



## SISTEMA PROTOTIPO PARA LA INCUBACIÓN ARTIFICIAL DE HUEVOS DE AVES MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Julio César Páez Castro, Luis Gabriel Marín Collazos & José Antonio Marín Peña

Artículo recibido el 20 de Marzo de 2011, aprobado para publicación el 10 de Junio de 2011.

### Resumen

Este proyecto se hizo con el fin de realizar un primer acercamiento, a la solución de la problemática que se presenta en el departamento del Caquetá, con respecto a la cadena de producción incompleta de la avicultura. Se pretende eliminar la dependencia que tiene el avicultor, al comprar los recién nacidos en lugares alejados al departamento, lo que causa un porcentaje de alta mortalidad. El artículo presenta la implementación de un sistema prototipo para el control de la temperatura y movimiento en el proceso de incubación de huevos de aves mediante lógica difusa. Opcionalmente el sistema puede ser monitoreado por una herramienta software implementada en el lenguaje de programación JAVA en un PC y orientada a la comunicación USB. El diseño de los sistemas de control difuso de temperatura y rotación se desarrollaron mediante la metodología del experto, se implementaron en una plataforma hardware DsPIC y finalmente, se validaron mediante tres enfoques: computacional, de control y de aplicación. Se obtuvo un 85% de eclosión, por lo que se concluye que es viable realizar la incubación artificial con este prototipo de incubadora para huevos de aves.

**Palabras clave:** Control, pollos, arquitectura, hardware.

## PROTOTYPE SYSTEM FOR THE ARTIFICIAL INCUBATION OF BIRD EGGS BY MEANS OF FUZZY LOGIC

### Abstract

At the Caqueta department, the birds growers (chicken and hens) farmers living far away from the distribution areas, experience high loses due to mortality when buying little chicks. The aim of the study was to implement a prototype system for the control of both temperature and movement of incubated eggs, by means of fuzzy logic. Optionally, the system can be monitored by a software tool implemented in JAVA program in a PC oriented to a USB communication port. The design of the fuzzy control systems of temperature and rotation were developed with the expert methodology and implemented in a DsPIC hardware plataform, and validated with three approaches: computational, of control, and application. A 85% hatching was found which allowed to conclude that this type of artificial incubator is viable to incubate birds eggs.

**Palabras clave:** Control, chiks, architecture, hardware.

## Introducción

En Colombia existen empresas y personas naturales, dedicadas a la producción de huevos fértiles para incubación, a la cría de aves para exportación de razas exóticas, aves de engorde y huevos para el consumo humano. La avicultura es una práctica atractiva para las personas del ámbito rural, quienes la ven como una forma independiente y beneficiosa para obtener ingresos. Según las estadísticas de FENAVI (2009), en Colombia la avicultura es una industria que en los últimos 10 años ha tomado fuerza en el mercado de los alimentos. Un ascenso considerable en el índice de producción, indica que la carne del ave y los huevos, son productos comunes en la canasta familiar.

Actualmente, los avicultores en el departamento del Caquetá manejan en su mayoría la cría de pollos de engorde, pollas ponedoras, codornices ponedoras, entre otras. Para cualquiera de estos procesos, las aves se compran a una temprana edad, uno o dos días de nacidos y en ciudades lejanas al departamento. El transporte, la manipulación y el cambio abrupto de temperatura que se puedan dar durante el traslado de las aves recién nacidas, son factores que afectan la tasa de mortalidad de estos.

En la incubación artificial de huevos de aves se manejan cuatro variables importantes: temperatura, rotación de los huevos, ventilación y humedad. Se ha demostrado que la temperatura es una variable importante en este proceso, esta debe de mantenerse tan constante como sea posible en aproximadamente 37,78°C para todo tipo de aves. La rotación de los huevos debe hacerse desde y hasta un número determinado de días, esto difiere entre especies, con el fin de ayudar a mantener la membrana del embrión separada de la cáscara del huevo. La ventilación debe ser rica en oxígeno para que los ovíparos por medio de su coraza puedan respirar y en la etapa de eclosión, el grado de humedad es el que permite definir el género de las aves. Mantener estas variables dentro de los márgenes establecidos según los estudios realizados por expertos,

permite obtener un porcentaje de eclosión aceptable en cada incubación (Clauer, 2009).

La lógica difusa es una técnica de la inteligencia computacional que pretende imitar el comportamiento del ser humano ante situaciones cotidianas de decisión, toma información imprecisa y genera una respuesta exacta (Wang, 1997). Actualmente existen implementaciones de sistemas de control difuso, en diferentes ámbitos de trabajo y de conocimiento, tanto para desarrollo académico como para el industrial. Por ejemplo, Ponce (2001), implementó una incubadora de cuidados intensivos controlada con lógica difusa en un microcontrolador PIC 16C73B, la cual se hizo con el fin de mejorar este proceso para los neonatos y obtuvo resultados superiores a las incubadoras que utilizaban control clásico. Meneses (2005), realizó un control difuso de temperatura para una carga resistiva con un microcontrolador de 8 bits, el cual presenta el proceso de construcción sobre el microcontrolador, de los bloques de fusificación, defusificación e inferencia basada en reglas.

Gómez *et al.* (2007), realiza un control difuso de nivel de líquido de un tanque, con el cual reconocen la versatilidad de los sistemas difusos en el control de parámetros de medición que se encuentran en variación constante, al igual, con microcontroladores para la implementación de este. Por último, Dannenberg *et al.* (2005) presenta el desarrollo de un control difuso para un motor en el microcontrolador MSP430F14x, en el que mediante sistemas difusos se resuelven problemas que son difíciles de tratar con las técnicas tradicionales de control. Éstas entre otras aplicaciones se han implementado sobre microcontroladores mediante lógica difusa.

El presente artículo describe el desarrollo de un sistema prototipo para la incubación artificial de huevos de aves. Para llevar a cabo dicha actividad, se realizó la construcción de una planta física a la cual se le aplicó un control P.D. difuso. Este control fue implementado en una arquitectura hardware, para las variables de temperatura y rotación de los huevos

(Smith, 2004). Las variables opcionalmente, pueden ser monitoreadas por una herramienta software implementada en un PC y orientada a la comunicación USB. El aporte principal del presente trabajo es hacer una innovación a la industria de la avicultura, con el desarrollo de un prototipo de incubadora artificial, que difiera de las encontradas actualmente en el mercado con control clásico. En este sistema prototipo el control efectuado sobre las variables de temperatura y rotación de la incubación es mediante lógica difusa, dado que los controles difusos han demostrado tener mejor desempeño en algunas tareas respecto a los controles clásicos (Ferreira y Fuentes, 2009). Con lo anterior se pretende generar impacto a nivel social, educativo, ambiental, investigativo y empresarial, tanto departamental como nacional. Al igual, se presentan los resultados obtenidos del proyecto para la validación del prototipo de incubadora, el cual se hace mediante tres enfoques: (1) computacional, (2) de control y (3) de aplicación; cada uno evaluado y analizado para cada sistema de control implementado.

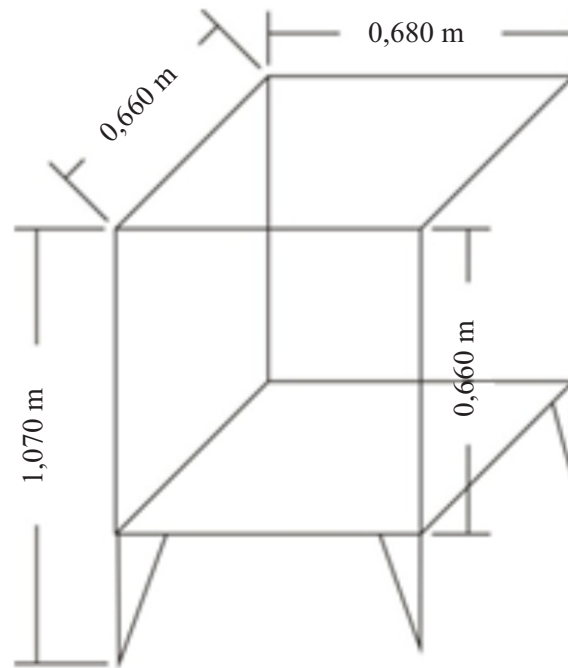
## Materiales y métodos

El montaje del prototipo de incubadora “AI-Vida” se realizó en el Laboratorio de Mecánica Fina ubicado en la Sede Principal de la Universidad de la Amazonia. El proceso de incubación de huevos de aves se realizó en el Barrio La Estrella de la ciudad de Florencia, Caquetá.

### Construcción de la estructura del prototipo

La incubadora se elaboró en lámina de acero galvanizado calibre 20 y consta de dos partes principales: (1) componentes necesarios para el control de la temperatura y (2) sistema mecánico para el control de rotación. En la figura 1, se muestra el plano con las dimensiones de la estructura del prototipo

Para el control de la temperatura fue necesaria la adaptación de tuberías, por las que circula el aire caliente al interior del prototipo. El aire se calienta con una resistencia de  $41\Omega$  a 300 Wattios y es impulsado por un ventilador,



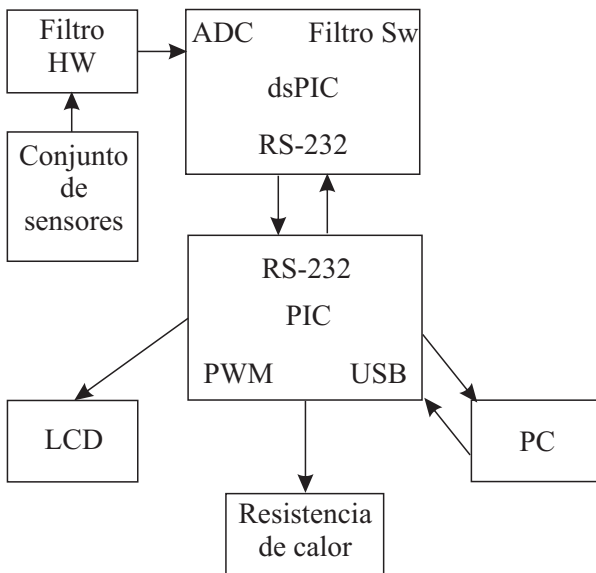
**Figura 1.** Medidas del prototipo de incubadora artificial.

ambos alimentados con una tensión de hasta 110 v AC. El cambio de temperatura que produce la resistencia es percibido por Termistores NTC, que están instalados de forma estratégica para obtener el promedio de la temperatura real interna de la planta. Además, para cumplir con la demanda de oxígeno para el embrión, se hicieron 9 orificios de 5 mm de diámetro aproximadamente para la circulación del oxígeno y eliminación de dióxido de carbono producido por los huevos durante el proceso de incubación.

Para el sistema de rotación de los huevos, fue necesaria la construcción de soportes y cuatro bandejas con una capacidad de 84 huevos de codorniz, con el fin de realizar el movimiento y mantener los huevos en una posición segura, las cuales fueron accionadas por un motorreductor DC de 6 a 12v, el cual es controlado por un inversor de giro ó puente H de referencia L293B. Se seleccionaron huevos de codorniz por tener un tiempo para la eclosión de 16 días aproximadamente, aunque es posible cambiar la bandeja para el tipo de ave que se desee incubar.

### Hardware utilizado para el control de temperatura

Para la interfaz con el usuario y el almacenamiento de los sistemas difusos, se utilizó el PIC de referencia 18F4550 y el dsPIC 30F4013 respectivamente. La figura 2, muestra el comportamiento de los componentes hardware utilizados en el sistema prototipo de temperatura. Dicho comportamiento inicia en el bloque de sensores, donde los Termistores sensan la temperatura del interior del prototipo. Luego la señal eléctrica, pasa al bloque de filtro hardware, donde se aplica un filtro butterworth con frecuencia de corte de 10Hz. En el bloque dsPIC se encuentra el conversor ADC, que recibe la señal analógica filtrada y la convierte a una señal digital con una resolución de 1,2 mv para cada código diferente en la conversión. Esta señal digital, pasa posteriormente por un filtro software que se encarga de estabilizar la lectura de cada sensor, y así obtener la medida estable y real de la temperatura del prototipo. Esta información es la entrada al sistema difuso que genera el dato que es utilizado para el control de la temperatura. Posteriormente, el dsPIC envía los datos del sensor y del valor de salida del sistema difuso al PIC por medio de una comunicación serial. Luego de recibir la información, el PIC se encarga de generar la



**Figura 2.** Comportamiento de los componentes de temperatura en el prototipo.

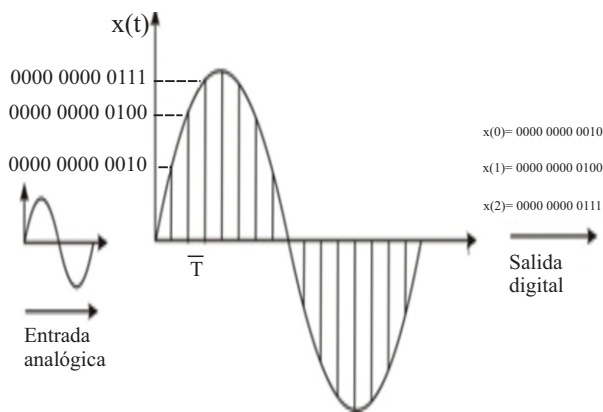
señal PWM para el control de la temperatura, que es aplicada al circuito que controla la resistencia de calor, y al igual, envía los datos obtenidos hacia el PC por medio del protocolo de USB, como a un LCD.

Para sensar la temperatura, se utilizaron Termistores NTC con una resistencia variable interna de 10KΩ a 25°C y una constante de disipación de 1mW/°C, que fueron escogidos por la rápida respuesta térmica, estabilidad y precisión que asegura el fabricante (U.S. Sensor, 2001). Este termistor no es lineal, es decir, que no hay una constante con la que se pueda hacer una conversión directa de resistencia a temperatura, para esto se utiliza la ecuación 1 de Steinhart-Hart, que es la expresión que caracteriza a este sistema, con la que es posible realizar la linealización del dispositivo.

$$\frac{1}{T} = A + B * \ln(R) + C * (\ln(R))^3 \quad (1)$$

Para obtener una lectura de la señal de temperatura real, se tuvo en cuenta que la red presenta corrientes parásitas que afectan a las señales de los Termistores utilizados en el sensado; por lo que fue necesario realizar filtros tanto hardware como software, de acuerdo con lo planteado por Pérez *et al.* (2003). Según el Teorema Nyquist, para evitar el efecto aliasing de una señal analógica que se quiere muestrear con una frecuencia  $f_s$ , es necesario asegurar que no existan componentes sinusoidales de una frecuencia mayor a  $f_s/2$  (Angulo *et al.*, 2006). Por tanto, por ser la temperatura una variable de respuesta lenta, fue posible aplicar un filtro antialiasing con frecuencia de corte en 10Hz tipo Butterworth de orden dos, con el que se pudo asegurar una respuesta plana hasta la frecuencia de corte, y una respuesta al escalón unitario de 1,2 segundos aproximadamente, la cual es aceptable para la aplicación realizada. Finalmente, para el filtro digital se utilizó la técnica de la Media Móvil ó Moving Average (Verrastro *et al.*, 2005).

Para la conversión análogo-digital de la temperatura, se utilizó el módulo ADC de 12 bits integrado en el dsPIC30F4013. Las



**Figura 3.** La señal analógica  $x(t)$  convertida a digital.

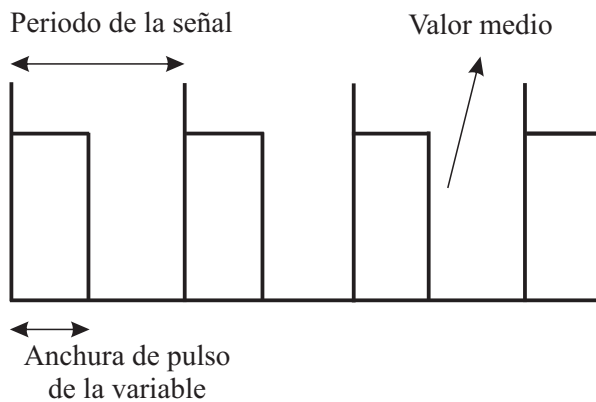
muestras se cuantifican y posteriormente se codifican para obtener las señales digitales. La figura 3, presenta una señal analógica  $x(t)$  que es muestreada cada  $T_s$  segundos, donde el inverso es la frecuencia de muestreo. De esta forma se obtienen muestras cada  $x(nT)$  que se codifican con 12 bits para este caso (Angulo et al., 2006).

El tipo de comunicación utilizada entre los dispositivos PIC y dsPIC del prototipo, fue serial ó RS-232 para el intercambio de información en corta distancia. Luego de haber realizado la conversión de las señales de temperatura, el dsPIC procesa la información mediante el sistema difuso, y envía los datos pertinentes por medio de esta comunicación para que el PIC los procese y visualice en el LCD y el PC.

La comunicación entre los dos dispositivos incluyó un protocolo de transporte de información, para que los datos tuvieran menos oportunidad de ser extraviados. El dsPIC crea una trama de seis posiciones, la cual inicialmente es cargada con el carácter 'm', como se muestra en el ejemplo de la figura 4 y empieza el envío de la información desde la

2	9	.	1	\0	m
0	1	2	3	4	5

**Figura 4.** Trama de datos para el envío de la temperatura del dsPIC al PIC.



**Figura 5.** Modulación por ancho de pulso o PWM.

posición cero hasta la número cinco.

El actuador de temperatura se controló mediante la modulación por ancho de pulso o PWM, la cual es una técnica de la electrónica digital, que se puede utilizar para el manejo de tensiones tanto AC como DC (Figura 5). Este control depende del ancho del pulso que se genere y para este caso se realizó el control de un voltaje AC con el PIC18F4550, para la carga resistiva provocada por el calor.

Para la comunicación PIC - PC se utilizó el módulo USB que contiene el PIC18F4550, el cual maneja en su arquitectura, el hardware necesario para cumplir con los aspectos relevantes de este protocolo. Para la transferencia de la información fue necesario implementar un protocolo que evitara la pérdida de los datos. Dicho protocolo inicia cuando el usuario de la herramienta software envía un dato de solicitud con lo que el PIC se pone en modo de intercambio de información vía USB con el PC, esto quiere decir que comienza a enviar la trama que recibe del dsPIC como muestra el ejemplo de la figura 6, con la diferencia que en la posición cinco, el PIC envía el número del sensor al que pertenece este dato.

3	2	\0	m	m	1
0	1	2	3	4	5

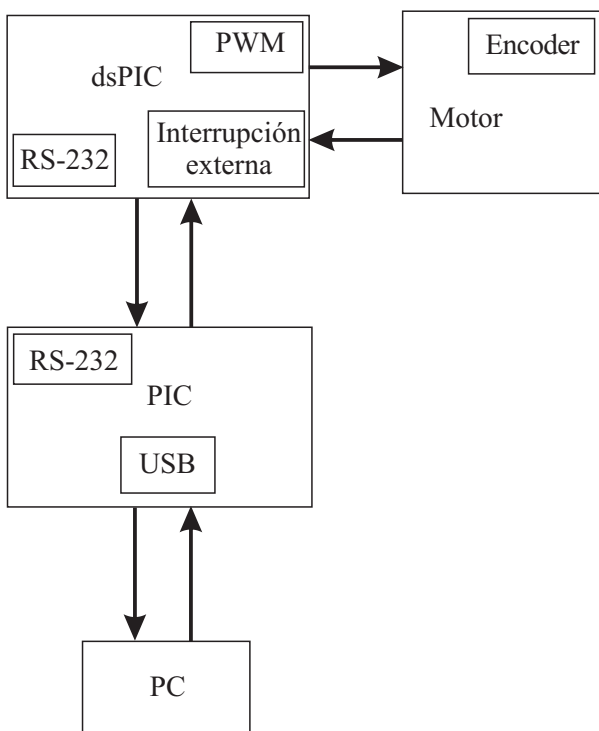
**Figura 6.** Trama de datos para el envío de la temperatura del PIC al PC.



### Hardware necesario para el control de la rotación

En la figura 7, se muestra el comportamiento del sistema de rotación del prototipo de incubadora. Por medio del encoder óptico integrado al motor, es posible saber la posición en que éste se encuentra en un determinado momento. Dicho encoder genera pulsos cuadrados que son leídos por la interrupción externa del dsPIC, con estos datos se hallan las entradas al control difuso de rotación o posición y se obtiene el dato de salida de control, con el que posteriormente se genera la señal PWM que alimentará al motor hasta que se termine la fase de control.

Para la alimentación del motor que controla la rotación fue implementada la técnica de PWM. En este caso se realizó con el módulo que viene integrado en el dsPIC30F4013, el cual fue configurado con un ciclo útil de 0 (mínimo 0v) a 1023 (máximo 12v, aproximadamente), restando solo cargar el ciclo útil para trabajo y enviar esta señal al inversor de giro ó puente H que controla el motor.



**Figura 7.** Comportamiento de los componentes de rotación en el prototipo.

### Software de monitoreo

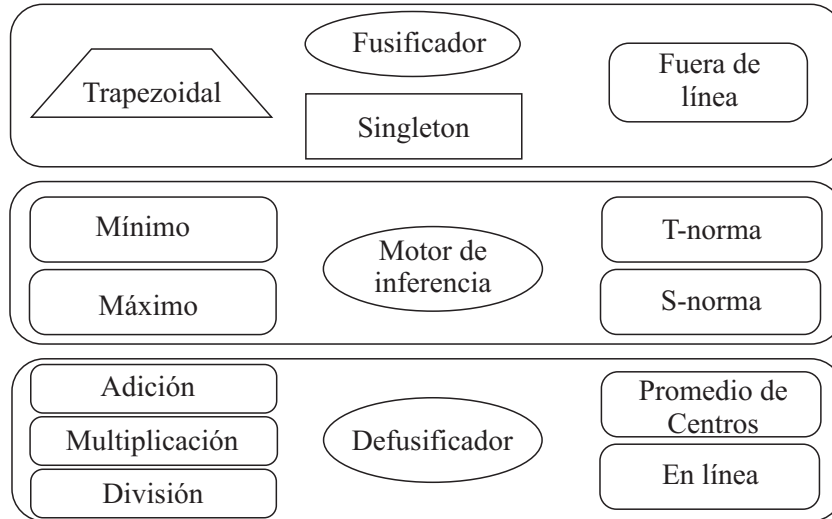
La herramienta software para el monitoreo del prototipo de incubadora “AI-Vida” fue desarrollada en el lenguaje de programación JAVA y orientada a la comunicación USB, como una aplicación de escritorio. La Figura 8, muestra la primera vista que tiene el usuario en el sistema, la cual es de bienvenida y donde se encuentra un botón con la opción de iniciar una nueva incubación, que lo lleva al panel en el que debe ingresar los datos necesarios para identificar la incubación que se va a llevar a cabo. Luego de haber realizado el registro del nuevo proceso, la captura de los datos es iniciada automáticamente, con lo que comienza la solicitud y recepción de la información que provienen del prototipo de incubadora.



**Figura 8.** Interfaz inicial de la herramienta de monitoreo.

### Diseño e implementación de los sistemas de control difuso

El diseño se realizó de acuerdo con aspectos relacionados con la avicultura y el proceso de incubación artificial descritos por Clauer (2009) y Smith (2004). La figura 9, muestra el modelo computacional considerado para la implementación del control por medio de los sistemas de inferencia difusa, tanto para la variable de temperatura como de rotación.



**Figura 9.** Modelo computacional de los sistemas difusos.

Dicho modelo se basa en el trabajo realizado por Téllez y Camelo (2009), donde hacen un estudio de desempeño de la velocidad de procesamiento y utilización de recursos orientado a la arquitectura dsPIC33F, en el que el mejor resultado es obtenido a través de este modelo computacional.

De acuerdo con el modelo computacional seleccionado, resta definir las variables de entrada y salida para cada sistema difuso, el universo de discurso, las etiquetas lingüísticas y la semántica asociada a cada variable y finalmente, la base de conocimiento.

**Control P.D. difuso de temperatura**

En estudios realizados sobre avicultura por Clauer (2009) y Smith (2004), la temperatura para la incubación artificial debe ser de aproximadamente 37,78°C, a la que se debe llegar paulatinamente luego de introducir los huevos en la incubadora. El prototipo de incubadora solo controla la temperatura a puntos deseados que se encuentren por encima de la temperatura ambiente.

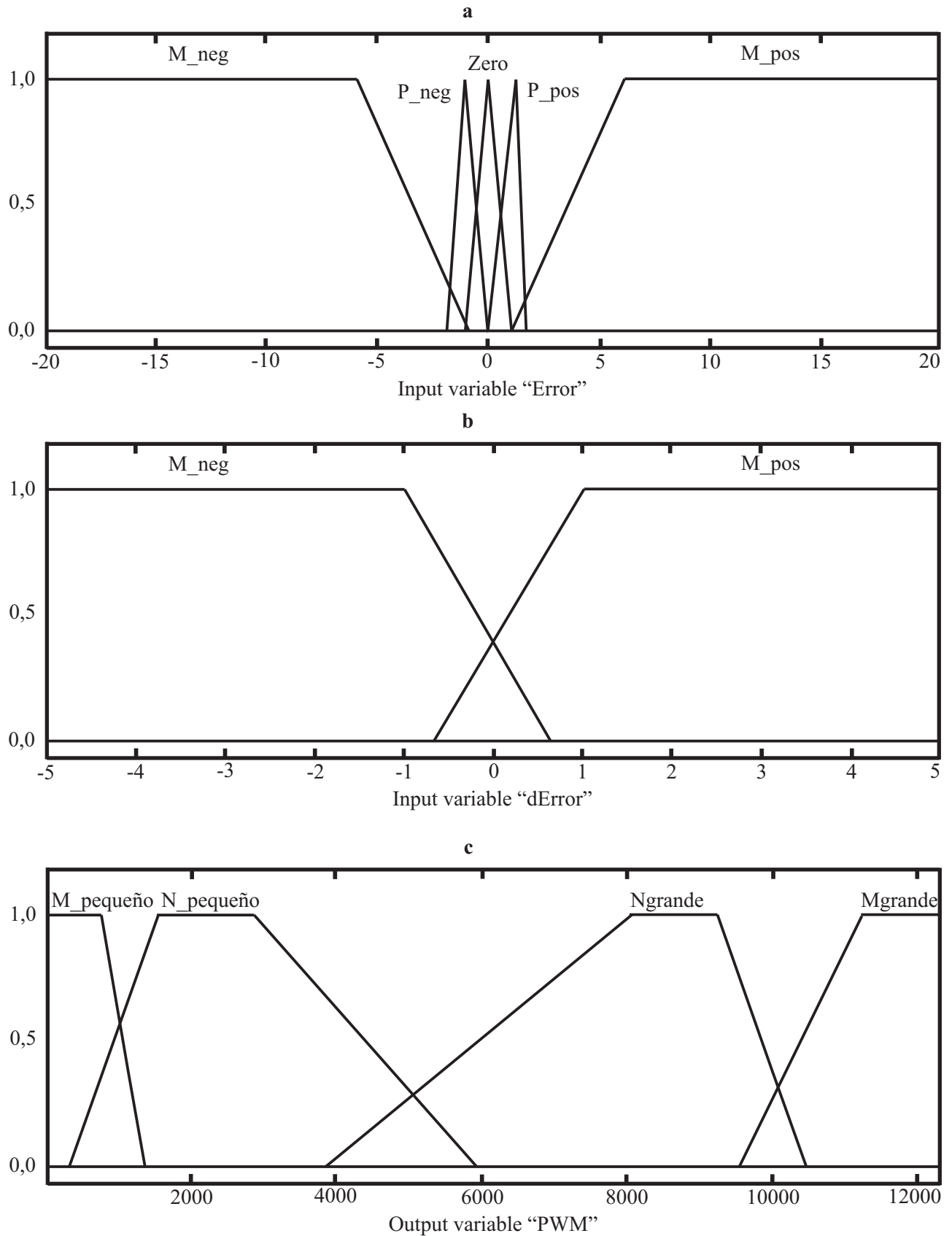
La primera variable de entrada al sistema difuso, es el Error, el cual es expresado como la diferencia entre el valor deseado y el valor actual de temperatura. Por efectos del actuador, el prototipo alcanza una temperatura máxima de 45°C, y de acuerdo con la temperatura

promedio del Caquetá de 26°C aproximadamente, el universo de discurso de esta variable está en un intervalo entre [-20,20], que representa los grados que puede tomar esta diferencia, lo cual es suficiente para la incubación artificial. Se utilizaron cinco etiquetas lingüísticas para esta variable M\_neg, P\_neg, Zero, P\_pos, M\_pos, como ilustra la figura 10a.

La segunda variable de entrada, es la variación del error ó (dError), que es expresada como la diferencia entre el error actual menos el error anterior, para la cual, luego de hacer pruebas a la planta se determinó que el rango de esta es de [-5,5], y fueron suficientes solo dos etiquetas lingüísticas, una llamada M\_pos y otra M\_neg, como se muestra en la figura 10b. Estas dos variables dan como resultado un total de 10 reglas para la base de conocimiento.

Para la variable de salida llamada PWM, fueron suficientes cuatro etiquetas lingüísticas M\_pequeño, N\_pequeño, N\_grande y M\_grande, como puede verse en la figura 10c, y el intervalo definido para esta es de [1,12300], que es el conjunto de números configurado para el control de la temperatura como ciclo útil.

Para crear una base de reglas sobre un comportamiento, existen dos maneras, la primera es guiarse por un experto en ese comportamiento, quien puede dar nociones de



**Figura 10.** a. Variable de entrada Error del sistema difuso de temperatura. b. Variable de entrada dError del sistema difuso de temperatura. c. Variable de salida PWM sistema difuso de temperatura.



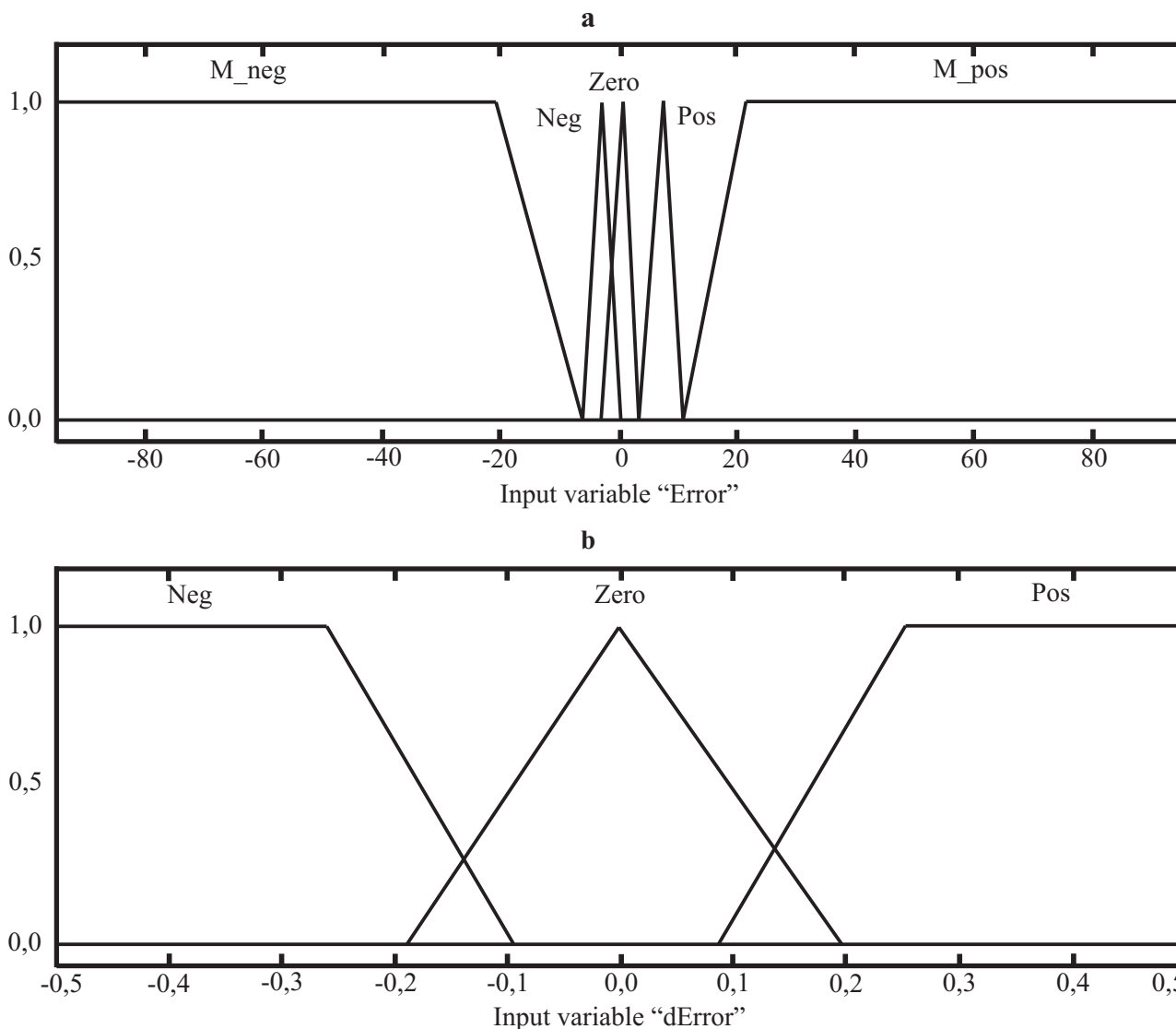
**Cuadro 1.** Conjunto de reglas para el sistema de temperatura difuso.

Error	M_neg	P_neg	Zero	P_pos	M_pos
M_pos	M_grande	M_grande	N_grande	N_pequeño	M_pequeño
M_neg	M_grande	M_grande	N_grande	N_pequeño	M_pequeño

cómo actúa él ante situaciones que se presentan en el proceso determinado, y la segunda, extraer el comportamiento de datos obtenidos de dicho proceso y generar una base de conocimiento acorde a lo recopilado (Wang, 1997). Para el desarrollo de este sistema difuso se optó por extraer el comportamiento de expertos en control de temperatura. En el cuadro 1, se muestra la base de reglas para el control de la temperatura.

**Control P.D. difuso de rotación**

Para la rotación en la incubación, se hizo un control de posición del motorreductor de acuerdo con la literatura sobre incubación artificial, que indica la realización de un giro de 90° paulatinamente, a las bandejas en un lapso de tres horas, de dos a tres veces por día, desde y hasta un número determinado de días, en el intervalo que dure la incubación (Clauer, 2009;



**Figura 11.** a. Variable de entrada Error sistema difuso de rotación. b. Variable de entrada dError sistema difuso de rotación.

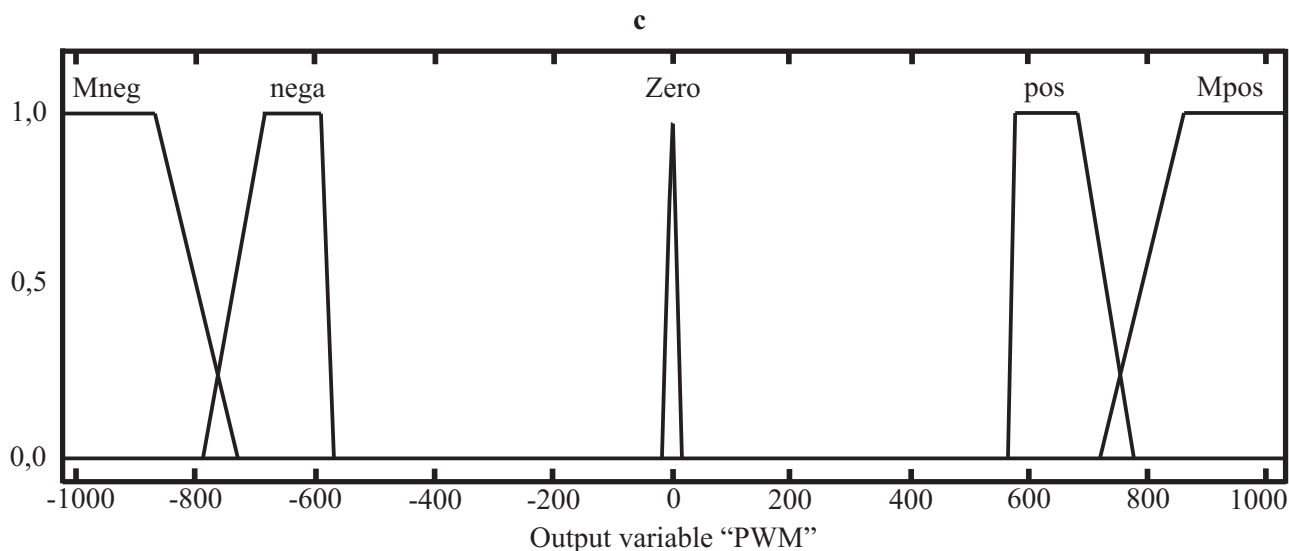


Figura 11. c. Variable de salida PWM sistema difuso de rotación.

Smith, 2004).

La primera variable de entrada al igual que en el sistema difuso de temperatura es el error (Error). En esta variable fueron agregadas cinco etiquetas lingüística M\_neg, Neg, zero, Pos y M\_pos, como se muestra en la figura 11a y el intervalo de la variable fue considerado entre [-95,95].

La segunda variable es la variación del error (dError), luego de realizar pruebas al motor, se observó el dError no supera 0,3°, por tanto el intervalo de esta variable se definió entre [-0,5, 0,5] y fueron suficientes tres etiquetas lingüísticas Neg, Zero y Pos, como se pueden visualizar en la figura 11b. Por último estas dos variables dan como resultado una base de conocimiento con 15 reglas.

El universo de discurso de esta variable llamada PWM está entre [0,1023]. Dicha variable contiene tres etiquetas lingüísticas Mneg, nega, zero, pos y Mpos, como se indica en la figura

11c.

Para la base de reglas del sistema de rotación fue necesario utilizar la experiencia de un experto en rotación en la fase de incubación, con el fin de extraer el comportamiento que debe de realizarse para esta variable. En el cuadro 2, se muestran las combinaciones posibles para las reglas de la base de conocimiento.

### Implementación de sistemas difusos

Se utilizó la herramienta de síntesis automática orientada a la arquitectura dsPIC33F desarrollada por Téllez y Camelo (2009). Luego de haber diseñado los sistemas difusos, para el control de las variables tanto de temperatura como de rotación, se utiliza dicha herramienta para generar el código en lenguaje C, que representa a los diseños hechos previamente en el *Fuzzy Logic Tollbox™* de MATLAB® y que fueron almacenados en el dsPIC.

Cuadro 2. Conjunto de reglas para el sistema de rotación difuso.

Error	M_neg	Neg	Zero	Pos	M_pos
Pos	Mneg	nega	Zero	Pos	Mpos
Zero	Mneg	nega	Zero	Pos	Mpos
Neg	Mneg	nega	Zero	Pos	Mpos

Para la implementación del sistema de inferencia que controla la temperatura fue necesaria, la construcción de un código en C, que adecúa la lectura y prepara al dsPIC para el procesamiento de esta variable por parte del sistema difuso. Dicho código, tiene la función de configurar al dsPIC para realizar las conversiones de las señales análogas a digitales, que son enviadas por los Termistores que sensan la temperatura. Por último el código C generado por la herramienta de síntesis automática, es empotrado en el dsPIC para poder obtener el dato de salida para el control de la resistencia que proporciona el calor.

La implementación del sistema difuso de rotación se hizo mediante la herramienta de síntesis automática, con la que se obtiene el código C del diseño del sistema difuso, que posteriormente es empotrado en el programa principal, que fue creado con el fin de adaptar la lectura de la posición del motor y así, llegar al punto deseado, en donde el sistema inteligente, decide cuando detener el motor.

### Validación

La validación del prototipo de incubadora, se hizo a través de tres enfoques. El computacional, que consiste en realizar una comparación entre los datos que se obtienen del sistema difuso diseñado en el *Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup>* de MATLAB<sup>®</sup> y los datos generados por el dsPIC con el software implementado en el lenguaje de programación C; y se registraron los tiempos de inferencia difusa. La validación por el enfoque de control, consistió en el análisis de la información recolectada del comportamiento de los sistemas difusos, y se hallaron de esta manera los parámetros relevantes de la ingeniería de control (Ogata, 2003). Por último, se hizo la validación desde el punto de vista de la aplicación del prototipo, en el cual se tiene en cuenta el comportamiento de las variables controladas durante el periodo de incubación, registrada en el software de monitoreo y el porcentaje de eclosión que genera el sistema.

La validación desde el punto de vista computacional de los sistemas difusos de control, se realizó de la siguiente manera:

- Se ingresaron 100 valores aleatorios de las dos variables de entrada.
- Se registró el dato de la variable de salida que cada sistema generó y el tiempo consumido por el dsPIC para la inferencia difusa.
- Se calculó el error cuadrático medio y el error absoluto medio como sigue:

$$ECM = \frac{1}{n1 \cdot n2} \sum_{i2=1}^{n2} \sum_{i1=1}^{n1} (X_{nLT}(i1,i2) - X_{dsPIC}(i1,i2))^2 \quad (2)$$

$$EAM = \frac{1}{n1 \cdot n2} \sum_{i2=1}^{n2} \sum_{i1=1}^{n1} \text{Abs}(X_{nLT}(i1,i2) - X_{dsPIC}(i1,i2)) \quad (3)$$

Donde  $n1$ ,  $n2$  son los números de punto evaluados para las diferentes entradas de los modelos a verificar. En la cual  $X_{nLT}(i1,i2)$ , es el valor de salida generado por los valores  $i1$ ,  $i2$  proveniente del *Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup>* de MATLAB<sup>®</sup>, y la variable  $X_{dsPIC}(i1,i2)$ , es la salida del sistema que genera el dsPIC.

- Se calculó el tiempo promedio de inferencia difusa y la desviación estándar.

La validación por el enfoque de control, se realizó de dos formas:

Sin perturbaciones:

- Se establecieron varios puntos de referencia y se procedió a hacer la captura de la información de los sistemas.
- Se analizaron los datos, y se calculó el error de estado estable, el sobrepaso y tiempo de establecimiento.

Con perturbaciones:

- Se establecieron los puntos de referencia y se inició la captura de los datos.

- Al llegar a la estabilidad, se generaron perturbaciones para registrar, cómo es el comportamiento de los sistemas de inferencia ante estas. Esto sólo aplicó para el control de temperatura, pues el piñón que realizó la rotación era demasiado frágil para resistir alguna perturbación.

- Se observó y analizó el comportamiento ante perturbaciones de los sistemas difusos.

En el enfoque de aplicación, se realizó una incubación para comprobar el control de las variables por parte del prototipo. Al igual se analizó el comportamiento de los sistemas en la fase de incubación, cómo actúan estos durante todo el proceso, y la cantidad de huevos que hicieron eclosión.

- Se realizó una incubación con huevos de codorniz y se establecieron los parámetros de la siguiente manera: cantidad de días de la incubación 16, día de inicio de la rotación 3, día final de la rotación 14, temperatura de referencia de 37,78°C.

- Durante el proceso de incubación se llevó un registro de las variables controladas, y estas fueron almacenadas por la herramienta software de monitoreo, dicho registro no fue constante sino, realizado de cinco a siete horas por día, para la temperatura. La rotación fue capturada cada ocho horas, luego del inicio y hasta la finalización del tiempo estipulado para esta.

- Luego de terminada la fase de incubación se calculó el promedio de temperatura por día y de todo el proceso y la desviación estándar de esta. Con los datos obtenidos de la variable de rotación, se verificó el cumplimiento del proceso durante los días programados.

## Resultados y discusión

### Validación computacional

Una vez ejecutadas las pruebas al sistema de control de temperatura, se obtuvieron los

siguientes resultados: ECM de 0,8193 y EAM de 0,6323, lo cual es aceptable para la aplicación realizada, esto indica, que el dsPIC, genera una salida similar al diseño implementado en la herramienta de alto nivel de MATLAB®. El tiempo de inferencia difusa promedio fue de 0,9 ms con una desviación estándar de 0,01. Teniendo en cuenta que la temperatura es una variable de respuesta lenta, el tiempo de inferencia fue suficiente para el control de la misma.

El ECM y EAM para el sistema difuso de rotación fue de 0,6403 y 0,41 respectivamente, lo cual indica la similitud que tienen los sistemas difusos implementados en ambas plataformas. Al igual, el tiempo de inferencia promedio medido fue de 1,2 ms con una desviación estándar de 0,006.

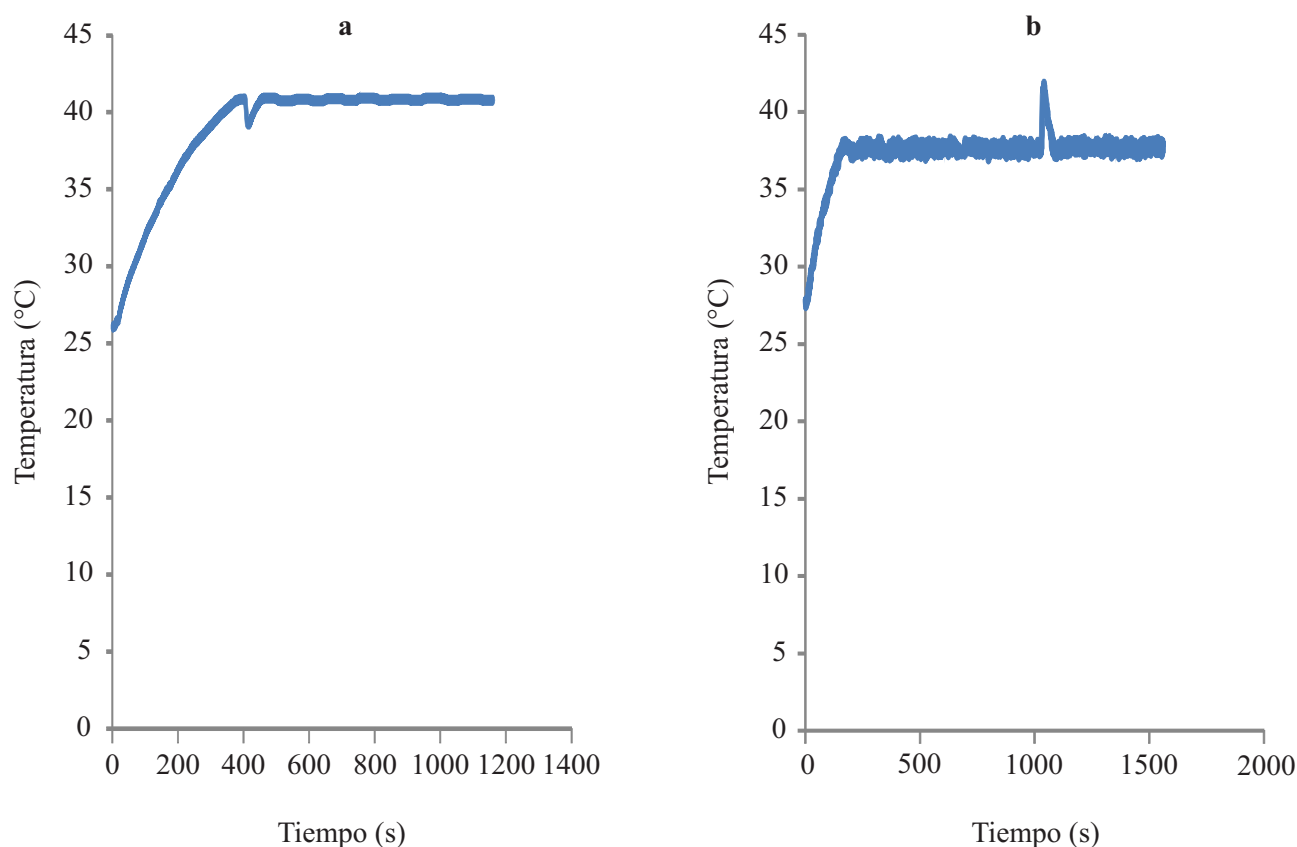
### Validación de control

En el cuadro 3 se presentan medidas sin perturbaciones para el sistema difuso de temperatura para diferentes temperaturas. Como se puede observar el *overshoot* o sobrepaso no supera el 19%. Aunque la planta tiene escape de aire para la oxigenación, el error en estado estable no sobrepasa los 0,3°C, en relación a los puntos de referencia establecidos y finalmente, se puede concluir que el tiempo de establecimiento es adecuado para la incubación artificial.

En la figura 12a, se ilustra una de las perturbaciones realizadas al sistema, esta corresponde a la abertura de la puerta durante

**Cuadro 3.** Pruebas hechas al sistema difuso de temperatura sin perturbaciones.

Referencia (°C)	Tiempo de establecimiento (minutos)	Sobrepaso (%)	Error en estado estable
36	11,9	19	0,21
37	14,0	0	0,20
38	12,2	7	0,18
41	20,4	0	0,23
42	22,3	0	0,22
43	34,5	0	0,30



**Figura 12.** a. Perturbación puerta abierta durante un minuto. b. Perturbación inyección de aire caliente.

un minuto, donde se observa que el prototipo responde de forma correcta y regresa al punto deseado en un tiempo aproximado de 3 minutos. En la figura 12b, se muestra la perturbación realizada al inyectar calor manual al prototipo, con el fin de probar la respuesta ante un sobrecalentamiento del sistema. Se observa un comportamiento aceptable ante esta excitación, pues el sistema vuelve al valor de referencia definido para la prueba en un tiempo aproximado de 3 minutos.

En el cuadro 4 se muestra la información sobre

las pruebas realizadas con las perturbaciones al sistema. Luego de obtener los datos del comportamiento del sistema difuso de rotación, se calcularon los parámetros que describen a los sistemas de primer orden, los cuales se muestran en el cuadro 5. El sobrepaso en este sistema es cero, el error de estado estable máximo es de 0,0512 y el tiempo de establecimiento mayor obtenido es de 0,832 s, por tanto es posible concluir que el sistema difuso de rotación llena las expectativas de la evaluación por enfoque de control.

**Cuadro 4.** Información sobre las pruebas hechas al sistema difuso de temperatura con perturbación.

Referencia (°C)	Perturbación	Tiempo de establecimiento (minutos)	Sobrepaso (%)	Error en estado estable
41,00	Puerta abierta	36,30	0	0,25
37,78	Inyección de calor	9,58	9	0,23

**Cuadro 5.** Información de pruebas realizadas al sistema de rotación.

Referencia (°)	Tiempo de establecimiento (segundos)	Sobrepaso (%)	Error en estado estable
5	0,756	0	0,0500
10	0,789	0	0,0430
15	0,810	0	0,0512
20	0,832	0	0,0412

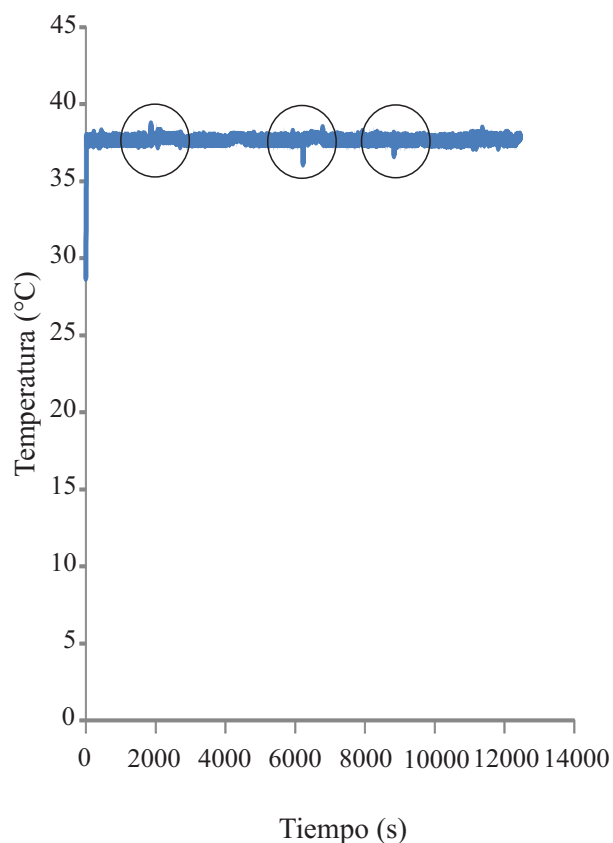
**Validación de la aplicación**

La figura 13 muestra fluctuaciones del comportamiento de la temperatura en el prototipo. La primera perturbación (de izquierda a derecha), se generó por una variación de voltaje que pudo afectar directamente la resistencia que proporciona el calor en la planta. La segunda y tercera perturbación, se produjeron por dos cortes en la energía que alimentaba al prototipo, los cuales fueron prolongados por un tiempo mayor al que podía resistir la UPS conectada.

El promedio general de la temperatura en los días de incubación, fue de 37,64°C, con una desviación estándar promedio de 0,13 (Cuadro 6).

Los resultados obtenidos del proceso de incubación del sistema difuso de rotación, indican que se realizaron las tres rotaciones establecidas, cada ocho horas en los días predeterminados para esto.

Al realizar el análisis por los tres enfoques en



**Figura 13.** Temperatura en el proceso de incubación.

ambos sistemas de inferencia, se demostró que las variables controladas por el prototipo se mantuvieron en los rangos establecidos para el proceso de la incubación artificial. La prueba de incubación que se llevó a cabo, obtuvo un 85% de eclosión; con un factor de confusión provocado por la calidad de los huevos utilizados, pues los 172 huevos colocados en la incubadora no fueron certificados por el proveedor como fértiles o aptos para la incubación.

**Cuadro 6.** Temperatura media (°C) al interior del prototipo durante los días de incubación.

Días	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Temperatura promedio</b>	37,6	37,6	37,7	37,6	37,6	37,7	37,7	37,6	37,6	37,8	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,7
<b>Desviación estándar</b>	0,62	0,09	0,13	0,11	0,09	0,13	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,14



## Agradecimientos

Al profesor Manuel Agudelo, por su colaboración en la tarea compleja de construcción de la estructura del prototipo para este proyecto. Al grupo de investigación GIECOM por ser motivador en el desarrollo de este tipo de trabajos en la Universidad de la Amazonia.

## Literatura citada

Angulo, J; García, B; Angulo, I; Sáenz, V. 2006. Microcontroladores Avanzados dsPIC. Thomson Editores Spain, España. 768 p.

Clauer, P. 2009. Incubating Eggs. Especialista de la Extensión de Aves de Corral (en línea). Consultado 12 jun. 2009. Disponible en <http://pubs.ext.vt.edu/2902/2902-1090/2902-1090.html>.

Dannenberg, A; Odry, P; Diveki, S; Csasznyi, A; Burany, N. 2005. Fuzzy Logic Motor Control with MSP430x14x (en línea). Consultado 29 ene. 2010. Disponible en <http://www.google.com.co/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBcQFjAA&url=http%3A%2F2Ffocus.ti.com%2Flit%2Fan%2Fslaa235%2Fslaa235.pdf&rct=j&q=Fuzzy%20Logic%20Motor%20Control%20with%20MSP430x14x&ei=9izTNH7JoH78AaHooCTCg&usg=AFQjCNEaLUTFqFruZFCf9yAdWBGhkCWuzw&cad=rja>.

FENAVI. 2009. Archivo de Excel histórico desde el año 2000 hasta Junio de 2009 (en línea). Consultado 23 jun. 2009. Disponible en <http://www.fenavi.org/fenavi/estadisticas-produccion-avicola-pub.php?idm=113>

Ferreyra, A; Fuentes R. 2009. Estudio comparativo entre control PID y difuso (en línea). Consultado 17 mar. 2009. Disponible en <http://proton.ucting.udg.mx/somi/memorias/CONTROL/Con-4.pdf>.

Gómez, D; Guerrero, M; Mejía, N; Mercado, F; Sanguino, C. 2007. Control Flujo de Nivel (en

línea). Consultado 19 ene. 2010. Disponible en [http://www.google.com.co/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fexpoelectronica.upbbga.edu.co%2Fpdf\\_2003%2F0809.pdf&rct=j&q=CONTROL%20DIFUSO%20DE%20NIVEL%20Dolly%20Paola%20G%C3%B3mez%20Carrascal&ei=\\_x6zTLLmIMOC8gbCutifCQ&usg=AFQjCNE4IOlo5L6q66achvvhx68yxBzkn6A&cad=rja](http://www.google.com.co/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fexpoelectronica.upbbga.edu.co%2Fpdf_2003%2F0809.pdf&rct=j&q=CONTROL%20DIFUSO%20DE%20NIVEL%20Dolly%20Paola%20G%C3%B3mez%20Carrascal&ei=_x6zTLLmIMOC8gbCutifCQ&usg=AFQjCNE4IOlo5L6q66achvvhx68yxBzkn6A&cad=rja).

Meneses, G. 2005. Control difuso de temperatura para carga resistiva con microcontrolador de 8 bits. Tesis (Ing Elect). Colombia, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. 140 p.

Ogata, K. 2003. Ingeniería de Control Moderna. Estados Unidos. Prentice-Hall, cuarta edición, versión en español. 956 p.

Pérez, L; Peralta, H; Bianchi, R. 2003. Estudio de las corrientes de Foucault a través del enfoque magnetostático (en línea). Consultado 12 mar. 2010. Disponible en [http://www.fisicacreativa.com/informes/infor\\_em/Eddy2k3a.pdf](http://www.fisicacreativa.com/informes/infor_em/Eddy2k3a.pdf).

Ponce, D. 2001. Incubadora de Cuidados Intensivos Controlada con Lógica Difusa. Sociedad Cubana de Bioingeniería. 00209: 5p.

Smith, T. 2004. Care and Incubation of Hatching Eggs (en línea). Consultado 10 jun. 2009. Disponible en <http://www.thepoultrysite.com/articles/166/care-and-incubation-of-hatching-eggs>.

Téllez, A; Camelo, Z. 2009. Diseño e Implementación de una herramienta software para la síntesis automática de procesadores difusos con orientación a la arquitectura de la familia dsPIC33F. Tesis (Ing Elect). Colombia, Universidad Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería. 144 p.

U.S. Sensor. 2001. Thermistors, RTD's, Probes, Assemblies (en línea). Consultado 05 feb. 2010. Disponible en [http://www.ussensor.com/US\\_SENSOR\\_CATALOG.pdf](http://www.ussensor.com/US_SENSOR_CATALOG.pdf).

Verrastro, C; Alberino, S; Folino, P. 2005. Control PID con esquema adaptativo de filtrado de ruido (en línea). Consultado 19 sep. 2010. Disponible en <http://www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/SDC29.pdf>

Wang, L. 1997. A course on Fuzzy Systems and Control. New Jersey, Prentice Hall. 419 p.

---

### **Julio César Páez Castro**

Estudiante de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Distrital "Francisco José de Caldas" en convenio con la Universidad de la Amazonia. Pertenece al grupo de investigación GIECOM de la Universidad de la Amazonia.

### **Autor para correspondencia**

**E-mail: [juliostrong14@hotmail.com](mailto:juliostrong14@hotmail.com)**

---

### **Luis Gabriel Marín Collazos**

Ingeniero Electrónico de la Universidad Autónoma de Colombia. Especialista en Evaluación Pedagógica de la Universidad Católica de Manizales. Estudiante de la Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente ocasional tiempo completo de la Universidad de la Amazonia. Su área de trabajo son los sistemas de control y la inteligencia computacional. Pertenece al grupo de investigación GIECOM de la Universidad de la Amazonia.

---

### **José Antonio Marín Peña**

Licenciado en Ciencias de la Educación de la Universidad Distrital "Francisco José De Caldas". Magister de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Magister de la Universidad Pedagógica Nacional - U.P.N. y Especialista de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Docente de planta de la Universidad de la Amazonia.