



COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN HORNOS APLICANDO TÉCNICAS MODERNAS DE CONTROL

(Behavior of the furnaces temperature applying moderns control techniques)

Recibido: 05/09/2012 Aceptado: 09/07/2013

Rodríguez, José

Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín, Venezuela

jgrodriquez3@urbe.edu.ve

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue determinar el comportamiento de la temperatura en hornos utilizando técnicas modernas de control, para la realización de este proyecto se siguieron los aportes de los autores Ogata (1998) y Creus (1998), entre otros, para la construcción de las bases teóricas, los pasos necesarios a las exigencias de los entes involucrados en el proyecto, adoptando una metodología propia, estructurada en cinco fases: I) Análisis del funcionamiento de la planta piloto de control de temperatura, II) Obtención de los datos experimentales de la planta, III) Identificación de la planta y obtención del modelo matemático que rige el comportamiento de la planta, IV) Diseño y entonamiento de los controladores PID, PID difuso y basado en redes neuronales, V) Determinar el comportamiento de la temperatura de la planta piloto frente a los controladores anteriores. Los resultados arrojaron semejanzas en cuanto a la operatividad de los controladores y el funcionamiento del mismo y diferencias en cuanto a los parámetros respecto al comportamiento en variación del tiempo de estabilización y de retardo, ello permitió dar nuevas alternativas para el diseño de controladores para el control de la temperatura.

Palabra clave: Temperatura en calderas, Técnicas de control, Lógica difusa, Redes neuronales.

ABSTRACT

The purpose of this investigation was to determine the behavior of the furnaces temperature using modern control techniques, for the realization of this project the contributions of Ogata (1998) and Creus (1998), among other authors, were followed for the construction of the theoretical bases, the necessary steps to the demands of the entities involved in the project, adopting an own methodology, structured in five phases: I) Analysis of the operation of pilot plant of the control of temperature, II) Collection of experimental data of the plant. III) Identification of the plant and building mathematical model for plant's behavior. IV) Design and tuning of PID, Fuzzy PID controllers, and based on neural network, V) Determine the behavior of temperature in front of the previous controllers. Results showed similarities about operability of the controllers and behavior of them, and also showed differences for the parameters concerning behavior in variation of time stabilization and time delay; it led to new alternatives for the design of controllers for the control of the temperature.

Keyword: Furnaces temperature, Control techniques, Fuzzy logic, Neural networks.



INTRODUCCIÓN

En el desarrollo mundial de los sistemas de control, se puede observar en su parte teórica que hay diversas formas de diseñar y modelar los diversos controladores para los fines requeridos. Se hablan de funciones de transferencia, de diagramas de estado y otros términos que son un poco complicados de entender para algunos no estudiosos de la materia.

Para el diseño de sistemas de control, incluyendo la identificación de sistemas y el propio diseño de los controladores se utilizan muchos cálculos matemáticos que no son comunes, porque se debe conocer muy bien los procedimientos y funciones requeridas para tales fines. Para algunos procedimientos es necesario conocer las características de los elementos de las plantas a controlar.

En este sentido, hay varias herramientas que se utilizan, una de ellas son los controladores PID, para los cuales ya existen criterios para poder entonarlos y otros se relacionan con el pensamiento humano como son la lógica difusa y las redes neuronales, donde la primera presenta la cualidad de ser una teoría fundamentada en conjuntos basados en el lenguaje humano y la segunda con la forma del pensamiento en sí del cerebro humano. En el sector industrial se necesita tener nuevas tecnologías del control de los procesos para hacerlos más eficientes.

Las técnicas modernas de control en la industria, como la lógica difusa y las redes neuronales en los sistemas de control, hacen un papel eficiente en algunos procesos, la determinación del modelo de las plantas se hace mucho más eficiente y se pueden tomar partes del sistema que antes se despreciaban, el diseño del sistema de control se hace de una forma sencilla ya que los parámetros que se utilizan para su determinación son similares al pensamiento humano.

La temperatura en los hornos es una de las variables que se miden en los procesos industriales, ya que esta determina las características de los productos que se están desarrollando y tiene que ser monitoreada en varias etapas del proceso para mantener las propiedades del producto.

Por otra parte, el propósito fundamental de la presente investigación es el estudiar el comportamiento de la temperatura en hornos usando las técnicas modernas de control, obteniendo así alternativas de solución para procesos industriales y académicos, permitiendo ampliar los conocimientos a través de nuevos métodos de control alterno.

PROCESOS DE CONTROL Y FILOSOFÍAS DE CONTROL

Los procesos de control y automatización surgen de la necesidad de tener al alcance el mayor grado de estabilidad y pureza dentro de las industrias, sobre todo aquellas cuya producción es continua y precisa para de esta manera también proteger al personal ante ambientes de alto riesgo. Para lograr lo antes planteado, existe una serie de magnitudes, las cuales requieren una gran atención, entre ellos se pueden mencionar el control de flujo o caudal, la presión, el nivel, la temperatura, entre otras (Creus, 1998).



Con el fin de realizar dicho control es necesario cumplir con una serie de condiciones y estrategias que permitan una efectiva función de control y supervisión de forma automática de la actividad en estudio (Ogata, 1998). En muchos casos los sistemas de control implementados no son apropiados para cada proceso y deben estar constantemente supervisados en forma manual para poder tomar en cuenta todos los factores que varían durante su actividad, estos factores pueden ser muy relevantes cuando ha transcurrido el tiempo, requiriendo un ajuste desde el punto de vista del control mismo.

Los sistemas que controlan la magnitud temperatura de una planta no siempre pueden probarse en línea, para comprobar su funcionamiento habría que detener el proceso y cambiar la estrategia de control asumiendo esta como la más eficiente, pero en la mayor parte de los casos esto no es posible, los procesos son continuos y detenerlo produciría mayores problemas y gastos al tratar de cambiar el sistema de control.

Los cambios de las estrategias de control implementadas se producen debido a que al transcurrir el tiempo por efecto de su misma dinámica del proceso se va saliendo de los parámetros establecidos inicialmente en el control, lo cual conlleva a una serie de fallas o desbalances en el funcionamiento que pueden ocasionar graves daños al producto o actividad que se esté realizando.

Si las estrategias de control no son cambiadas a una que lo regule en la forma deseada, se produciría inestabilidad que puede llevar a una manufactura defectuosa, a un mezclado erróneo, a una temperatura inadecuada para una mezcla química, entre otros.

Por lo antes mencionado, previo a implementar una estrategia de control, se debe determinar si esta es la apropiada, lo cual implica simular el comportamiento, llevarlo a un computador y estudiar el comportamiento del mismo para establecer si la estrategia de control es la adecuada.

Para realizar la simulación del sistema es necesario en primer lugar modelarlo matemáticamente, lo que implica determinar las relaciones que existen entre todos los factores que intervienen en el mismo, aplicando las leyes y ecuaciones que describen el comportamiento del proceso.

En ingeniería existen dos vertientes diferentes que forman la base para el desarrollo de modelos matemáticos (Ríos, 2007), dichas vertientes son el modelo analítico y modelo de forma experimental o empírica. El modelo analítico se divide en varias etapas, la primera consiste en la delimitación del modelo en función de los fenómenos que resulten relevantes de acuerdo al problema que se quiere resolver. En esta etapa es donde no se puede sistematizar fácilmente, y requiere una dosis de intuición y sobre todo un vasto conocimiento y experiencia en relación con el sistema a modelar.

Una vez delimitados los fenómenos que se consideran relevantes para la construcción del modelo se pasa a la siguiente etapa, en la que se deben formalizar las relaciones constitutivas y estructurales asociadas respectivamente a los fenómenos considerados y a la forma en que estos se disponen dentro del mismo. En los sistemas físicos, estas



relaciones constitutivas y estructurales encuentran su expresión formal (matemática) en las leyes fundamentales de los dominios de la física asociada a los fenómenos a estudiar.

Por ende, el modelo analítico de un sistema físico conlleva al conocimiento de las leyes físicas elementales asociadas a los fenómenos que se estudian, debido a que hay que relacionar las variables del proceso más relevantes y aplicar las leyes básicas fundamentales para obtener una relación matemática que emule el comportamiento del proceso.

El modelo en forma experimental o empírica se basa en la obtención de datos a través de la manipulación de las variables (Valderrama, 1995), esta manipulación proporciona una serie de datos que permiten aplicar los procedimientos adecuados para la identificación del proceso y modelar este sin necesidad de aplicar las leyes físicas fundamentales que rigen el comportamiento del mismo.

Para determinar los modelos matemáticos en forma experimental hay que escoger el método más idóneo para ese fin. Entre los métodos modernos que se consideran se encuentran las redes neuronales, la lógica difusa, sistemas expertos, algoritmos genéticos, entre otros, que sirven para modelar procesos como el de la temperatura en hornos.

Las redes neuronales son un sistema de neuronas biológicas que están compuesto por neuronas de entrada (sensores) conectados a una compleja red de neuronas "calculadoras" (neuronas ocultas), las cuales, a su vez, están conectadas a las neuronas de salidas que controlan (Freeman, 1991); por ejemplo, los músculos, como los sensores que pueden ser señales de los oídos, ojos, las respuestas de las neuronas de salida activan los músculos correspondientes.

En el cerebro hay una gigantesca red de neuronas "calculadoras" y ocultas que realizan la función requerida. De forma similar, una red neuronal artificial debe ser compuesta por sensores del tipo mecánico o eléctrico para que emule el mismo funcionamiento.

Otro de los métodos que se utilizan es la Lógica difusa o Lógica fuzzy, en la forma de lógica utilizada en algunos sistemas expertos y en otras aplicaciones de inteligencia artificial, en la que las variables pueden tener varios niveles de verdad o falsedad representados por rangos de valores entre el 1 (verdadero) y el 0 (falso) (Martín del Brío, 2002).

Con la lógica fuzzy, el resultado de una operación se puede expresar como una probabilidad y no necesariamente como una certeza. Por ejemplo, además de los valores verdadero o falso, un resultado puede adoptar valores tales como probablemente verdadero, posiblemente verdadero, posiblemente falso y probablemente falso.

Un método más avanzado para representar el conocimiento, es el de sistemas expertos. Está compuesto por varias clases de información almacenada: las reglas If - Then le dicen al sistema cómo se debe reaccionar ante los estados del "mundo" (Durkin,



1994). Una regla del sistema experto puede ser if, Y es un hombre, Then Y es mortal. Los hechos describen el estado del "mundo". Por ejemplo: Juan es mortal. Por último, una máquina de inferencia relaciona los hechos conocidos con las reglas If-Then, y genera una conclusión.

OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y MODELOS MATEMÁTICOS

Para la obtención de los datos se utilizó una planta piloto de la empresa Elettronica Veneta, empresa italiana reconocida como líder mundial en el campo de los equipos para la formación técnica, que consta con todos los elementos necesarios para simular procesos de control de temperatura.

La recopilación de los datos de temperatura requiere de mucho cuidado ya que hay varios factores que intervienen en ello, como la temperatura ambiente del lugar, de la toma de datos, el ruido que genera el amplificador de potencia y la descalibración de los condicionadores de señal, que pueden ocasionar lecturas erróneas, para eso se toma como referencia un termómetro de mercurio para comparar las mediciones.

Después de haber recolectado los datos experimentales, se utilizaron varias estructuras de relación entre los datos experimentales para determinar el modelo matemático que más se aproxima al modelo real de la planta.

Las estructuras utilizadas para el modelado del proceso fueron la ARX, la ARMAX, la de Error de Salida y la Box-Jenkins generada por el programa MATLAB de MathWorks, el cual se usó como plataforma para la simulación y pruebas. Cada uno de los datos fue aplicado a cada una de las estructuras para determinar cuál era la más conveniente.

Un modelo completo (Ríos, 2007), viene dado por:

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t)$$

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k}$$

$$H(q) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} h(k)q^{-k}$$

Los coeficientes en cuestión entran en el modelo como parámetros a ser determinados. Se llama entonces θ al vector que contenga todos los parámetros a estimar, donde la descripción del modelo será la siguiente:

$$y(t, \theta) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t)$$

Luego de haber aplicado todas las estructuras antes mencionadas, y haciendo los ajustes respectivos a cada uno, se obtuvo que el modelo más cercano fue el OE (error de salida) ya que este dio un error pequeño en relación al comportamiento de la planta. Ya



identificada la planta en forma discreta se determina la función de transferencia que se usa para describirla y poder estudiar el comportamiento, es:

$$G_p(z) = \frac{0.09165}{z - 0.8967}$$

Llevando la función de transferencia en forma discreta a forma continua, se tiene:

$$G_p(s) = \frac{0.09674}{s + 0.1091}$$

El siguiente paso es diseñar el controlador PID, proporcional-integrativo-derivativo, para observar el comportamiento de la planta piloto. Dado el tipo de función de transferencia no es posible aplicar el método de Ziegler-Nichols, ya que no es posible hacerlo oscilar de forma directa y sostenida.

Otro procedimiento aplicable al disponer de herramientas de simulación es la entonación a mano, según el método de Smith (1979), citado por Jantzen (1998), en su reporte # 98-H 8,71. Procedimiento entonamiento manual: Hand-Tuning.

1. Eliminar la acción Integradora y/o Derivativa al hacer $T_d=0$ y $1/T_i=0$.
2. Afinar la ganancia proporcional K_p para que produzca la respuesta deseada, ignorando cualquier offset final sobre el punto de ajuste que se introdujo.
3. Incrementar la ganancia proporcional y seguidamente la ganancia Derivativa T_d para amortiguar el sobre pico.
4. Ajustar la ganancia Integral $1/T_i$ para remover cualquier offset final.
5. Repetir hasta que la ganancia Proporcional sea grande como sea posible.

Este procedimiento ajusta la ganancia derivativa antes que la integral, pero esta secuencia puede invertirse. Para entonar el controlador PID se utilizó una señal escalón y siguiendo las reglas anteriores se obtuvo los siguientes parámetros para el controlador:

$$K_p = 4000$$

$$T_d = 0 \text{ seg}$$

$$1/T_i = 0.01 \text{ seg}$$

En segundo término, se procedió a realizar y definir el controlador PID difuso, para describir el comportamiento de la variable temperatura frente a este tipo de controlador. Se definió en primer lugar las ganancias del controlador basados en la implementación de Jantzen para el entonamiento de los controladores PID difusos.



$$GE * GU = K_p$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d$$

$$\frac{GIE}{GE} = \frac{1}{T_i}$$

Para el análisis del control difuso se ajustaron los parámetros del controlador con los siguientes valores:

$$GE = 8$$

$$GU = 1.5$$

$$GCE = 0$$

$$GIE = 80$$

Para finalizar solo queda definir las variables lingüísticas de conjunto difuso y las funciones de membresía. Las cuales se hará según el modelo de Mandani.

Si el voltaje es bajo (set point) la temperatura es baja.

Si el voltaje es medio (set point) la temperatura es media.

Si el voltaje es alto (set point) la temperatura es alta.

En último término se procedió a determinar el comportamiento de la planta con un controlador basado en redes neuronales, para ello se realizaron los procedimientos de entrenamiento de la red para encontrar el mínimo global.

Para la red neural se escogió una de del tipo retro propagación, ya que dicha red neural converge de una forma rápida, se diseñó una de 3 capas; quince, ocho y una neurona respectivamente, lo que arrojo un valor óptimo de error de $9.0711e-32$ en unas 1007 iteraciones.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Luego del diseño de cada uno de los controladores, la subsiguiente implementación y simulación, se observó un comportamiento estable para todos los controladores, teniendo cada uno de ellos sus diferencias con relación a los tiempos de estabilización y el tiempo de retardo de cada uno. Siendo el PID y el controlador PID difuso los que poseen similitudes en su comportamiento en relación a la respuesta de la planta.

El controlador basado en redes neuronales presentó un comportamiento lento en relación a los anteriores. Para plantas que posean más de una entrada y más de una



salida el controlador PID difuso es una alternativa ya que solo son necesarios conocer algunos parámetros y el comportamiento básico de la planta para poder ser diseñados.

En los controladores basados en redes neuronales solo es necesario conocer la respuesta de la planta para empezar a desarrollar dicho controlador. El controlador PID es una solución sencilla para en lazos de control sin perturbaciones, sin embargo se presenta la dificultad de entonar dichos controladores.

CONCLUSIONES

El estudio permitió la familiarización con la tecnología utilizada por el fabricante, en lo relacionado con los elementos actuadores, el proceso en sí mismo y los sensores. El conocimiento de la constitución física permitió su operación adecuada y pudiera ser manipulado de forma adecuada y corregir de forma apropiada cualquier problema que surgiera.

Con los datos obtenidos del comportamiento de la planta se estableció las estructuras necesarias para la identificación del mismo, se realizaron varias pruebas con cada uno de las estructuras entre las que se encuentran las ARX, ARMAX, OE Y BOX-JENKINS, para cada una de las estructuras anteriores se variaron los parámetros y determinaron los errores de estimación, donde se escogió la respuesta del modelo OE ya que este mostró el menor error.

Identificado el modelo de la planta se procedió a encontrar la función de transferencia, la cual en primer lugar se determinó de forma discreta ya que los procedimientos seguidos trabajan con valores puntuales (discretos); para luego convertir esta función discreta en forma continua ya que el estudio se basa en el comportamiento de la temperatura en el tiempo.

Una vez determinada la función de transferencia se procedió a diseñar e implementar los controladores PID, PID difuso y un controlador basado en redes neuronales, una vez obtenido cada controlador se aplicó a la planta para determinar el comportamiento de la temperatura aplicando un escalón unidad en la entrada.

Se observó que el comportamiento de los controladores PID y PID difuso son muy similares, el entonamiento de cada uno de ellos proporcionó un tiempo de retardo muy bajo, sin embargo el tiempo de levantamiento de PID fue menor que el del PID difuso, en relación al tiempo de asentamiento en el PID se obtuvo un tiempo menor que el de PID difuso; en los resultados obtenidos el mejor entonamiento del PID difuso se estabiliza en un punto mayor al valor del escalón que se le proporciono a diferencia del PID donde se estabilizó en el valor del escalón aplicado.

Con relación al controlador basado en redes neuronales, este presenta un tiempo de levantamiento y asentamiento muy grande en relación a los dos controladores anteriores, queda como resultado que este controlador es más lento. Después de ver el comportamiento de cada controlador se concluyó que el PID es el que presenta mejores y eficientes condiciones para el control de temperatura.

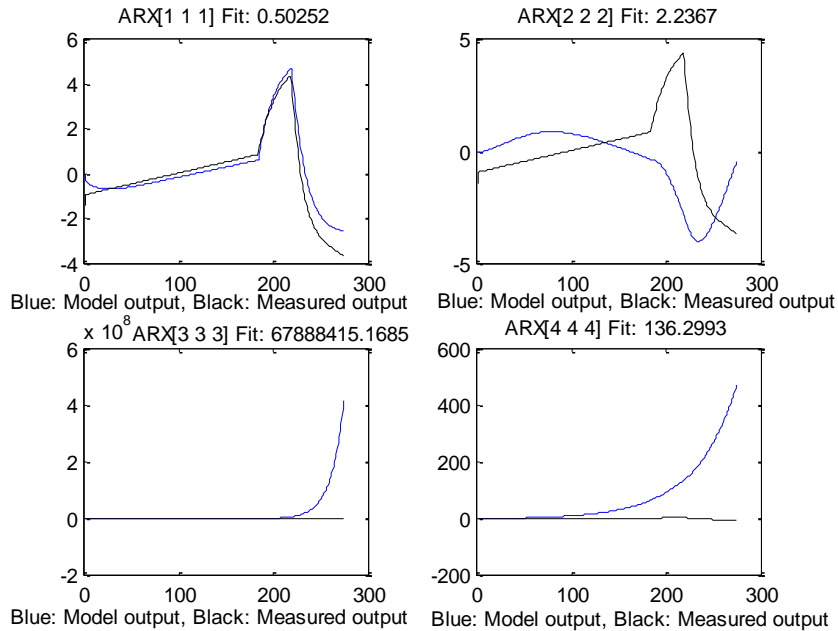


REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Creus, A. (1998). Instrumentación industrial. México. Editorial Alfaomega.
- Durkin, J. (1994). Expert systems: design and development. Estados Unidos. Maxwell Mac-Millan.
- Freeman, J. (1991). Neural networks algorithms, applications, and programming techniques. Estados Unidos. Addison-Wesley Publishing Company.
- Jantzen, J. (1998). Tuning of fuzzy PID controllers. Documento en línea. Disponible en: <http://faculty.petra.ac.id/resmana/private/fuzzy/fpid.pdf>. Consulta: 15/03/2012.
- Martín del Brío, B. (2002). Redes neuronales y sistemas difusos. España. RA-MA Editorial.
- Ogata, K. (1998). Ingeniería de control moderna. México. Prentice-Hall hispanoamericana, S.A.
- Ríos, S. (2007). Modelización. España. Alianza Editorial.
- Valderrama, M. (1995). Modelos matemáticos aplicados a las ciencias experimentales. España. Ediciones Pirámide.

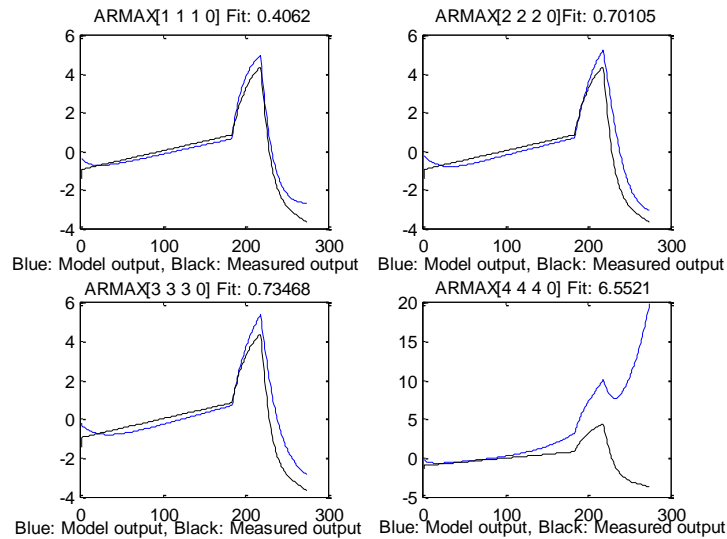
APÉNDICE

Figura 1. Respuesta del modelo ARX



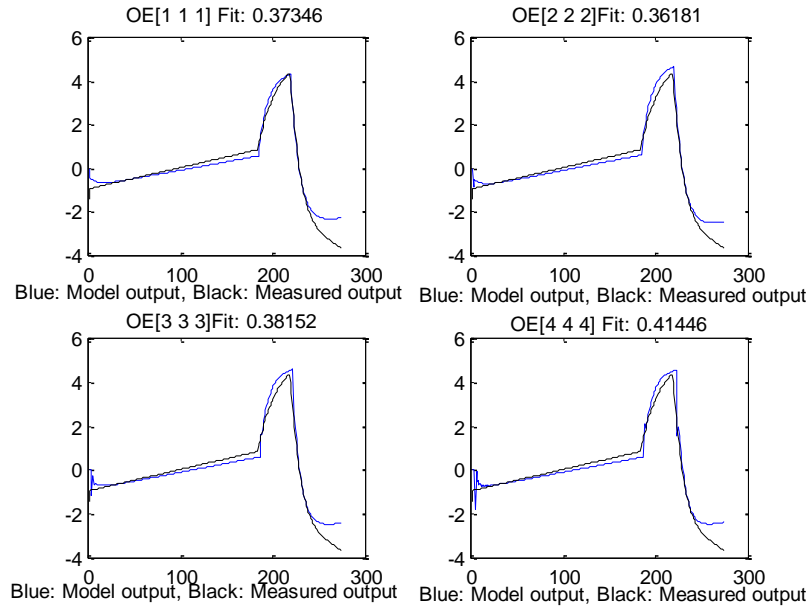
Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Respuesta del modelo ARMAX



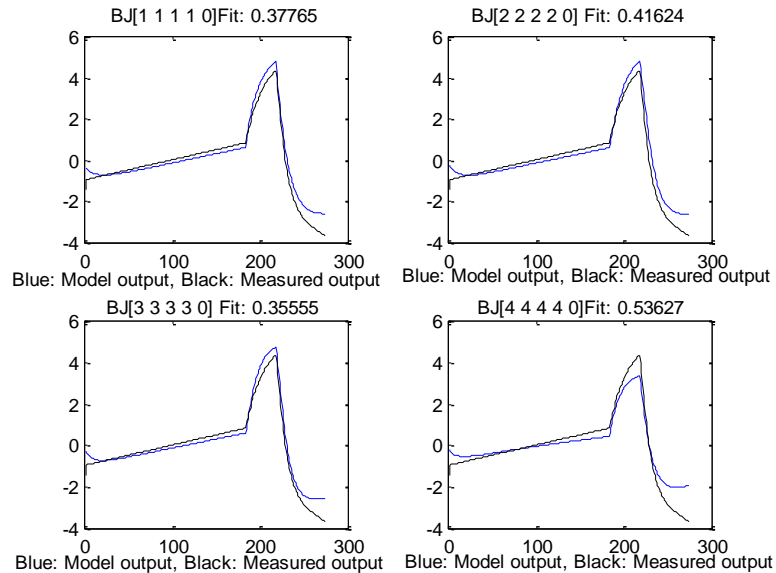
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Respuesta del modelo OE



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Respuesta del modelo Box-Jenkins



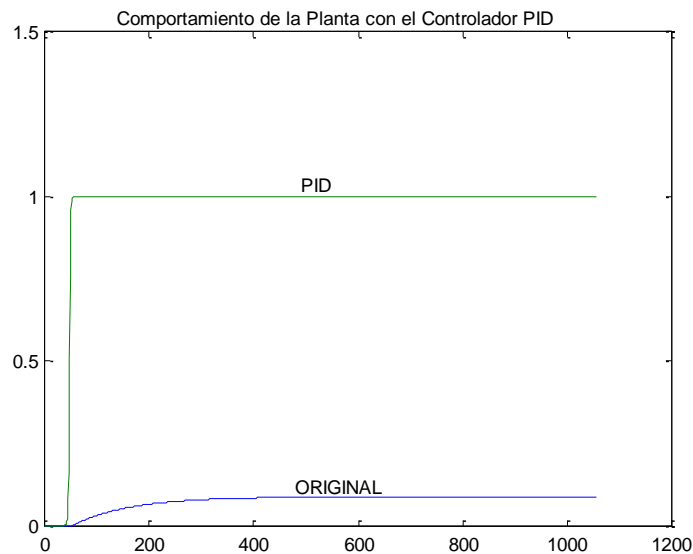
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Reglas de entonamiento de controladores

Acción	RISE TIME	OVERSHOOT	STABILITY
Increase KP	faster	Increases	getsworse
IncreaseTd	slower	Decreases	Improves
Increase 1/Ti	faster	Increases	getsworse

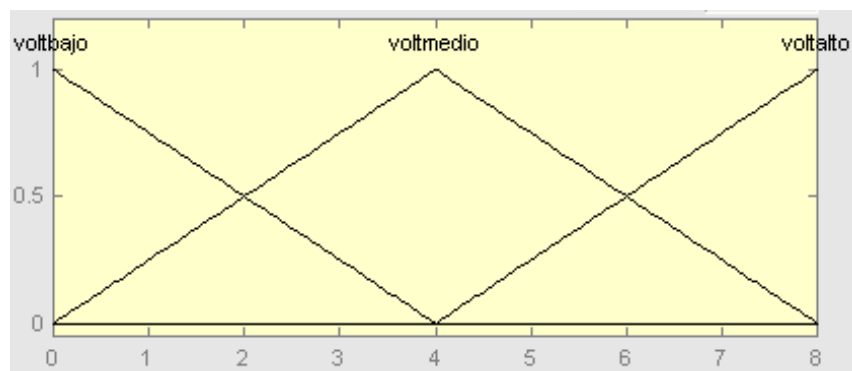
Fuente: Jantzen (1998).

Figura 6. Respuesta del PID



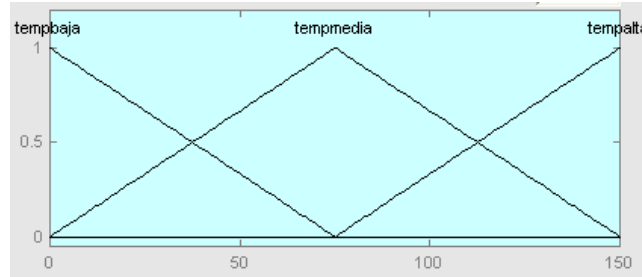
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Funciones de membresía de la entrada



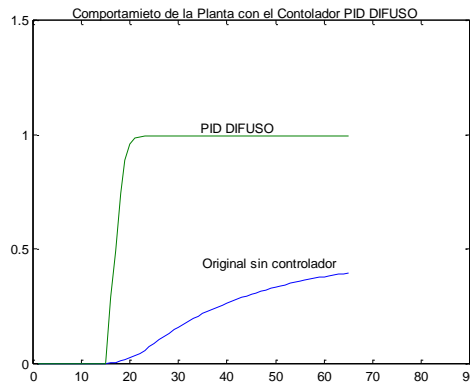
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Funciones de membresía de la salida



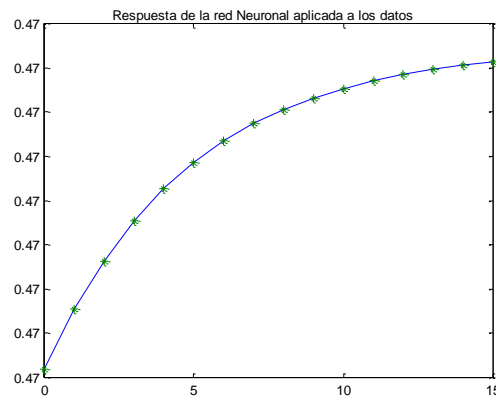
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Respuesta del PID Difuso



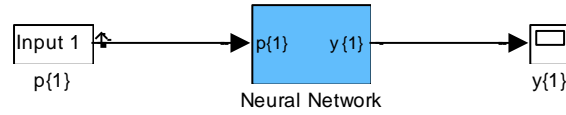
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Respuesta del modelo de la red neuronal



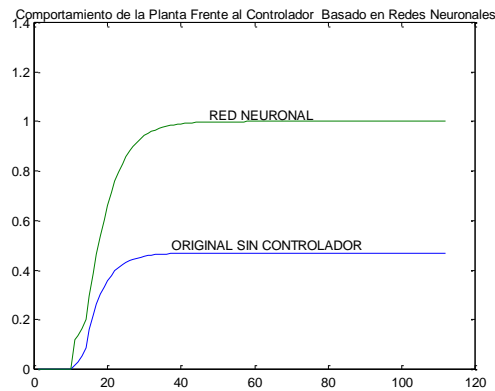
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Red neuronal



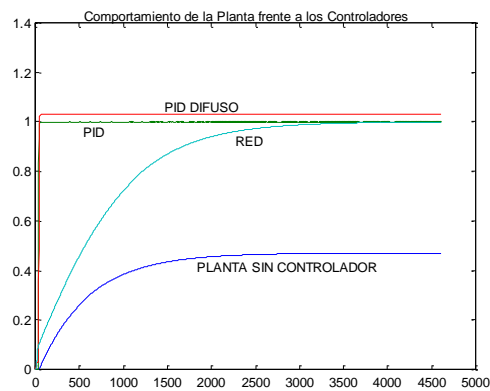
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Respuesta de la red neuronal



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Comportamiento de la planta con los controladores estudiados



Fuente: elaboración propia.