

Automatización del horno de una línea de fabricación de galletas implementando un sistema de control difuso diseñado con redes neuronales.

Herrera Gil, Johanna. Becerra Merchan, Lenin. Montes Molina, Luis.
johaherrera@gmail.com, leninbm@unexpo.edu.ve, montesluis@gmail.com
Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” Vicerrectorado Barquisimeto.
Venezuela

Resumen.

Se plantea diseñar un sistema de control difuso basado en un modelo de red neuronal para el control de la temperatura del horno de una línea de fabricación de galletas; se realiza el modelado del horno utilizando el programa MATLAB creando una red neuronal de tipo Feed Forward con algoritmo de entrenamiento Levenberg Marquard, para el diseño del controlador se utilizó el FIS Editor del Toolboxes de Fuzzy Logic de MATLAB, se establece el tipo de sistema difuso a utilizar Mamdani con método de defusificación Centro de gravedad o centroide. Se concluye que: las Redes Neuronales son una herramienta altamente eficaz para modelar sistemas con múltiples entradas; el controlador difuso diseñado brinda una mayor precisión en el control de los quemadores del horno aun en presencia de perturbaciones, por lo que se obtiene una mayor calidad en el producto final, lo que no se obtuvo con el controlador PID.

Palabras Claves: controlador difuso, redes neuronales, control de temperatura, automatización.

Summary.

Arises to design a control system based on a fuzzy neural network model to control the furnace temperature a biscuit production line, the modeling is performed using MATLAB oven creating a neural network with Feed Forward type Levenberg Marquardt training algorithm for controller design used the FIS Editor Fuzzy Logic Toolboxes of MATLAB sets the type to use Mamdani fuzzy system with defuzzification method of center of gravity or centroid. We conclude that: Neural Networks are a highly effective tool for modeling systems with multiple inputs, the designed fuzzy controller provides more precise control of the furnace burners even in the presence of perturbations, so you get a higher quality the final product, which was not obtained by the PID controller.

Keywords: fuzzy controller, neural networks, temperature control, automation.

Introducción

Los avances tecnológicos van de la mano con la industrialización debido a que estos persiguen facilitar y mejorar la vida cotidiana del ser humano e incrementar rendimiento, calidad y eficiencia de las empresas para así optimizar y facilitar la fabricación de sus productos.

La empresa Galletera Independencia ubicada en Maracaibo, Venezuela; no escapa de dicho cambio, cuenta con más de sesenta (60) años en el sector galletero del país y en la actualidad sus productos son reconocidos como parte del gentilicio nacional, pasó de tener una producción artesanal constituida por troqueles hechos de lata, mezclas batidas a mano, hornos de barro y carrusel de funcionamiento manual a una producción automatizada en su mayoría, desde su fundación y en los diversos estadios de su crecimiento se observa un proceso innovador sustentado en las mejoras continuas de sus instalaciones, productos, procesos productivos y maquinarias; sin embargo, en el horno de fabricación de galletas de donde se obtiene su producto principal como lo es la galleta rellena se observó un proceso realizado de forma manual, específicamente en el control de la temperatura del horno y la velocidad de la banda transportadora interna, el cual se realizaba mediante lecturas visuales del hornero dependiendo de la producción necesaria, debido a que las variaciones en la temperatura afectan directamente al producto final generando pérdidas considerables en la producción se plantea como objetivo de esta investigación diseñar un sistema de control difuso basado en un

modelo de red neuronal para el control de la temperatura del horno de esta línea de fabricación de galletas.

Objetivos:

- Obtener el modelado del horno utilizando redes neuronales, considerando como variables de entrada peso de la galleta y velocidad de la malla de horneado y como variable de salida la temperatura interna del horno.
- Con el modelo obtenido diseñar un controlador con lógica difusa para el control de la temperatura del horno y validarlo mediante simulación.
- Verificar mediante comparación con un controlador la eficiencia del controlador difuso diseñado para parámetros de entrada variables dentro y fuera de los límites reales de operación.

Capítulo 1

Desde su aparición y hasta hoy los sistemas basados en PID son usados ampliamente para controlar procesos industriales, esto debido a su confiabilidad, durabilidad, robustez y eficiencia en dichas operaciones; sin embargo, cuando se presentan situaciones con perturbaciones o fluctuaciones constantes en las que se requiere precisión en la salida los sistemas basados en redes neuronales y lógica difusa presentan características que los hacen atractivos en cuanto a la automatización y control, debido a su adaptabilidad a situaciones particulares con muchas o pocas variables, además de que no requiere algoritmos altamente sofisticados para su funcionamiento, asimismo la implementación de estos sistemas en brindan resultados altamente confiables para el control, es por ello que se combinan en la propuesta para lograr un sistema confiable y altamente efectivo.

Antecedentes

A continuación se presentan diferentes fuentes de autores cuyas investigaciones abordaron algunos de los tópicos a tratar en ésta investigación, a continuación se presentan dichos aportes:

Dávila (2009). Presenta un Sistema de control difuso de control de humedad para incubadoras neonatales, en el cual obtiene las funciones de transferencia de temperatura y diseña dos controladores lógicos difusos proporcional integral, para demostrar que el modelo obtenido por identificación describe satisfactoriamente el comportamiento de la temperatura y humedad en el habitáculo de la incubadora y los controladores difusos diseñados estabilizan la salida a el valor de referencia en un tiempo entre 80 y 100 minutos incluso en presencia de perturbaciones.

Martínez (2009). Presenta un Sistema de control difuso del flujo de gas de inyección en pozos petroleros con extracción artificial, en donde inicialmente realiza la identificación del proceso para obtener un modelo matemático, con esta información diseña un controlador lógico difuso, basado en la información del proceso obtenida en la fase de diagnóstico de la investigación, luego con la función de transferencia obtenida de la identificación del proceso visualiza el comportamiento del controlador en función de su salida respecto a su entrada obteniendo una respuesta satisfactoria ya que la señal de salida del sistema tiende a seguir la señal de referencia con un porcentaje de error bastante bajo.

Oropeza (2007). Presenta un Sistema de control difuso de la presión diferencial de una planta de fluidificación para un lecho de arena de médano, en el cual el sistema de control desarrollado con lógica difusa es alimentado con el error existente entre la entrada de referencia, el valor sensado en la salida de la planta de la presión diferencial y la variación de este error y como salida del controlador la variación del caudal, para el controlador difuso se utilizó el método Mandani y se establecieron cuarenta y nueve reglas difusas obtenidas directamente del proceso; concluye que el modelo matemático obtenido del proceso sigue fielmente el comportamiento dinámico de la planta aún en presencia de señales de perturbaciones en la entrada o salida del proceso y la simulación comprueba que el comportamiento del proceso se adapta fielmente al comportamiento teórico de la fluidificación.

Peña (2007). Presenta un Diseño de un controlador proporcional derivativo adaptativo basado en sistemas neuro difusos para una banda transportadora, en el cual se parte del modelo de un motor CC, se realiza el sistema de control usando un controlador PD como control de posición y velocidad para controlar el sistema y un estimador difuso para la masa del objeto a transportar, tomando corriente y el voltaje de la armadura como datos de entrada para entrenar la red fuera de línea, luego con el valor estimado de masa se modifican los parámetros del controlador PD convencional por medio de un sistema difuso tipo sugeno obtenido a partir del entrenamiento de una red neuronal, realizando varias pruebas se obtuvo el estimador difuso que mejor se adaptaba a las características de la planta y con el valor de la masa obtuvo el valor de K_d , lo que brindó como resultado una respuesta transitoria bastante homogénea.

Rendón (2008). Presenta un Método de identificación de procesos con una red neuronal de Hopfield, a partir de la ecuación de energía de una red neuronal de Hopfield y de la ecuación de energía del error cuadrático medio dado por la diferencia del estado estimado y el estado actual del proceso. Este método de identificación consiste en obtener los parámetros del proceso a identificar, mediante aprendizaje de una red de Hopfield que está basado en cálculos matriciales que minimizan una deteriorada función de energía en el entrenamiento de la red neuronal, cuyo aprendizaje es no supervisado, posteriormente obtiene el algoritmo que conduce al modelo de un proceso en variables de estado, indicando esto que el software desarrollado demuestra que la convergencia hacia el óptimo es cierta, es decir, que el método utilizado es válido para realizar la identificación paramétrica con la red neuronal de Hopfield.

Sánchez (2007). Plantea un Sistema de control difuso de la temperatura de aceite vegetal, para la salida del proceso de calentamiento de aceite vegetal realizado en un intercambiador de caracol cuyo fluido de transferencia térmica que es aceite vegetal se calienta en un calderín, inicialmente define las variables del proceso para obtener luego los modelos matemáticos tanto para el calderín como del intercambiador de caracol, con esta información diseña los controladores estableciendo dos variables de entrada y una de salida y se estiman los rangos de membrecía, para certificar el funcionamiento de los mismos elabora modelos en simulink para el proceso del intercambiador y el calderín, además diseña dos lazos de control, un lazo tiene como salida la temperatura del aceite mineral, la cual se suma a la acción de control ejercida sobre la temperatura del aceite vegetal en el segundo lazo, se obtiene de esto una respuesta medianamente lenta y con muchas fluctuaciones en el levantamiento, el segundo sistema es un lazo de control con las plantas de ambos equipos en cascada y con el controlador de temperatura del aceite vegetal, el cual también resulta en una respuesta muy lenta, por lo que

cambia el controlador por el del aceite mineral obteniendo la respuesta más rápida de los tres modelos y disminuyendo las fluctuaciones.

Línea de fabricación de galletas

Las líneas de fabricación de galletas más comunes están compuestas de cinco secciones fundamentales como se observa en la figura 1, las cuales definen el proceso bajo el cual se realiza la investigación, se definen a continuación:

Figura 1.
Secciones Fundamentales de la Línea de producción de Galletas



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Mezcla: En esta sección se realiza el mezclado de todos los ingredientes ya prepesados para la preparación de la masa de las galletas, sin amasado, sólo se unen todos los ingredientes hasta formar la masa.

Laminación: En esta sección se vierte la masa por partes en una tolva de alimentación, la cual posee una serie de rodillos acanalados en el fondo que aplican presión a la masa para formar los paños o láminas de masa, siendo la primera la más gruesa de aproximadamente 5 cm, dicha lamina es transportada por una lona hacia otro rodillo para obtener un espesor más pequeño y así es transportada sucesivamente a través de rodillos que le dan el grosor y amasado final, para luego ser llevada al rodillo de rotoestampa que es el encargado de aplicar la forma deseada del producto, una vez obtenidas las galletas en crudo, pasan al puente de entrega.

Horneo: En esta sección el producto que es transportado por el puente de entrega pasa hacia la malla de horneo para ser dirigida al horno, en cuyo recorrido el producto será horneado hasta obtener la consistencia correcta.

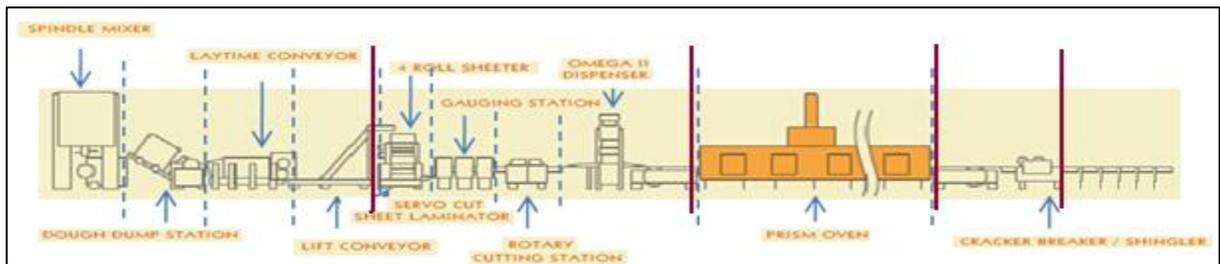
Enfriamiento: Esta sección es obligatoria para estas líneas de fabricación, ya que este tipo de productos así como muchos alimentos manufacturados no se pueden empaquetar con temperaturas elevadas, esto debido a la generación de humedad en la bolsa, lo cual afecta directamente la durabilidad del producto, es por ello que se estima que el tamaño de esta sección de enfriamiento comprendida por lonas de transportación debe ser de un tamaño tres veces mayor al tamaño del horno.

Empaque: En esta sección se realiza el empaquetado del producto, de la siguiente forma: De las lonas de enfriamiento se toma de forma manual las galletas para ser apiladas en dos cañones, uno de los cuales dirige la galleta de una detrás de la otra través de una lona muy angosta a una sección de encremado, que consiste en una especie de manga que le aplica la porción de crema correspondiente, una vez encremada y sobre la misma lona de transporte esta pasa debajo del segundo cañón cargado de galletas para colocarle encima de la crema la galleta que terminará el sándwich. Una vez formado el sándwich de galletas, éstas pasan a una sección de agrupamiento en donde son colocadas en pares una encima de la otra y formando

grupos de cuatro sándwiches, los cuales serán empaquetados para formar el paquete individual, cabe destacar que en esta sección se obtienen 150 paquetes por minuto, que serán organizados de forma manual en bolsas de 12 paquetes individuales, que a su vez serán organizadas en bultos de 6 bolsas.

Composición del Prism Oven

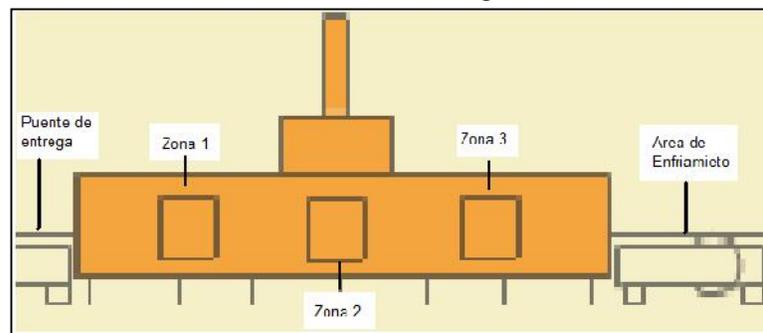
Figura 2
Modelo de una línea de fabricación de galletas tipo Thomas L. Green



Fuente : <http://www.readingbakery.com/prism-oven-bakery-equipment.html>

Tal como se observa en las figuras 2 y 3, estos hornos están compuestos internamente de tres zonas, en cada zona está disponible un número de opciones para permitir la combinación precisa de la radiación, la convección de calefacción y la conducción de calor directo sobre la malla que transporta el producto durante su recorrido en el interior del horno, las cuales proveen de cocción, extracción de la humedad y dorado de las galletas.

Figura 3.
Horno de cocción de galletas

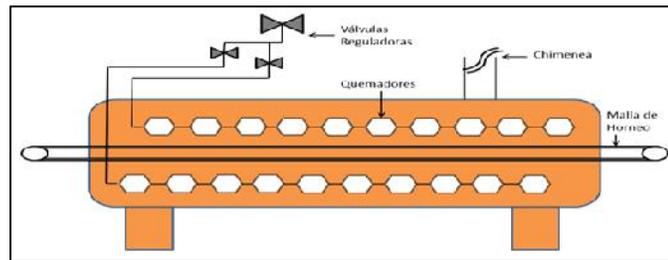


Fuente : <http://www.readingbakery.com/prism-oven-bakery-equipment.html>

En la figura 4, se pueden apreciar las zonas del horno mediante una vista de perfil del mismo. Cada zona está compuesta alrededor de 20 quemadores que están dispuestos por encima y por debajo de la malla de horneado, para un total de aproximadamente 60 quemadores, cada uno con su respectivo módulo de encendido, dichos quemadores son controlados por un sistema compuesto de válvulas reguladas por un Motor pequeño que las abre o cierra a través de la válvula de mando, un termocontrol y una termocupla.

Figura 4.

Vista de Perfil de zona del horno



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Capítulo 2

Modelado del Horno:

Se tomaron como variables de entrada la velocidad de la malla que traslada el producto crudo hacia el horno, el peso de la galleta en crudo y el flujo de gas que es inyectado a los quemadores del horno, el cual es controlado por la válvula reguladora y como variable de salida muestreo y se establece como Set Point el rango de 218 a 219 °C como se observa en la figura 5. Adicionalmente, se obtiene otro conjunto de variables con valores de entrada la temperatura del horno en los rangos del de datos para las variables de velocidad, peso y flujo de gas en períodos de tiempo distintos para validar el controlador difuso a diseñar. Un ejemplo de los datos obtenidos se puede observar en la figura 4.

Figura 5.

Datos de entrenamiento de la red neuronal

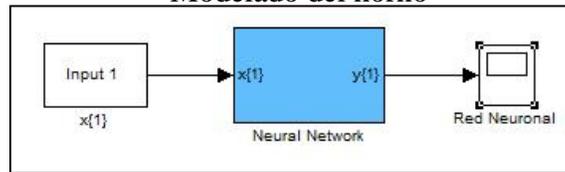
| Tiempo (seg) | Peso (gr) | Velocidad (rpm) | Flujo de gas (gal/min) | Temperatura (°C) |
|--------------|-----------|-----------------|------------------------|------------------|
| 2 | 53 | 21.5 | 6.6 | 213.0 |
| 4 | 53 | 21.4 | 6.5 | 213.1 |
| 6 | 53 | 21.3 | 6.7 | 213.2 |
| 8 | 53 | 21.6 | 6.8 | 213.2 |
| 10 | 53 | 21.7 | 6.9 | 213.3 |
| 12 | 53 | 21.6 | 6.7 | 213.4 |
| 14 | 53 | 21.9 | 6.8 | 213.4 |
| 16 | 53 | 22.1 | 6.9 | 213.3 |
| 18 | 53 | 22.2 | 7.2 | 213.5 |
| 20 | 53 | 22.5 | 7.4 | 213.7 |
| 22 | 53 | 22.3 | 7.3 | 213.6 |
| 24 | 53 | 22.4 | 7.5 | 213.8 |
| 26 | 53 | 22.5 | 7.3 | 213.6 |
| 28 | 53 | 22.7 | 7.2 | 213.8 |
| 30 | 53 | 22.7 | 7.5 | 213.7 |
| 32 | 53 | 22.6 | 7.6 | 213.9 |
| 34 | 53 | 22.5 | 7.5 | 214.0 |
| 36 | 54 | 21.3 | 7.6 | 214.5 |
| 38 | 54 | 21.6 | 7.6 | 214.6 |
| 40 | 54 | 21.5 | 7.4 | 214.7 |

Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Procedimiento para crear la Red Neuronal

Se selecciona el programa Matlab para el modelado del horno con los datos de entrada y salida ya obtenidos para crear la red, estableciendo el tamaño de las capas, el número de neuronas, el máximo de ciclos para entrenar e indicando el tipo de red a utilizar y el algoritmo de entrenamiento. La red obtenida se puede observar en la figura 6.

Figura 6.
Modelado del horno



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

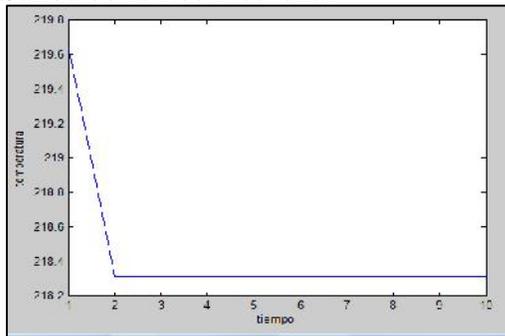
Las características de la Red neuronal se resumen en la Tabla 1, cabe destacar que el modelo de red neuronal seleccionado muestra un buen comportamiento y aprendizaje, tal como se muestra a continuación:

Tabla 1.
Datos de la Red Neuronal

| Tipo de Red Neuronal | Algoritmo de Entrenamiento | Número de Capas | Número de Neuronas | Cantidad máxima de ciclos | Número de Entradas | Número de Salidas |
|----------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| Feed-Forward | Levenberg – Marquardt | 1 | 5 | 50 | 3 | 1 |

Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Figura 7.
Salida de la Red Neuronal



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

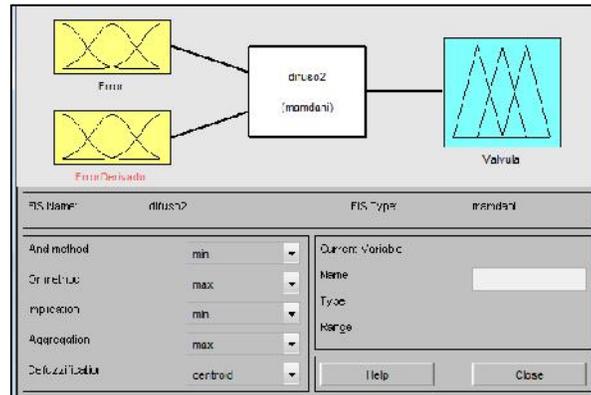
La gráfica de salida de la Red Neuronal creada se muestra en la figura 7, en la cual se puede apreciar que la red se estabiliza en un valor muy cercano al Set Point, lo cual corresponde al valor esperado dadas las características de las entradas utilizadas para el entrenamiento de la red.

Diseño del Controlador Difuso.

Como variables entrada se establecen una variable llamada Error, la cual es resultado de la diferencia entre el valor de referencia o Set point y el valor real de la temperatura del horno obtenido de la red neuronal y una variable llamada ErrorDerivado que es generada a partir de la variación de la variable Error respecto a las variables de entrada y la variable de salida, dicha variable tiene como finalidad disminuir o suavizar el sobreimpulso generado por las Variaciones en la entrada,

Para la salida del controlador se crea una variable llamada Válvula que viene dada por la apertura de la válvula que dirige el flujo de gas hacia los quemadores del horno, una vez establecidos estos parámetros se procede a crear las funciones de membrecía de cada variable y a establecer el tipo de sistema difuso a utilizar en este caso se seleccionó Mamdani con método de defusificación Centro de gravedad o centroide, como se puede observar en la figura 8.

Figura 8
Controlador Difuso

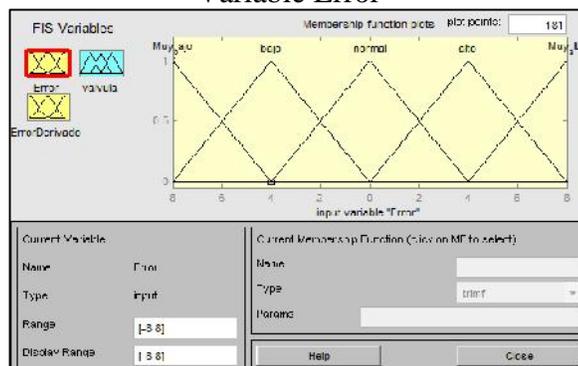


Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Funciones de Pertenencia para las variables de entrada del controlador.

Para la variable Error cuyo universo de discurso se estableció de -8 hasta 8, se establecieron cinco funciones de pertenencia que muestren el estado de la variable Error, definidas estas como Muybajo, Bajo, Normal, Alto y Muyalto, como se muestra en la Figura 9 y el Set Point se establece en 218,5 °C.

Figura 9.
Variable Error

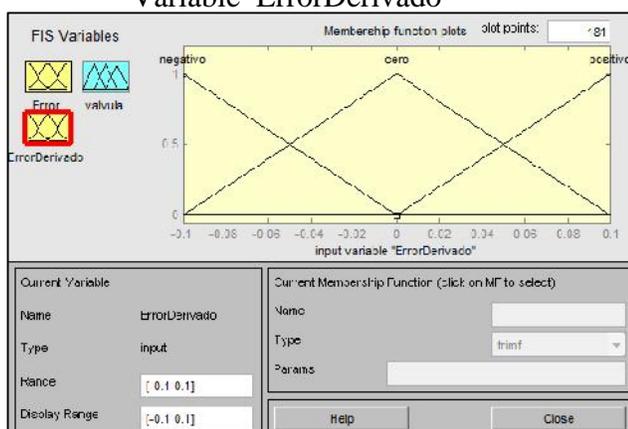


Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Para analizar estos estados podemos señalar por ejemplo: si la variable Error se encuentra en estado Muy_bajo la temperatura interna del horno es muy baja para el producto por lo que la señal de mando hacia la válvula debe estar entre 19 y 20 miliamperios por consiguiente se debe enviar una señal para mantener la válvula abierta o abrirla en su totalidad hasta alcanzar el nivel de temperatura adecuado en el horno para la cocción del producto.

Para la variable ErrorDerivado se establecieron tres funciones de pertenencia definidas como Negativo, Cero y Positivo, con un universo de discurso de -0.1 a 0.1, tal como se aprecia en la figura 10, la cantidad de funciones de pertenencia en esta variable se debe a que esta busca reducir el máximo sobreimpulso en la señal de salida a partir de los cambios generados en la variable Error por lo que no se consideró necesario introducir otra cantidad de funciones de pertenencia y dicha variable muestra el cambio dado en la señal que va hacia la válvula generado por la variable de Error.

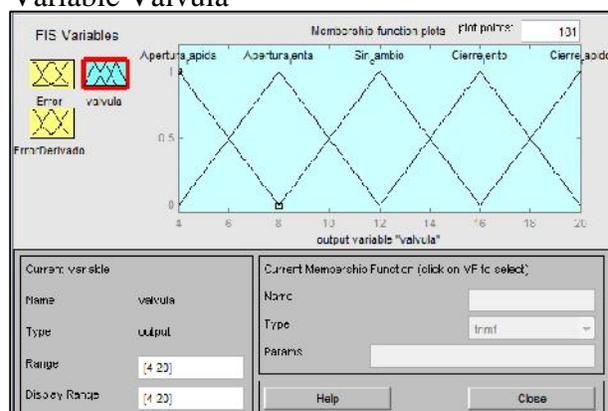
Figura 10.
Variable ErrorDerivado



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Funciones de pertenencia para la variable de salida del controlador.

Figura 11.
Variable Válvula



Para la variable de salida del controlador se establecieron cinco funciones de pertenencia definidas como Cierre_rápido, Cierre_lento, Sin_cambio, Apertura_lenta, Apertura_rápida, siendo el universo de discurso de 4 a 20 miliamperios, dichas funciones representan los cambios de estado que se deben dar sobre la válvula dependiendo de los valores de las variables de entrada, tales funciones se pueden apreciar en la figura 11.

Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Reglas Difusas

El tipo de sistema difuso que se utilizó para el controlador fue Mamdani, debido a que este método se basa en un mecanismo de inferencia basado en reglas se adaptó fácilmente a las condiciones planteadas basadas en el comportamiento del horno de la variables de entrada respecto a la variable de salida, adicionalmente se utiliza el método de defusificación Centroide o centro de gravedad por ser continuo. Se observan las reglas resultantes como sigue:

1. If (Error is Muy_alto) then (válvula is Cierre_rápido)
2. If (Error is alto) then (válvula is Cierre_lento)
3. If (Error is normal) then (válvula is Sin_cambio)
4. If (Error is bajo) then (válvula is Apertura_lenta)
5. If (Error is Muy_bajo) then (válvula is Apertura_rápida)
6. If (Error is normal) and (ErrorDerivado is cero) then (válvula is Sin_cambio)

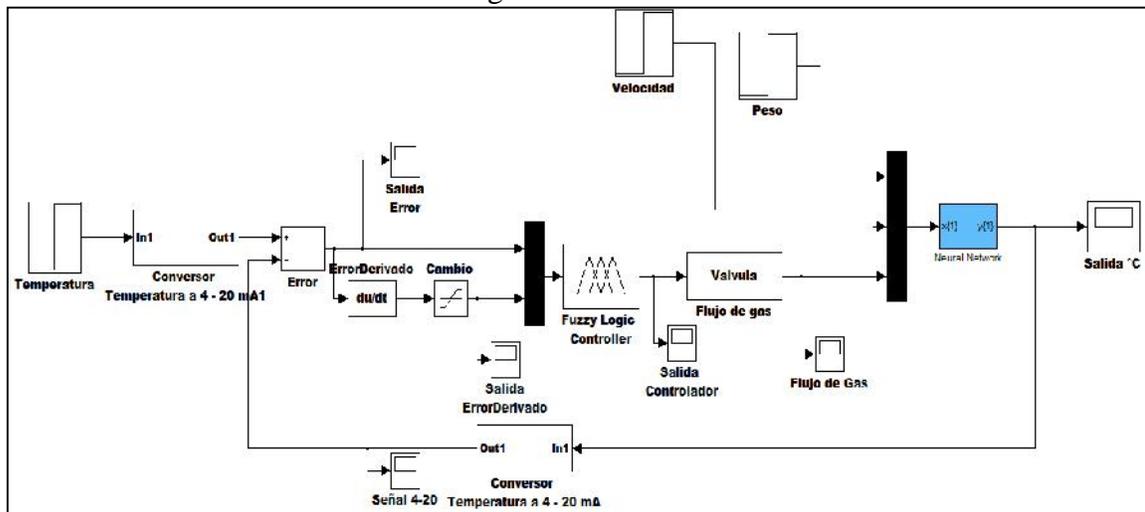
7. If (Error is normal) and (ErrorDerivado is negativo) then (valvula is Apertura_lenta)
8. If (Error is normal) and (ErrorDerivado is positivo) then (valvula is Cierre_lento)
9. If (Error is bajo) and (ErrorDerivado is negativo) then (valvula is Apertura_lenta)
10. If (Error is alto) and (ErrorDerivado is positivo) then (valvula is Cierre_lento)

Simulación del controlador difuso

Una vez modelado el horno mediante la red neuronal y diseñado el controlador difuso se procede a unir todas las partes creando simulando el sistema utilizando Simulink de Matlab como se muestra en la figura 12, cuya salida llamada *Salida °C* muestra el comportamiento del sistema.

Para introducir los datos correctamente al modelo se dispone de convertidores de las señales a miliamperios y la válvula de control de flujo de gas. Adicionalmente, para agregar la variable ErrorDerivado al modelo se emplea un bloque derivativo y un bloque de saturación llamado cambio cuyo rango va de -0.1 a 0.1 que es el rango de esa variable, el cual contribuye a que al producirse el menor cambio de la señal de Error bien sea en los rangos de las funciones de pertenencia positivo o negativo de esta variable el controlador realice el cambio respectivo.

Figura 12.
Diagrama del sistema



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Las entradas de la red neuronal corresponden al peso, velocidad y flujo de gas como se mencionó anteriormente todas estas introducidas a la red usando un multiplexor, siendo el peso y la velocidad constantes y la entrada flujo de gas proveniente de la salida del controlador difuso, el cual tal como se indicó contiene dos variables de entrada definidas como Error y Errorderivado.

Diseño del Controlador PID.

Utilizando el procedimiento de Prueba del Proceso de Escalón a la curva de reacción del proceso o respuesta escalón del circuito abierto se obtienen los valores correspondientes a la sintonización del PID, tal como se observa en la tabla 2.

Tabla 2.
Valores de sintonización del PID

| Tipo de Controlador | Ganancia Proporcional (K_c) | Tiempo de Integración(t_i) | Tiempo de Derivación (t_D) |
|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Proporcional- integral – derivativo | $1.25 \frac{t_D}{K_c}$ | $2.0 \frac{t_D}{K_c}$ | t_D |
| | 7.28 | 5 | 1.25 |

Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Una vez obtenidos los valores del PID antes mencionados, se procede a aplicar el Procedimiento para obtener los datos del controlador PID para la simulación, lo que se aprecia en la tabla 3.

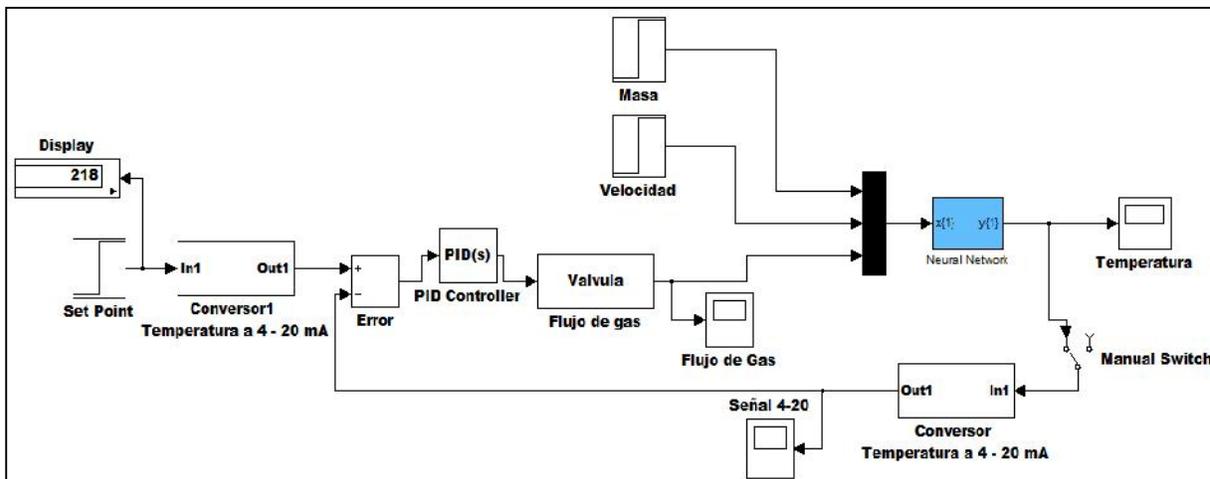
Tabla 3

| P | I | D |
|------|------|-----|
| 7.28 | 1.45 | 9.1 |

Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Con los resultados obtenidos se procede a realizar la simulación del controlador PID utilizando Simulink de Matlab como se observa en la figura 13, lo cual permite visualizar si el comportamiento de la salida del controlador corresponde a lo estimado.

Figura 13.
Simulación del controlador PID con modelo de Redes Neuronales



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

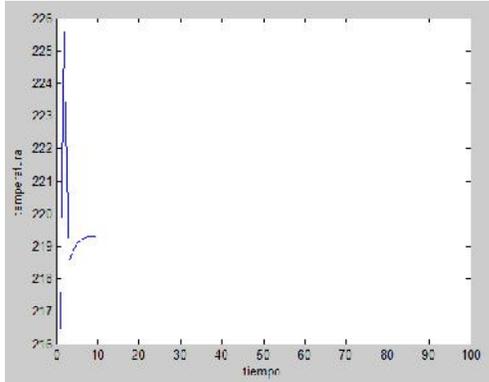
Capítulo 3.

Comparación de la Temperatura de salida del Controlador Difuso versus la Temperatura de salida del Controlador PID.

A continuación se realiza una comparación entre la gráfica de la salida del controlador difuso figura 14 y la gráfica de la salida del controlador PID figura 15. Tal como se aprecia en ambas gráficas el Controlador Difuso brinda una salida más estable que el controlador PID aunque

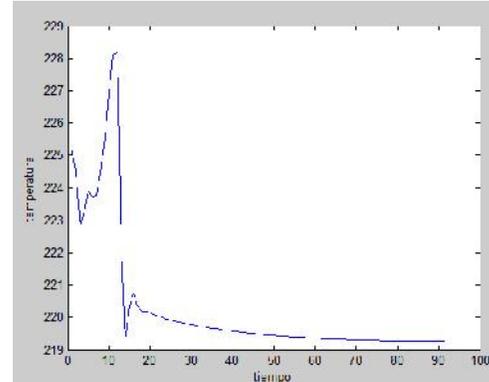
este muestre un comportamiento estable luego de un lapso de tiempo un poco mayor al observado en el controlador difuso, estas fluctuaciones no son convenientes para el proceso de horneado debido a que afectan directamente la cocción del producto.

Figura 14
Salida del Controlador



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

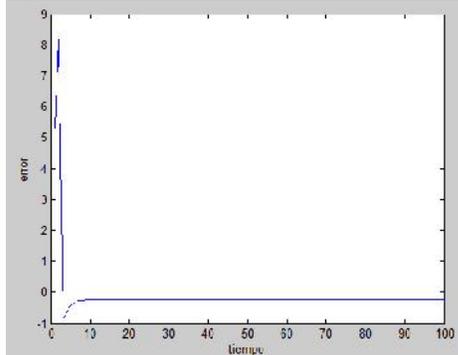
Figura 15
Salida del Controlador PID



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Estudio del error de la salida del controlador difuso utilizando la red neuronal de validación

Figura 16
Señal de Error de la salida del sistema



Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Para verificar si la salida generada por el controlador difuso diseñado es correcta se realiza la comparación de las salidas del modelo del controlador difuso primero con la red neuronal de entrenamiento y luego con la red neuronal de validación siendo la diferencia de ambas salidas la señal de error, la cual es muy cercana a cero, lo que se puede apreciar en la figura 16.

Estudio del comportamiento de los controladores ante perturbaciones en las entradas mediante Simulación

Para verificar el comportamiento de los controladores diseñados se realizan simulaciones ante variaciones o perturbaciones en las entradas de Velocidad y Peso, con lo que se puede apreciar si los sistemas diseñados se adaptan a las necesidades planteadas al inicio de la investigación. Para ello se debe observar el comportamiento interno del horno tomando en cuenta que durante la cocción de la galleta se produce humedad en el mismo, la cual afecta disminuyendo o aumentando la temperatura interna del horno, por lo tanto de esta premisa se obtiene para este caso de estudio la siguiente condición:

- ✓ La velocidad es directamente proporcional a la Temperatura

Es decir, que para un Peso mayor o menor se tiene que:

- Para una Velocidad mayor debe generarse una temperatura mayor
- Para una Velocidad menor debe generarse una temperatura menor

Ante las variaciones realizadas se observa que el controlador difuso brinda una salida adecuada que cumple con las condiciones antes mencionadas ya que se estabiliza en un tiempo mucho menor, mientras que el controlador PID no se adapta a algunas condiciones por lo que su salida no corresponde a los valores esperados en algunos casos, el resumen de la comparación de ambos controladores se puede observar en la tabla 4.

Tabla 4.

Comportamiento de los controladores ante perturbaciones en las entradas mediante simulación

| Peso (gr) | Velocidad (rpm) | Temperatura (°C) Controlador Difuso | Temperatura (°C) Controlador PID | Comportamiento Controlador Difuso | Comportamiento Controlador PID |
|------------------|------------------------|--|---|--|---------------------------------------|
| 56 | 22 | 219.3 | 219.3 | Adecuado | Adecuado |
| 59 | 24 | 219.3 | 217.7 | Adecuado | No Adecuado |
| 56 | 21 | 219.2 | 218.9 | Adecuado | Adecuado |
| 54 | 22 | 219.2 | inestable | Adecuado | No Adecuado |

Fuente: Herrera J. y Col. 2013

Capítulo 4

Conclusiones

Del caso estudio presentado se obtienen las siguientes conclusiones.

- Se observa que las Redes neuronales son una herramienta altamente eficaz para el modelado de sistemas con múltiples entradas y su resultado describe el sistema a modelar completamente tal como se hizo en el estudio realizado.
- El controlador difuso diseñado cumple con los requerimientos para el control de temperatura del horno de galletas descrito y será de gran utilidad en cuanto al uso eficiente del mismo.
- Utilizando Simulink de Matlab se pudo observar el comportamiento de los controladores diseñados de acuerdo a los parámetros de entrada del sistema.
- Se observa que tanto el Controlador PID como el Controlador Difuso brindan una salida del estable de acuerdo a las entradas seleccionadas, sin embargo al añadir perturbaciones al sistema en las entradas el controlador PID muestra un comportamiento inestable mientras que el controlador difuso brinda un comportamiento estable y dentro de los parámetros de operación esperados.
- Se comprueba que para efectos de los requerimientos del proceso de horneado de las galletas de la línea de fabricación de la galletera Independencia C. A. la utilización de un controlador tipo PID no se adapta a las necesidades planteadas ya que ante perturbaciones en las variables de entrada su funcionamiento no brindaría una salida estable.

- El Controlador Difuso basado en un modelo de red neuronal brinda un mejor uso de la válvula de control.

Referencias

Dávila M., *Sistema de control difuso de control de humedad para incubadoras neonatales*, Trabajo de Grado, UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2009.

Martínez H., *Sistema de control difuso del flujo de gas de inyección en pozos petroleros con extracción artificial*, Trabajo de Grado, UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2009.

Oropeza A.; *Sistema de control difuso de la presión diferencial de una planta de fluidificación*, Trabajo de Grado, UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2007.

Peña J.; *Diseño de un controlador proporcional derivativo adaptativo basado en sistemas neuro difusos para una banda transportadora*, Trabajo de Grado, UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2007.

Reading Bakery Systems, Equipment. Baking. Cookie/Cracker. Prism Oven. Fuente <http://www.readingbakery.com/prism-oven-bakery-equipment.html>. Pennsylvania, USA. 2011.

Rendón, J., *Método de identificación de procesos con una red neuronal de Hopfield*, Trabajo de Grado, UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2008.

Sánchez, M.; *Sistema de control difuso de la temperatura de aceite vegetal*, Trabajo de Grado, UNEXPO. Barquisimeto, Venezuela. 2007.