

Diseño de un sistema de control inteligente para un pasteurizador tipo túnel

Design of an intelligent control system for a tunnel pasteurizer

Ing. Julio César Mendieta Villamizar¹, Ing. Mario Alberto Olarte Daza², M.Sc. Hernando González Acevedo³

^{1,2} Unidades Tecnológicas de Santander. julio.mendieta@bav.sabmiller.com, mariolarte69@hotmail.com

³ Universidad Autónoma de Bucaramanga. hgonzalez7@unab.edu.co

Recibido 25/02/12, Aceptado 30/07/2012

RESUMEN

En el siguiente artículo de investigación tecnológica se presenta el diseño de un sistema de control inteligente para una máquina pasteurizadora tipo túnel ubicada en la empresa Bavaria S.A., que conjuga lógica difusa con redes neuronales para mejorar la calidad del producto, eficiencia mecánica y consumo energético de una planta que tiene más de 10 años de funcionamiento. La red neuronal controla los niveles de referencia de las dos principales zonas de alta temperatura de la máquina y la velocidad del sistema de transporte, afectando directamente el proceso de pasteurización. El control Fuzzy, tipo sugeno, se encarga de mantener constante la velocidad del transportador.

Palabras clave: Pasteurizador tipo túnel, Control Inteligente, Lógica Difusa, Redes Neuronales.

ABSTRACT

The article presents the design of an intelligent control system for a tunnel pasteurizer of the Bavaria S.A. Company; it combines the fuzzy logic and the neural networks for to improve product quality, mechanical and energy efficiency of a machine that has more than 10 years of operation. The neural network controls the reference levels of the two main areas of high temperature of the machine and the speed of the transport system, directly affecting the pasteurization process. The Fuzzy Control, Sugeno type, is responsible for maintaining the speed of the conveyor.

Keywords: Tunnel Pasteurizer, Intelligent Control, Fuzzy Logic, Neural Networks.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos modernos de producción y fabricación demandan de los sistemas de control un buen comportamiento en una amplia gama de condiciones de trabajo. Sin embargo, en tales circunstancias existe un gran número de procesos que exhiben fuertes no linealidades y un comportamiento no estacionario y, por tanto, existe una notable incertidumbre sobre el proceso en cuestión. Los controladores clásicos han probado su validez en el ambiente industrial, siempre que todas las condiciones teóricas (requisitos a priori de diseño) se cumplan y los parámetros de diseño hayan sido escogidos convenientemente. No

obstante, en la práctica muchos de estos requisitos no se cumplen y algunos parámetros de diseño no son los más apropiados, lo cual repercute en un pobre funcionamiento del sistema de control. Es bajo estas condiciones en donde se utilizan las técnicas de control inteligente.

El control inteligente es la disciplina donde los métodos de control se desarrollan para emular algunas características importantes del ser humano. Estas características incluyen adaptación y aprendizaje, planeación bajo gran incertidumbre y el trabajo con gran cantidad de datos. Las áreas donde se está realizando trabajo alrededor del control inteligente son redes neuronales, control difuso, algo-

ritmos genéticos, sistemas de planeación, sistemas expertos y sistemas híbridos (combinación de más de una de las técnicas anteriores). Un ejemplo de esta técnica de control se observa en [1], en el cual abordan el problema de identificar y controlar un reactor químico utilizando técnicas de control inteligente. En [2] se presenta una metodología para el diseño de controladores difusos aplicados a procesos de mecanizado; una aplicación similar se observa en [3], pero en este caso diseñan un control adaptativo, basado en lógica difusa, para la optimización de los procesos de fresado.

2. MÁQUINA PASTEURIZADORA TIPO TÚNEL

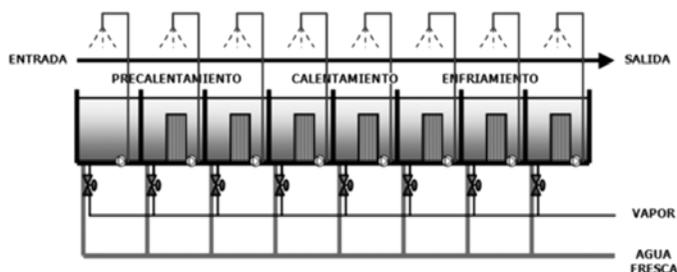
La pasteurización se define como un tratamiento térmico de productos alimenticios, de baja intensidad (generalmente inferior a 100°C), que tiene como objetivo principal la eliminación y/o reducción a niveles controlables de microorganismos que puedan ser riesgosos para la salud humana o para la calidad del producto [4] [5]. Existen dos tipos de pasteurización implementadas en la industria, la continua y la discontinua.

2.1 Pasteurización

En la empresa Bavaria S.A. el proceso de pasteurización se realiza de forma continua, una botella envasada viaja dentro de un túnel y es sometida a duchas de agua a temperatura variable. La máquina se encuentra dividida en tres zonas principalmente: precalentamiento, calentamiento y enfriamiento, y a su vez cada región se divide, cuatro zonas de precalentamiento, dos zonas de calentamiento (supercalentamiento y pasteurización) y cuatro zonas de enfriamiento, que permiten una variación suave de la temperatura sin afectar la consistencia del vidrio, permitiendo elevar la temperatura de la cerveza dentro de la botella de 3°C hasta 61°C aproximadamente y luego disminuirla a 30°C (Figura 1). La temperatura se regula mediante válvulas proporcionales Samson tipo 3241 con posicionador electro neumático 3730-2, las cuales controlan la entrada de vapor a los tanques de agua.

Figura 1. Regiones de temperatura en la máquina de pasteurización

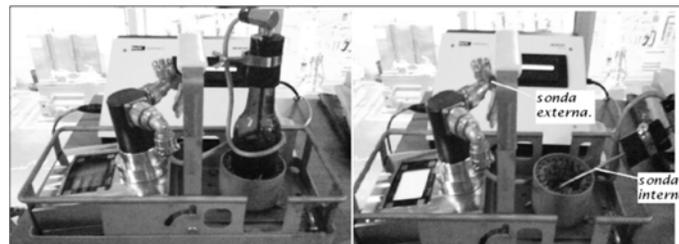
Figure 1. Temperature zones in the pasteurization machine



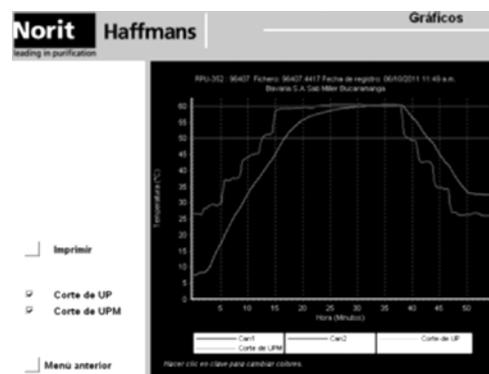
La pasteurización del producto es cuantificada por las unidades de pasteurización, que se calculan por medio de un equipo electrónico llamado HAFFMANS, el cual se encarga de muestrear y almacenar cada 500 milisegundos la temperatura interna y externa a la que es sometida la botella (Figura 2a). Estos datos se obtienen a través de dos sensores de temperatura, una sonda que va al interior de la botella y otra sonda que se ubica en el exterior para verificar la temperatura del agua con la cual se está rociando las botellas. Estos datos se grafican, como se observa en la Figura 2b, en la cual la temperatura interna es la curva roja y la externa es la curva verde. Al integrar el área bajo la curva relacionada con la temperatura interna se obtiene las unidades de pasteurización, que pueden ser de dos tipos: el primero corresponde a las unidades de pasteurización mortales (UPM), estas se calculan integrando el área bajo la curva para temperaturas mayores a 60°C, y su valor debe estar entre 3 y 8 UPM. La segunda unidad de pasteurización llamadas totales (UPT), se calculan integrando de igual forma el área de la grafica para temperaturas superiores a 50°C y su valor debe estar entre 8 y 19 UPT.

Figura 2. Equipo Haffmans

Figure 2. Haffmans System



a) Dispositivo físico
a) Physical Device



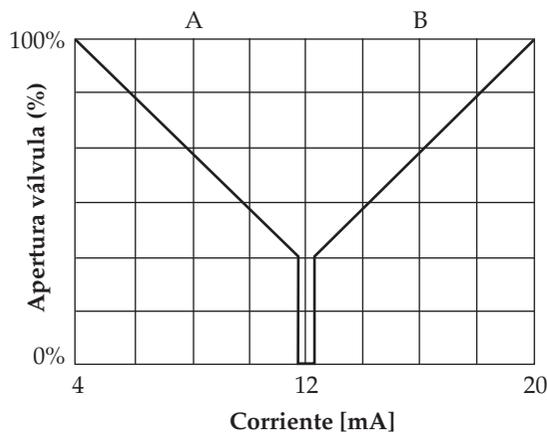
b) Respuesta transitoria del proceso de Pasteurización
b) Transient response of the pasteurization process

2.2 Sistema de Transporte

Al interior de la máquina de pasteurización las botellas son transportadas por medio de dos emparrillados de acero inoxidable, uno fijo y otro móvil, este último rea-

liza cuatro movimientos cíclicos por medio de cilindros hidráulicos, conocidos como *paso peregrino*. El transporte de la botella a través del pasteurizador dura aproximadamente 45 minutos en condiciones normales de operación. Inicialmente las botellas son recibidas dentro de la pasteurizadora por una parrilla fija que se extiende por toda la máquina, en este momento la parrilla móvil realiza su primer movimiento (elevación), mediante el cual, las botellas quedan apoyadas sobre ella y a la vez despegados de la parrilla fija. En un segundo movimiento, la parrilla móvil avanza hacia la salida del pasteurizador una cierta distancia (aproximadamente 8 cm). Una vez llega a este punto, la parrilla móvil desciende hasta conseguir que las botellas queden apoyadas ahora sobre la parrilla fija, quedando libre de esta manera la parrilla móvil, para finalmente retroceder y quedar en posición de iniciar un nuevo ciclo. Los cilindros hidráulicos están dispuestos en las cuatro esquinas de la máquina y actúan dos simultáneamente, conformando dos pares encargados de realizar los movimiento de avanzar-retroceder (primer par de cilindros) y subir-bajar (segundo par de cilindros). El accionamiento de cada par de cilindros es gobernado por dos válvulas Rexroth de las cuales solo una tiene variación de apertura, brindándole la capacidad de regular el caudal de aceite. De esta manera el primer par, encargado de los movimientos avanzar-retroceder tiene velocidad variable, mientras que el segundo par, encargado de subir y bajar el emparillado, es de velocidad fija. La figura 3 muestra el comportamiento de la apertura de la válvula para avanzar (A) y retroceder (B), la cual es alimentada desde un amplificador analógico marca Rexroth. Si la señal de salida del controlador lógico programable (PLC) se encuentra entre 4 a 11 mA el sistema hidráulico realiza el avance de la máquina, con una velocidad proporcional a la apertura de la válvula, en 12 mA detiene el movimiento del par de cilindros que controla y, entre 13 y 20 mA, la máquina retrocede el emparillado móvil del Pasteurizador, también con una velocidad variable.

Figura 3. Válvula Proporcional Rexroth
Figure 3. Rexroth Proportional Valve



3. CONTROL INTELIGENTE A PARTIR DE REDES NEURONALES

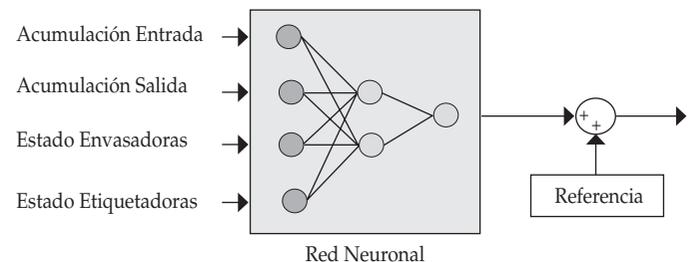
Las redes neuronas artificiales (denominadas habitualmente como RNA o en inglés como ANN) son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso. Este tipo de red tiene un nivel de entrada con n neuronas que no realizan ningún procesamiento sirviendo únicamente como interfaz entre los datos de entrada y la siguiente capa de la red. La capa de salida consta de m neuronas que, luego del procesamiento realizado por la red, se encargan de entregar la salida hacia el exterior. Adicionalmente se incluye una capa intermedia entre la entrada y la salida, a esta capa se le denomina capa oculta dado que no tiene contacto ni con la entrada ni la salida de la red y está conformada por h neuronas. La información fluye en una única dirección, de la entrada a la capa oculta y finalmente, a la capa de salida, además existe conectividad total entre las capas [6].

3.1 RNA para el sistema de transporte

El diseño de esta red se realizó con el fin de controlar la velocidad del sistema de transporte de la máquina pasteurizadora, la cual tiene una capacidad de procesar el producto a una velocidad nominal de 84000 botellas en una hora. La red presenta cuatro entradas, la primera neurona (A1) indica la acumulación de botellas en los transportadores a la entrada de la pasteurizadora, la segunda neurona (A2) indica la acumulación de botellas a la salida de la pasteurizadora, la neurona tres (A3) el estado de funcionamiento de las envasadoras, máquinas que alimentan con botellas el pasteurizador, y la neurona cuatro (A4) el estado de funcionamiento de las etiquetadoras, ubicadas por delante del pasteurizador en la línea de embotellado. La red cuenta con dos neuronas en la primera capa oculta y una neurona de salida (Figura 4), la cual indica el incremento en el tiempo del paso peregrino, que va de 0 a 3.5 segundos, generando un tiempo para completar el ciclo del paso peregrino entre 12.5 segundos (84000 botellas/hora) y 16 segundos (65000 botellas/hora).

Figura 4. Arquitectura de la Red Neuronal para el tiempo de ciclo del sistema de transporte

Figure 4. Architecture of the Neural Network for the cycle time of the transport system



El valor de entrada para cada una de las neuronas se encuentra en un rango de 0 a 1; las dos primeras neuronas varía de forma proporcional al nivel de acumulación en los transportadores de entrada y transportadores salida, según la ecuación 1, donde X es una palabra digital cuyos bits son afectados individualmente por datos binarios provenientes de los sensores de proximidad inductivos ubicados estratégicamente para medir de forma adecuada la acumulación existente. La palabra digital, de la cual se consigue el valor de la neurona A1, es afectada por 15 sensores que apuntan cada uno, a un bit diferente de dicha palabra, conjugando el estado de los sensores en un solo valor que se encuentra entre 1 hasta 32767, igualmente procedimiento se aplica para calcular el valor de la neurona A2, con ayuda de otros 12 sensores ubicados en los transportadores de salida (Ecu. 2), logrando un valor de cero cuando no hay acumulación de botellas en los transportadores, hasta uno (1) cuando la acumulación es del 100% (totalmente lleno).

$$f_1(x) = \ln(x)/10.4 \quad \text{Ecu. 1}$$

$$f_2(x) = \ln(x)/8.32 \quad \text{Ecu. 2}$$

Los valores para la otras dos neuronas de entrada, miden el estado de funcionamiento de las máquinas anteriores y posteriores del pasteurizador buscando predecir la cantidad de acumulación sobre los transportadores y variar moderadamente la velocidad de la máquina, mitigando el impacto de grandes vacíos o acumulaciones excesivas en la línea de embotellado. Dicho valor se calcula promediando en intervalos de un minuto, las paradas de las dos envasadoras (neurona A3) o las dos etiquetadoras (neurona A4) que hacen parte del proceso, teniendo un cero cuando las máquinas no se han detenido, un valor entre 0 y 1 cuando una o ambas máquinas se han detenido (depende del número de paradas n) y 1 cuando las dos máquinas se han detenido totalmente, en la ventana de tiempo establecida.

$$f_3(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{Parada Envasadora}_1(\text{o Etiquetadora}_1) + \text{Parada Envasadora}_2(\text{o Etiquetadora}_2)}{2} \quad \text{Ecu. 3}$$

El total de datos para entrenar la red perceptron multicapa fue de 92 y el sistema se validó con 42 casos diferentes. La base de datos es determinada gracias al conocimiento de un operador experto en el proceso. Algunos de los datos de entrenamiento utilizados se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de entrenamiento de la red neuronal para controlar el tiempo de ciclo del sistema de transporte
Table 1. Training data of the neural network to control the cycle time of the transport system

A1	A2	A3	A4	Salida Red Neuronal [sg]
0	0.25	0	0	0
0.2	0.3	0	0	1.575
0.4	0.7	1	0	3.5

Primer caso. No hay acumulación de botellas en la entrada de la máquina ($A1 = 0$) lo cual se puede presentar al finalizar la producción, durante el cambio del producto envasado o cuando ha ocurrido una parada superior a 15 minutos en algunas de las máquinas anteriores al pasteurizador. Los transportadores en la salida de la máquina tienen una acumulación del 25% ($A2 = 0.25$), las máquinas envasadoras están funcionando correctamente ($A3 = 0$) al igual que las máquinas etiquetadoras ($A4 = 0$), por lo tanto la salida de la red es cero, con este valor el tiempo de ciclo no se incrementa y permite finalizar rápidamente la producción o separar lo suficiente una marca de cerveza de la otra.

Segundo caso. Existe una acumulación del 20% en la entrada de la máquina ($A1 = 0.2$), 30% en la salida de la misma ($A2 = 0.3$) y las máquinas envasadoras y etiquetadoras se encuentran en normal funcionamiento ($A3 = A4 = 0$). Esta situación se puede presentar después de reanudar la producción, una vez se finaliza el cambio de marca producida, las máquinas envasadoras no están alimentando de forma continua el pasteurizador u operan a baja velocidad. Por esta razón se estableció un valor de incremento en el tiempo de 1.575 segundos.

Tercer caso. Se tiene un 40% de acumulación sobre los transportadores de entrada de la máquina ($A1 = 0.4$), 70% de acumulación en los transportadores de salida ($A2 = 0.7$), las dos envasadoras se encuentran paradas ($A3 = 1$) y las etiquetadoras operan normalmente ($A4 = 0$). Para este caso se determinó el máximo incremento posible en el tiempo de ciclo del paso peregrino (3.5 segundos) con lo cual se logra disminuir la velocidad de la máquina antes que el vacío ocasionado por la parada de las dos envasadoras sea detectado por los transportadores, además se desea que la mayoría del tiempo solo exista una acumulación del 30% en la salida, dejando una cantidad considerable de los transportadores vacíos, con el fin de absorber una eventual parada de las máquinas que están después del pasteurizador.

3.2 RNA para la temperatura de pasteurización

Esta red neuronal se utiliza para controlar la temperatura de pasteurización de una de las zonas más críticas de la máquina, en donde el producto puede perder sus propiedades si no se hace correctamente: si se excede la temperatura se afecta el sabor de la cerveza y si por el contrario no se alcanza el valor establecido la carga microbiológica del producto puede llegar a dañarlo con el paso del tiempo. Se configura una red neuronal de dos neuronas de entrada, cuatro neuronas en la capa oculta y una neurona de salida. El dato para la primera entrada a la red se encuentra en un rango de 0 a 1 y se obtiene mediante la ecuación 4, donde X es el promedio del tiempo de ciclo del sistema de transporte de botellas en el interior de la maquina, en una ventana de tiempo de dos minutos, el dominio de esta función se encuentra entre 12.5 sg y 16 sg.

$$f_4(x) = \frac{2x - 25}{7} \quad \text{Ecu. 4}$$

La segunda neurona corresponde a la temperatura promedio del proceso de pasteurización durante la misma ventana de tiempo y es obtenido de igual forma mediante la ecuación de una línea recta con rango de 0 a 1 y dominio de 60.4 a 61. El valor de la neurona de salida se encuentra entre 0 a 0.6, cantidad que posteriormente se resta a la temperatura de referencia de la zona de pasteurización, modificando de esta forma el set point entre 60.4 °C y 61 °C, variación suficiente para compensar la modificación del tiempo de exposición del producto a las duchas de agua caliente y mantener las unidades de pasteurización estables. Para el entrenamiento de esta red neuronal se utilizó 35 situaciones y se validaron con otros 20 casos. En la tabla 2 se pueden apreciar dos condiciones representativas en las cuales el objetivo principal es mantener en valores estándares las unidades de pasteurización.

Primer caso. El valor de 0.75 para la neurona A1 indica un tiempo promedio en el transportador de 15.125 segundos y el valor de 0 en la neurona A2 representa una temperatura promedio en las duchas de 61 °C durante el intervalo de tiempo de 2 minutos. Con estos datos y con la ayuda de un simulador de unidades de pasteurización se obtienen unos valores de 20.16 UPT y 12.51 UPM los cuales se encuentran muy por encima de rango permitido, por esta razón se establece un valor de 0.6 a la salida de la red disminuyendo la temperatura a 60.4 °C.

Segundo caso. El valor promedio del tiempo de ciclo es de 14.25 segundos ($A1 = 0.5$) durante el intervalo de tiempo definido para esta red y una temperatura de exposición promedio de 60.6 °C ($A2 = 0.66$), lo cual genera 16.29 UPT y 6.98 UPM, valores muy cerca del límite superior del rango. La salida de la red es 0.54, obteniendo una temperatura en la zona de 60.46°C.

Tabla 2. Datos de entrenamiento de la red neuronal para regular la temperatura de pasteurización

Table 2. Training data for the neural network to regulate the temperature of pasteurization

A1	A2	Salida Red Neuronal [°C]
0.75	0	0.6
0.5	0.66	0.54

3.3 RNA para la temperatura Supercalentamiento

Esta red busca controlar la temperatura de la zona previa a la zona de pasteurización. Su diseño es muy similar a la red neuronal anterior, cuenta con dos neuronas de entrada, que de igual forma son alimentadas con los valores promedio del tiempo de ciclo del sistema de transporte de la máquina y el promedio de la temperatura en la zona de supercalentamiento, valores que se calculan en una ventana de tiempo de dos minutos. La red incorpora tres neuronas en una capa oculta y una neurona de salida con un rango entre 0 a 1.6, valor que se resta a la temperatura referencia de la zona con lo cual se modifica el set point entre 60,4°C a 62°C, variación suficiente que permite mantener estables las unidades UPT. Para el entrenamiento de esta red neuronal se utilizó 45 situaciones y se validaron con otros 32 casos.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

El método de control difuso Takagi-Sugeno, propuesto en el año de 1985, es similar a la metodología Mamdani en las etapas de fusificación y evaluación del antecedente de la regla, la diferencia radica que la función de salida es una relación lineal. Esta técnica de control ofrece una solución con mejor eficiencia computacional a la hora de programar el regulador en un PLC con relación a la técnica Mamdani, a su vez permite simular un controlador proporcional derivativo configurado para diferentes puntos de operación, dado el carácter lineal de la función de salida. En la ecuación 5 se observa una regla típica de este modelo, en la cual las constantes a , b y c se definen en la etapa de diseño del controlador.

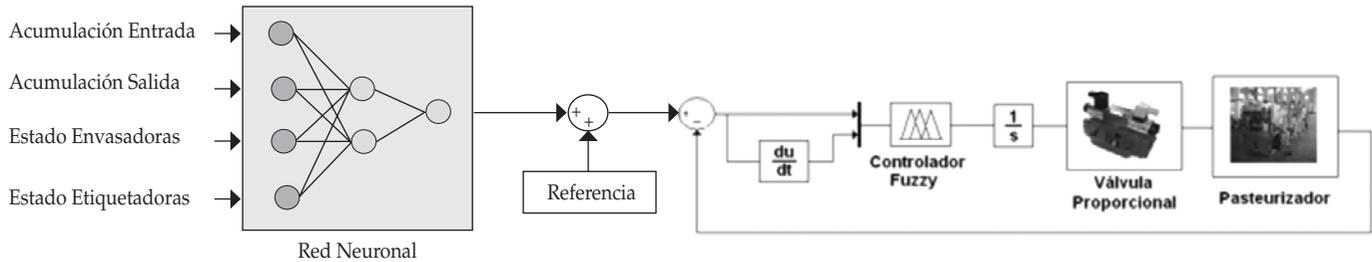
$$\text{Si } \text{input}_1 = x \text{ input}_2 = y \Rightarrow z = ax + by + c \quad \text{Ecu. 5}$$

En la figura 5 se observa el diagrama de bloques del sistema de control, las entradas al regulador son el error en el tiempo de ciclo y la segunda variable es la diferencia entre el error presente y el pasado, la salida del sistema indica la razón de cambio de la acción de control. La señal se integra y este valor define la apertura de la válvula proporcional Rexroth, encargada de regular el aceite de los cilindros que se utilizan para el avance y retroceso de la parrilla que transporta la cerveza. El diseño del regulador

se realizó con la toolbox *Fuzzy Logic* de Matlab, se escogió la función *mínimo* para evaluar el operador AND, como método de defusificación la función *"wtsum"*, definida por

ecuación 6, donde w_i corresponde al valor del antecedente y z_i al valor del consecuente de cada regla.

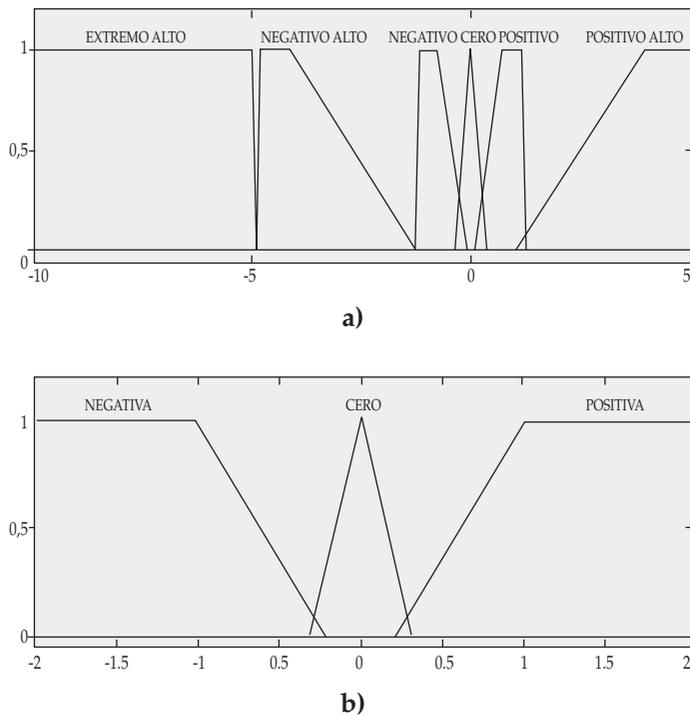
Figura 5. Sistema de Control inteligente para el pasteurizador tipo túnel
Figure 5. Intelligent Control System for tunnel type pasteurizer



$$f_5(x) = \sum_{i=1}^{\infty} w_i z_i \quad \text{Ecu. 6}$$

En la figura 6, se observa los conjuntos difusos para las variables lingüísticas de entrada (las unidades del universo de cada variable son segundos), las cuales se definieron de acuerdo a la experiencia de los operarios de la máquina.

Figura 6. Variables de entrada del sistema difuso. a) Error b) Razón de cambio del error
Figure 6. Input variables of the fuzzy system. an) Error by) Reason of change of error



Las funciones lineales que se definieron para la salida del sistema se encuentran en la tabla 3. La base de reglas del controlador difuso se definieron bajo dos premisas fundamentales, permitir que la variable de proceso logre el punto de consigna en el menor tiempo posible sin sobrepaso y permitir que el sistema difuso identifique casos específicos en cada una de las situaciones de funcionamiento del pasteurizador, logrando mejorar la estabilidad en el tiempo de ciclo de la máquina. En respuesta a la primera premisa se establecieron las siguientes reglas:

- Regla 1.** Si Error es *Negativo Alto* entonces salida *Abrir Máximo*.
- Regla 2.** Si Error es *Negativo* y Razón de Cambio del Error es *Negativa* entonces salida es *Medio*.
- Regla 3.** Si Error es *Negativo* y Razón de Cambio del Error es *Cero* entonces salida es *Medio*.
- Regla 4.** Si Error es *Negativo* y Razón de Cambio del Error es *Positiva* entonces salida es *Bajo*.
- Regla 5.** Si Error es *Cero* entonces salida es *Bajo*.
- Regla 6.** Si Error es *Positivo* y Razón de Cambio del Error es *Negativa* entonces salida es *Bajo*.
- Regla 7.** Si Error es *Positivo* y Razón de Cambio del Error es *Cero* entonces salida es *Medio*.
- Regla 8.** Si Error es *Positivo* y Razón de Cambio del Error es *Negativa* entonces salida es *Medio*.
- Regla 9.** Si Error es *Positivo Alto* entonces salida es *Cerrar Máximo*.

Tabla 3. Funciones lineales del sistema difuso Sugeno
Table 3. Linear functions of Sugeno fuzzy system

Nombre	Función
Cero	$Z1 = 0$
Cerrar Máximo	$Z2 = 0.98$
Medio	$Z3 = 0.2 * \text{Error} + 0.05 * \text{Razon_Cambio_Error}$
Bajo	$Z4 = 0.16 * \text{Error} + 0.03 * \text{Razon_Cambio_Error}$
Abrir Máximo	$Z5 = -0.98$

Para los casos específicos que se presentan en el pasteurizador se agregaron dos reglas, la primera tiene como objetivo lograr que el controlador realice la función de un switch, anulando la acción de control cuando en la línea de embotellado alguna de las máquinas posteriores al pasteurizador se detiene por largo tiempo y causa que el proceso se pare por acumulación de botellas. Esta condición se caracteriza por un error extremadamente alto y una razón de cambio negativa.

Regla 10. Si Error es *Extremo Alto* y Razón de Cambio del Error es *Negativa* entonces salida es *Cero*

La segunda regla evita que el regulador permanezca en el estado definido con la regla 10. La primera vez que ocurre la parada no se debe generar ninguna acción de control y la señal aplicada a la válvula debe mantener el valor anterior, pero si la parada ocurre nuevamente el controlador debe generar una acción de control alta con el fin que el tiempo de ciclo disminuya, permitiendo que el transportador se mueva a la velocidad más alta posible.

Regla 11. Si Error es *Extremo Alto* y Razón de Cambio del Error es *No Negativa* entonces salida es *Abrir Máximo*

Para evaluar el desempeño del controlador se deshabilitó el módulo de redes neuronales, se fijó un setpoint para el tiempo de ciclo de 12.5 sg y se analizaron diferentes situaciones en el proceso. En cada imagen, que se muestra a continuación, se utiliza la siguiente anotación: la línea de color morado representa la señal de control sobre la válvula proporcional, siguiendo la configuración de la figura 3; la línea de color verde representa la variable a controlar, que en este caso corresponde al tiempo invertido para realizar un movimiento de paso peregrino; y la línea de color amarillo es una señal booleana que indica si ocurre una parada en la máquina. En la figura 7 se analiza el caso de la regla 10, ocurre una parada y cuando el sistema reinicia el temporizador interno del PLC que registra el tiempo de un ciclo completo del paso peregrino da un valor de 20 segundos, al reanudar el proceso el controlador mantiene la última de acción de control. Al utilizar un regulador PID reconocería el error (SP-PV) ocasionado por la para-

da de la máquina y ejecutaría una acción de control fuerte buscando la estabilidad del sistema, sin embargo esto solo provocaría lo contrario.

En la figura 8 se presenta el caso en el cual ocurren dos paradas de forma simultánea, en la primera se mantiene la acción de control, pero en la segunda parada el controlador detecta un error *EXTREMO-ALTO*, ejecutando una acción de control lo suficientemente grande para llevar la variable de proceso a una región, donde las otras reglas generen una modulación en la amplitud de la señal analógica, logrando estabilizar nuevamente el tiempo de ciclo.

Figura 7. Validación de la regla 10 del sistema de control difuso

Figure 7. Validation of the Rule 10 of the fuzzy control system

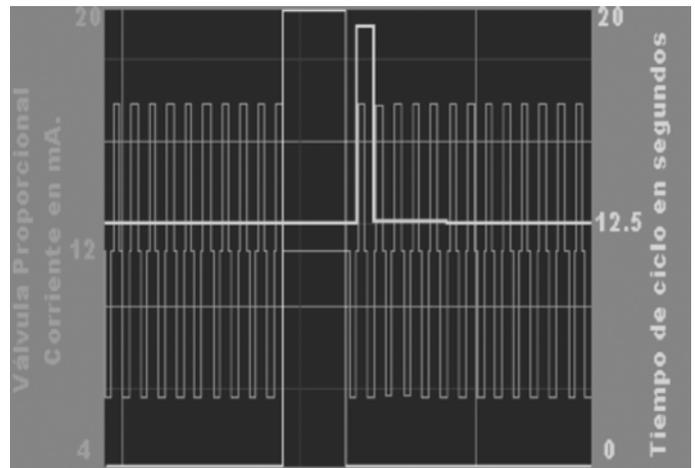
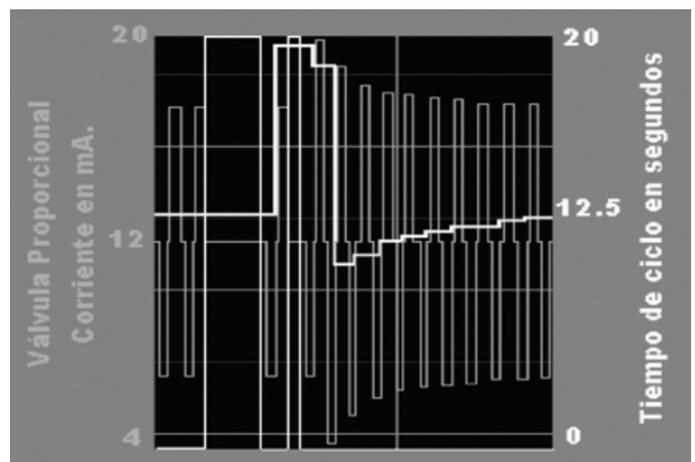


Figura 8. Validación de la regla 11 del sistema de control difuso

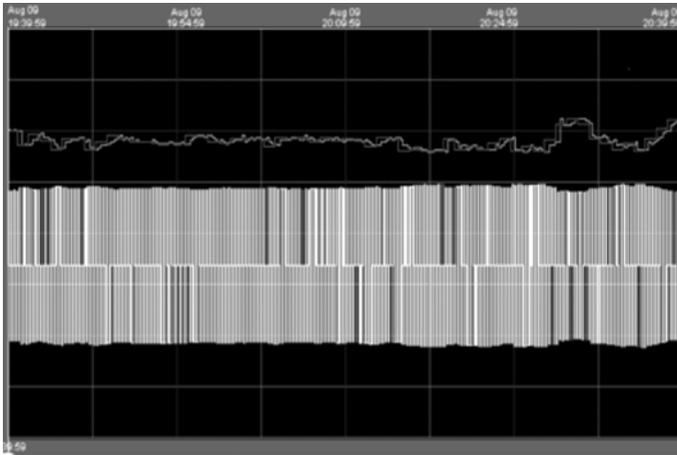
Figure 8. Validation of Rule 11 of the fuzzy control system



En la figura 9 se analiza el comportamiento del sistema de control inteligente para el transportador: la red neuronal

modifica el set point de tiempo de ciclo de la máquina (línea roja) y el regulador difuso genera la señal para la válvula proporcional (línea blanca). Se observa que la acción de control disminuye su amplitud cuando es necesario un mayor tiempo de ciclo (menor velocidad) y aumenta cuando se requiere un menor tiempo de ciclo (mayor velocidad).

Figura 9. Validación del sistema de control inteligente
Figure 9. Validation of intelligent control system



5. CONCLUSIONES

- En la industria continuamente se realizan repotenciaciones en máquinas y procesos, que le permiten no solo mantenerse en el mercado si no aumentar su participación en este. Dichas repotenciaciones muchas veces buscan mejorar una función específica de alguna máquina y tal particularidad requiere de controles especialmente diseñados para cubrir todas estas necesidades. El control inteligente implementado en esta máquina, permitió una disminución que puede llegar a ser, hasta del 30 % en el consumo de vapor y 50% el número de botellas caídas a la salida de la máquina. Además se logró disminuir el tiempo de parada por fallas en el sistema mecánico e hidráulico del pasteurizador, reduciendo de esta forma el mantenimiento correctivo de la máquina. De otro, es importante retomar la experiencia de los operarios con el fin de optimizar este tipo de control.

REFERENCIAS

- [1] Marulanda J.F., Barco M.G., López J.A. Control Inteligente de un reactor químico. Grupo de percepción y sistemas inteligentes, Universidad del Valle. http://objetos.univalle.edu.co/files/Control_inteligente_de_un_reactor_quimico.pdf
- [2] Haber Guerra R.E., Alique López J.R., Alique Palomar A. Control Inteligente de los procesos de Mecanizado. Instituto de Automática Industrial (CSIC) - Madrid. http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIII/documentos/ja02_019.pdf
- [3] Alique J.R, Gajate A., Novo M. Control adaptativo inteligente para la optimización de los procesos de fresado desatendido. Instituto de Automática Industrial (CSIC) - Madrid. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/13773/1/Control%20Adaptativo%20Inteligente.pdf>
- [4] Sevilla J.M. Pasteurización. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Almería. <http://www.ual.es/~jfernand/TA/Tema7/Tema7-Pasteurizacion.pdf>
- [5] Díaz Peñafiel C.A. *Determinación de residuos de antibióticos y sulfonamidas en seis marcas comerciales de leche de mayor consumo en la ciudad de Riobamba*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2008. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1604/1/17T0847.pdf>
- [6] Brio B.M, Molina A.S. Redes neuronales y difusos. Editorial Alfaomega. 2002.
- [7] Hudson Beale M., Hagan M.T., Demuth H.B. Neural Network Toolbox – User’s Guide. R2012a. http://www.mathworks.com.au/help/pdf_doc/nnet/nnet_ug.pdf
- [8] Fuzzy Logic Toolbox - User’s Guide. R2012a. http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf