design of PID controllers based on non-convex optimization", *Automatica* Vol. 34-5, p. 585-601, 1998
- Astrom KJ, Hagglund T. "Revisiting the Ziegler-Nichols tuning rules for PID control", *Asian Journal of Control* Vol. 4-4, p. 364-380, 2002
- Ziegler JG, Nichols NB. "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of ASME*, Vol. 64, p. 759-768, 1942
- Astrom KJ and Hagglund T. "Automatic tuning of simple regulators for phase and amplitude margins specifications." In Proceedings of the IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco, California, 1983.
- Astrom KJ, Hagglund T. "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins" *Automatica* Vol.20-5, p. 645-651, 1984