

# CONTROL Y MONITOREO DE TEMPERATURA PARA UN HORNO DE CURADO DE PRENDAS ÍNDIGO UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA Y CONTROLES PI

Sergio Andrés Castaño Giraldo <sup>1</sup>, David Santiago Hernández Gómez <sup>2</sup>, Jorge Hugo Gallo Blandón <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero en instrumentación y control. Estudiante de Maestría en Automatización de la Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

<sup>2</sup> Ingeniero en instrumentación y control. Metrología en Noel S.A. Medellín, Colombia.

<sup>3</sup> Ingeniero en instrumentación y control. Jefe de mantenimiento Expofaro. Medellín, Colombia.

Email autor de correspondencia: sac\_ing@outlook.com

## RESUMEN

El proceso de curado somete la prenda índigo a unas condiciones determinadas de temperatura en el interior de un horno, para garantizar el acabado de la prenda. Este artículo a través de un método inductivo, trata el diseño de un control por lógica difusa y un controlador PI por el método de ganancia límite para controlar la temperatura del horno de curado de prendas índigo de la empresa Expofaro, evidenciando las ventajas de controladores alternativos para la regulación de variables a nivel industrial. Adicionalmente, se realiza un monitoreo inalámbrico que permite analizar el comportamiento de la temperatura a lo largo y ancho del horno de curado. Este trabajo es realizado por medio de dispositivos embebidos y componentes electrónicos, los cuales lograron un funcionamiento adecuado en el control de la variable temperatura obteniendo como resultado una adherencia correcta de la resina sobre las prendas índigo logrando un acabado de quiebres deseado. El alcance del proyecto llega hasta la implementación del hardware y software que regule la temperatura del horno.

**Palabras clave:** Control difuso, Prendas índigo, horno de curado, comunicación Zigbee, Control PI.

Recibido: 31 de octubre de 2013. Aceptado: 20 de noviembre de 2013.

*Received: October 31<sup>st</sup>, 2013. Accepted: November 20<sup>th</sup>, 2013.*

## CONTROL AND MONITORING OF TEMPERATURE FOR AN INDIGO CLOTHING CURING OVEN USING FUZZY LOGIC AND PI CONTROLS

### ABSTRACT

*The curing process put indigo garment through certain conditions of temperature inside an oven to ensure its finish. This paper discusses through inductive method the design of a fuzzy logic control and PI control by the method of boundary gain for regulation of the variable temperature inside of a indigo garments curing oven from Expofaro Company, demonstrating the advantages of alternative controllers for regulation of industry variables. Additionally, the project has a wireless monitoring system which allows analyzing the behavior of the variable temperature throughout the curing oven. This work is done with embedded devices and electronic components, which achieved an appropriate functioning of the variable regulation, giving as a result proper adhesion of the resin onto the indigo clothes, achieving wanted breaks. The scope of the project includes the implementation of hardware and software to regulate the temperature of the oven.*

**Keywords:** Fuzzy control, indigo garments, curing oven, Zigbee communication, PI Control.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de curado de prendas índigo, permite brindarle a la tela un acabado característico con el cual se distribuye en el mercado. Este proyecto se enfoca sobre jeans índigo. Para darle un terminado a los jeans, estos son impregnados con resina ya sea por métodos de inmersión o por la aplicación con pistolas de aire, las cuales atomizan la resina adhiriéndola a la prenda, con el objetivo de darle dos efectos a la prenda: prendas con superficies completamente lisas o con retención de quiebres por planchado, conservando esta característica incluso después del uso, o de varias lavadas. Para que la resina logre estos efectos, es necesario someter la prenda a un proceso de curado, ingresando los jeans índigo en un horno a 150°C.

La empresa CI Expofaro es una lavandería industrial localizada en el municipio Itagüí – Antioquia, especializada en el curado de jeans tipo índigo y elaboración de detalles sobre los mismos. El proceso de curado de prendas es realizado al interior de un horno ubicado en el área de manualidades de la empresa, donde el principal problema es lograr una uniformidad y estabilidad de temperatura en el interior de este. Debido al constante flujo de jeans al interior del horno, se debe idear un sistema de control que mantenga la temperatura constante pudiendo sobrellevar las fluctuaciones de factores externos al proceso.

Analizando el estado del arte del proyecto, se estudia proyectos similares de otros autores donde se enuncian los más relevantes:

Camargo y Villamizar [1], desarrollan un controlador difuso en un horno y comparan sus características con respecto a un controlador convencional PID, demostrando un mejor rendimiento en el controlador difuso.

Lopez, Garcia, Davico y Verrastro [2] proponen un controlador difuso multivariable, para la regulación de temperatura en un horno de varias zonas, donde existe un fuerte grado de acoplamiento de las zonas y una inercia térmica, dificultando el control por métodos clásicos como el PID.

Jiménez [3] diseña y construye un controlador difuso Mamdani para un horno eléctrico usado en la cocción de piezas cerámicas, mejorando notoriamente el tiempo de cocción y calidad de las piezas cerámicas.

Cortés y Arenas [4], diseñan e implementan un control de temperatura difuso para una incubadora avícola, obteniendo condiciones óptimas para el desarrollo de las aves en el interior del huevo.

Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de control difuso en un dispositivo embebido para darle solución a una problemática encontrada en el proceso de curado de prendas de la lavandería industrial textil Expofaro. Para esto se hace énfasis en la utilización de lógica difusa como un medio importante en la medición y control de variables y con el cual se puede acoplar los diferentes valores de dichas variables a un rango preestablecido, contribuyendo a un mejor comportamiento del control sobre estas [5].

Los sistemas difusos han tomado gran importancia tanto en procesos industriales como en aplicaciones del hogar, para la manipulación de una variable específica, por eso hoy en día, no es de sorprenderse encontrar lavarropas, cámaras de video, aires acondicionados entre otros con sistemas de control difuso. Esto es debido a que son sistemas robustos, sencillos, económicos y de rápida implementación [6]. Una de las ventajas más significativas que otorga el control difuso, es poder efectuar acciones sobre el proceso mediante la interpretación de variables lingüísticas y el uso de pertenencia de conjuntos; Evitando realizar el modelado matemático de sistemas complejos o poco lineales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Desarrollo del Sistema Embebido para el Procesamiento y Transmisión de Datos

Para el desarrollo del controlador con Lógica Difusa, que se implementa en el horno de curado de prendas índigo, es necesario diseñar una tarjeta electrónica que interactúe entre el proceso físico y el proceso de monitoreo, adicionalmente, se requiere que dicha tarjeta, lea constantemente las señales análogas del proceso por medio de los sensores de temperatura, y efectúe la acción de control correspondiente sobre la variable, con el fin de garantizar la temperatura adecuada para el proceso de curado.

### 2.1.1 Selección del procesador digital

La tarjeta electrónica cuenta con un procesador digital (CPU) el cual efectúa las acciones de procesamiento matemático y toma de decisiones para que el proceso opere en las condiciones deseadas. Los microcontroladores seleccionados para la comparación son el PIC16F887 y el PIC18F4550 [7]. Los cuales son dispositivos embebidos de gama media.

Para la selección del procesador, se parte de las características necesarias para la implementación del control difuso sobre el horno de curado por eso se opta por el empleo del PIC18F4550, debido a que posee una mayor velocidad de procesamiento, tiene más capacidad de memoria ROM, cuenta con dos puertos CCP necesarios para la manipulación del elemento final de control, 13 canales análogos para la lectura de las termocuplas del horno y por último tiene un módulo de comunicación serial USART, para la implementación del monitoreo inalámbrico por módulos XBEE.

### 2.1.2 Acople de las señales de entrada y salida

Las entradas y salidas requeridas para el desarrollo del circuito son de tipo análogo, donde deben muestrearse las señales físicas del proceso y a su vez debe proporcionarse una señal análoga de corriente para la manipulación de la válvula de control.

Para la captura de la variable temperatura se dispone de cinco termocuplas tipo J con un rango de operación entre los -200 °C hasta los 700 °C [8]. Estos sensores se distribuyen en diferentes puntos al interior del horno para obtener una medida promedio de todo el recinto

Las terminales de las termocuplas proporcionan un diferencial de tensión en un rango de milivoltios, que es amplificado previamente antes de llegar a la etapa del procesador digital con el fin de evitar errores en la medición, para esto se hace uso de amplificadores operacionales en configuración no inversora como se aprecia en la Fig.1

En la ecuación 1 se calcula el voltaje de salida del amplificador operacional, dicho voltaje está determinado por la ganancia del circuito, la cual puede ser ajustada incrementando o disminuyendo el valor de las resistencias, es por ello que se

decide implementar el circuito con resistencias variables.

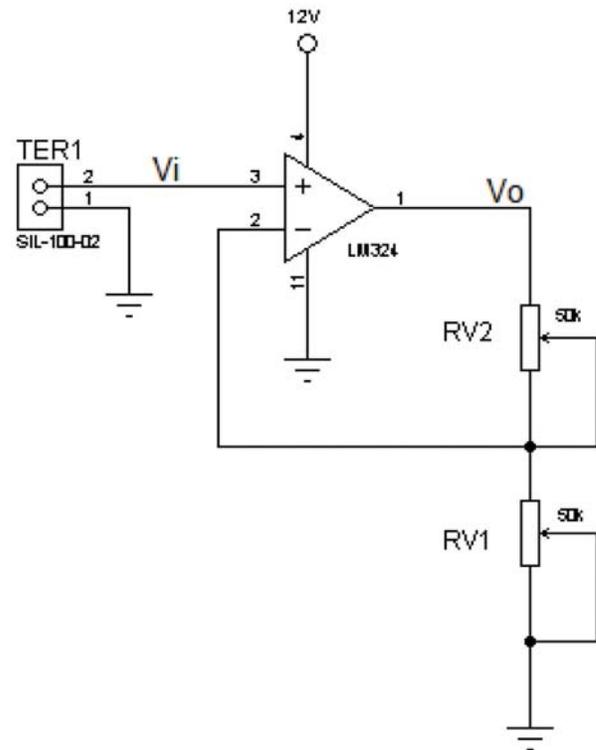


Figura 1. Amplificador operacional en configuración no inversora.

$$V_o = \left( \frac{RV_2}{RV_1} + 1 \right) V_i \quad (1)$$

Cuando el voltaje es elevado a un valor adecuado para el modulo análogo – digital del microcontrolador, se linealiza dicha señal por medio de una ecuación de quinto orden, propuesta por la empresa *Omega Engineering* [9]; dando como resultado valores acordes a la temperatura interior del horno. La siguiente ecuación es lineal cuando x es pequeña, por lo cual se desprecian los términos de orden superior.

$$T = -0.0488 + 19873.14x - 21814x^2 + 11569199x^3 - 264917531x^4 + 2018441314x^5 \quad (2)$$

Por otro lado se requiere que el sistema embebido entregue una señal análoga de 4 – 20 mA la cual es enviada hacia la válvula de control para la regulación de la variable temperatura. Para lograr esto, se debe acoplar la señal de salida del módulo CCP del microcontrolador, el cual proporciona una salida digital en forma de PWM, por lo tanto es

necesario realizar una conversión inicial digital – análoga a través del diseño de un filtro pasa bajos como se observa en la Fig.2, El cual convierte la señal digital PWM proveniente del microcontrolador a una señal análoga de 1 – 5 VDC. La señal de voltaje directo, debe ser transformada a una señal de corriente de 4 – 20 mA, para ello se hace uso de un convertidor de voltaje a corriente expuesto en la Fig. 3.

### 2.1.3 Etapa de comunicación

Hoy en día los dispositivos XBEE ofrecen una solución robusta en la transmisión inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal de diferentes dispositivos que empleen la comunicación serial. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Existen 2 series de estos módulos. La serie 1 y la serie 2 o también conocida como 2.5. Los módulos de la Serie 1 y la Serie 2 tienen el mismo pin-out, sin embargo, NO son compatibles entre sí ya que utilizan distintos chipset y trabajan con protocolos diferentes.

La serie 1 está basada en el chipset *Freescale* y está pensado para ser utilizado en redes punto a punto y punto a multipunto. Los módulos de la serie 2 están basados en el chipset de *Ember* y están diseñados para ser utilizados en aplicaciones que requieren repetidores o una red *mesh*. Ambos módulos pueden ser utilizados en los modos AT y API [10].

Para el proyecto de investigación, se emplean dos módulos XBEE PRO serie 2 configurados en modo API. Si bien, es cierto que con solo dos XBEE es más que suficiente realizar una simple comunicación AT, se opta por realizar la comunicación a través de tramas API, debido a la robustez que tiene en la transmisión de datos y además se piensa a futuro, cuando se desee implementar una red de sensores en diferentes hornos de la empresa.

### 2.1.4 Elaboración de la tarjeta

Para terminar con el diseño de la tarjeta, se anexan periféricos adicionales como un LCD para la visualización de las variables, un reloj de tiempo real DS1307 para contabilizar la fecha y llevar un periodo de muestreo exacto y pulsadores que permitan la navegación por las funciones del

sistema. En la Fig. 4 se aprecia el hardware terminado que cumplirá la función de control y monitoreo del horno de curado.

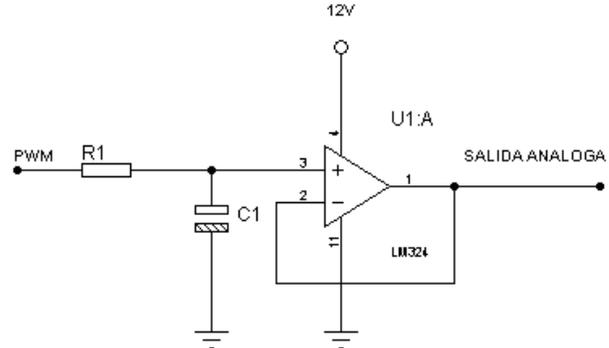


Figura 2. Conversión digital-análogo.

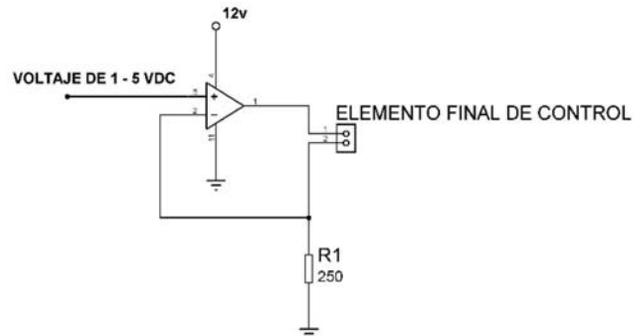


Figura 3. Conversor de voltaje a corriente.

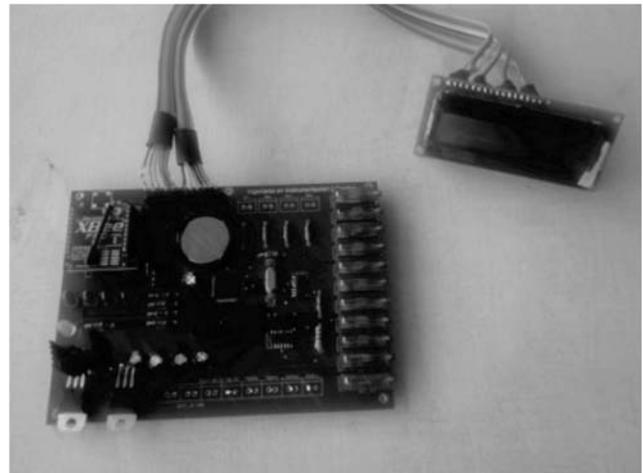


Figura 4. Circuito embebido.

Para poder anexar el desarrollo al ambiente industrial del horno, se organiza el circuito en un gabinete donde está protegido del polvo y de sustancias que puedan alterar el funcionamiento del circuito, en la Fig. 5. Se observa el acabado final del sistema embebido para el proceso.



Figura 5. Sistema embebido

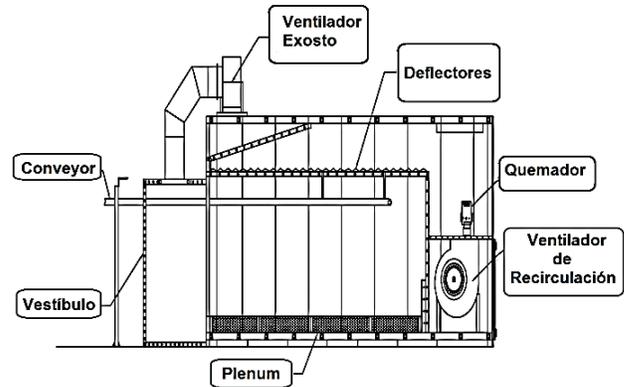


Figura 6. Plano estructural del horno de curado.

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE EL SISTEMA EMBEBIDO DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y MODELACIÓN EN MATLAB®

El horno se encuentra ubicado en el área de manualidades de la empresa CI EXPOFARO S.A.S, cuya función principal es el calentamiento de prendas Índigo, a las cuales se les realiza un proceso de impregnación de resina. El sistema de ventilación consta del ventilador de recirculación y de deflectores de fácil calibración que distribuyen homogéneamente el aire, para que se obtenga una temperatura constante a lo largo del horno.

Las prendas ingresan al horno por medio de un sistema de conveyor manejado por un variador de velocidad, con este a su vez se regulan los tiempos de la prenda al interior del horno, programando el controlador a una temperatura de 150 grados centígrados.

El horno está dotado con tres motores: Uno para la circulación del aire al interior del horno, otro para generar la combustión y el último para la extracción de humo generado por la quema de la resina y el Índigo, como se observa en la Fig. 6.

#### 3.1 Identificación del horno de curado

Se procede a realizar el modelamiento de la respuesta de del horno de curado, a través de una adquisición de datos tomada con el sistema embebido diseñado en el capítulo 2. Esta modelación tiene como finalidad obtener una función de transferencia de primer orden con retardo, la cual permitirá hacer el diseño de un controlador convencional PI para posteriormente comparar la respuesta de dicho control contra la respuesta del control difuso.

El proceso de identificación se hace de forma no paramétrica donde se obtiene las características del sistema mediante una tabla que describe las propiedades dinámicas a través un número finito de parámetros [11].

Se estimula el sistema con dos escalones de 70°C y uno más pequeño de 30°C obteniendo la respuesta observada en la Fig. 7. Se recortan y trasladan los datos del escalón de 70°C como se ve en la Fig. 8. Para posteriormente hacer el modelado de primer orden con el toolbox de identificación Matlab®.

Un sistema de primer orden con retardo es descrito por la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3)$$

Donde:

- $K$ : Ganancia del sistema
- $\theta$ : Retardo del sistema
- $\tau$ : Constante de tiempo del sistema
- $Y(s)$ : Salida del sistema
- $U(s)$ : Entrada del sistema

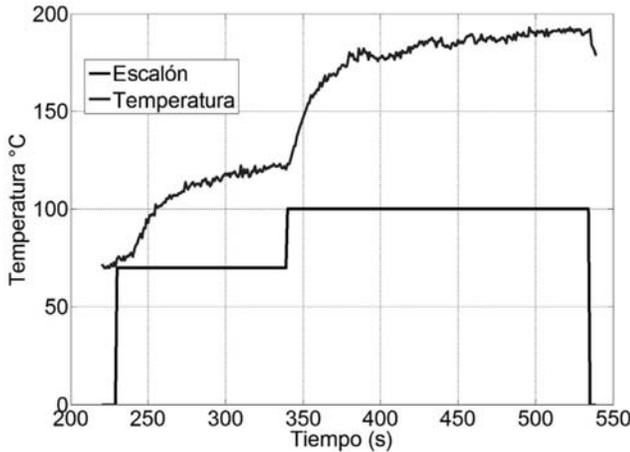


Figura 7. Respuesta experimental ante entradas escalón.

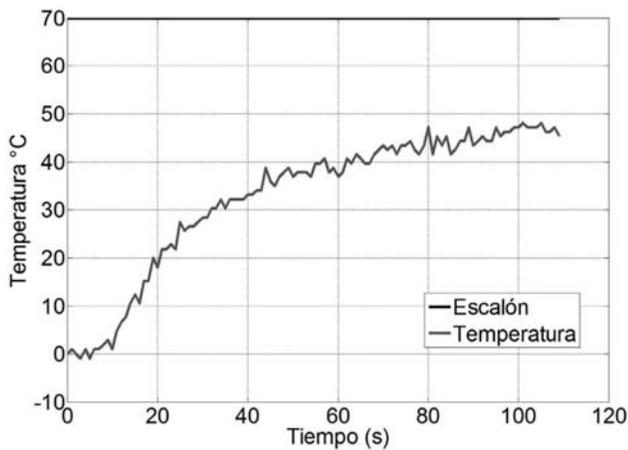


Figura 8. Recorte y traslado de datos del escalón de 70°C.

El horno de curado se aproxima al siguiente sistema de primer orden arrojado por el toolbox de MATLAB®. La Fig. 9. ilustra la comparación de la respuesta del modelo vs los datos reales del sistema.

$$G(s) = \frac{0.66 e^{-7.41s}}{25.44s+1} \quad (4)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Implementación del Control y Monitoreo de Temperatura del Horno de Curado

El desarrollo e implementación del controlador difuso en un sistema embebido junto con la comunicación inalámbrica Zigbee por medio de los dispositivos XBEE, son la base de la investigación de este proyecto, donde se pone a prueba la eficiencia de este controlador no convencional,

frente a un controlador tradicional como el PI (Proporcional + Integral).

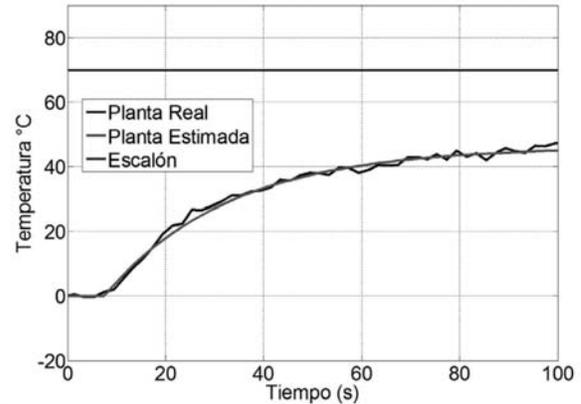


Figura 9. Respuesta sistema de primer orden.

#### 4.1.1 Diseño del controlador convencional

Uno de los controladores más comunes utilizados en el control de temperatura, es el control PI (Proporcional + Integral), donde la salida del controlador tendrá un arranque inicial al error actual y después empezara a tener una variación gradual a una velocidad proporcional al error, dicho control puede ser representado a través de la siguiente ecuación en el dominio del tiempo [12].

$$u(t) = Kc \left[ e(t) + \frac{1}{ti} \int e(t) dt \right] \quad (5)$$

En donde:

$u(t)$  = Salida del controlador.

$e(t)$  = Señal de error actuante.

$Kc$  = Ganancia del controlador. (Parámetro de ajuste).

$ti$  = Tiempo Integral en segundos.

Discretizando la ecuación 5 se obtiene el siguiente modelo:

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{q_0 z + q_1}{z-1} \quad (6)$$

Donde  $M(z)$  es la salida del controlador,  $E(z)$  es el error actuante,  $q_0$  y  $q_1$  son los parámetros del control PI discreto. La relación entre  $Kc$  y  $ti$  con los parámetros discretos  $q_0$  y  $q_1$  se enuncian en las siguientes ecuaciones:

$$q_0 = Kc \left[ 1 + \frac{T}{2ti} \right] \quad (7)$$

$$q_1 = -Kc \left[ 1 - \frac{T}{2ti} \right] \quad (8)$$

Donde  $T$  hace alusión al periodo de muestreo

Se opta por sintonizar el PI a través del método propuesto por Ziegler-Nichols de la ganancia límite, el cual es una forma de sintonización ampliamente usado a nivel industrial. Partiendo de la función de transferencia que representa la dinámica del horno de curado se procede a hallar la ganancia límite  $K_u$ , el cual pone a oscilar al sistema y el periodo ultimo  $T_u$  correspondiente al sistema oscilatorio, para luego hallar las ganancias del controlador a través de la Tabla 1.

Tabla 1. Ajuste de controladores por ganancia limite

Controlador	$K_c$	$t_i$	$t_d$
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$0.83T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

Pasando la función de transferencia al dominio de la frecuencia pueden obtenerse los valores de ' $K_u$ ' y ' $T_u$ ' y a su vez los parámetros del controlador PI.

$$K_u = 9.1608 \quad (9)$$

$$T_u = 26.8066 \quad (10)$$

$$K_c = 4.1223 \quad (11)$$

$$t_i = 22.24 \quad (12)$$

Dando como resultado el siguiente controlador PI discreto reemplazando en las ecuaciones 7 y 8 con un periodo de muestreo de 1 segundo.

$$\frac{m(z)}{e(z)} = \frac{4.2150z - 4.029}{z - 1} \quad (13)$$

En la Fig.10. Puede apreciarse el lazo de control PI y en la Fig. 11. Se evidencia la respuesta de la planta ante la acción de este control.

#### 4.1.2 Diseño del controlador difuso

El método de control difuso representa un enfoque bastante nuevo al control de sistemas industriales, sistemas no lineales, sistemas complejos o sistemas cuyo modelo matemático es difícil o imposible determinar.

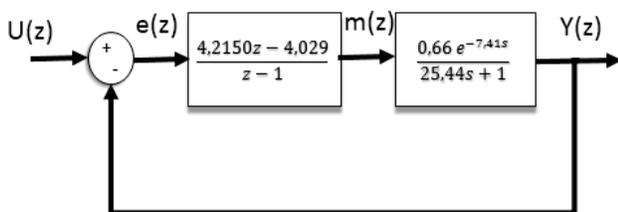


Figura 10. Lazo cerrado control PI discreto

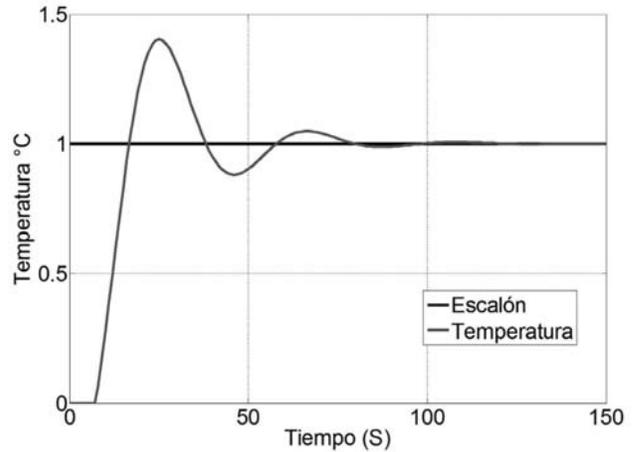


Figura 11. Respuesta del control PI simulado.

La lógica difusa y la teoría de los conjuntos difusos son el resultado de una comprensión más amplia de los sistemas prácticos de control y las acciones de control realizadas por el ser humano, en operaciones que no podían haber sido correctamente interpretadas por el uso del control clásico. En la Fig. 12. Se muestra el lazo de control difuso, junto con las etapas que son programadas en el microcontrolador, para lograr la regulación de la variable.

**4.1.2.1 Fusificación:** proceso que se encarga de transformar los datos numéricos a la entrada del controlador (error y derivada del error) en variables lingüísticas. Clasificando las variables de entrada en conjuntos difusos definidos dentro del universo del discurso [13].

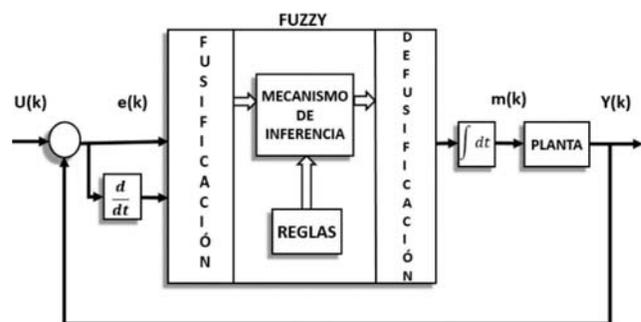


Figura 12. Esquema de sistema difuso

**4.1.2.2 Variables lingüísticas:** determinan los conjuntos compuestos por cada función de membresía definidas por el experto, en este trabajo de investigación se realizó variables lingüísticas de 7 particiones expuestas en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables lingüísticas del difuso.

Error	Derivada Error	Salida	Definición
eNG	deNG	uNG	Negativo Grande
eNM	deNM	uNM	Negativo Medio
eNP	deNP	uNP	Negativo Pequeño
eZ	deZ	uZ	Zero
ePP	dePP	uPP	Positivo Pequeño
ePM	dePM	uPM	Positivo Medio
ePG	dePG	uPG	Positivo Grande

**4.1.2.3 Reglas de inferencia:** son las que buscan validar premisas y aseveraciones de variables lógicas para llegar a una conclusión. Las reglas definen las operaciones que determinan la lógica de control determinando la verdad o falsedad absoluta demostradas en una combinación. El desarrollo de las reglas para el horno de curado se hace por medio de la tabla FAM el cual crea todas las combinaciones posibles que pueden darse; En este caso por ser un sistema de 7 particiones se generan 49 reglas, la tabla FAM se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Tabla FAM

	deNG	deNM	deNP	deZ	dePP	dePM	dePG
eNG	uNG	uNG	uNG	uNG	uNM	uNP	uZ
eNM	uNG	uNG	uNG	uNM	uNP	uZ	uPP
eNP	uNG	uNG	uNM	uNP	uZ	uPP	uPM
eZ	uNG	uNM	uNP	uZ	uPP	uPM	uPG
ePP	uNM	uNP	uZ	uPP	uPM	uPG	uPG
ePM	uNP	uZ	uPP	uPM	uPG	uPG	uPG
ePG	uZ	uPP	uPM	uPG	uPG	uPG	uPG

**4.1.2.4 Funciones de membrecía:** Son los conjuntos difusos pertenecientes al universo del discurso en donde la variable cambia su valor. Estos conjuntos están valorados de 0 a 1, donde 0 es que no pertenece y 1 es que pertenece totalmente, y los valores intermedios indican el grado de pertenencia al conjunto. Las funciones de membrecía pueden ser construidas de diferentes formas geométricas, para el caso de este proceso, se realizan funciones triangulares tanto en las entradas como en la salida. En la Fig. 13. Se aprecian las funciones de membrecía del sistema difuso.

**4.1.2.5 Etapa de defusificación:** en esta etapa, se halla el valor numérico asociado a las funciones de pertenencia de la entrada con el mecanismo de inferencia, para obtener una salida la cual será enviada al elemento final de control con el fin de poder hacer una regulación del proceso. El método de defusificación usado para el horno de curado, es el de centro de gravedad, donde si bien es cierto, que es un método pesado para ser implementado en un microcontrolador, debido a la cantidad de memoria y de tiempo que consume, demostró funcionar correctamente en las pruebas realizadas en el horno. Dicho método se caracteriza, por retornar el centro del polígono generado en la etapa de agregación y se encuentra regido por la siguiente ecuación.

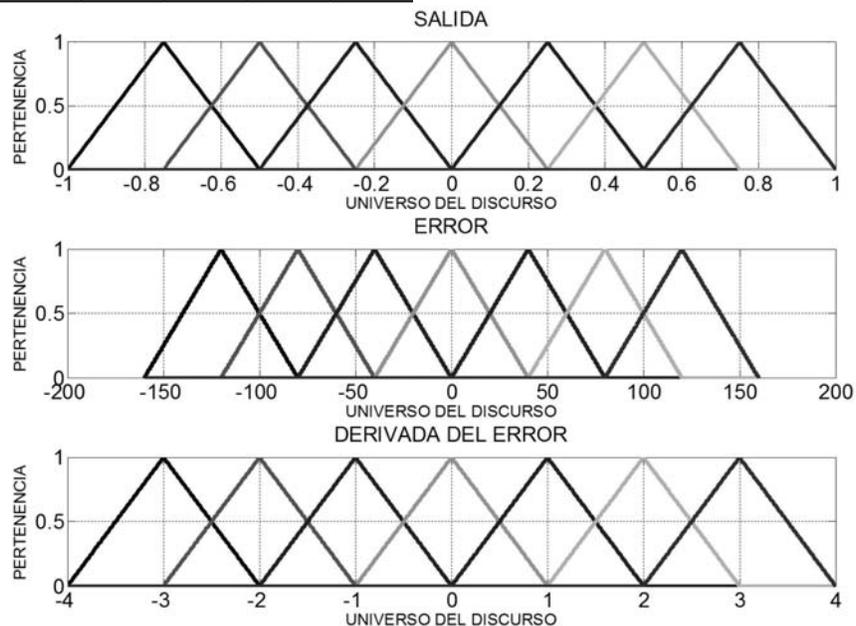


Figura 13. Funciones de membrecía



Figura 14. Centro de gravedad.

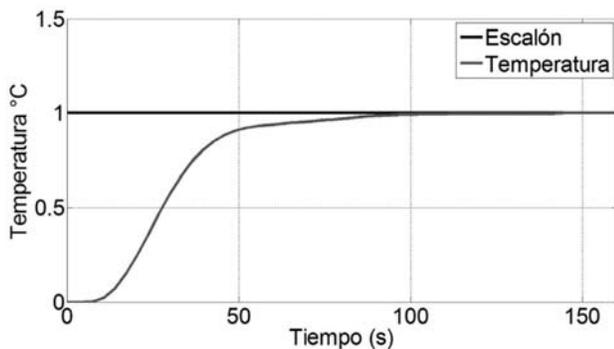


Figura 15. Respuesta del control difuso simulado.



Figura 16. Interfaz gráfica de usuario.

$$cg = \frac{\sum xf(x)}{\sum f(x)} \quad (14)$$

Donde:

$x$ : Universo de discurso.

$f(x)$ : Vector que implica las máximas salidas del sistema difuso.

La acción del centro de gravedad, puede verse ilustrada en la Fig. 14. Donde se calcula el valor correspondiente al centro del polígono generado

por el mecanismo de inferencia a través de las funciones de membrecía y las reglas para unos determinados datos de entrada. En la Fig. 15. Se observa la respuesta del controlador difuso, simulado en MATLAB®. Donde se puede apreciar la capacidad del controlador para llevar la variable al punto de referencia del escalón unitario.

#### 4.1.3 Sistema de monitoreo

Para efectuar el monitoreo de la variable temperatura, se diseñó una interfaz de usuario en el software de LabVIEW®, donde se puede visualizar el comportamiento de la variable ante la acción del controlador convencional PI y el control difuso. La conmutación entre estos dos controles se hace de manera local a través del menú del sistema embebido. Adicionalmente, pueden enviarse los parámetros del controlador PI remotamente a través de la interfaz de usuario y puede modificarse el periodo de muestreo si así se desea. El panel de monitoreo, puede observarse en la Fig. 16. Donde cada señal es enviada por radiofrecuencia por medio de los módulos XBEE y codificada en el interior de esta, para la visualización de los datos.

#### 4.1.4 Implementación de los controles

Como parte final del proyecto, se procedió a implementar el controlador convencional PI y el control difuso diseñados anteriormente sobre el sistema embebido construido para este fin. En esta etapa del proyecto, se hizo la comparación entre ambos controles y se sacaron conclusiones sobre el sistema de regulación más adecuado que garantice los estándares de calidad de la empresa Expofaro sobre el proceso de curado de tela índigo.

En la Fig. 17. Se expone una fotografía del proceso, ingresando tela índigo por medio de un conveyor, seguidamente en la Fig. 18. Se muestra la válvula que regula la variable de temperatura en el interior del horno. Para poner a prueba los controladores se estimuló el sistema con dos escalones de 48 °C a 120°C y 120°C a 150°C.

El comportamiento de la variable temperatura se observa en la Fig. 19. Con el regulador PI convencional y en la Fig. 20. Con el controlador difuso. Seguidamente se expone en la Tabla 4, los datos del sistema en estado transitorio (Tiempo de establecimiento, máximo pico, error en estado estable), Para de este modo hacer una comparación entre ambos controles. Adicionalmente al análisis del estado transitorio, se

verifico la respuesta de los controladores, ante el ingreso de una perturbación al sistema, para esto se abrió una compuerta del horno, para permitir el ingreso de aire frio del exterior y de esta manera observar el comportamiento de la acción de control.



Figura 17. Fotografía del proceso

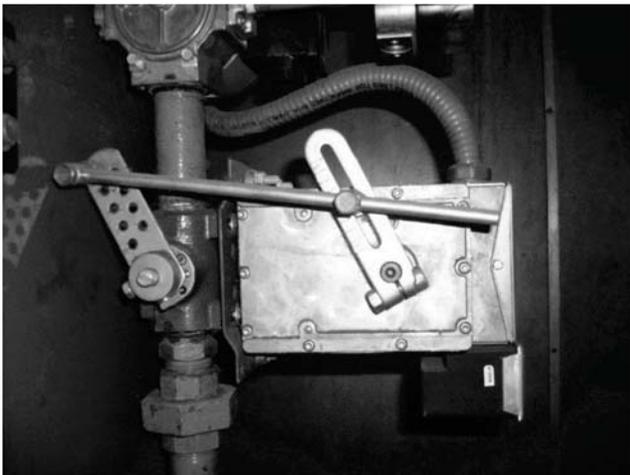


Figura 18. Elemento final de control (Válvula).

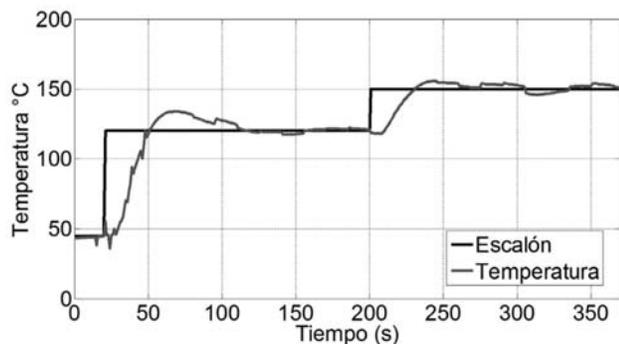


Figura 19. Respuesta del control PI

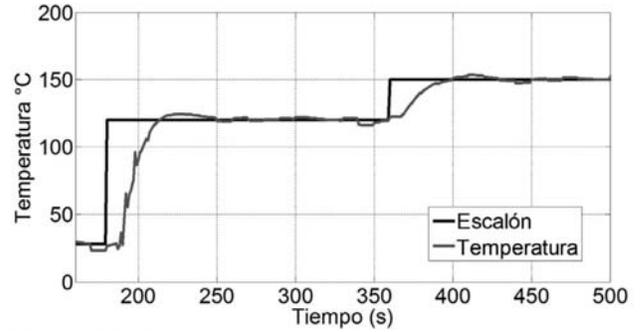


Figura 20. Respuesta control difuso

Tabla 4. Respuestas transitorias

Control	PI	Difuso
Tiempo Establecimiento (s)	95	50
Error en estado estable (°C)	0	0
Máximo Pico (°C)	133	124

En el controlador PI convencional, con el horno en reposo, se hace un ingreso de un único escalón de 120°C, y una vez que la variable alcanza el escalón y se encuentra en estado estable, se efectúa la perturbación como se observa en la Fig. 21. La temperatura tiende a bajar por unos instantes, hasta que el controlador efectúa la corrección, para llevar de nuevo la variable al lugar de referencia.

De la misma manera, se repite el procedimiento para el control difuso, con un único escalón de 120°C partiendo del reposo y una vez en estado estable, se aplica la perturbación, estimulando al controlador para que vuelva a buscar el Set-Point. El comportamiento del control difuso se observa en la Fig. 22. Como se aprecia en la Fig. 21 y Fig. 22. El control PI logra volver a llevar rápidamente la variable al valor de referencia, mientras que el control difuso, le tomo un poco más de tiempo, pero sin embargo también logra estabilizar la variable. Esto muestra la efectividad de los controles, para mantener la variable en un determinado punto, inclusive si existe presencia de alguna perturbación sobre el sistema.

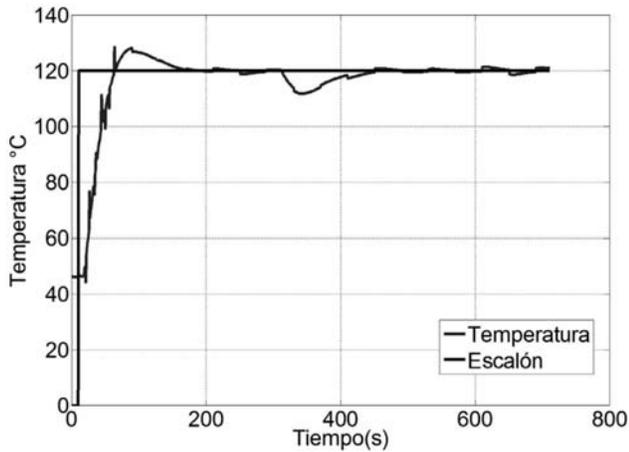


Figura 21. Control PI ante una perturbación de aire.

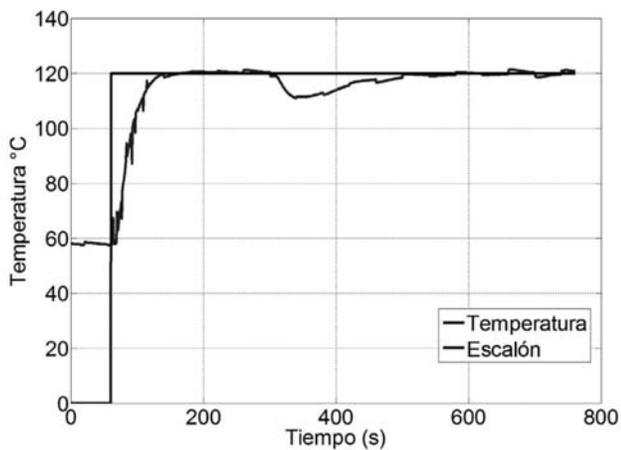


Figura 22. Control difuso ante una perturbación de aire.

El aporte de este artículo radica principalmente en el tipo de aplicación donde se implementa el controlador difuso. Este brinda una herramienta interesante para el control de la temperatura del horno de curado de empresas textiles, específicamente la empresa Expofaro en el cual se somete a altas temperaturas (150°C – 160°C) las prendas índigo impregnadas con resina para el proceso denominado Wrinkle Free (libre de arrugas) con el cual se dan dos tipos de acabados a los jeans: Retención de quiebres por planchado o superficies lisas. Para este caso, se usa este proceso para obtener una retención de quiebres en la parte delantera de los bolsillos del jean y en la parte trasera de las rodillas del jean. En otras palabras, se plasman arrugas deseadas (Quiebres) en partes específicas del jean.

La calidad de las prendas índigo, está ligada al resultado obtenido después de que estas pasan por todo el proceso de acabado, donde el horno de

curado solo hace parte de la etapa inicial del proceso, luego pasa por el lavado, el centrifugado y por último el secado de la prenda.

Para garantizar un correcto acabado de las prendas índigo es importante un control estable en el proceso de curado, donde el horno se mantenga a una temperatura de 150°C con una tolerancia de  $\pm 5^\circ\text{C}$  para tener la certeza de que la resina se adhiera correctamente a la prenda y el jean pueda adquirir el efecto de quiebre deseado. Aquí radica la importancia de tener un control robusto sobre este proceso capaz de adaptarse a los cambios de dinámica que puedan ocurrir con el pasar del tiempo, y esta es una de las ventajas que ofrece el controlador difuso.

Si la temperatura en el horno es demasiado alta, la resina se quema y se corre el riesgo de quemar los hilos o las tramas de la prenda y a pesar de que pueda salir con el efecto de quiebre, este también puede salir con una tonalidad dorada o tostada, lo cual es indeseado. Por otro lado, el fenómeno más común es que ocurra una temperatura baja en el horno, con lo cual la resina no se adhiere y los quiebres no se sostienen, como puede apreciarse en la Fig. 23.

Con la temperatura ideal en el horno de 150°C totalmente controlada y estable, pueden obtenerse el efecto deseado por la empresa Expofaro de la retención de quiebres, como puede observarse en la Fig. 24 y Fig. 25. una vez que estas son sometidas por los procesos de lavado, centrifugado y secado.



Figura 23. Jean sin retención de quiebre por baja temperatura de curado.



Fig. 24. Quiebres retenidos en la altura de los bolsillos.



Fig. 25. Quiebres retenidos en la parte posterior de las rodillas.

## 5. CONCLUSIONES

- Se diseñó un controlador PI convencional y un controlador difuso para un horno de curado de prendas índigo. La implementación de ambos, mostro buenos resultados de estabilidad, sobreimpulsos bajos y buen tiempo de establecimiento según lo observado en la Tabla 4 de respuesta transitoria.
- Al someter al horno de curado a dos referencias tipo escalón, se observa que el controlador difuso presenta un mejor desempeño que el controlador convencional, en cuanto a velocidad de establecimiento y máximo sobreimpulso con respecto al controlador PI.
- El controlador PI, regula correctamente la variable, pero presenta mayores fluctuaciones en el estado estable con respecto al controlador difuso que tiene un comportamiento más moderado.

- Ambos sistemas de control, lograron sobrellevar exitosamente la perturbación de flujo de aire ingresada en el horno, logrando reaccionar adecuadamente para mantener la temperatura en el punto de referencia.
- El sistema embebido diseñado e implementado, cumplió con las expectativas y exigencias del proyecto, permitiendo hacer medidas precisas, regulación de la válvula y transmisión remota de datos hacia la interfaz gráfica de monitoreo.
- Se hicieron producciones de jeans índigo, con el sistema difuso trabajando. Dichas prendas fueron sometidas al departamento de calidad superando exitosamente las pruebas, debido a que la resina de adhería correctamente a la prenda, manteniendo los quiebres de la prenda incluso después de someterlos al proceso de lavado.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa CI EXPOFARO S.A.S. Por permitir realizar las pruebas de los controladores en el horno de producción de jeans índigo. Y por poner a prueba el control difuso por varios días.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Camargo A., Villamizar E. Control de temperatura de horno por medio de lógica difusa. [Tesis de Ingeniería]. Medellín Colombia: UPB. 2008.
- [2] López D., García D., Davico L., Varrastro S. Controlador difuso multivariable Del perfil temperatura de un horno. Disponible en: [www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/IAR03.pdf](http://www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/IAR03.pdf) [Consultado 20 de octubre del 2013]
- [3] Jiménez I. Control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa. Disponible en: [jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/11597.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/11597.pdf). [Consultado 11 de noviembre del 2013]
- [4] Cortés A., Arenas O. Sistema de control de temperatura para incubadora avícola con control difuso y la plataforma LABVIEW. [Tesis de ingeniería]. Zacatecas México: Universidad autónoma Zacatecas. Disponible en:

ice.uaz.edu.mx/c/document\_library/get\_file?uuid=16eaf7c5-e1e6-44c2-a4c6-16f542e08032&groupId=54327. [Consultado 11 de noviembre del 2013]

[5] Palacio C. García J. Control de temperatura utilizando lógica difusa. 2010. Revista colombiana de física.

[6] Gómez, J. Fuzzy control. Editorial de la universidad tecnológica Nacional. 2008. Disponible en: [www.edutecne.utn.edu.ar/fuzzy\\_control/UTN-FCONTR.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/fuzzy_control/UTN-FCONTR.pdf). [Consultado el 20 de octubre del 2013]

[7] Compañía de soluciones embebidas. Disponible en: [www.microchip.com](http://www.microchip.com). [Consultado 21 de octubre del 2013]

[8] Termocuplas. Disponible en: [www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termocuplas.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas.htm). [Consultado 21 de octubre del 2013]

[9] Omega Engineering. Disponible en: [www.omega.com/temperature/z/pdf/z021-032.pdf](http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z021-032.pdf). [Consultado 21 de octubre del 2013]

[10] Módulos XBEE. Disponible en: [www.xbee.cl/](http://www.xbee.cl/). [Consultado 21 de octubre del 2013]

[11] Lopez, E. Identificación de sistemas en lazo cerrado con estructura tipo CLOE. [Tesis maestría]. Cuernavaca Mexico: Cenidet, 2007.

[12] García, L. Control Digital Teoría y Práctica. 196p, 2010.

[13] Medina, J.D. Desarrollo de un control difuso adaptivo por modelo de referencia. 2012. Disponible en: [kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)\\_Desarrollo\\_de\\_un\\_Control\\_Difuso\\_Adaptativo\\_por\\_Modelo\\_de\\_Referencia\\_731.pdf](http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_Desarrollo_de_un_Control_Difuso_Adaptativo_por_Modelo_de_Referencia_731.pdf). [Consultado 24 de octubre del 2013]