

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA**

**“CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO ELÉCTRICO  
MEDIANTE LÓGICA DIFUSA”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**PRESENTA**

**ISSAC SALOMÓN JIMÉNEZ ESCAMILLA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. ANTONIO ORANTES MOLINA**

**HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA. JUNIO DE 2012**



Tesis presentada ante los siguientes sinodales:

M.C. Jorge Luis Barahona Avalos

Dr. Rosebet Miranda Luna

Dr. Carlos García Rodríguez

Bajo la dirección de:

Dr. Antonio Orantes Molina



## **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado a mi madre Dolores Escamilla Díaz, quien me ha formado y me ha enseñado a ser una buena persona, a mi padre Gustavo Jiménez Santana quien paso de ser un héroe a una leyenda, dándome sabios consejos y enseñándome todo lo necesario para triunfar en la vida, por último a mi hermano Maxwell Gustavo Jiménez Escamilla la persona que me enseñó la honestidad.



## Índice general

Dedicatoria.....	v
Índice general.....	vii
Índice de figuras.....	xi
Resumen .....	xv
Capítulo 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Antecedentes .....	4
1.3. Objetivo general .....	5
1.3.1. Objetivos específicos.....	5
1.4. Justificación del proyecto .....	6
1.5. Estructura de la tesis.....	7
Capítulo 2.....	9
2. Fundamentos teóricos.....	9
2.1. Fabricación de piezas cerámicas.....	9
2.2. Fundamentos de lógica difusa.....	11
2.2.1. Conjuntos difusos .....	11
2.2.2. Funciones de pertenencia.....	13
2.2.3. Operaciones entre conjuntos difusos.....	14
2.2.4. Fusificación .....	14
2.2.5. Base de conocimiento.....	15
2.2.6. Inferencia difusa .....	16
2.2.7. Motor de inferencia .....	16
2.2.8. Defusificación .....	16
2.3. Sistemas de control.....	18
2.3.1. Control difuso.....	19
2.4. Transductores .....	21
2.4.1. Termopar.....	21

2.5. Tarjeta de adquisición de datos.....	23
2.5.1. NI USB 6008.....	23
2.6. LabVIEW.....	23
2.7. Control de encendido apagado.....	24
Capítulo 3 .....	25
3. Diseño e implementación del controlador difuso.....	25
3.1. Diseño del sistema.....	25
3.2. Acondicionamiento de la señal del termopar .....	26
3.2.1. Termopar tipo K.....	27
3.2.2. Amplificación y compensación de unión fría.....	28
3.3. Tarjeta de adquisición de datos (TAD) .....	30
3.4. Módulo de disparo.....	31
3.4.1. Detector de cruce por cero .....	31
3.4.2. Microcontrolador Atmega48A-PU .....	32
3.4.3. Etapa de potencia .....	34
3.5. Programación con LabVIEW .....	35
3.5.1. Diseño del controlador difuso.....	35
3.5.1.1. Fusificación y diseño de las funciones de membresía .....	37
3.5.1.2. Creación de la base de reglas.....	40
3.5.1.3. Identificación del método de defusificación.....	41
3.5.2. Programa de control .....	43
Capítulo 4 .....	45
4. Resultados.....	45
4.1. Medición de temperatura.....	46
4.2. Interfaz del sistema .....	47
4.3. Análisis de resultados del controlador difuso .....	49
Capítulo 5 .....	59
5. Conclusiones.....	59
5.1. Trabajos futuros .....	59
5.2. Costos .....	60
Bibliografía.....	61

---

Apéndice A .....	63
Apéndice B .....	69
Apéndice C .....	71



## Índice de figuras

Figura 1.1. Horno eléctrico. ....	2
Figura 1.2. Interruptor sostenido por cono pirométrico. ....	2
Figura 1.3. Modelo de un horno eléctrico. ....	3
Figura 1.4 Controlador West 6400. ....	5
Figura 2.1. Pasta cerámica. ....	9
Figura 2.2. Curva típica de cocción para quema de sancocho. ....	10
Figura 2.3. Lógica difusa vs lógica clásica. ....	12
Figura 2.4. Conjuntos difusos para la variable estatura. ....	12
Figura 2.5. Funciones típicas de membresía. ....	13
Figura 2.6. Variable lingüística. ....	15
Figura 2.7. Variable fusificada. ....	15
Figura 2.8. Máquina de inferencia difusa. ....	16
Figura 2.9. Método Max. ....	17
Figura 2.10. Método de centroide. ....	17
Figura 2.11. Media de máximos. ....	18
Figura 2.12. Lazo cerrado. ....	18
Figura 2.13. Lazo cerrado con controlador. ....	18
Figura 2.14. Controlador difuso. ....	19
Figura 2.15. Termopar. ....	21
Figura 2.16. Relación FEM Temperatura de diferentes termopares ....	22
Figura 2.17. Gráfica de un ejemplo de control encendido-apagado. ....	24
Figura 3.1. Diagrama a bloques del sistema de control difuso. ....	25
Figura 3.2. Acondicionamiento de la señal del termopar. ....	27
Figura 3.3. Termopar tipo k con termopozo. ....	27
Figura 3.4. Circuito de acondicionamiento. ....	28
Figura 3.5. Circuito acoplador. ....	29
Figura 3.6. Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008. ....	30
Figura 3.7. Circuito detector de cruce por cero. ....	31
Figura 3.8. Señal de salida del circuito detector de cruce por cero. ....	32
Figura 3.9. Diagrama del flujo del programa. ....	33
Figura 3.10. Conexión del Atmega48A-PU. ....	34
Figura 3.11. Circuito de potencia. ....	35
Figura 3.12. Compromiso de diseño. ....	36

Figura 3.13. Controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo .....	37
Figura 3.14. Funciones de pertenecía del error.....	38
Figura 3.15. Funciones de pertenecía del cambio de error. ....	39
Figura 3.16. Funciones de membresía de la salida. ....	40
Figura 3.17. Método Max-min.....	41
Figura 3.18. Editor de base de reglas.....	42
Figura 3.19. Superficie de control. ....	42
Figura 3.20. Simulación en LabVIEW 10. ....	43
Figura 3.21. Sistema de control implementado. ....	43
Figura 3.22. Interfaz de usuario. ....	44
Figura 4.1. Sistema de control difuso en operación.....	45
Figura 4.2. Interfaz de usuario y PC. ....	45
Figura 4.3. Gráfica comparativa entre el multímetro UNIT-71E y el sistema de control difuso. ....	46
Figura 4.4. Acercamiento del error de medición. ....	47
Figura 4.5. Interfaz de usuario en funcionamiento. ....	47
Figura 4.6. Quema típica de sancocho.....	48
Figura 4.7. Trayectoria de temperatura con máximo de 940 °C. ....	48
Figura 4.8. Trayectoria de temperatura con máximo de 900 °C. ....	49
Figura 4.9. Perfil de temperatura con máximo de 940 °C.....	50
Figura 4.10. Perfil de temperatura con máximo de 900 °C.....	50
Figura 4.11. Perfil de temperatura con máximo de 800 °C.....	51
Figura 4.12. Pausa en 940 °C.....	51
Figura 4.13. Pausa en 900 °C.....	52
Figura 4.14. Pausa en 800 °C.....	52
Figura 4.15. Pausa en 800 °C de subida.....	53
Figura 4.16. Pausa en 580 °C de subida.....	53
Figura 4.17. Pausa en 220 °C de subida.....	54
Figura 4.18. Pausa en 800 °C de bajada.....	55
Figura 4.19. Pausa en 580 °C de bajada.....	55
Figura 4.20. Pausa en 220 °C de bajada.....	56
Figura 4.21. Rampa de subida de 220 °C a 580 °C.....	56
Figura 4.22. Trayectoria de temperatura para el crisol tipo horno. ....	57
Figura 4.23. Crisol tipo horno.....	57
Figura A.1. Conexión de una señal de voltaje en modo diferencial. ....	A-1
Figura A.2. Ejemplo de una medición diferencial a 20V. ....	A-2
Figura A.3. Conexión de señales de voltaje en modo single-ended (RSE). ....	A-2

---

Figura A.4. Bloque de lógica difusa.....	A-5
Figura A.5. Diagrama a bloques.....	A-6
Figura C.1. Comparación de la respuesta del sistema real y de la función de transferencia.....	C-1
Figura C.2. Respuesta del controlador PID ante una entrada escalón.....	C-2
Figura C.3. Respuesta del controlador difuso.....	C-3



## Resumen

En la actualidad, muchos productos requieren algún tratamiento térmico y más cuando se habla de la creación de piezas cerámicas, por lo que resulta de vital importancia el control de la temperatura. En esta tesis se presenta la forma en la cual se diseñó y construyó un sistema para controlar la temperatura de un horno eléctrico para la cocción de piezas cerámicas. Se empleó un controlador difuso de tipo Mamdani, el cual trabaja con las entradas del error (temperatura deseada menos temperatura real), el cambio del error, y provee una salida de voltaje, la cual será la señal de control para un microcontrolador que realizará un control por encendido apagado mediante ciclos completos de la línea de alimentación de voltaje que nos proporciona CFE.

El software del sistema y el controlador se desarrollaron en *LabVIEW*, permitiendo visualizar en un entorno amigable al usuario, la temperatura deseada y real, así como un entorno agradable para el usuario. La digitalización de la temperatura y el envío de la señal de control se realizan con una tarjeta de adquisición de datos. Con la implementación del sistema de control, se mejoró la calidad de las piezas y el tiempo de cocción, además de facilitar el uso del horno eléctrico.



# Capítulo 1

## 1. Introducción

La Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) cuenta con un taller de cerámica para fines académicos. Dicho taller es utilizado por maestros, alumnos y en ocasiones, por personas interesadas en el área para diseñar piezas cerámicas. Para realizar el proceso de quema o cocción se dispone de un horno de gas y de dos hornos eléctricos. También se cuenta con mezcladoras y mesas de trabajo.

Los hornos presentan desventajas ya que no tienen indicadores de temperatura, por lo que el procedimiento de cocción es difícil y solo lo realizan expertos en el área. Esto nos obliga a diseñar un método de medición y control de temperatura. En la actualidad, en el mercado existen distintos dispositivos de medición y control de temperatura. En un principio eran analógicos por lo que tenían que calibrarse y presentaban un margen de error significativo, sin embargo gracias a los avances en el campo de la microelectrónica y sensores, en particular el avance de los microcontroladores, procesadores y dispositivos de almacenamiento, dichas técnicas son más eficientes [10].

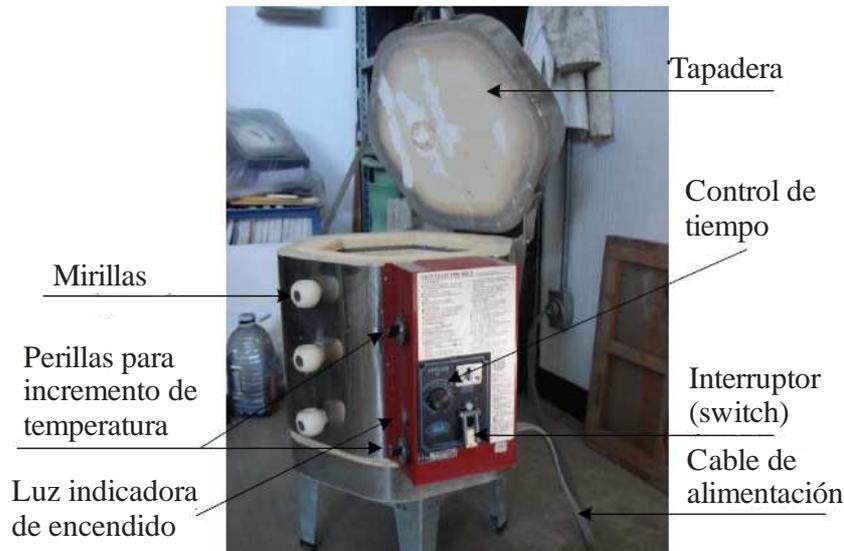
Actualmente los procesos exigen mayor precisión, enfrentando con éxito las perturbaciones y no linealidades de los mismos, esto ha propiciado la extensión del uso de técnicas de control inteligentes como el control difuso, neuro-difuso, redes neuronales, algoritmos genéticos y otros.

Por las razones mencionadas el control difuso, es una técnica de control que ha avanzado en los últimos años y que ha tenido un buen desempeño en varias aplicaciones. Tomando esta técnica de control se propone diseñar y construir un sistema que muestre y además controle la temperatura de un horno eléctrico, mediante un controlador difuso.

### 1.1. Descripción del problema

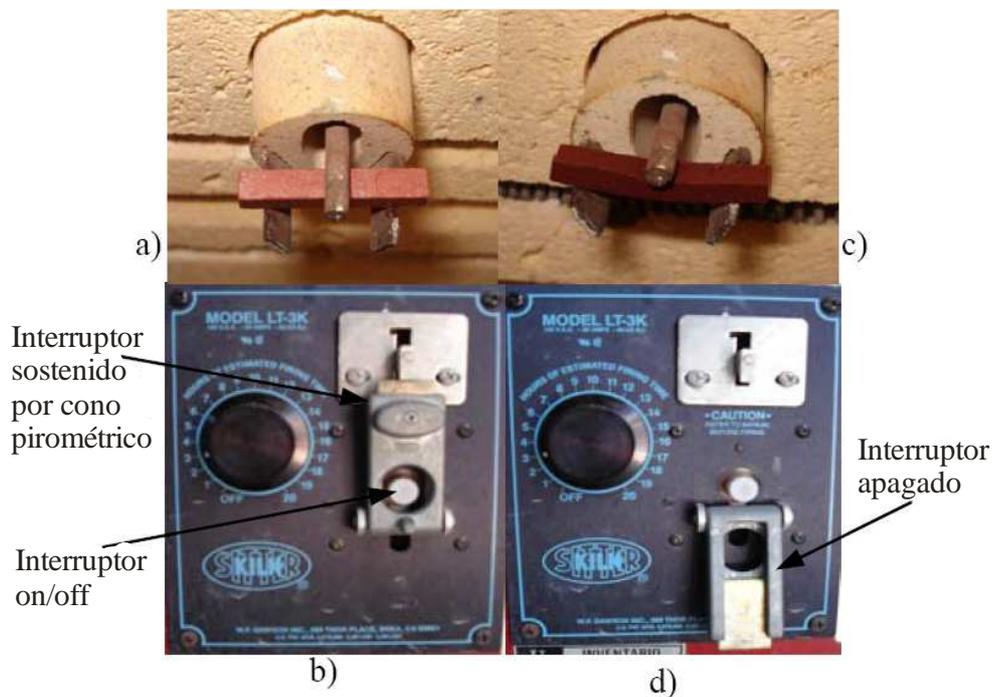
Para delimitar la complejidad y los alcances del presente trabajo, primero se analiza el funcionamiento del horno eléctrico marca Skutt Electric Kiln modelo LT-3K (el más pequeño del taller de cerámica). Su control es manual, cuenta con una perilla para regular el tiempo de quema y dos más para el flujo de corriente (Figura 1.1), lo que resulta en la variación de la temperatura. El horno tiene un recubrimiento interno de ladrillo refractario aislante al calor, con muy poca masa. A continuación se presentan algunas de sus características:

- Voltaje 115V CA.
- Corriente 20A.
- Potencia 2300W.
- Temperatura máxima 1232 °C.
- Resistencias eléctricas en forma de bobina.
- Capacidad 0.021  $m^3$



**Figura 1.1.** Horno eléctrico.

Resulta difícil seguir las trayectorias de quema, debido a que el horno no es automático y no cuenta con indicadores de temperatura. Para saber la temperatura se utilizan conos pirométricos. Los conos son colocados en el interior del horno antes de iniciar la quema (Figura 1.2 a), posteriormente se enciende el interruptor presionando el botón blanco *on/off*, el cono sostiene la palanca del interruptor (Figura 1.2 b) hasta que el horno llega a la temperatura que el cono soporta. Cuando esto ocurre el cono se dobla hasta que ya no es capaz de sostener la palanca del interruptor (Figura 1.2 c), y el horno se desconecta (Figura 1.2 d).



**Figura 1.2.** Interruptor sostenido por cono pirométrico. a) Colocación del cono en el interior del horno, b) Palanca del interruptor sostenida por cono, c) Cono doblado al alcanzar su temperatura máxima, d) Interruptor desconectado.

La interacción con el usuario es muy ineficiente y en algunos casos molesta. No tiene manual de usuario, por lo que el encargado del taller es responsable de enseñar su funcionamiento. Cabe mencionar que el horno tiene más de quince años sin mantenimiento, debido a esto las resistencias no calientan de manera uniforme, los ladrillos refractarios no están pegados con cemento refractario y tiene fracturas en la base lo que representa pérdidas de calor, registrándose temperaturas de 190 °C en las paredes externas del horno a su máxima temperatura alcanzada de 970 °C a la cual se llega en un tiempo aproximado de 15 horas.

El modelado de sistemas térmicos es en principio complicado, ya que la temperatura no suele ser homogénea en los cuerpos, lo que dará lugar a ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y, por lo tanto, a modelos de parámetros distribuidos. Se suele simplificar en muchos casos dividiendo el cuerpo en varias partes, o considerando una temperatura homogénea. El calor puede fluir por conducción, por convección y por radiación: el primer fenómeno es prácticamente lineal, el flujo de calor es proporcional a la diferencias de temperaturas. La convección es debida al flujo, sobre la superficie del cuerpo de sustancias gaseosas, las cuales en nuestro sistema, están cambiando constantemente. La radiación no es estrictamente un fenómeno lineal [18].

Realizando el análisis del horno eléctrico como un sistema térmico mediante parámetros concentrados [20], que contempla el material a calentar, la resistencia térmica  $R$ , la cual resultaría muy difícil de conocer debido a que la pieza cerámica despiden vapores y la  $C$  (capacitancia térmica) está en función de la masa, la cual varía debido a que no siempre se va a cocer la misma pieza, se meten piezas de distintos materiales y masas, además se desprenden moléculas de  $CO_2$  y vapor de  $H_2O$ .

Haciendo un análisis más detallado del horno eléctrico [15], se toman los siguientes parámetros (Figura 1.3).

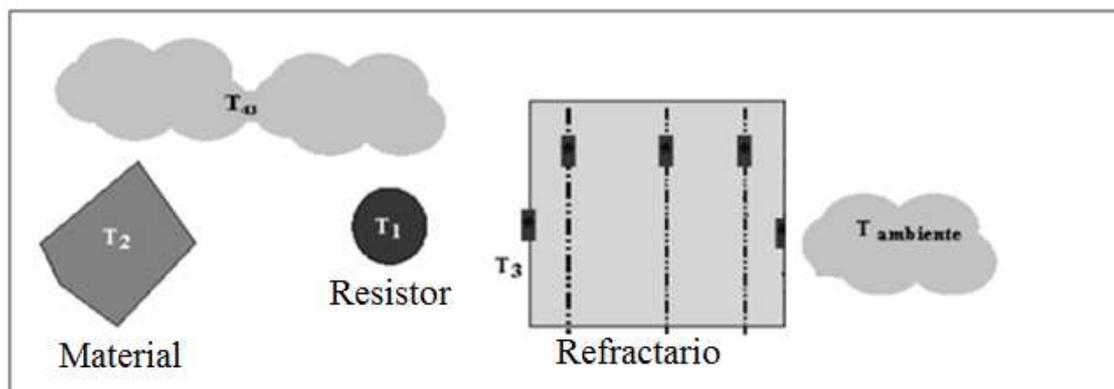


Figura 1.3. Modelo de un horno eléctrico.

Donde  $T_2$  es la temperatura del material a calentar,  $T_1$  es la temperatura del resistor,  $T_{43}$  es la temperatura de aire que se encuentra en el interior del horno,  $T_3$  es la temperatura del material refractario.

Para un sistema de control es posible realizar balances de energía para las siguientes masas de control: conductor eléctrico, pared refractaria, carga y gas alrededor. La ecuación general de balance de energía (1.1).

$$\frac{\partial}{\partial t} [\iiint e \rho dV]_{VC} + [\iint (e + Pv) \rho (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA]_{SC} = \frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} \quad (1.1)$$

Donde  $v$  es el volumen específico,  $e$  energía específica,  $P$  es presión,  $\rho$  es la densidad del material conductor,  $v$  la velocidad del fluido y  $n$  es el vector normal a la superficie de control ( $sc$ ).

De la ecuación (1.1) se deriva la ecuación (1.2), una ecuación diferencial no lineal, en la cual se ilustra el balance de la energía para la resistencia eléctrica, donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  (está en función de la capacidad calórica del aire que se encuentra dentro del horno y de la masa de) son constantes dependientes del factor de forma seleccionado para la radiación.

$$\frac{dT_1}{dt} = -bT_1 - 2cT_1^4 + cT_3^4 + cT_2^4 + bT_{43} + a \quad (1.2)$$

## 1.2. Antecedentes

En el 2001, Valverde y Castro presentaron en [25] el diseño e implementación de un controlador difuso para la regulación de temperatura en un horno eléctrico resistivo a un valor constante, en éste se describen las características del controlador difuso, diseñado e implementado con el objetivo de mantener un valor de temperatura constante dentro del ambiente de un horno eléctrico resistivo. Ello se logra controlando la potencia eléctrica aplicada al banco de resistencias del que se compone el horno eléctrico. El controlador difuso se implementó sobre una arquitectura de hardware basada en el microcontrolador M68HC11E9 en su modo expandido.

Un grupo de inteligencia de la UTN presentó el artículo [6], en el cual desarrollaron un controlador multivariable empleando técnicas de control difuso, que permite la descripción del problema usando variables lingüísticas y logrando que el horno eléctrico se comporte, en su conjunto, como si un operador estuviera accionando los controles para compensar las no linealidades del sistema.

Se presentó en la UTM la tesis de licenciatura [4] donde se aborda el problema de monitoreo de un horno de gas. En esta tesis desarrolló un sistema de monitoreo de temperatura para el horno de gas. Se utilizó una arquitectura maestro-esclavo con la cualidad de que el esclavo es capaz de asumir el control del monitoreo en caso de que el maestro falle. Se tomó como maestro a una PC, que a través de una interfaz utilizando el software *LabVIEW* ordena a su esclavo, el microcontrolador (Intel 8032), obtener la medición de temperatura interna del horno mediante un termopar tipo K.

En el 2006 Vásquez y Santiago presentaron en la UTM un artículo [16], en éste se describe el diseño y la implementación de un controlador PID para regular la temperatura del sistema Amira LTR701. Se obtuvo la función de transferencia, para el diseño del controlador se utilizó la herramienta Simulink y el método de Ziegler-Nichol's, obteniendo las ganancias. La simulación del sistema fue hecha en el software Matlab, para obtener los mejores valores de  $k_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ . Finalmente se usó el software *LabVIEW* para controlar la planta.

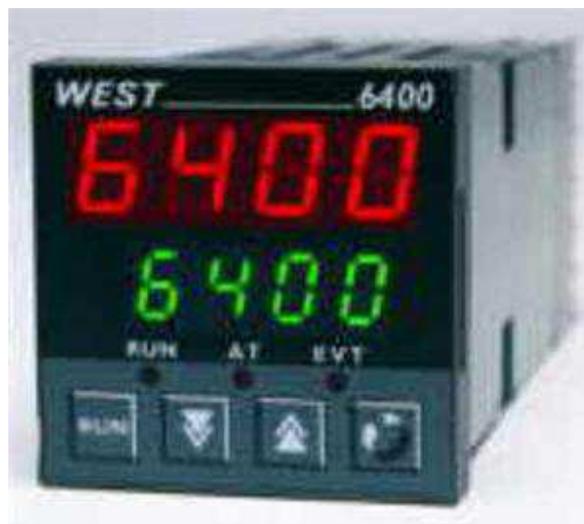
Hanamane y Mudholkar presentaron el artículo [23], en el que se describe la implementación de un controlador difuso de temperatura, utilizando un microprocesador. Se utilizó un termistor como sensor de temperatura formando el componente resistivo para el circuito del 555, operado en modo estable. La temperatura es leída como función de la frecuencia y comparada con la referencia de temperatura. El error es mandado al trigger del proceso de inferencia difusa, a través de una Interfaz de Puerto Programable PPI 8255. Para manejar la energía eléctrica del horno se utiliza la modulación por ancho de pulso (PWM).

En 2009 se realizó en la UTM la tesis de licenciatura [13], en esta tesis se diseñó y construyó el hardware para monitorear y controlar la temperatura utilizando dos sistemas de control tipo on-off y

por ciclos, también se desarrolló un programa con base en una computadora utilizando el software *LabVIEW*. En este programa se muestra el historial de las variaciones de temperatura y se configura el encendido o apagado vía puerto serie hacia el módulo de disparo. La digitalización de la temperatura se hace con una tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008.

Actualmente existen en el mercado sistemas electrónicos para medición y control de temperatura, los cuales ya utilizan sistemas de control difuso; a continuación presentaremos el modelo N6401 de *West Instruments* (Figura 1.4) [URL6], el cual presenta varias ventajas, ya que cuenta con un tablero programable para los tipos de quema que se deseen, como rampas de subida y bajada. A continuación mostramos las características principales:

- Tipo de Controlador: PID, PID-difuso y ON/OFF.
- Tiempo de quema máxima: hasta 99 horas 59 minutos.
- Lectura digital: Centígrados.
- Programación de trayectorias de quema, variando su velocidad.
- Acepta 4 programas con 16 segmentos cada uno.
- Accesible para termopares tipo K, J, R, T, S, B, L y N.
- Programación de las rampas desde el controlador o PC.
- Alarmas: Proceso alto, desviación y proceso bajo.
- Salidas: Relevador, Triac y SSR (relevador de estado sólido).
- No incluye termopar, ni módulo de potencia.
- Precio: Alrededor de 430 USD (Febrero 2012).



**Figura 1.4** Controlador West 6400.

### 1.3. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es monitorear y controlar la temperatura de un horno eléctrico mediante la implementación de un controlador difuso.

#### 1.3.1. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general, se proponen lo siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y construir una etapa de medición de temperatura, acondicionando la señal de un termopar tipo K, para ser enviada a la computadora.
- Diseñar y construir un control de encendido apagado, capaz de ser controlado desde *LabVIEW*.
- Desarrollar en *LabVIEW* un programa, capaz de visualizar las trayectorias de temperatura e introducir la trayectoria de temperatura deseada con un entorno gráfico amigable al usuario.
- Especificar de la trayectoria de temperatura por eventos.
- Diseñar e implementar un controlador difuso.
- Calibrar el controlador difuso.

#### 1.4. Justificación del proyecto

La realización de un control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa, implementado en el horno eléctrico marca Skutt Electric Kiln modelo LT-3K del taller de cerámica, se justifica debido a lo siguientes puntos:

- La necesidad de un dispositivo automático para realizar las quemas y para reducir los errores durante el proceso.
- La necesidad que se tiene de contar con un sistema didáctico para enseñar a los alumnos a realizar piezas cerámicas de buena calidad y para algunos prototipos que deben cumplir ciertas exigencias.
- La producción de piezas es muy poca, no requiere del cumplimiento de estándares de calidad altos, por lo que no se justifica comprar un controlador industrial.
- La interfaz de usuario puede ser utilizada para monitorear la temperatura de otros hornos, además se cuenta con una PC que ya se tenía en el taller.
- Se requiere de una interfaz amigable con el usuario, que facilite la introducción de trayectorias de temperatura deseadas a través de un sistema sencillo.
- Una mejora en el sistema sería la opción para observar la temperatura real y la temperatura deseada, así como la opción de poder guardar los datos de estos parámetros para su análisis.
- Los controladores existentes cumplen con los requisitos, pero no cuentan con interfaz amigable para el usuario, además requiere de un técnico especializado en la instalación del controlador.

Se requiere implementar un controlador que realice las trayectorias de temperatura, en un sistema modelado por ecuaciones diferenciales no lineales [7] (ecuación 1.2), que sea capaz de seguir la referencia sin importar la cantidad de piezas a calentar y el tipo de material. En algunos casos se requiere descender la temperatura de forma más lenta o con pausas (permanece en una temperatura constante), una opción que pocos controladores comerciales tienen.

Para cumplir con las especificaciones mencionadas se puede linealizar el sistema, lo cual resultaría en operaciones complicadas y perdería precisión el sistema. Debido a esto se optó por un control difuso, capaz de controlar un sistema no lineal (el horno eléctrico), de tal manera que el horno eléctrico siga las trayectorias de quema deseadas, usando reglas lingüísticas, similares a las usadas en la lógica humana. Los sistemas de control difuso permiten describir el conjunto de reglas que utilizaría un ser humano que controlase el proceso, con toda la imprecisión que poseen los lenguajes naturales y, sólo a partir de esas reglas, generar las acciones que realiza el control.

Cabe mencionar que se reutilizaron algunos componentes, como la caja del sistema, la fuente de alimentación, ventilador, circuito detector de cruce por cero y transistor de potencia de una tesis anterior [13].

## 1.5. Estructura de la tesis

Este documento de tesis está formado por 5 capítulos y tres anexos, realizados de la siguiente manera:

1. Introducción. Describe el problema, los objetivos, justificación y algunos proyectos relacionados.
2. Fundamentos teóricos. Se presenta una breve descripción de la fabricación de piezas cerámicas y las bases necesarias para el diseño y construcción del controlador difuso, así como los elementos a utilizar en el desarrollo del sistema.
3. Diseño e implementación del controlador difuso. Contiene la descripción del diseño del sistema y su implementación, así como de las partes involucradas en él.
4. Resultados. Se muestran las pruebas realizadas, se analiza el desempeño del controlador y los resultados obtenidos.
5. Conclusiones. Se realizan comentarios sobre las perspectivas de trabajos futuros, observaciones y conclusiones.

Anexo A. Funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008.

Anexo B. Descripción del código del microcontrolador, para realizar el control de encendido apagado.

Anexo C. Comparación del control difuso con un controlador PID.



## Capítulo 2

### 2. Fundamentos teóricos

Para llevar a cabo el trabajo de tesis se requiere tener conocimiento sobre algunos temas, como por ejemplo, fabricación de piezas cerámicas, termopares, adquisición de datos y control difuso. Por lo que se verán algunos fundamentos teóricos sobre estos temas.

#### 2.1. Fabricación de piezas cerámicas

El proceso de fabricación de piezas cerámicas resulta difícil de realizar e incluso complicado para un ceramista experimentado. A continuación describiremos el proceso de fabricación que se lleva en el taller de cerámica de la UTM, descrito por la persona encargada (Mayo 2011), Ma. Del Carmen Rosales Soto la Marina.

Para construir piezas cerámicas primero se realiza una mezcla de arcilla de bola, sílice, caulin, agua y talco, obteniendo una pasta (Figura 2.1); después se deja reposar de 3 a 7 días dependiendo del tamaño y espesor de la pieza.



**Figura 2.1.** Pasta cerámica.

En el siguiente paso se le da la forma deseada a la pieza. En el taller se ocupan 2 técnicas; la de vaciado y la de trabajo manual, en esta última se ocupan diferentes maneras como: torneado, placa suave, placa dura, forjado con moldes y murales. Ya obtenida la forma, se deja secar aproximadamente una semana.

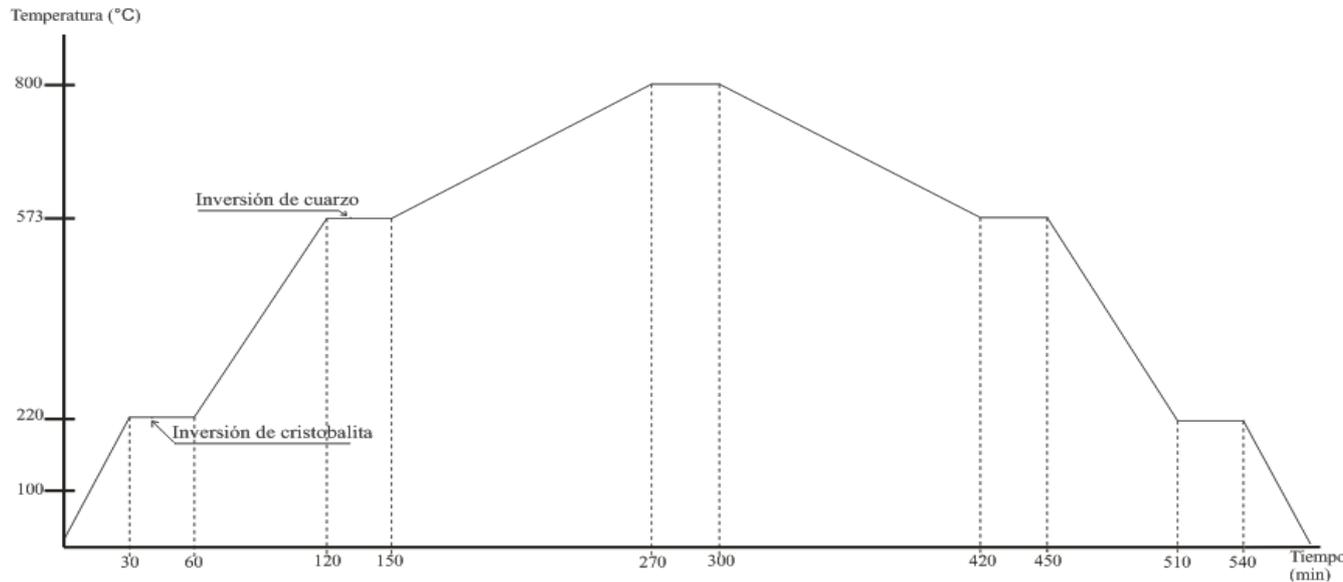
Cuando la pieza se encuentra completamente seca, se realiza el proceso más importante para su fabricación, el proceso de quema o cocción. Para realizar esta quema se realizan curvas de cocción, las cuales deben seguir un perfil de temperatura, ya que se debe tener cuidado al aumentar la temperatura demasiado rápido, y al pasar por las inversiones de cristobalita y cuarzo. A pesar de que existen algunas curvas de cocción típicas, resulta difícil de dar cifras exactas de los ciclos de quema, ya que éstos pueden ser tan específicos como lo requiera cada tipo de pasta o vidriado [26].

Cuando la pieza se encuentra en el intervalo de temperatura de 100 °C a 200 °C, se pierde toda la humedad que contiene la pieza, pero si el calentamiento es acelerado el agua saldrá rápidamente, causando que la pieza se agriete o estalle.

La inversión de cristobalita se produce a 220 °C. La cristobalita es dióxido de silicio, de color gris, que se presenta como esferas o cristales incluidos en otros minerales. La cristobalita aumenta su volumen al aumentar la temperatura y disminuye al enfriarse [URL2].

La inversión de cuarzo ocurre a los 573 °C. El cuarzo está presente en varias rocas y arcillas, éste cambia según su temperatura, cuando ésta aumenta los cristales de cuarzo se redondean y su volumen crece en 1%, cambia de cuarzo-alfa a cuarzo-beta. Este proceso es reversible cuando se enfría. Si los cambios se producen rápidamente las piezas se agrietan [URL2].

En el taller de cerámica por lo general se realizan dos tipos de quema, la de sancocho y la de esmalte. En la quema de sancocho se mantiene un tiempo de 2 a 3 horas, partiendo de la inversión de cuarzo hasta llegar a 800 °C (Figura 2.2). Después en el esmaltado se mantiene un tiempo de 3 a 5 horas, a partir de la inversión de cuarzo hasta llegar a 1000 ó 1200 °C, siguiendo un perfil de temperatura similar al del sancocho.



**Figura 2.2.** Curva típica de cocción para quema de sancocho.

No es recomendable tratar de acelerar el proceso de enfriamiento, ya que solo producirá que las piezas e inclusive el horno se agrieten. Se recomienda que después de haber bajado a 200 °C, se abra el horno [9].

## 2.2. Fundamentos de lógica difusa

En los años 60's fue el surgimiento de la teoría de la lógica difusa, debido a Lotfi Zadeh, quien enfatiza, en que el punto primordial de la lógica difusa es proveer un sistema formal, computacionalmente provisto de conceptos y técnicas para tratar con modos de razonamiento, los cuales son aproximados en lugar de exactos. En la lógica difusa se puede ver que todo está en términos de grado de pertenencia a un conjunto.

La lógica difusa se ha convertido en una de las disciplinas matemáticas con gran aplicación en la actualidad tales como: lavadoras de ropa, sistema de frenos en trenes, sistemas de aire acondicionado, procesado de imágenes, etc. Las principales razones son, la sencillez conceptual de los sistemas basados en lógica difusa, su facilidad para adaptarse a casos particulares, su habilidad para combinar en forma unificada expresiones lingüísticas con datos numéricos, y el no requerir de algoritmos muy sofisticados para su implementación.

La lógica difusa se basa en la relatividad de lo observado. Proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de una información de entrada ambigua. Se adapta mejor al mundo real en el que vivimos, e incluso puede funcionar con nuestras expresiones, del tipo “hace mucho calor”, “no es muy alto”, “el ritmo del corazón está un poco acelerado”, etc. La clave de esta adaptación al lenguaje se basa en comprender los cuantificadores de nuestro lenguaje, por ejemplo, “mucho”, “medio”, “bajo” y “muy bajo”. La lógica difusa puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad o falsedad a los resultados de “falso” y “verdadero”. El objetivo de todo sistema manejador de una lógica difusa es describir los grados de los enunciados de salida en términos de los de entrada [5].

### 2.2.1. Conjuntos difusos

Una buena estrategia para representar la teoría de conjuntos difusos, consiste en recordar algunos aspectos de la teoría de conjuntos clásicos, y a partir de allí hacer una extensión a los conjuntos difusos.

Un conjunto clásico se define como una colección de elementos que existen dentro de un universo, cada uno de los elementos del universo pertenece o no a un determinado conjunto. Por lo tanto, cada conjunto puede definirse completamente por una función de pertenencia, que opera sobre los elementos del universo, y que le asigna un valor de 1 si el elemento pertenece al conjunto y de 0 si no pertenece [27].

Ahora bien, un conjunto difuso se define de forma similar, con una diferencia conceptual importante: un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto. De esta forma, un conjunto difuso que existe dentro del universo, se define como todos aquellos elementos que pueden ser calificados mediante una grado de pertenecía. Este grado de pertenecía se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso: para cada valor que puede tomar la variable  $x$  la función característica  $\mu_A(x)$  proporciona el grado de pertenencia de ese valor  $x$  al conjunto difuso  $A$ , definido como:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\}$$

Donde  $U$  es el universo de discurso continuo (por ejemplo, todos los números reales:  $U = R$ ) [11].

Las primeras diferencias que se hacen evidentes entre los conjuntos clásicos y los conjuntos difusos son las siguientes:

- La función de pertenencia asociada a los conjuntos clásicos sólo pueden tener dos valores: 0 ó 1, mientras que en los conjuntos difusos pueden tener cualquier valor entre 0 y 1.
- Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de dicho conjunto. Lo anterior no es posible en los conjuntos clásicos, ya que constituiría una violación al principio del tercer excluido [URL12]

Visto desde esta perspectiva se puede considerar que la lógica clásica es un caso límite de la lógica difusa. Así pues los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos, como se representa conceptualmente en la Figura 2.3 [27].

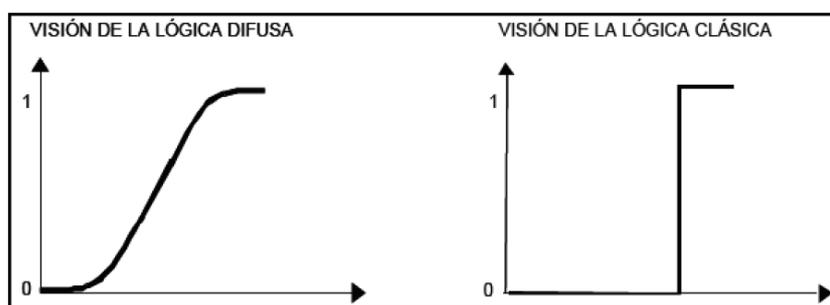


Figura 2.3. Lógica difusa vs lógica clásica, figura obtenida de [27].

Esta lógica permite tratar información imprecisa, como estatura alta, media o baja de una persona. Así, por ejemplo (Figura 2.4), un individuo es bajo si se tiene una estatura inferior a 1.60 metros, un individuo es mediano, si tiene una estatura superior a 1.60 metros e inferior a 1.80 metros y un individuo es alto, si tiene una estatura superior o igual a 1.80 metros, con lo que se lograría una clasificación en conjuntos clásicos. Sin embargo, qué tan grande es la diferencia que existe entre dos individuos, uno con estatura de 1.79 metros y otro de 1.80 metros; este centímetro de diferencia quizás no represente en la práctica algo significativo, y a pesar de eso los dos individuos han quedado rotulados con etiquetas distintas: uno es mediano y el otro es alto. Si se optase por efectuar la misma clasificación con conjuntos difusos estos cambios abruptos se evitarían, debido a que las fronteras entre los conjuntos permitirían cambios graduales en la clasificación [27].

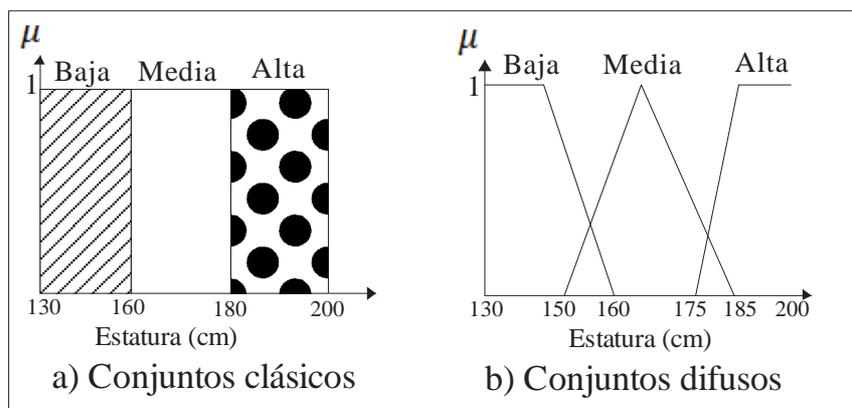


Figura 2.4. Conjuntos difusos para la variable estatura.

A continuación describiremos algunos conceptos importantes:

- Etiqueta. Nombre descriptivo usado para identificar un conjunto difuso.
- Variable lingüística. Es aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como, mucho, poco, positivo, negativo, etc., que son los calificativos que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto borroso [5].
- Universo de discurso. Rango de todos los valores posibles aplicados a una variable lingüística.

### 2.2.2. Funciones de pertenencia

Como ya se mencionó anteriormente la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto. Este grado de pertenencia se define mediante una función característica asociada al conjunto difuso, llamada función de membresía o pertenencia. Así, si se define un conjunto difuso “A” con  $n$  elementos: la función de membresía quedaría definida por  $\mu_A(x)$ , donde para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada  $x$ , la función de membresía  $\mu_A(x)$  proporciona el grado de pertenencia de este valor de  $x$  al conjunto difuso A. La única condición que deben de cumplir es que  $\mu_A(x) \in [0,1]$  [21].

Muchos conceptos de teoría clásica de conjuntos se pueden hacer extensivos a los conjuntos difusos, otros son exclusivos e inherentes a la teoría de conjuntos difusos. A continuación se muestran algunos de los más utilizados:

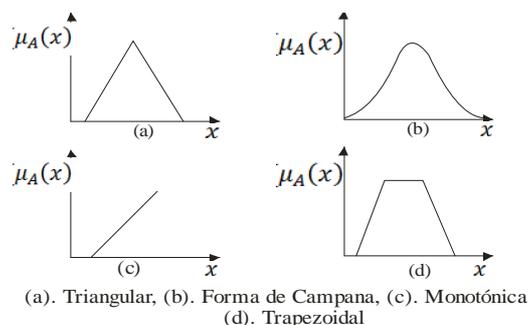
- El soporte de un conjunto difuso A en el universo de discurso U es un conjunto “crisp” (numérico) que contiene todos los elementos de U que tienen un valor de pertenencia mayor a cero en A, esto es:

$$\text{sop}(x) = \{x \in U \mid \mu_A(x) > 0\}$$

Si el soporte de un conjunto difuso no contiene ningún elemento, se tiene un conjunto difuso vacío. Si el soporte de un conjunto difuso es solo un punto, se tiene lo que se conoce como “singleton” difuso.

- El punto de cruce de un conjunto difuso, es el punto donde  $\mu_A(x)=0.5$ .
- Dos conjuntos difusos A y B son iguales si y sólo si sus funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$  son iguales.

La forma de la función de membresía utilizada, depende del criterio aplicado en la resolución de cada problema y varía en la experiencia del usuario. Existen varios tipos de funciones de membresía como: singleton, triangular, trapezoidal, pi, monótonica, S, gama, gaussiana o forma de campana, y sigmoïdal, pero las más utilizadas por su simplicidad matemática y operación son: triangular, forma de campana, monótonica y trapezoidal, como se muestra en la Figura 2.5 [5].



**Figura 2.5.** Funciones típicas de membresía, figura obtenida de [17].

El número de funciones de membresía depende del diseñador. A mayor número de funciones tendremos mayor resolución, pero también mayor complejidad computacional, por lo que se recomienda un número impar, de 3 a 7, con un solapamiento del 20% al 50% [5].

### 2.2.3. Operaciones entre conjuntos difusos

A los conjuntos difusos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Para los conjuntos difusos existen varias operaciones, pero sólo describiremos las más utilizadas que son: unión, intersección y complemento.

Antes de introducir las operaciones de los conjuntos difusos, definiremos lo que es un subconjunto difuso.

**Definición 1** (Subconjunto o contención): Para dos conjuntos difusos **A** y **B** sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$ , se dice que el conjunto difuso **A** está contenido en el conjunto difuso **B**, si y solamente si  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ . Es decir [17];

$$A \subseteq B \iff \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

**Definición 2** (Unión): Para dos conjuntos difusos **A** y **B** sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$ , se dice que el resultado de efectuar la operación de unión entre estos dos conjuntos (que en lógica binaria es el equivalente de una operación OR), es un nuevo conjunto difuso  $A \cup B$  definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia  $\mu_{A \cup B}(x)$ , dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

**Definición 3** (Intersección): Para dos conjuntos difusos **A** y **B** definidos sobre el mismo universo de discurso, y con funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$ , se dice que el resultado de efectuar la operación de intersección entre estos dos conjuntos (que en lógica binaria es el equivalente AND), es un nuevo conjunto difuso  $A \cap B$  definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia  $\mu_{A \cap B}(x)$ , dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

**Definición 4** (Complemento): Para un conjunto difuso **A** definido sobre un universo de discurso **U**, y cuya función de pertenencia es  $\mu_A(x)$ , se dice que el resultado de efectuar la operación de complemento (que en lógica binaria es el equivalente de la operación NOT), es un nuevo conjunto difuso **A'**, definido sobre el mismo universo, y con función de pertenencia  $\mu_{A'}(x)$ , dada por [27]:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

### 2.2.4. Fusificación

En esta etapa se transforman los parámetros físicos de un sistema en variables difusas, donde a cada variable física se le asigna un grado de pertenencia en cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado, mediante las funciones de membresía asociadas a estos conjuntos difusos.

El primer paso en la fusificación es dividir el universo de discurso, asignando etiquetas en cada variable difusa. Después, se establecen las funciones de membresía para dar significado numérico a cada etiqueta. En el proceso, las funciones de membresía definidas sobre las variables de entrada mapean a los datos presentes para determinar el grado de pertenencia.

Por ejemplo, en la Figura 2.6, los valores difusos de la variable lingüística o variable difusa temperatura podrían ser BAJO, MEDIO y ALTO; estos argumentos se conocen como valores difusos, cada uno de ellos está modelado por su propia función de pertenencia (Figura 2.7) [17].

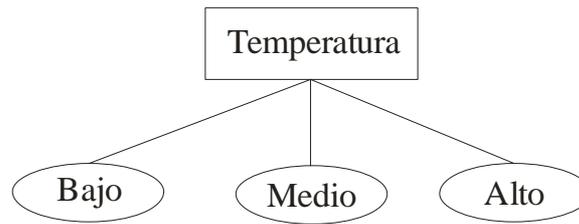


Figura 2.6. Variable lingüística.

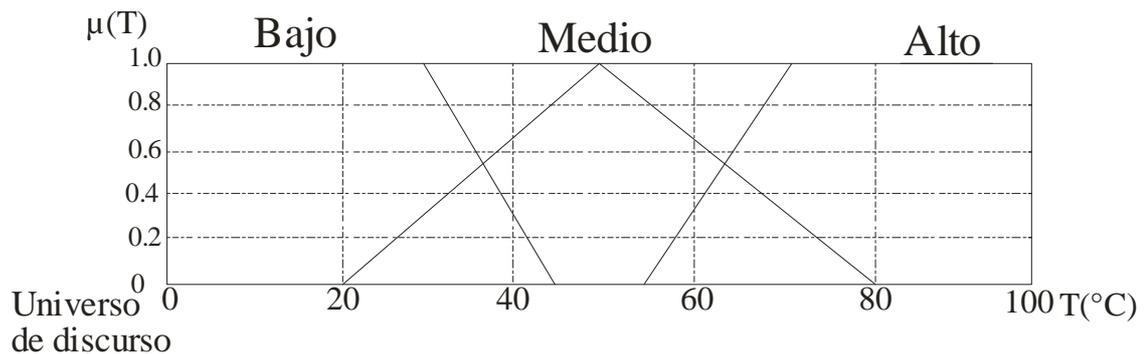


Figura 2.7. Variable fusificada.

### 2.2.5. Base de conocimiento

Comprende un conocimiento del dominio de aplicación. La base del conocimiento de un sistema difuso consiste de dos componentes: una base de datos y una base de reglas del comportamiento del sistema. Las bases de datos contienen la definición lingüística de las variables tanto de entrada como de salida. Define la semántica de cada variable lingüística.

Las bases de reglas combinan uno o más conjuntos difusos de entrada, llamados antecedentes o premisas, y les asocian un conjunto difuso de salida, llamado consecuente o consecuencia [29].

*If premisa (antecedente), THEN conclusión (consecuente)*

Los conjuntos difusos de la premisa se asocian mediante conjuntivas lógicas como (AND) y (OR). Esto permite expresar el conocimiento del que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes mediante implicaciones difusas. Para expresar este conocimiento de forma completa, normalmente se precisa de varias reglas que se agrupan como una tabla de reglas o bien como una memoria asociativa difusa o FAM. Las FAM son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas [5].

Existen diversas formas de derivar las reglas, entre las que destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de reglas se determina a partir de observar y analizar la forma en que el operador maneja el sistema.
- La modelación del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de datos de entrada y salida del proceso.

### 2.2.6. Inferencia difusa

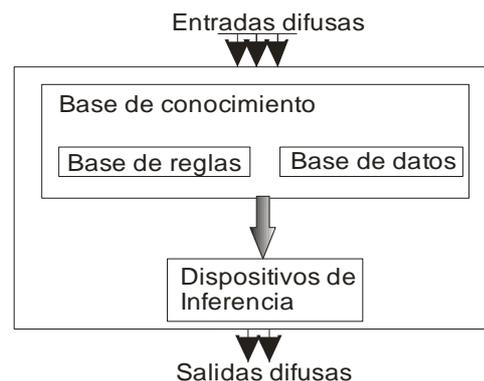
La inferencia lógica se ocupa del razonamiento formal con proposiciones, pero a diferencia de la lógica clásica, los valores de las proposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso [5].

En lógica difusa el razonamiento no es preciso, sino aproximado, lo cual quiere decir que se puede inferir de una regla una conclusión, aunque el antecedente (premisa) no se cumpla plenamente. Existen dos métodos básicos de inferencia entre reglas o leyes de inferencia, *modus ponens* generalizado (GMP) y el *modus tolens* generalizado (GMT), que representan extensiones o generalizaciones del razonamiento clásico, para mayores detalles consultar [5].

Para llevar a cabo la inferencia, se utilizan dispositivos de inferencia difusa, estos interpretan las reglas de tipo **If-then** de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema [5].

### 2.2.7. Motor de inferencia

Realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada difusas, mediante el uso de la inferencia difusa, apoyada en la base de conocimiento, entregando conjuntos difusos de salida (Figura 2.8). La secuencia de cálculos que realiza el motor de inferencia [21] [5] incluye:



**Figura 2.8.** Máquina de inferencia difusa.

- Determina el grado de cumplimiento de cada regla a partir de los grados de pertenencia de las variables de entrada obtenidas en la fusificación.
- Utiliza un dispositivo de inferencia para interpretar la base de reglas y de datos.
- Genera una salida difusa, que es un conjunto difuso salida  $B'$ , siendo éste la unión de los  $m$  conjuntos difusos mostrado en la siguiente ecuación.

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B^1}(y) + \dots + \mu_{B^m}(y) \quad (2.1)$$

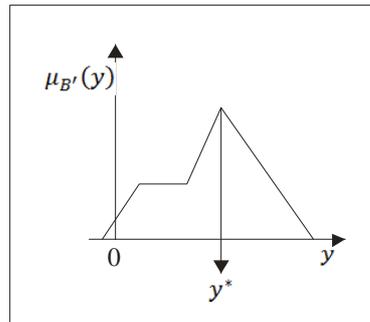
### 2.2.8. Defusificación

Es el bloque que a partir del conjunto difuso obtenido por la máquina de inferencia difusa, y mediante métodos matemáticos de defusificación lo transforma a un valor no difuso, definido como  $y^*$ . Para realizar esta tarea se utilizan diversos métodos.

Sea  $B'$  un conjunto difuso definido sobre un universo de discurso  $U$ , y cuya función de pertenencia del conjunto de salida  $B'$  es  $\mu_{B'}(y)$ .

- Defusificación por el método del máximo (CoM). Es el caso en donde la función característica del conjunto difuso tiene su máximo valor, tomando ese valor como salida, mostrado en la siguiente ecuación, véase Figura 2.9 [29].

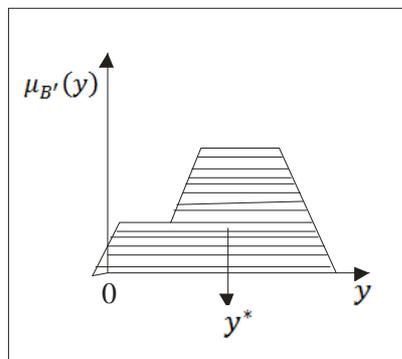
$$\mu_{B'}(y^*) \geq \mu_{B'}(y) \quad (2.2)$$



**Figura 2.9.** Método Max.

- Defusificación por el método del centroide o centro de área (CoG) (ecuación 2.3). Se calcula el centro de gravedad del área limitada por la curva de la función de membresía véase Figura 2.10.

$$y^* = \frac{\int \mu_{B'}(y) \cdot y \, dy}{\int \mu_{B'}(y) \, dy} \quad (2.3)$$



**Figura 2.10.** Método de centroide.

- Media de máximos (MoM). La salida está definida por la ecuación 2.4, en donde  $\bar{y}$  es el valor medio de los puntos de máximo grado de pertenencia de la función de membresía [1].

$$y^* = \frac{\sum_i^n \bar{y}_i}{n} \quad (2.4)$$

Por ejemplo, en la Figura 2.11 la salida defusificada sería  $y^* = \frac{a+b}{2}$

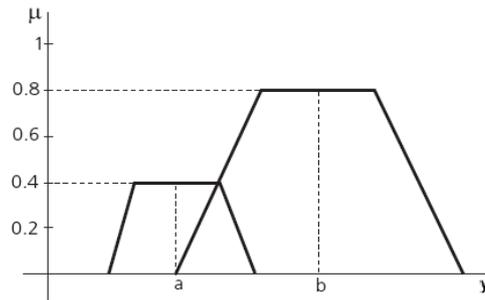


Figura 2.11. Media de máximos, figura obtenida de [1].

### 2.3. Sistemas de control

Un sistema de control es un arreglo de componentes físicos diseñados, de tal manera que se pueda manipular, dirigir o regular a sí mismo o a otro sistema, a través de una acción de control [29]. La acción de control debe controlar al sistema; y para controlar se requiere medir el valor de la variable que se está midiendo del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medio a partir de un valor deseado [20].

Los sistemas son típicamente de dos tipos:

- Lazo abierto. Es aquel en el cual no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada [20].
- Lazo cerrado o control realimentado. El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia (error) entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia (R) (Figura 2.12) y lo continúa haciendo con base en esta diferencia [20].

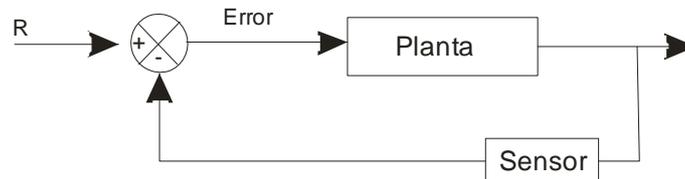


Figura 2.12. Lazo cerrado.

Utilizar un control realimentado en ocasiones no es suficiente para reducir el error, para ello se requiere un controlador, éste detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y lo amplifica a un nivel lo suficientemente alto, para disminuir el error (Figura 2.13) [20] [29].

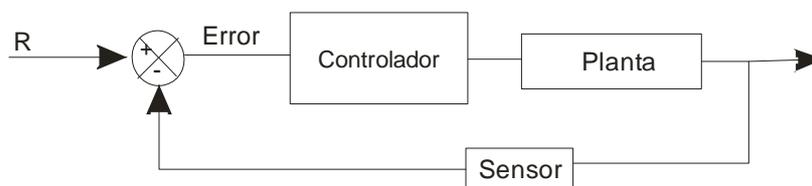


Figura 2.13. Lazo cerrado con controlador.

Los controladores industriales se clasifican de acuerdo con sus acciones de control, como:

- De dos posiciones o de encendido apagado (*on/off*)

- Proporcionales
- Integrales
- Proporcionales-integrales (PI)
- Proporcionales-derivativos (PD)
- Proporcionales-integrales-derivativos (PID)

### 2.3.1. Control difuso

El control de sistemas utilizando lógica difusa es una de las aplicaciones más interesantes de la teoría difusa, en el diseño de sistemas de control, a partir de unas entradas se deben generar unas salidas para actuar sobre determinados mecanismos.

La lógica difusa comenzó a utilizarse en controladores por su simplicidad, ya que no requiere de operaciones matemáticas complejas, permitiendo cambiar el diseño mediante la descripción del funcionamiento con lenguaje natural.

Los controladores difusos simples por lo general se representan como se muestra en la Figura 2.14, en donde sus partes interactúan de la siguiente manera: el bloque de interfaz de fusificación se encarga de convertir las entradas R (referencia) y señal del sensor en conjuntos difusos, apoyado por el módulo de base de conocimiento, el cual contiene el conocimiento sobre las entradas y salidas difusas; las entradas fusificadas son entregadas al bloque de motor de inferencia, este bloque, apoyado en un conjunto de reglas de la forma **If...then...** almacenadas en la base de reglas, produce varios conjuntos difusos para que el bloque de interfaz de defusificación los tome y los convierta en salidas no difusas, aptas para la planta (A) [29].

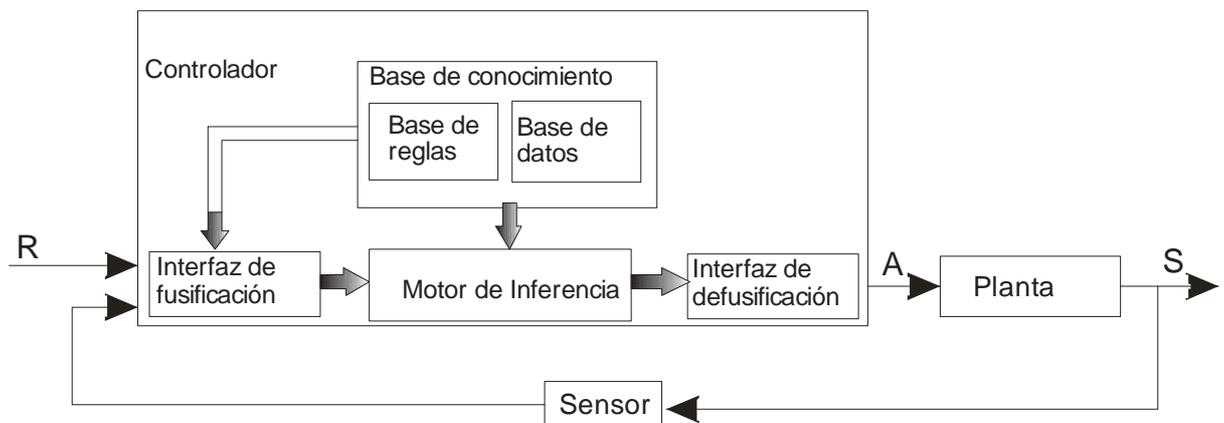


Figura 2.14. Controlador difuso.

Los controladores difusos se pueden clasificar basados en sus reglas de inferencia en dos tipos: Controlador tipo Takagi-Sugeno y Mamdani [5].

El controlador Mamdani sigue el siguiente formato de reglas que se muestra en la definición 2.1: Sean  $A_1^l, A_n^l$  y  $B^l$  conjuntos difusos sobre un universo de discurso  $U$ , y  $x = (x_1 \dots x_n)^T \in U_1 \times \dots \times U_n$  son las entradas, mientras que  $y$  es la salida del sistema difuso. Si llamamos  $M$  al número de reglas If-THEN de la base, entonces:

$$\text{If } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ and } x_2 \text{ es } A_2^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ es } A_n^l \text{ THEN } y \text{ es } B^l \quad (2.1)$$

En la definición 2.1,  $l = 1, 2, \dots, M$ , se dice que, sí un elemento  $x_1$  presenta un grado de pertenencia mayor a cero para al conjunto  $A_1^l$  de la regla  $l$ , un elemento  $x_2$  presenta un grado de

pertenencia mayor a cero para el conjunto  $A_2^l$  así sucesivamente, entonces la salida es un elemento  $y$  con un grado de pertenencia al conjunto  $B^l$  mayor a cero.

En los controladores de Takagi-Sugeno (definición 2.2) la función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada, o en un caso más general, una función genérica de las variables de entrada.

$$\text{If } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ and } x_2 \text{ es } A_2^l \text{ and } \dots \dots \text{ and } x_n \text{ es } A_n^l \text{ THEN } y^l = f^l(x) \quad (2.2)$$

Los sistemas difusos con  $n$  entradas y una sola salida, se conocen como MISO (*Multiple Input Single Output*), mientras que los que tienen varias salidas se conocen como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) [5].

La arquitectura del control a utilizar depende de la aplicación concreta. No resulta fácil realizar una clasificación genérica de todas las arquitecturas posibles de controladores basados en lógica difusa, no obstante, consideraremos los siguientes tres grandes grupos de controladores [5].

- Controladores difusos directos sin optimización. La estructura típica consiste en un preprocesado de las variables de entrada y un postprocesado de la salida del controlador, con el fin de adecuarla al proceso que se ha de controlar. El tipo de preprocesado de las entradas define la clase de controlador, en este sentido, los tipos más usuales de controlador son:

- 1) Controlador proporcional:  $X = f(e)$
- 2) Controlador integral:  $X = f(s)$
- 3) Proporcional-derivativo:  $X = f(e, \Delta e)$
- 4) Proporcional-integral:  $X = f(e, s)$
- 5) Con realimentación no lineal:  $X = f(R, S)$

En las expresiones anteriores se denota con  $e$  el error, con  $\Delta e$  su derivada y con  $s$  su integral.  $R$  representa las variables de control y  $S$  las salidas.

Estos controladores permiten realizar control de sistemas utilizando una descripción lingüística de las reglas de control. Estas reglas han de obtenerse del conocimiento que disponen los expertos sobre el control del sistema, o bien por procedimientos heurísticos.

- Controladores difusos directos con optimización. Éstos parten de la estructura de los controladores difusos directos sin optimización, añadiendo elementos que permiten ajustar sus parámetros internos con el fin de mejorar su eficiencia. Según el tipo de ajuste se distinguen diversos tipos de optimizaciones:
  - a) Controladores difusos auto-organizados
  - b) Controladores difusos con auto-aprendizaje
  - c) Controladores basados en modelado difuso
- Controladores difusos híbridos. Son aquellos controladores formados por dos controladores interconectados, de los cuales uno es convencional (como los PID) y el otro es difuso. El primero se encarga básicamente del control, garantizando un comportamiento estable, mientras que el controlador difuso actúa en paralelo, introduciendo el componente heurístico en el proceso. Este segundo controlador difuso, también puede emplearse para el ajuste de los parámetros del controlador convencional.

## 2.4. Transductores

Un transductor se define como el elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado [30].

Dentro de la familia de los transductores, se encuentran los sensores. Los sensores se refieren a elementos que producen una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo, lo cual resulta de gran importancia para conocer magnitudes físicas o químicas [30].

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida, el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador [3].

Los instrumentos para medir temperatura son los siguientes:

- Variaciones en volumen o en estado de los cuerpos (sólidos, líquidos o gases).
- Variación de resistencia de un conductor (sondas de resistencia).
- Variación de resistencia de un semiconductor (termistores).
- F.e.m. creada en la unión de dos metales distintos (termopares).
- Intensidad de la radiación total emitida por el cuerpo (pirómetros de radiación).
- Otros fenómenos utilizados en laboratorio (velocidad del sonido en un gas o frecuencia de resonancia de un cristal).

### 2.4.1. Termopar

Un termopar es un dispositivo para la medición de temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes. En uno de los extremos del cable, los dos metales están eléctricamente empalmados (corto circuito) ya sea mediante un trenzado o soldadura; precisamente esta terminación es la que se conecta térmicamente a la región a ser medida, por lo que recibe el nombre de unión caliente, cuya temperatura es mucho mayor que la del otro extremo, generando una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz, efecto *Seebeck*. El otro extremo, llamado unión fría es conectado a un dispositivo de medición (Figura 2.15).

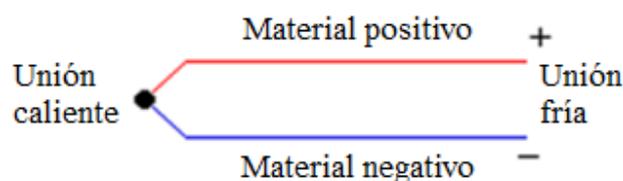


Figura 2.15. Termopar.

El efecto *Seebeck* se presenta cuando existe una diferencia de temperatura entre las uniones fría y caliente, lo que provoca un flujo de calor y un flujo de electrones conocido como corriente *Seebeck*. La fuerza electromotriz (*fem*) que genera la corriente se conoce como fuerza electromotriz de termopar o tensión de *Seebeck*.

$$V_{Seebeck} = \alpha (T_{uc} - T_{uf})$$

En donde  $T_{uc}$  es la temperatura de la unión caliente,  $T_{uf}$  es la de la unión fría,  $\alpha$  es el coeficiente *Seebeck* y  $V_{Seebeck}$  es la tensión o voltaje de *Seebeck* [3].

Es posible que la temperatura de la unión fría de un termopar no sea 0 °C, lo que provocará variaciones en la *fem*, debido a esto se recomienda mantener la unión fría de un termopar a 0 °C, es decir tenerlo inmerso en una mezcla de agua y hielo, técnica que resultaría impráctica. Se puede utilizar un circuito de compensación para producir una *fem* que varía con la temperatura de la unión fría, de manera que genere una *fem* que es la misma que se habría generado si la unión hubiese estado a 0 °C [30].

El valor de la tensión generada por el termopar depende de los metales utilizados y de las temperaturas, debido a esto a los termopares de uso común se les asignan letras de referencia (Figura 2.16) (Tabla I) [URL1].

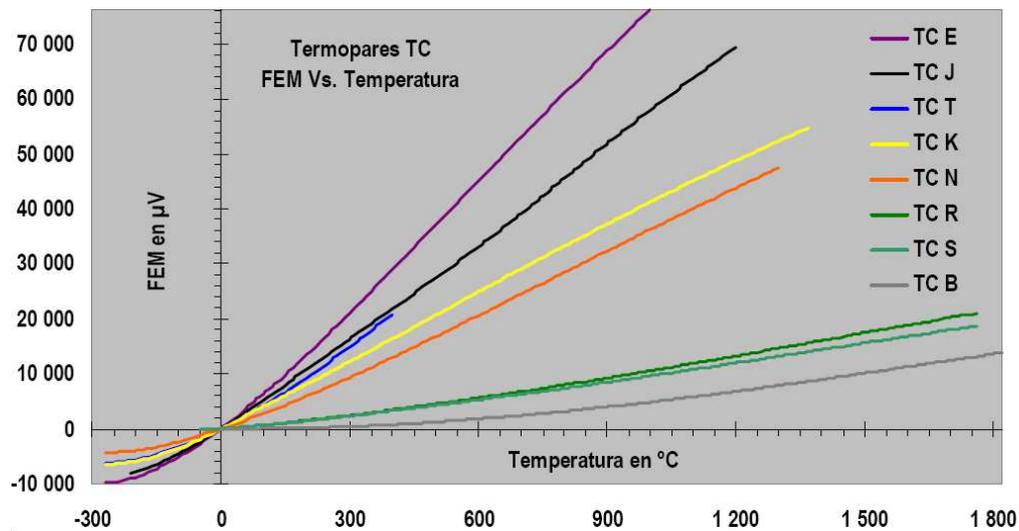


Figura 2.16. Relación FEM Temperatura de diferentes termopares, figura obtenida de [URL1].

Tabla I. Características de diferentes termopares.

Tipo	Rango de temperatura (°C)	Materiales y aleaciones (+) Vs. (-)
Metal-base		
E	-270 a 1000	Níquel-cromo Vs. Cobre-níquel
J	-210 a 1200	Hierro Vs. Cobre-níquel
T	-270 a 400	Cobre Vs. Cobre-níquel
K	-270 a 1372	Níquel-cromo Vs. Níquel-aluminio
N	-270 a 1300	Níquel-cromo-silicio Vs. Níquel-silicio-magnesio
Metal-noble		
R	-50 a 1768	Platino-13% rodio Vs. platino
S	-50 a 1768	Platino-10% rodio Vs. platino
B	0 a 1820	Platino-30% rodio Vs. Platino-6% rodio

En algunas aplicaciones el termopar se ve expuesto a condiciones extremas, debido a esto se requiere el uso de un termopozo. El termopozo es un dispositivo de protección que separa al termopar del ambiente, protegiéndolo de atmosferas oxidantes, choques térmicos y flujos de gases, evitando su deterioro o falla [3].

## 2.5. Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos (TAD), es una tarjeta de circuito impreso para entradas analógicas, que cuenta con circuitos para realizar funciones de multiplexión, amplificación, conversión analógica a digital, registro y control, a fin de alimentar las señales digitales muestreadas al sistema de computó [30].

Las especificaciones de una TAD incluyen la tasa de muestreo de las entradas analógicas, que se da en KS/s (kilo muestras sobre segundo), resolución (número de bits), número de salidas analógicas, temporizadores y contadores que se utilizan como disparadores del sistema.

### 2.5.1. NI USB 6008

La tarjeta de adquisición de datos de la marca NI (*National Instruments*), modelo NI USB 6008 brinda funcionalidad de adquisición de datos, es básica para aplicaciones como registro simple, medidas portátiles y experimentos académicos. A continuación mostramos las características más relevantes [URL3].

- 8 entradas analógicas (12 bits, 10kS/s).
- Conexión en modo diferencial y modo *single-ended*.
- Modo diferencial de  $\pm 20V$  de entrada, 12 bits y 4 entradas analógicas.
- Modo *single-ended* de  $\pm 10V$ , 11 bits y 8 entradas analógicas.
- 12 E/S digitales.
- Contador de 32 bits.
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s).
- Alimentación por USB.
- Compatible con *LabVIEW*.

## 2.6. LabVIEW

LabVIEW por sus siglas en inglés (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un sistema de desarrollo basado en programación gráfica orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación que integra una serie de librerías para comunicación con instrumentos electrónicos como GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, sistemas de adquisición y acondicionamiento como VXI o SCXI, comunicaciones en redes TCP/IP, UDP, o en los estándares de software COM, OLE, DDE, DLL o ActiveX para *Windows*, así como *AppleEvents* para MacOS o PIPE para *UNIX*.

Los programas realizados en *LabVIEW* se llaman instrumentos virtuales “VIs”, ya que tienen la apariencia de los instrumentos reales, sin embargo, poseen analogías con funciones provenientes de lenguajes de programación convencionales [12].

Cada VI de *LabVIEW* cuenta con dos ventanas principales: un instrumento real tendrá un Panel Frontal donde estarán sus botones, pantallas, etc. y una circuitería interna. Estas partes reciben el nombre de Panel Frontal y diagrama de Bloques respectivamente [19].

- Panel Frontal, es la parte que verá el usuario, suele tener fondo gris.
- Diagrama de Bloques, es donde se realizará la programación y suele tener fondo blanco.

## 2.7. Control de encendido apagado

Cuando se conecta un interruptor entre la fuente de corriente alterna (CA) y la carga, se puede controlar el flujo de potencia haciendo variar el valor rms del voltaje de CA aplicado a la carga, y a este tipo de circuito de potencia se le llama controlador de voltaje de CA. Las aplicaciones más comunes de los controladores de voltaje de CA son: calefacción industrial, cambio de conexión de transformador con carga, controles de alumbrado, control de velocidad de motores polifásicos de inducción y controles de electroimanes de CA. Para la transferencia de potencia se usan, en el caso normal, dos tipos de control:

1. Control de encendido apagado
2. Control por ángulo de fase

En el control por ángulo de fase, los interruptores conectan la carga con la fuente de CA durante una parte de cada ciclo de voltaje de entrada [24].

En el control de encendido apagado, los interruptores conectan la carga a la fuente de CA durante algunos ciclos de voltaje de entrada y lo desconectan durante otros ciclos [24].

El control de encendido apagado se usa en aplicaciones con una gran inercia mecánica y una constante alta de tiempo térmico (como en calefacción industrial). Debido a la conmutación a voltaje cero y corriente cero de los interruptores, se reducen las armónicas generadas por las acciones de conmutación [24].

Para un voltaje sinusoidal de entrada  $v_s = V_m \sin \omega t = \sqrt{2}V_s \sin \omega t$ . El voltaje de entrada se conecta a la carga durante  $n$  ciclos y se desconecta durante  $m$  ciclos, donde la suma de  $m$  y  $n$  es, en general alrededor de 100 ciclos, y el voltaje rms de salida (o de carga) se puede determinar cómo sigue [24]:

$$V_0 = V_s \sqrt{\frac{n}{m+n}} = V_s \sqrt{k}$$

Donde  $k = \frac{n}{m+n}$  y  $k$  se llama ciclo de trabajo, el voltaje rms de fase es  $V_s$ .

Si por ejemplo se utiliza un periodo de 10 ciclos y se desea que el interruptor esté 5 ciclos abierto (ciclo on) y 5 ciclos cerrado (ciclo off), se comportará como se muestra en la Figura 2.17.

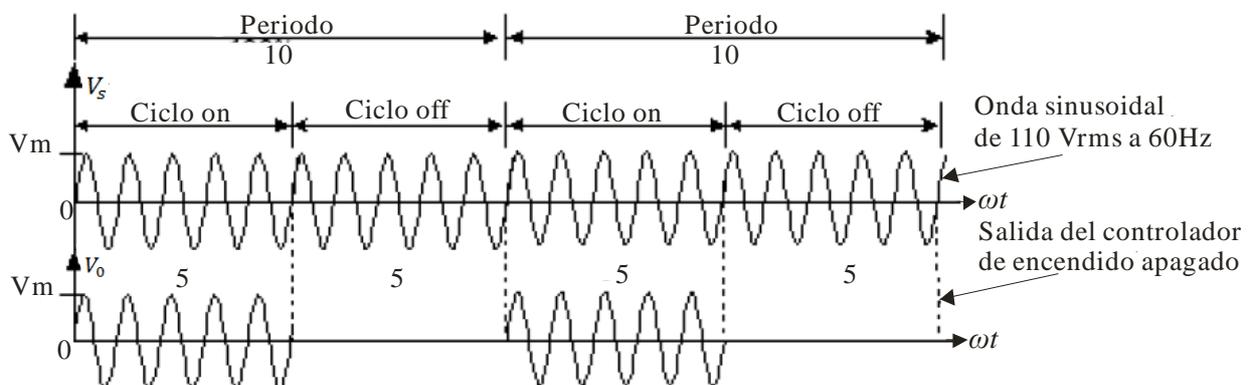


Figura 2.17. Gráfica de un ejemplo de control encendido-apagado.

## Capítulo 3

### 3. Diseño e implementación del controlador difuso

En este capítulo se describe el diseño y la implementación de todas las partes involucradas en el desarrollo del controlador difuso de temperatura, cumpliendo con los objetivos planteados anteriormente.

#### 3.1. Diseño del sistema

Para desarrollar el sistema de control de temperatura se obtienen sus parámetros de operación (temperatura máxima, tiempo que tarda en alcanzar la temperatura máxima, tiempo en enfriamiento) y se averigua la forma en que se va a manipular, tomando en cuenta todas las actividades que se encuentran en su conjunto integradas para obtener resultados que permitan la creación del sistema de control de temperatura, realizando las siguientes fases (Figura 3.1):

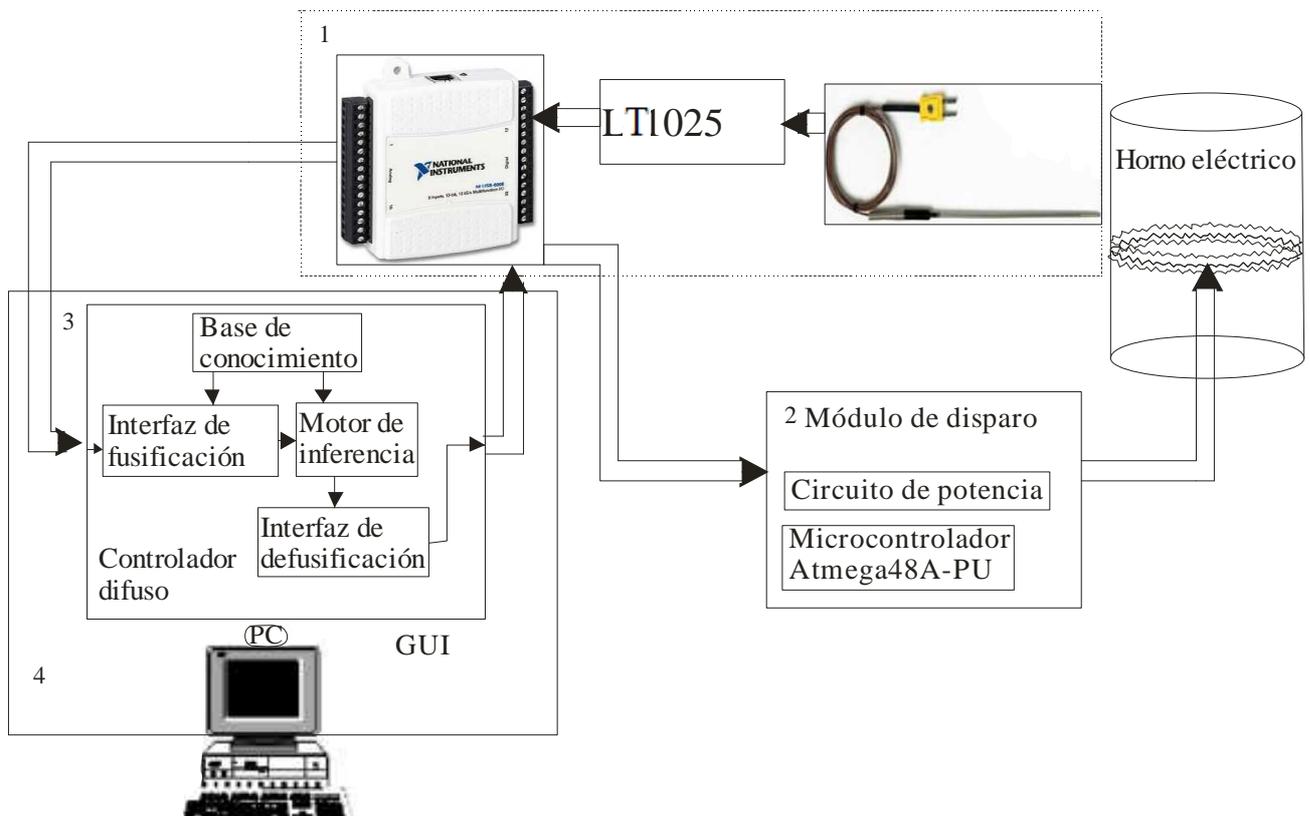


Figura 3.1. Diagrama a bloques del sistema de control difuso.

Fase 1. Acondicionamiento de la señal del termopar.

- Conocimiento de las partes importantes, como son: la capacidad de las resistencias eléctricas, la estructura del horno para averiguar la localización óptima del medidor de temperatura y determinación de la temperatura máxima.
- Caracterización del termopar tipo K: conocer su rango de operación, relación voltaje temperatura y el error que presenta en la medición de temperatura.
- Amplificar, filtrar y adaptar la señal del termopar para acoplarla con la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008.
- Creación de un programa en *LabVIEW* para leer la señal de la tarjeta de adquisición de datos y graficarla en la PC.

Fase 2. Módulo de disparo.

- Se diseñó e implementó un circuito de potencia capaz de manipular la energía que se le suministra al horno, utilizando un control encendido apagado.
- Se diseñó e implementó un circuito por medio de un microcontrolador, para activar el circuito de potencia.
- Se implementó un programa en *LabVIEW* para mandar un nivel de voltaje por medio de la tarjeta de adquisición de datos para el microcontrolador.

Fase 3. Implementación del control difuso.

Del acondicionamiento de la señal del termopar (Fase 1), se obtuvo el error de la temperatura y el cambio de error utilizándolas como entradas al controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo, realizado con la herramienta de lógica difusa de *LabVIEW* 8.5, como salida del controlador difuso, se utilizó un nivel de voltaje, el cual es enviado al módulo de disparo (Fase 2). La herramienta de lógica difusa de *LabVIEW* 8.5 ha mostrado tener un buen desempeño en diversas aplicaciones [8], [14], [2].

Fase 4. Interfaz grafica de usuario (GUI).

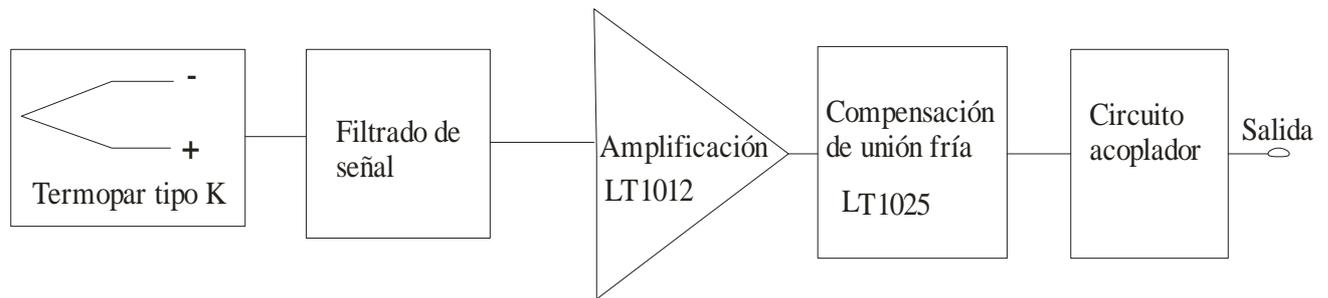
Se integró el control difuso en un programa amigable para el usuario con opciones para que introduzca las temperaturas y las visualice, además de seguir los principios de usabilidad [URL5].

Fase 5. Pruebas

- Calibración del control difuso.
- Pruebas del sistema.

## 3.2. Acondicionamiento de la señal del termopar

Para poder enviar la señal del sensor, en nuestro caso termopar, a la PC, es necesario tratar la señal del termopar, los tratamientos que recibe la señal es: filtrado de la señal, amplificación, compensación de unión fría y por último se acopla con la TAD NI USB 6008 (Figura 3.2), en un rango de 0 a 10 volts, debido a que la tarjeta de adquisición de datos acepta una entrada de voltaje máxima de 10 volts.



**Figura 3.2.** Acondicionamiento de la señal del termopar.

### 3.2.1. Termopar tipo K

El termopar que se utilizó fue el termopar industrial tipo K de *West Instruments*, debido a su bajo costo, rango de medida y una relación aproximadamente lineal de  $fem$  ( $\mu V$ ) vs temperatura ( $^{\circ}C$ ) (Figura 2.16). A continuación se muestran algunas características:

- Rango de medida. ( $-200$  a  $1093$ )  $^{\circ}C$
- Salida de voltaje aproximada de  $40.3 \mu V/ ^{\circ}C$
- Error. El error varía de acuerdo al rango (Tabla II).

**Tabla II.** Error del termopar tipo k.

Rango ( $^{\circ}C$ )	Error
$-200$ a $-100$	$\pm 2.00\%$
$-100$ a $293$	$\pm 2.2 \text{ } ^{\circ}C$
$293$ a $1250$	$\pm 0.75\%$

El termopar se protegió por un termopozo mostrado en la Figura 3.3 de junta aislada, de cerámica SILMA, el cual es resistente a químicos y choques térmicos. También se utilizó un cable para termopar, el cual presenta propiedades eléctricas similares a las del termopar, para que la señal no sea afectada por la distancia y la temperatura que genera el horno no afecte el funcionamiento del controlador.



**Figura 3.3.** Termopar tipo k con termopozo.

### 3.2.2. Amplificación y compensación de unión fría

Una vez elegido el termopar se procede a adaptar su señal, es decir, eliminar cualquier interferencia eléctrica en la conexión del termopar con el resto del circuito. En este caso la interferencia puede ser causada por el ruido de motores debido a su campo electromagnético. La solución es implementar un filtro pasivo pasabajas como se muestra en la Figura 3.4 (Filtrado), para solo dejar pasar señales con frecuencias bajas, menores a la frecuencia de corte de 22 Hz.

El voltaje generado por el termopar, es dado por la diferencia de temperaturas entre las uniones fría y caliente, tradicionalmente la unión fría era mantenida a una temperatura de 0 °C por medio de un baño de hielo, técnica que es impráctica y ha sido reemplazada por un circuito de compensación de unión fría. El dispositivo utilizado es el LT1025A [URL7] de *Linear Technologies Inc.*, puede trabajar con los tipos más comunes de termopar (incluido el tipo K), realiza la compensación de unión fría y linealiza la salida del termopar.

El hecho de que la señal del termopar sea pequeña (en el orden de los micro-volts) nos obliga a amplificarla. El LT1025, en su hoja de especificaciones recomienda un amplificador de precisión, por esta razón se utilizó un LT1012 [URL8] de *Linear Technologies Inc.*, el cual tiene un bajo costo y se adecua fácilmente al LT1025, en un circuito sencillo, entregando una salida de aproximada de 10 mV/°C (Figura 3.4).

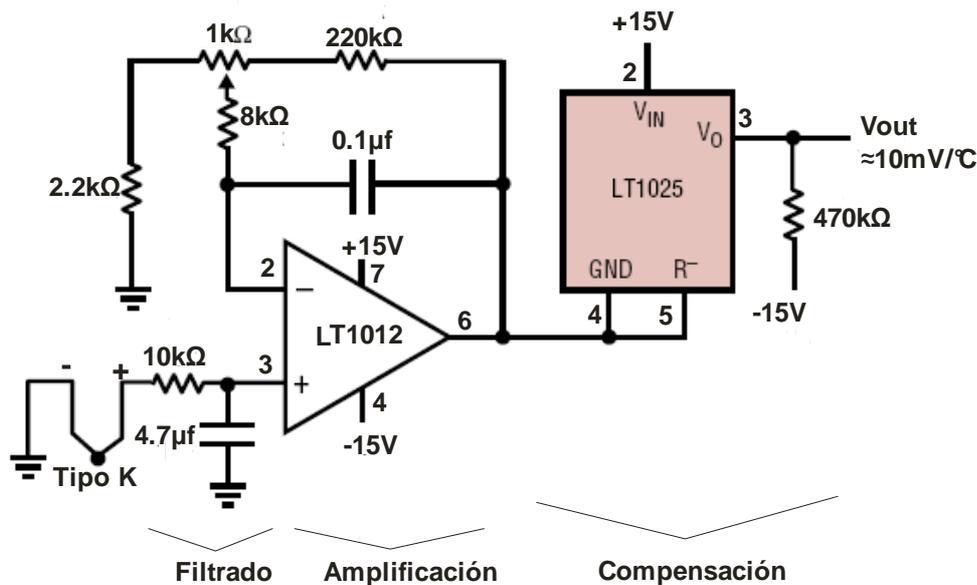


Figura 3.4. Circuito de acondicionamiento.

Debido a que la salida del LT1025 es de 0 a 11V excediendo el rango máximo de 10 volts permitidos por la tarjeta de adquisición de datos, se utilizó un circuito para atenuar estas señales.

Para atenuar la señal se ocuparon dos amplificadores operacionales, para reducir a un rango de 0 a 10V, con lo cual se tiene una señal de entrada que puede ser procesada por la tarjeta de adquisición de datos.

Se utilizó un amplificador operacional TL072 [URL9], que incorpora dos amplificadores operacionales TL071 para realizar el circuito (Figura 3.5), el cual fue diseñado de la siguiente manera: se utilizó la configuración de un inversor con ganancia unitaria obteniendo  $-V_T$  que es el mismo voltaje

que proporciona el LT1025 ( $-V_T$ ), solo que negativo (ecuación 3.1), después la señal  $-V_T$  se introduce a un inversor con ganancia de  $\frac{R_f}{R_1} = .9$ , reduciendo el voltaje  $V_o$  (ecuación 3.2).

$$-V_T = (V_T) * (-1) \quad (3.1)$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} * (-V_T) \quad (3.2)$$

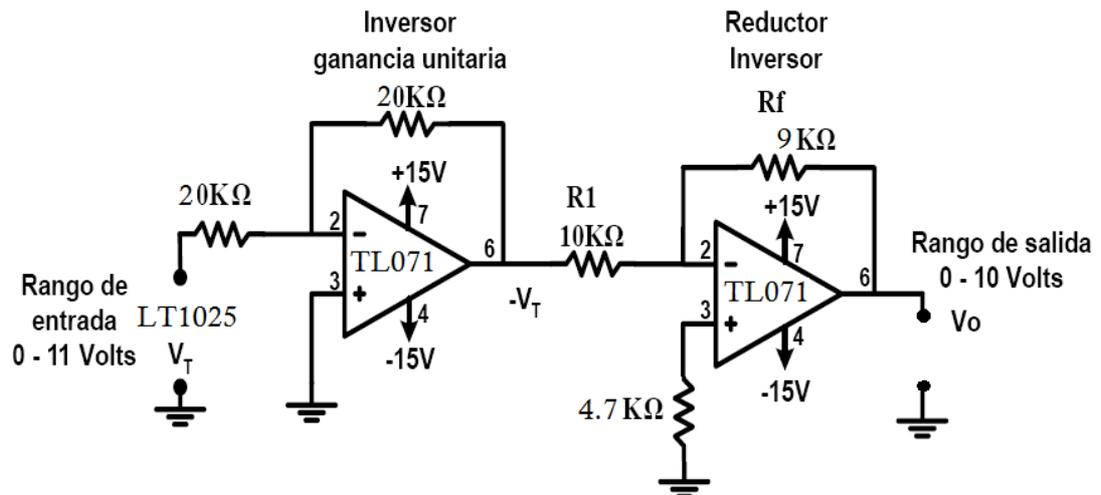


Figura 3.5. Circuito acoplador.

En la tabla III, se muestra los valores de voltaje de salida  $V_o$ ,  $-V_T$  y  $V_T$  (voltaje del LT1025) en proporción a la temperatura.

Tabla III. Tabla de voltajes medidos del circuito acoplador.

Temperatura (°C)	$V_T$ (V)	$-V_T$ (V)	$V_o$ (V)
30	.53	-.53	.47
100	1.20	-1.20	1.07
300	3.15	-3.15	2.79
500	5.35	-5.35	4.67
800	8.07	-8.07	7.21
1000	10.06	-10.06	8.97
1100	10.95	-10.95	9.80

### 3.3. Tarjeta de adquisición de datos (TAD)

La tarjeta de adquisición de datos utilizada es la NI USB 6008 de *National Instruments* (Figura 3.6), la cual cumple con los requerimientos del diseño del sistema de control. La información adquirida y recibida por la PC será transmitida por puerto USB, manejando los datos en un programa realizado en *LabVIEW* 8.5.



Figura 3.6. Tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008.

La tarjeta de adquisición de datos se utilizó en modo *single-ended*, es decir el voltaje está referenciado a tierra. Esta característica se modifica directamente en el programa hecho en *LabVIEW* al momento de configurar la tarjeta, la cual, está especificada para un rango de  $\pm 10V$  de entrada. Cuenta con ocho entradas analógicas de 11 bits, obteniendo  $2^{11} = 2048$  cambios o pasos en el bit menos significativo, con la cual se obtiene una resolución de  $10V/2048 = 4.88$  milivoltios / (variación en el bit menos significativo).

La señal proveniente del circuito acoplador se introduce en la terminal 2, 5 y 8 de la TAD, las cuales corresponden a las entradas analógicas AI0, AI1 y AI2 en la modalidad *single-ended*, y la tierra del circuito va a la terminal 1 correspondiente a GND. Las tres entradas analógicas se promediaron en el programa hecho en *LabVIEW* debido a que la señal proveniente del circuito acondicionador presentaba un poco de ruido.

Se utilizó una salida analógica, terminal 14 de la TAD que corresponde a AO0, la cual es la señal de control para el microcontrolador, (ver diagrama de terminales analógicas, página A-3).

### 3.4. Módulo de disparo

Para realizar la conexión de la carga eléctrica con la TAD, realizamos un módulo de disparo implementado en hardware, el cual está integrado por:

- Detector de cruce por cero
- Microcontrolador ATmega48A
- Etapa de potencia

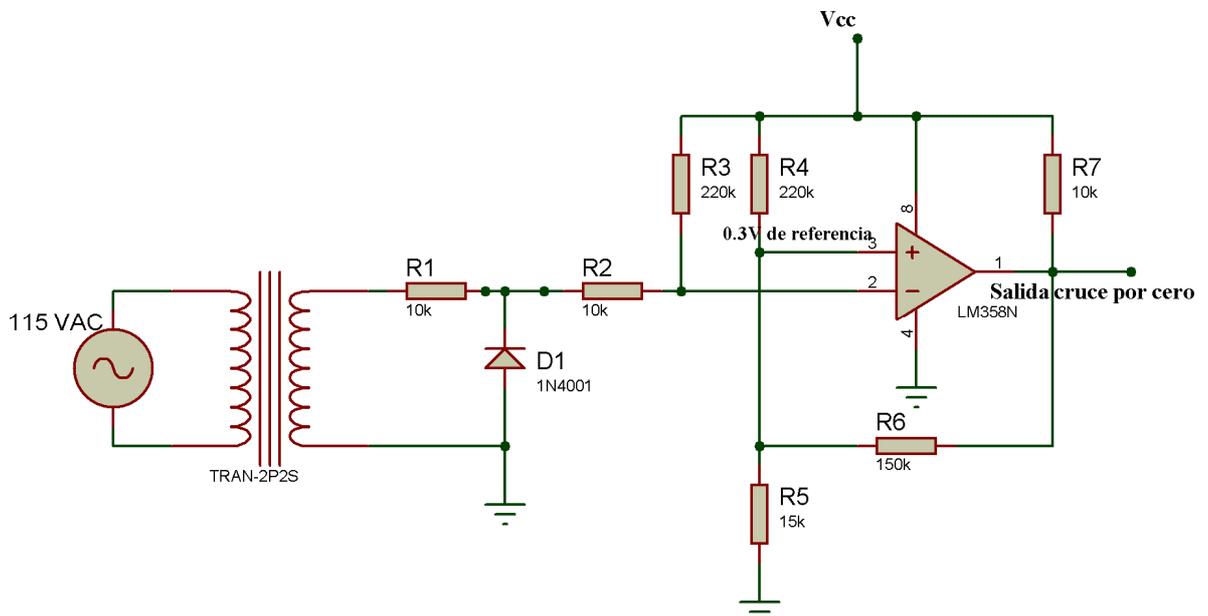
La corriente que se le suministra al horno, se regula mediante un control de encendido apagado, el cual es manejado por un microcontrolador, que recibe la señal del detector de cruce por cero y una señal de la TAD proveniente del controlador difuso.

#### 3.4.1. Detector de cruce por cero

El detector de cruce por cero detecta los cambios de signo de la señal de voltaje de corriente alterna (CA).

En cada semiciclo negativo de la señal de CA envía pulsos de 0 y 5 voltios a una frecuencia de 60 Hz al microcontrolador ATmega48A, el cual los detecta en flanco de subida por medio de una interrupción.

En la Figura 3.7 se muestra la configuración del detector de cruce por cero, en él se puede observar un amplificador operacional con la configuración de comparador, se utilizó el LM358 ya que es compatible con niveles TTL (0 a 5V), que son los valores de voltaje que maneja el microcontrolador.



**Figura 3.7.** Circuito detector de cruce por cero.

La Figura 3.8 muestra las formas de onda de entrada y salida del circuito detector de cruce por cero, la entrada es una onda senoidal medida a la salida del transformador de 6.36Vrms, cuando esta señal es menor que el voltaje de referencia 0.3V, el detector envía a la salida un voltaje positivo, de lo contrario envía 0V generando así una señal cuadrada de 3.32V a 60Hz, medición realizada con el osciloscopio de la marca *Agilent* modelo 54621A.

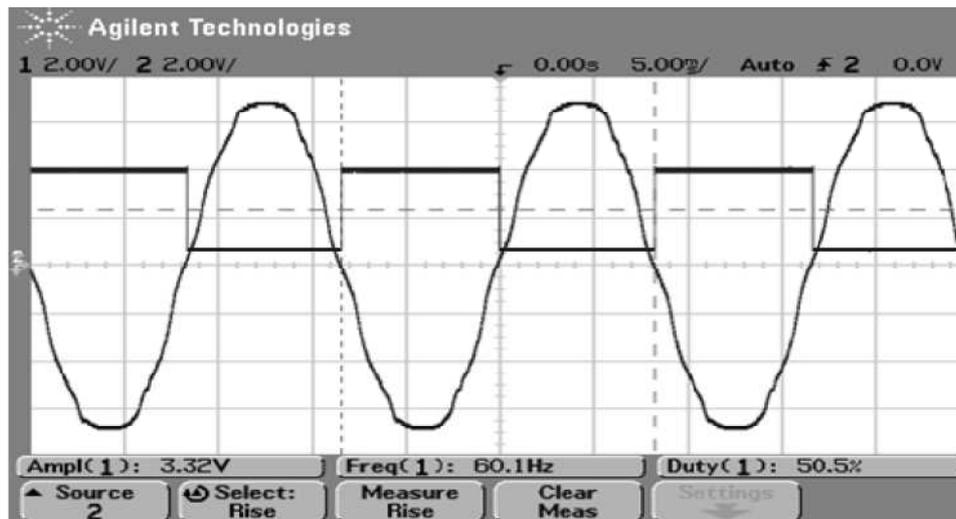


Figura 3.8. Señal de salida del circuito detector de cruce por cero.

### 3.4.2. Microcontrolador Atmega48A-PU

El microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las instrucciones grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres unidades funcionales principales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida. Su uso típico consiste en realizar funciones de “control” interactuando con el mundo real para monitorear condiciones, y en respuesta a ello enviar una señal de salida.

El uso de un microcontrolador reduce notablemente el número de componentes electrónicos, tamaño y en consecuencia disminuye la probabilidad de averías. Cada tipo de microcontrolador sirve para una serie de casos y es el diseñador del sistema quien debe decidir cuál es el microcontrolador más idóneo para cada uso. El microcontrolador PIC16F84 cumple con los requerimientos, pero se tiene mayor experiencia y dominio con los microcontroladores de Atmel. Se eligió el Atmega48A-PU de Atmel [URL10], debido a su bajo precio, facilidad de programación y a las características que a continuación se presentan:

- 32 registros de 8 bits.
- Frecuencia máxima de trabajo: 20MHz.
- Memoria de datos: 512 bytes de RAM y 256 bytes de EEPROM.
- Memoria de código: 4 Kbytes de memoria flash.
- Terminales de entrada/salida: 23.
- Canales de conversión analógico/digital: 6 de 10 bits.
- Canales PWM: 6.
- Temporizadores: 2 de 8 bits y 1 de 16 bits.
- Interrupciones externas: 2.

El microcontrolador se utilizó para realizar el control por encendido apagado, controlado por un nivel de voltaje, proveniente del controlador difuso. A continuación se muestra un diagrama a bloques (Figura 3.9) en el que se muestra la secuencia del programa que realizó el microcontrolador.

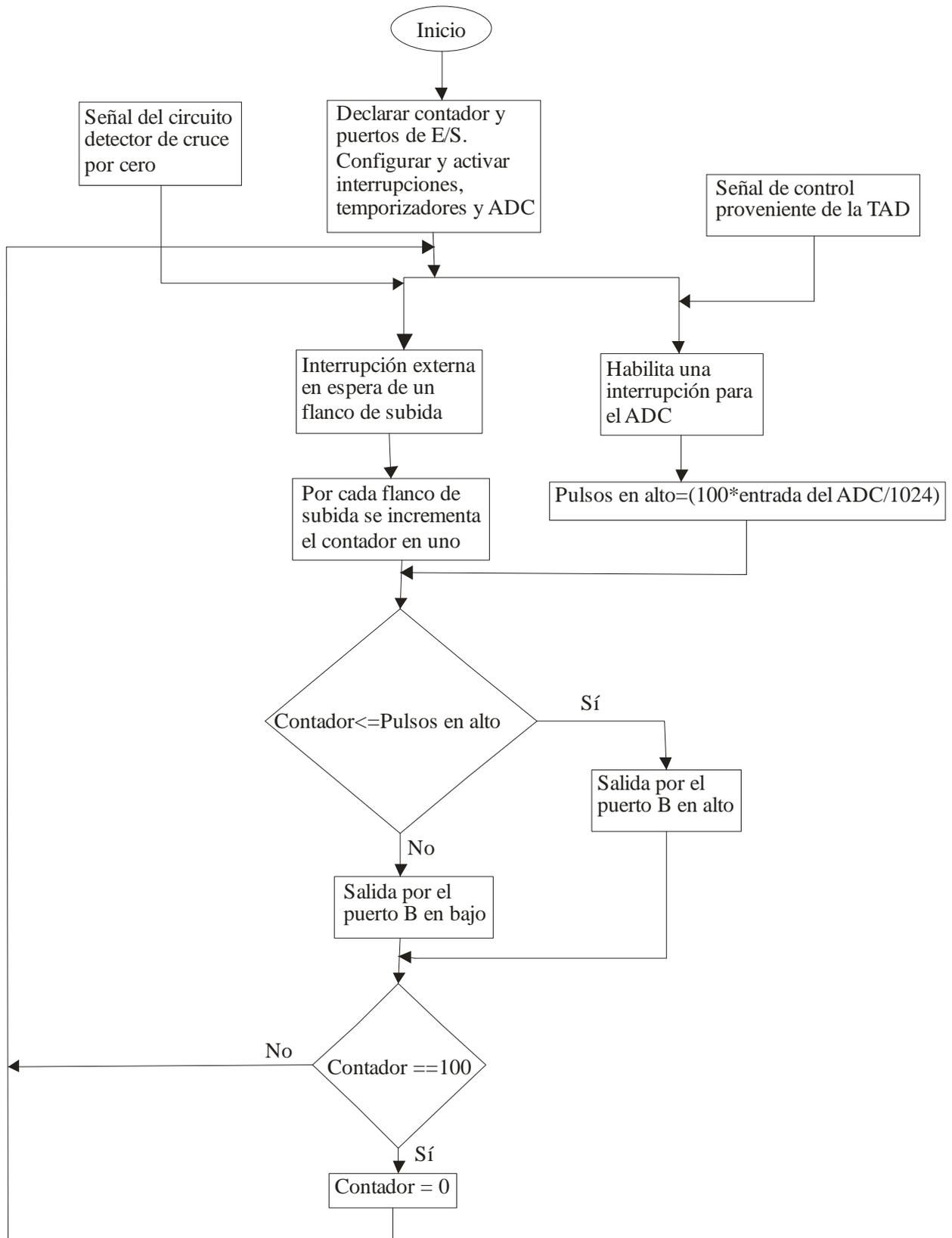


Figura 3.9. Diagrama del flujo del programa.

Las interrupciones constituyen el mecanismo más importante para la conexión del microcontrolador con el exterior ya que sincronizan la ejecución de programas con los valores externos, como en este caso la detección de pulsos externos. El microcontrolador recibe los pulsos del detector de cruce por cero a través de la interrupción externa INT1 (Figura 3.10), configurada por flanco de subida, con base en cada interrupción un contador cuenta los ciclos.

También se activa una interrupción por coincidencia por comparación para el ADC (ADC0), éste recibe una entrada de voltaje en un rango de 0 a 5 volts proveniente de la TAD, que es la señal del controlador difuso; el voltaje es digitalizado de la siguiente manera:

$$ADCW = \frac{V_{in} * 1024}{V_{ref}}$$

Donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada,  $V_{ref}$   $\Omega$  es el voltaje de referencia el cual es de 5 volts y  $ADCW$  es una variable de 10 bits. Esta variable digitalizada debe ser transformada a un número de pulso en un rango de 0 a 100 pulsos, esto se logra mediante:

$$\text{Número de pulsos} = \frac{ADCW * 100}{1024}$$

Creando una relación entre el voltaje de entrada de la TAD y los pulsos, equivalente a:

$$1 \text{ pulso} = 0.05 \text{ volts}$$

Por el puerto B (PB2) sale una señal de 5 volts de amplitud con un periodo constante de 1.666 segundos equivalente a 100 ciclos de 60 Hz, la cual varía su ciclo de trabajo (*duty cycle*) dependiendo del número de pulsos, es decir, mientras el contador de pulsos sea menor al número de pulsos, pone en alto (5 volts) la señal de salida, de lo contrario se cambia a bajo (0 volts).

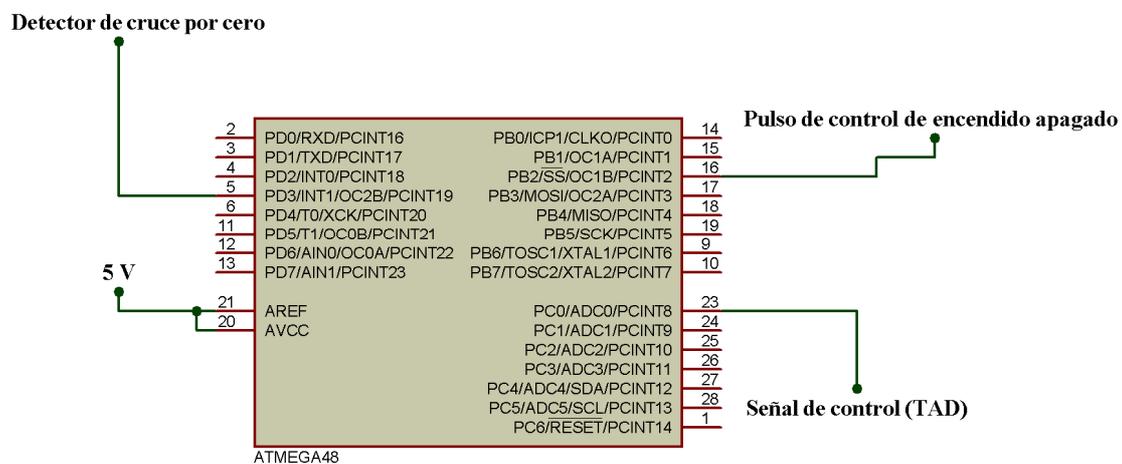


Figura 3.10. Conexión del Atmega48A-PU.

### 3.4.3. Etapa de potencia

El microcontrolador envía una señal de control al circuito de potencia, éste permite que el horno se encienda y apague por un determinado tiempo, a través de un Triac (dispositivo de potencia). Para realizar esto, se requiere tener una protección y una conexión entre ambas etapas (la digital y la de potencia), por lo que se utilizó un optocoplador MOC3031 [URL11], este dispositivo realiza un acoplamiento óptico y un aislamiento eléctrico, mediante un diodo emisor infrarrojo, ópticamente acoplado a un detector monolítico (fototriac), desempeñando la función de un circuito interno de cruce

por cero que conmuta al Triac sólo, cuando el diodo está energizado y en los cruces por cero de la señal de CA que nos proporciona CFE.

El circuito de potencia (Figura 3.11) recibe un pulso de control proveniente del microcontrolador, cuando el pulso se encuentra en un nivel alto (5V), hará circular una corriente por el diodo emisor infrarrojo, lo que provocará que el fototriac entre en conducción en el siguiente cruce por cero de tensión de la red eléctrica. Cuando esto sucede se comporta como un interruptor cerrado enviando corriente a la entrada G (gate) del Triac NTE5695 [URL4] a su vez éste envía corriente al horno eléctrico encendiéndolo. Es importante mencionar que se instaló un disipador y un ventilador que está removiendo el calor generado por el Triac ya que maneja potencias medias por un periodo largo de tiempo, y esto puede repercutir en su funcionamiento.

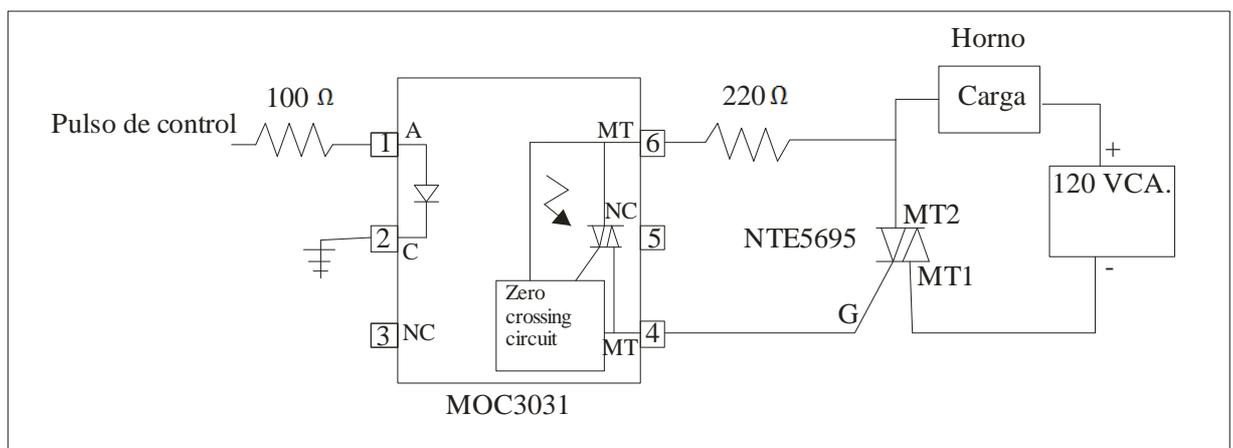


Figura 3.11. Circuito de potencia.

### 3.5. Programación con LabVIEW

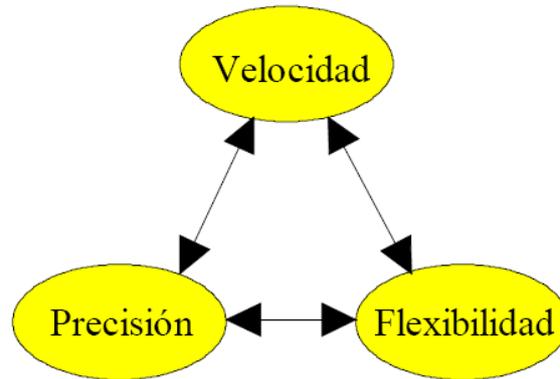
Una vez realizado el acondicionamiento de la señal del termopar y la etapa de potencia, se procedió a leer y mandar señales por medio de la PC, a través de la TAD NI USB 6008. Para realizar esto se ocupó *LabVIEW* 8.5.

Primero se leyeron los datos provenientes de la TAD NI USB 6008, mediante tareas (*DAQmx Task*), se creó una tarea la cual se configuró con tres canales analógicos de entrada (AI0, AI1 y AI2) en un rango de 0 a 10 volts, los valores de voltaje de las entradas se promediaron y después se multiplicaron para obtener la temperatura del horno.

Para mandar una señal de voltaje al microcontrolador, la cual será la que realice el control de encendido apagado, se creó una tarea la cual genera una señal analógica (AO0) en un rango de 0 a 5 volts, en la que se escribe el valor de voltaje.

#### 3.5.1. Diseño del controlador difuso

El diseño de un controlador basado en lógica difusa supone establecer un compromiso entre diversos criterios de diseño (Figura 3.12).



**Figura 3.12.** Compromiso de diseño.

Para conseguir los resultados deseados debe plantearse la velocidad de respuesta del sistema de control, la cual vendrá limitada por otros factores, como el grado de precisión requerido o la flexibilidad del diseño. Si deseamos una alta precisión en el control necesitaremos una gran cantidad de conjuntos para cada variable y un alto número de reglas, lo que exigirá una elevada cantidad de cálculos, causando un aumento del tiempo de respuesta. Si además deseamos que el sistema de control tenga flexibilidad de adaptación a los cambios del sistema y aprender de los errores cometidos, serán necesarios muchos más cálculos adicionales [5].

Algunos [1] [29] recomiendan los siguientes pasos en el diseño de un controlador difuso:

1. Identificar las variables de entrada y salida del sistema.
2. Un modelo lingüístico puede ser creado con base en el conocimiento de un humano experto.
3. Definir el universo de discurso de acuerdo a la variable lingüística y dividir el universo de discurso, asignando etiquetas a los valores difusos (conjuntos difusos).
4. Asignar funciones de pertenencia para cada conjunto difuso.
5. Asignar una relación entre las entradas y las salidas, formando una base de reglas.
6. Determinar un método de defusificación.

Considerando lo anterior, diseñaremos nuestro controlador difuso. Primero definiremos las variables de entrada y salida de nuestro controlador.

Se utilizaron dos variables de entrada, la primera es el error que se refiere a la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura de referencia (deseada), como a continuación se muestra:

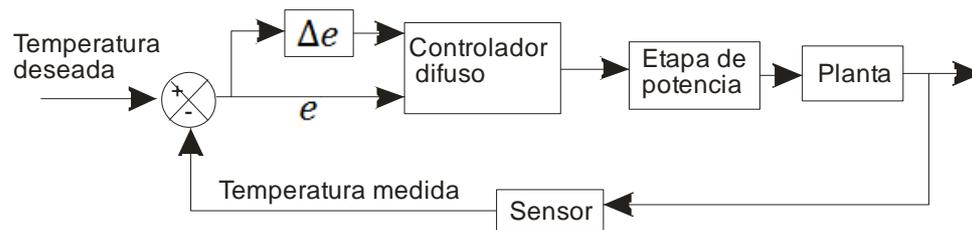
$$\text{error} = e = \text{temperatura deseada} - \text{temperatura medida}$$

La segunda variable de entrada es el cambio del error, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$\text{cambio de error} = \Delta e = \text{error actual} - \text{error anterior}$$

Se eligieron estas variables de entrada debido a que la variable  $e$  cuantifica que tan lejos o cerca se encuentra la temperatura de la referencia y la variable  $\Delta e$  cuantifica que tan rápido o lento cambia la temperatura. Como variable de salida del controlador se toma al voltaje en un rango de 0 a 5 volts, debido a que es el rango de salida que maneja la TAD NI USB 6008, ya que el microcontrolador transforma el voltaje a ciclos.

El controlador está constituido, como se muestra en la Figura 3.13, este controlador es difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo, debido al tipo de preprocesado de sus entradas [21] [5].



**Figura 3.13.** Controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo

Se utilizó la herramienta (*TOOLBOX*) difusa de *LabVIEW* 8.5 para diseñar el controlador difuso, en el que se definen las entradas, salidas, funciones de pertenecía, base de reglas, dispositivo de inferencia y método de defusificación. Toda esta información es guardada en un archivo para posteriormente cargarlo en el controlador difuso.

### 3.5.1.1. Fusificación y diseño de las funciones de membresía

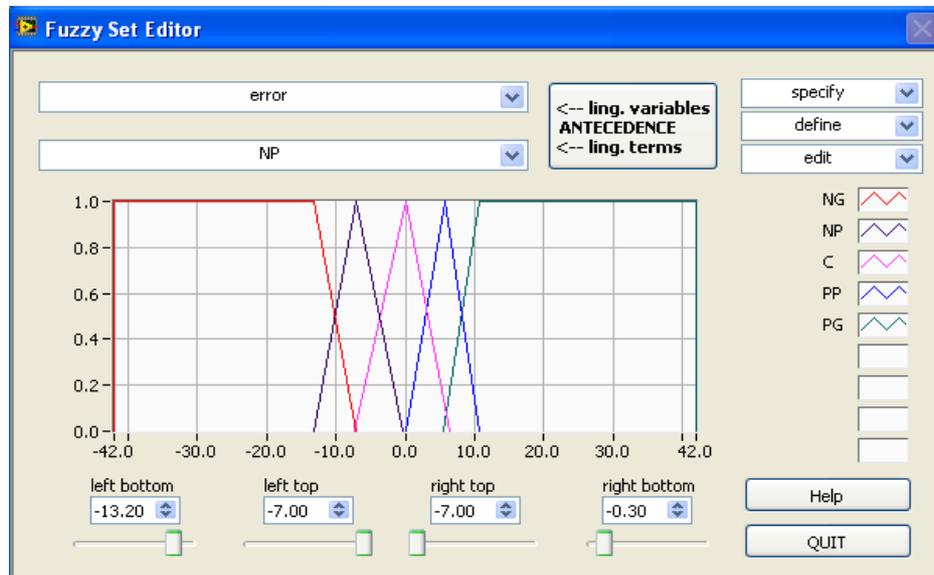
Una vez que tenemos definidas nuestras variables de entrada y salida, proseguimos a defusificarlas para que el controlador las pueda procesar.

Definimos el universo de discurso sobre el que se definen nuestras variables y después las particionamos en conjuntos difusos caracterizados por funciones de membresía; por lo que nuestras variables de entrada y salida serán llamadas variables lingüísticas.

Para nuestra variable lingüística “error ( $e$ )” definimos un universo de discurso en el rango de  $-42$  a  $42$ , debido a que a bajas temperaturas ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), al prender el horno tarda en llegar a la temperatura deseada, quedándose a  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  por debajo de ésta, y en ocasiones cuando se llega a temperaturas menores de  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un lapso de tiempo muy corto, las sobrepasa con un error de hasta  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El universo de discurso se dividió en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango, como se muestra en la tabla IV y en la Figura 3.14:

**Tabla IV.** Descripción de los conjuntos difusos del error.

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango
NG	Error negativo grande	$-42$ a $-7$
NP	Error negativo pequeño	$-13.2$ a $-0.3$
C	Error cero	$-7.4$ a $6.4$
PP	Error positivo pequeño	$0$ a $10.8$
PG	Error positivo grande	$5.5$ a $42$



**Figura 3.14.** Funciones de pertenencia del error.

Para nuestra variable lingüística “cambio de error ( $\Delta e$ )” definimos un universo de discurso en el rango de -4.5 a 4.5, debido a que el cambio del error no es muy grande, solo se presentan cambios de error de ( $\pm 2.2$ ) cuando sube de forma muy rápida, que se presenta al inicio con rampas de temperatura con pendientes muy grandes, y cuando desciende abruptamente desde temperaturas mayores a 880 °C. El universo de discurso se dividió en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango como se muestra en la tabla V y en la Figura 3.15:

**Tabla V.** Descripción de los conjuntos difusos del cambio de error.

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango
NG	Cambio de error negativo grande	-4.5 a -0.45
NP	Cambio de error negativo pequeño	-0.9 a 0
C	Cambio de error cero	-.45 a .45
PP	Cambio de error positivo pequeño	0 a 0.9
PG	Cambio de error positivo grande	.45 a 4.5

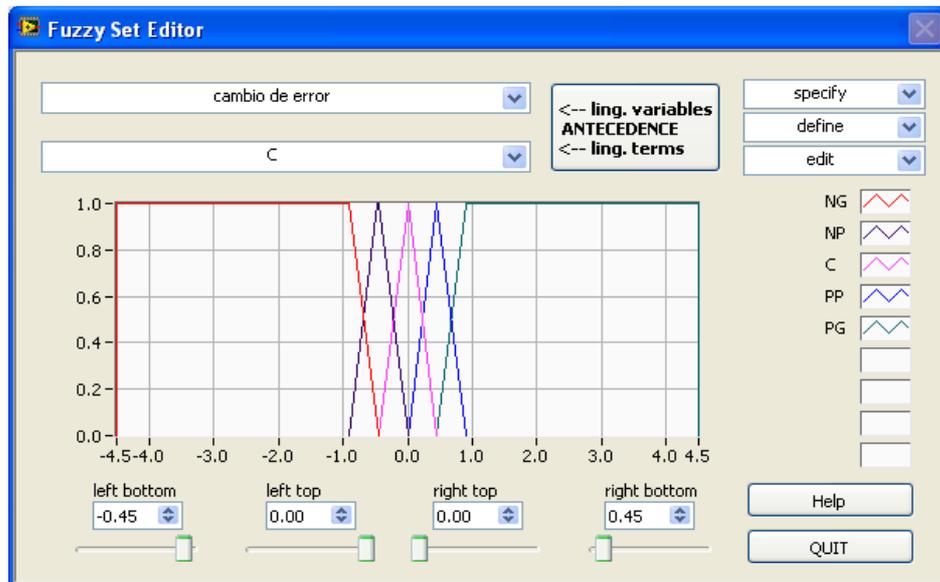


Figura 3.15. Funciones de pertenencia del cambio de error.

Como se observa en la Figura 3.14 y Figura 3.15, los conjuntos difusos PP, C y NP están caracterizados por funciones de pertenencia tipo triangular y los conjuntos difusos PG y NG están caracterizados por funciones tipo trapezoidal.

Para nuestra variable lingüística “voltaje” definimos un universo de discurso en el rango de 0 a 5, debido a que la TAD NI USB 6008 tiene un rango de salida de voltaje de 0 a 5 volts. El universo de discurso se dividió en 5 conjuntos difusos con su respectivo rango, como se muestra en la tabla VI y en la Figura 3.16:

Tabla VI. Descripción de los conjuntos difusos de la salida.

Nombre del conjunto difuso	Descripción	Rango
MB	Voltaje muy bajo	0 a 1.25
B	Voltaje bajo	0.1 a 2.5
M	Voltaje medio	1.38 a 3.8
MA	Voltaje medio alto	2.56 a 5
A	Voltaje alto	3.7 a 5

Como se observa en la Figura 3.16, los conjuntos difusos B, M y MA están caracterizados por funciones de pertenencia tipo triangular y los conjuntos difusos MB y A están caracterizados por funciones tipo trapezoidal.

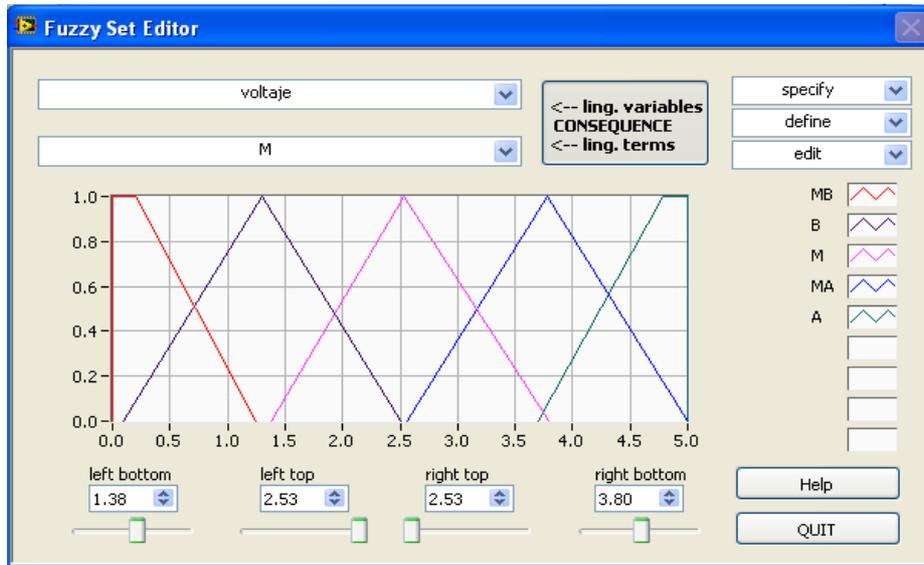


Figura 3.16. Funciones de membresía de la salida.

3.5.1.2. Creación de la base de reglas

La construcción de la base de reglas surge de la observación y análisis del sistema, a partir de ahí se realizó una inferencia difusa, asociando a cada una de las posibles combinaciones de las entradas un valor de salida.

La base de reglas siguió el formato tipo Mamdani (definición 2.1), donde en nuestro controlador se conformaría de la siguiente manera, por ejemplo:

If  $e$  es NG y  $\Delta e$  es NG then voltaje es MB.

Para expresar las 25 reglas de una forma más simplificada, se agruparon en una matriz de reglas (Tabla VII).

Tabla VII. FAM del controlador difuso de temperatura.

			$\Delta e$			
		<b>PG</b>	<b>PP</b>	<b>C</b>	<b>NP</b>	<b>NG</b>
	<b>PG</b>	A	A	A	A	A
	<b>PP</b>	A	A	MA	MA	M
$e$	<b>C</b>	MA	M	M	M	B
	<b>NP</b>	M	B	B	MB	MB
	<b>NG</b>	B	MB	MB	MB	MB

El dispositivo de inferencia utilizado fue el de Max-min, el cual interpreta las reglas del tipo If-then con el formato de reglas tipo Mamdani de la siguiente manera:

Sea  $A_1^k, A_2^k$  y  $B^k$  conjuntos difusos sobre un universo de discurso  $U$  y  $x = (x_1 \dots x_n)^T \in U_1 \times \dots \times U_n$ , que son las entradas, mientras que  $y$  es la salida del sistema difuso, definido para  $k$  reglas [29], como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\mu_{B^k}(y) = \max^k \left[ \min \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2) \right] \right] \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (3.3)$$

La ecuación 3.3 toma el valor mínimo de pertenencia de dos conjuntos difusos, en el conjunto consecuente de la regla asociada, después realiza una unión de los demás conjuntos consecuentes de acuerdo a cada regla, véase Figura 3.17.

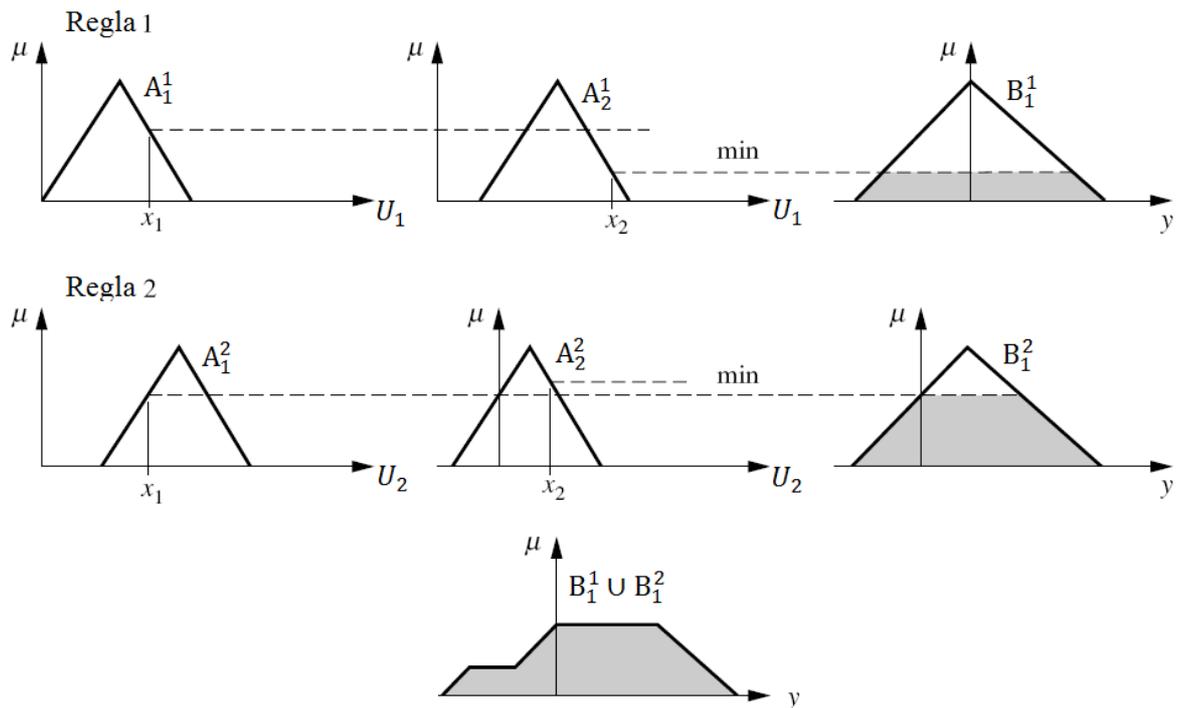


Figura 3.17. Método Max-min.

### 3.5.1.3. Identificación del método de defusificación

El objetivo de defusificar consiste en obtener un valor no difuso, en nuestro caso un voltaje. Para este controlador se utiliza el método del centroide, debido a que es el más usado en aplicaciones de control, obteniendo buenos resultados en diversas aplicaciones [8], [14], [28], [22], en el que la salida final será el centro de gravedad del área total resultante del dispositivo de inferencia Max-min, el método del centroide no requiere gran capacidad computacional y la salida abarca mayores funciones de pertenencia, con respecto a otros métodos de defusificación.

La base de reglas, el dispositivo de inferencia y el método de defusificación se implementaron en la herramienta de lógica difusa de *LabVIEW* 8.5, como se muestra en la Figura 3.18.

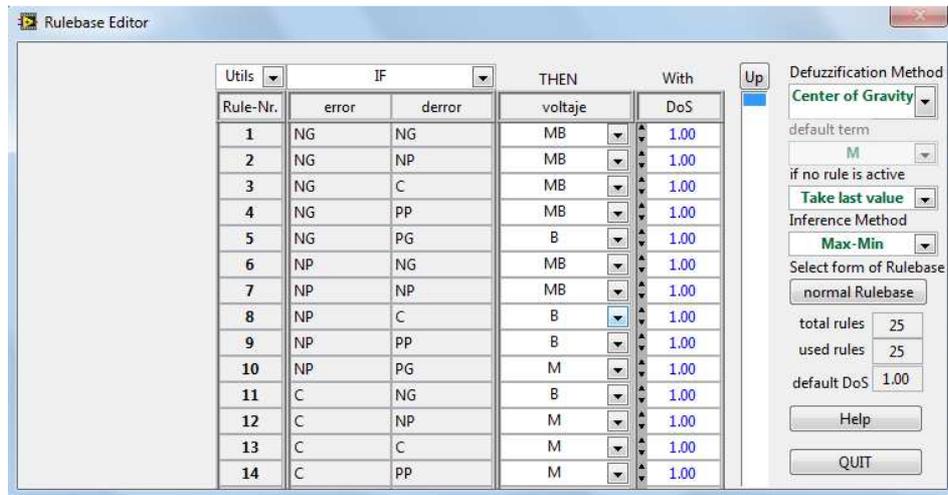


Figura 3.18. Editor de base de reglas.

La superficie de control es una gráfica en tres dimensiones donde el dominio son las entradas, en nuestro caso  $e$  y  $\Delta e$  y el codominio que es el resultado de salida de control: voltaje. Esto nos permite visualizar la relación, forma y comportamiento que sigue nuestra salida de control (Figura 3.19, realizada en MATLAB), en ésta se observa que la zona amarilla presenta un error muy grande lo que produce una salida de 5 volts, pero al aproximarse a un error de cero disminuye el voltaje. Cuando el error y el cambio de error se encuentran cerca de cero el voltaje oscila alrededor de 2.55 volts, la superficie azul corresponde a un error y cambio de error con valores muy negativos, lo que implica valores de voltaje de cero.

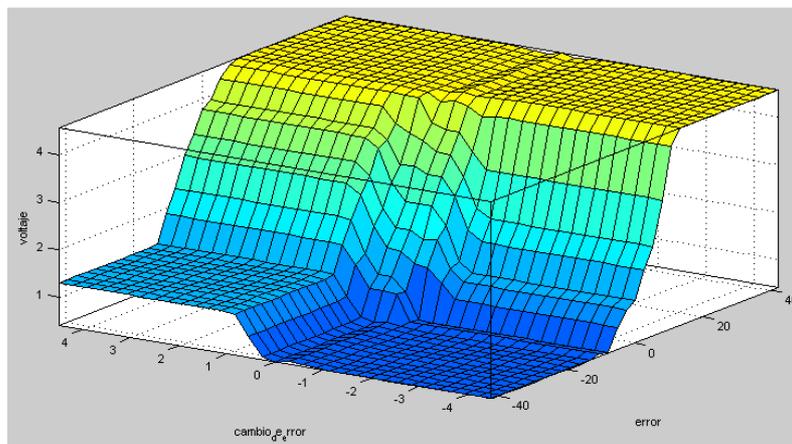


Figura 3.19. Superficie de control.

También se utilizó la herramienta de lógica difusa de *LabVIEW 10* (Figura 3.20), para simular y observar el valor de voltaje en relación a las entradas, la posición en la superficie de control y las reglas que son utilizadas.

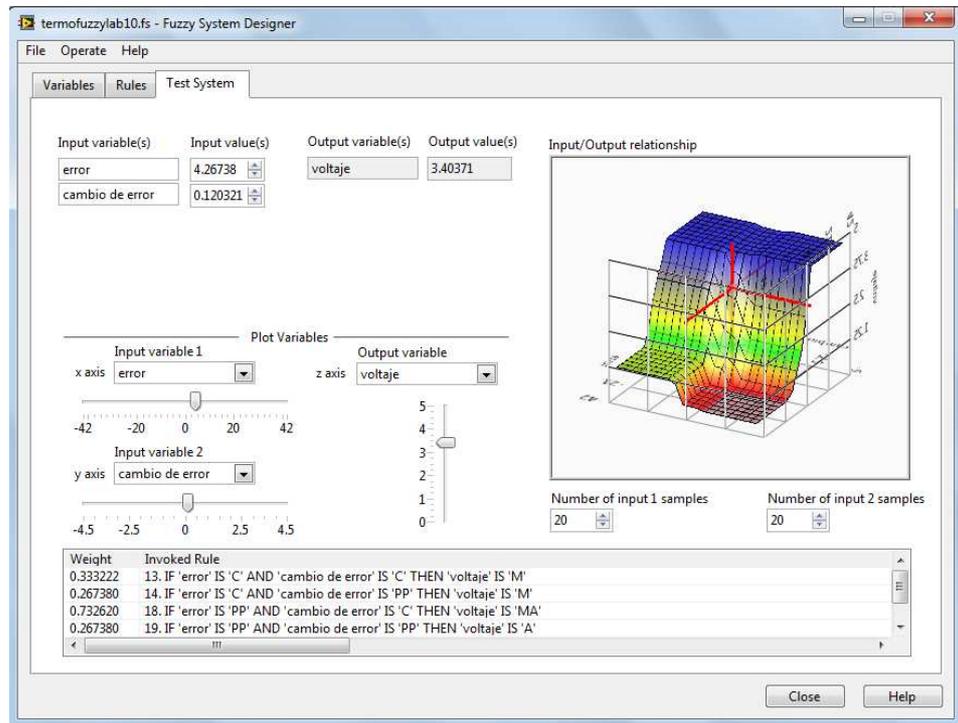


Figura 3.20. Simulación en LabVIEW 10.

Al controlador difuso se le agregaron ganancias (Figura 3.21) para amplificar el error ( $e$ ) y el cambio del error ( $\Delta e$ ), además de minimizar la salida de voltaje en las rampas de bajada. Para las ganancias se usaron los siguientes valores:  $g_1 = 1.442$ ,  $g_2 = 1.187$  y  $g_3 = 0.959$ , los cuales fueron encontrados mediante prueba y error.

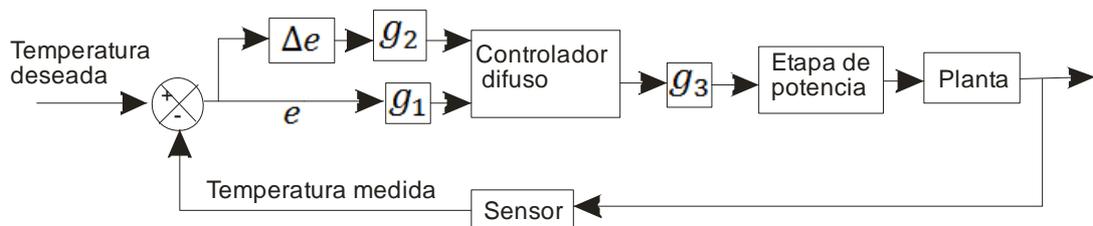


Figura 3.21. Sistema de control implementado.

### 3.5.2. Programa de control

Todo el programa se hizo en *LabVIEW 8.5*, para realizar una interfaz de usuario que permita introducir la temperatura deseada que siga el horno, en forma de rampas o pausas, con la opción de permitir un número máximo de 8 rampas de subida o pausas y 8 rampas de bajada o pausas, introduciendo la temperatura inicial, temperatura final, el tiempo de inicio y tiempo de término. Estas rampas de temperatura que introduce el usuario es la temperatura deseada, con la cual se obtiene el error y a su vez el cambio de error, entradas para el controlador difuso. *LabVIEW* tiene un bloque de control difuso, al que solo hay que introducir las entradas y cargar el archivo que se realizó en la herramienta de lógica difusa (ver página A-5).

La interfaz proporciona al usuario otras opciones (Figura 3.22):

- Led (verde) en cada rampa, indica que se encuentra realizando esa rampa de temperatura.
- Solo monitorear.
- Apagado natural (sin rampas, ni influencia del controlador difuso), apaga el horno y detiene el programa hasta llegar a la temperatura deseada.
- Muestra la hora de inicio, hora actual y fecha.
- Grafica la temperatura del horno y la temperatura de referencia, en el dominio del tiempo (seg.).
- Guarda los datos de temperatura del horno, tiempo y temperatura de referencia en un archivo con extensión “.lvm”.
- Indicador de la potencia eléctrica que está empleando el horno.
- Termómetro, que indica la temperatura del horno.
- (*OFF\_Temp*) se apaga al llegar a una temperatura deseada, sin el uso del control difuso, manejando toda la potencia del horno.
- Botón de paro (STOP), el cual detiene el proceso y apaga el horno.
- Cuando termina de realizar las rampas de temperatura asignadas, apaga el horno y se detiene el programa.

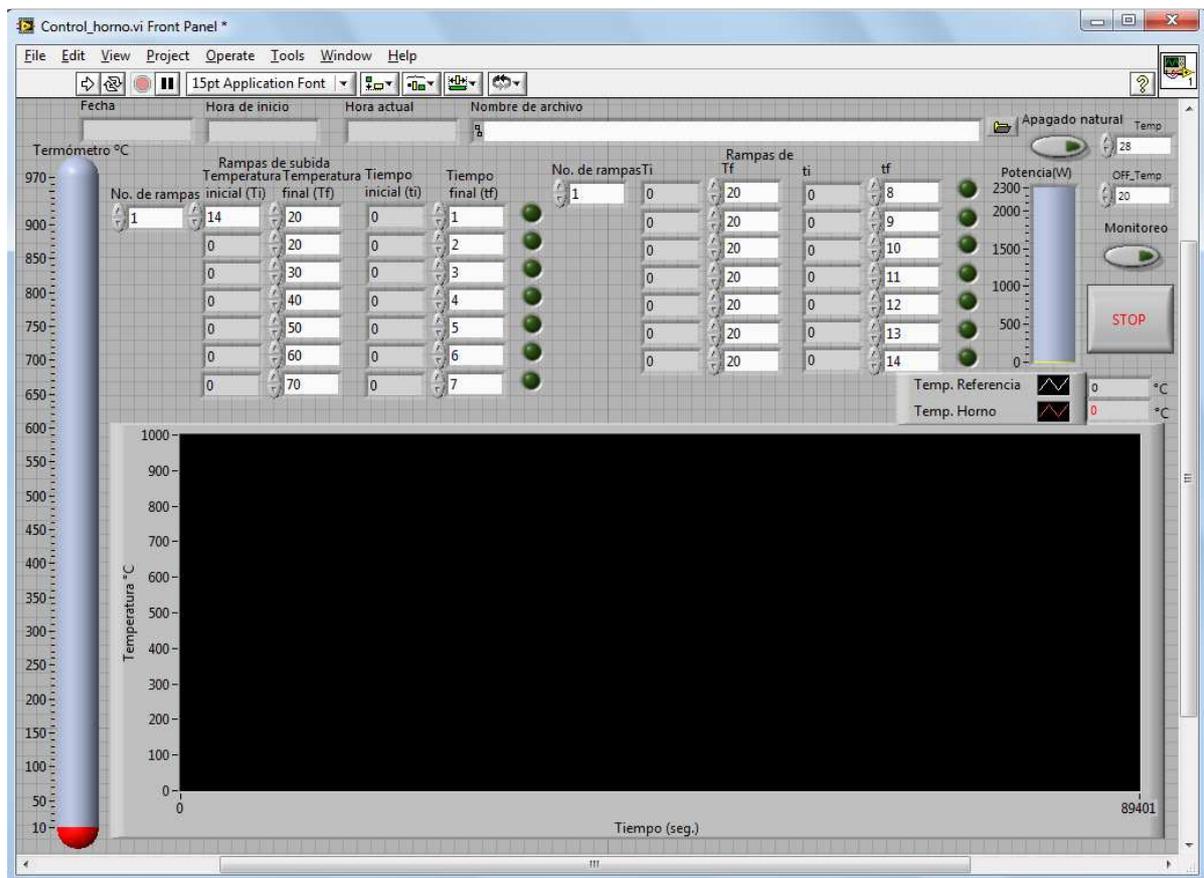


Figura 3.22. Interfaz de usuario.

## Capítulo 4

### 4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos del controlador difuso a través de la interfaz de usuario con tres diferentes trayectorias de temperatura o quema, realizadas una vez que el sistema fue terminado, además se realizó un sensado de la temperatura con el fin de hacer un comparativo entre las mediciones hechas por el sistema de control difuso y un equipo de marca de mayor confiabilidad, como, el multímetro UNIT-71E.

En la Figura 4.1 se muestra al sistema de control difuso en operación realizando una quema de sancocho, introducida y monitoreada en una PC a través de la interfaz de usuario, véase Figura 4.2.



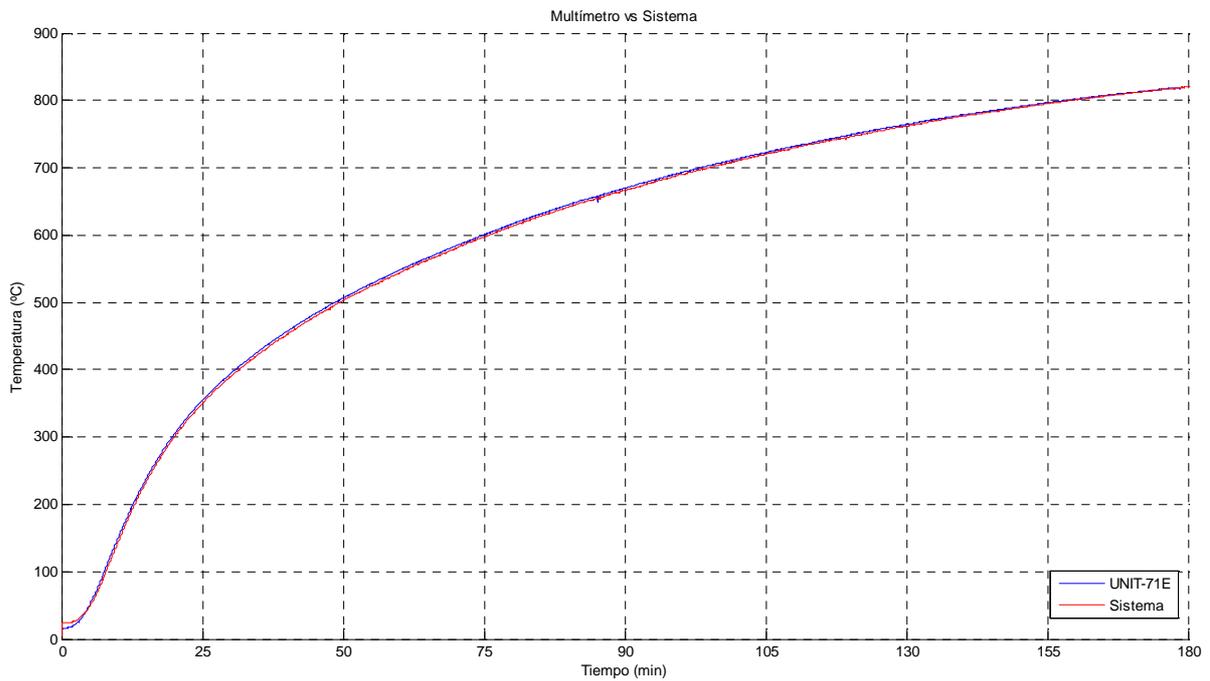
**Figura 4.1.** Sistema de control difuso en operación.



**Figura 4.2.** Interfaz de usuario y PC.

## 4.1. Medición de temperatura

Es necesario comprobar la temperatura medida por el controlador difuso con un sistema confiable, como el multímetro UNIT-71E, esto se hizo comparando el voltaje entregado por el termopar el cual corresponde a una temperatura, con la temperatura que muestra el sistema de control difuso, esto se realizó con el objetivo de calibrar y verificar la precisión del sistema. En esta prueba (Figura 4.3) realizada a 820 °C manejando la máxima potencia del horno, la diferencia entre las temperaturas no se mantiene constante, por lo que se obtuvo un error promedio de 2.2 °C por debajo de la medición del multímetro UNIT-71E mostrada en la Figura 4.4. El error es aceptable para el rango de temperaturas que manejamos.



**Figura 4.3.** Gráfica comparativa entre el multímetro UNIT-71E y el sistema de control difuso.

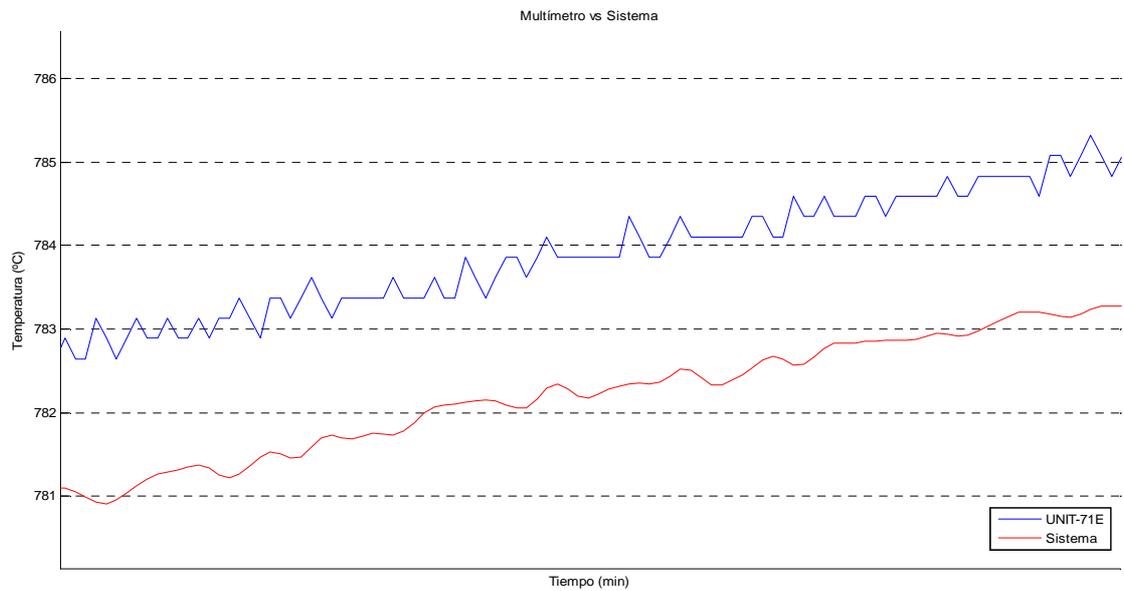


Figura 4.4. Acercamiento del error de medición.

## 4.2. Interfaz del sistema

En la Figura 4.5 se muestra la interfaz de usuario en funcionamiento, realizando una quema típica de sancocho, en la que se muestra la rampa que está realizando con una luz verde, en este caso es de bajada de 580 °C a 220 °C y también se muestra la potencia eléctrica en las resistencias del horno.

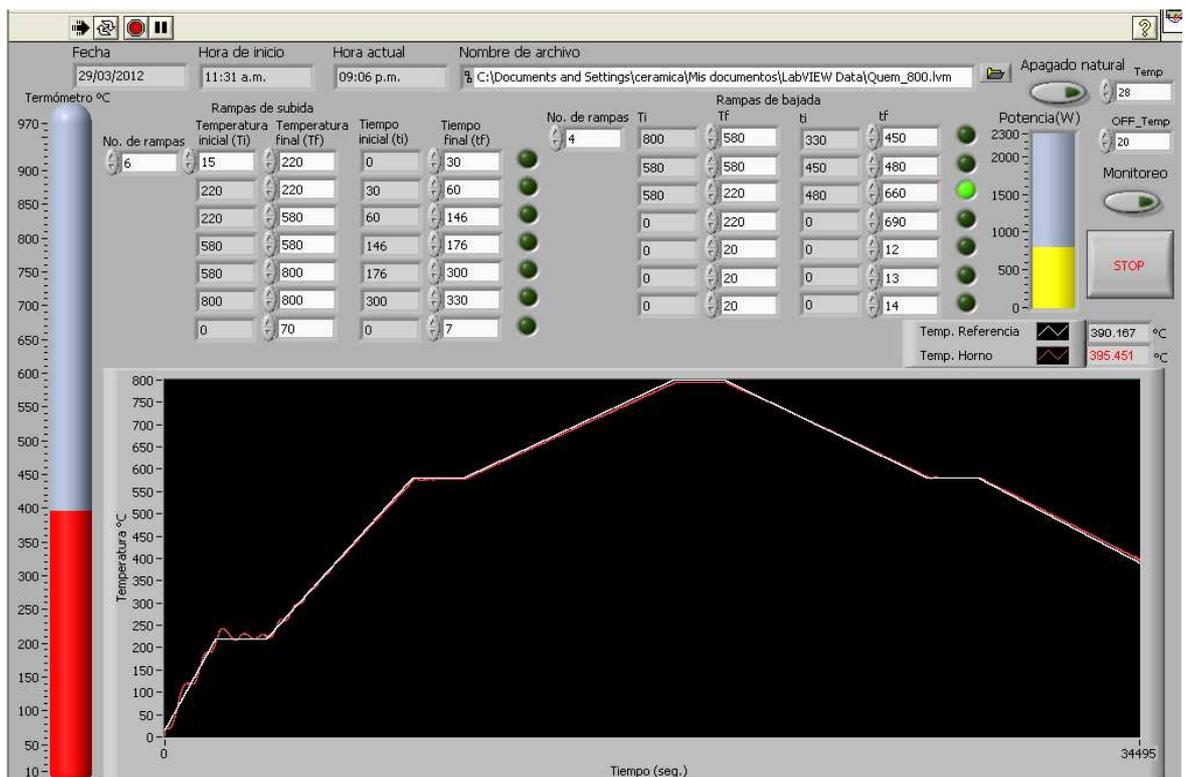


Figura 4.5. Interfaz de usuario en funcionamiento.

En la Figura 4.6 se muestra una quema típica de sancocho terminada, en la Figura 4.7 se realizó una trayectoria de temperatura similar a la del sancocho pero con una rampa de subida adicional de 800 °C a 940 °C. En la Figura 4.8 se muestra una trayectoria de temperatura similar, solo que la última rampa de subida es de 800 °C a 900 °C.

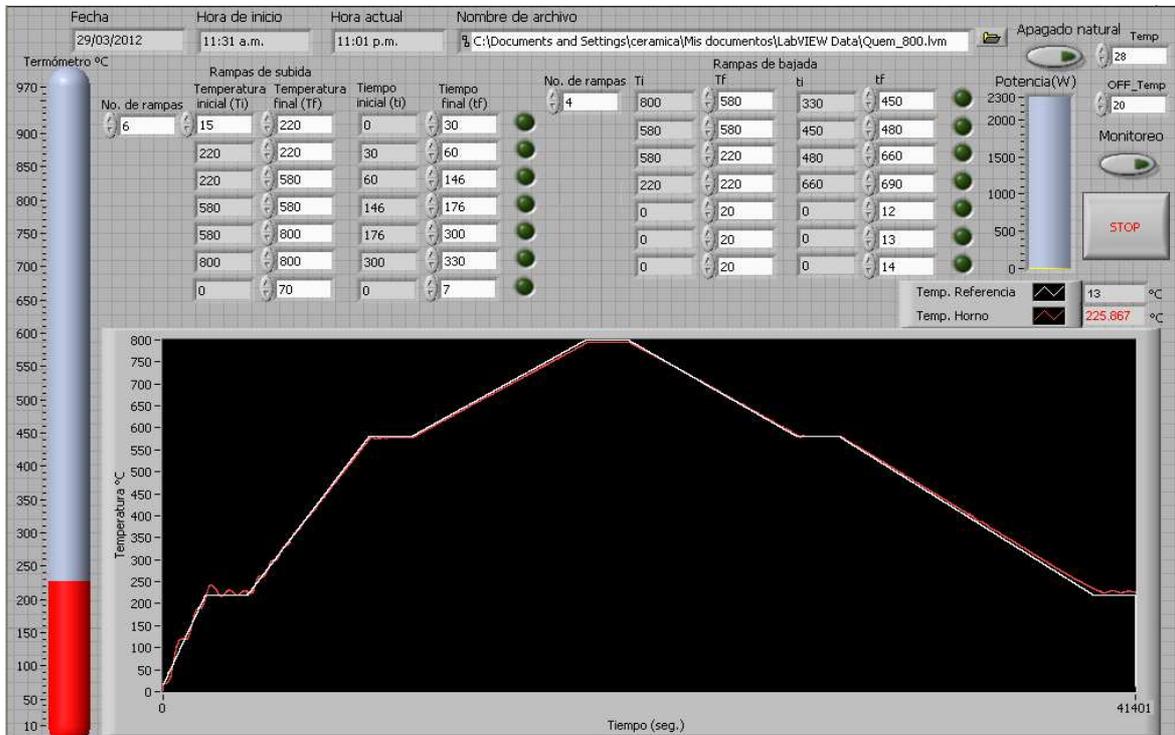


Figura 4.6. Quema típica de sancocho.

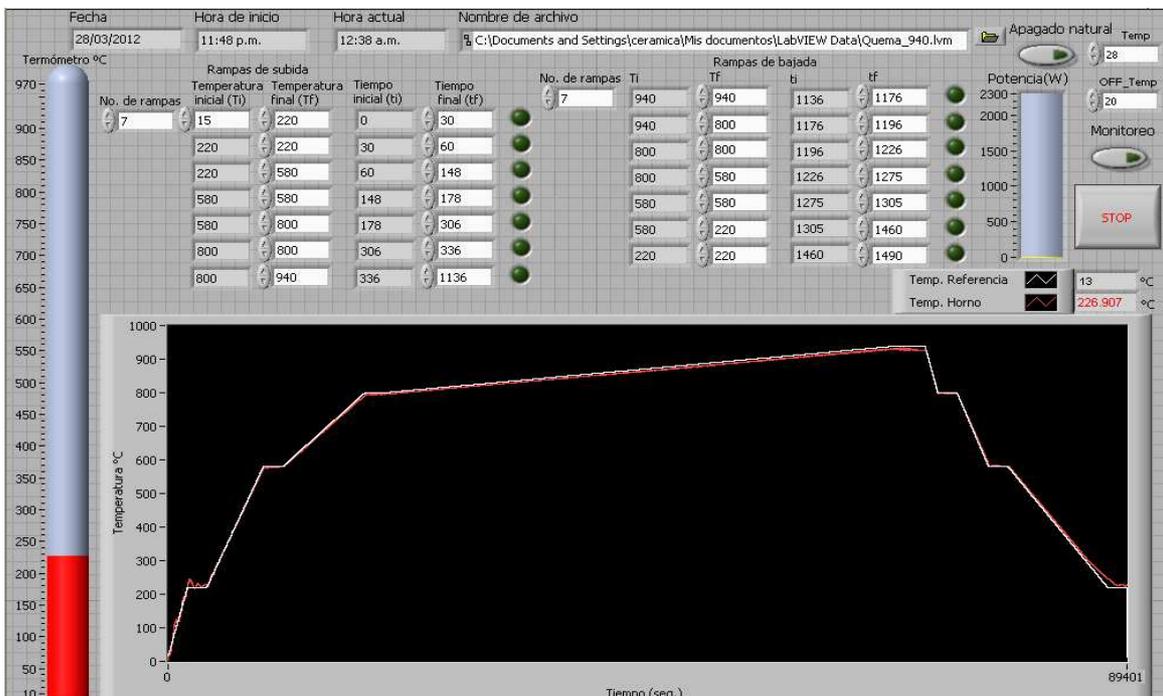


Figura 4.7. Trayectoria de temperatura con máximo de 940 °C.

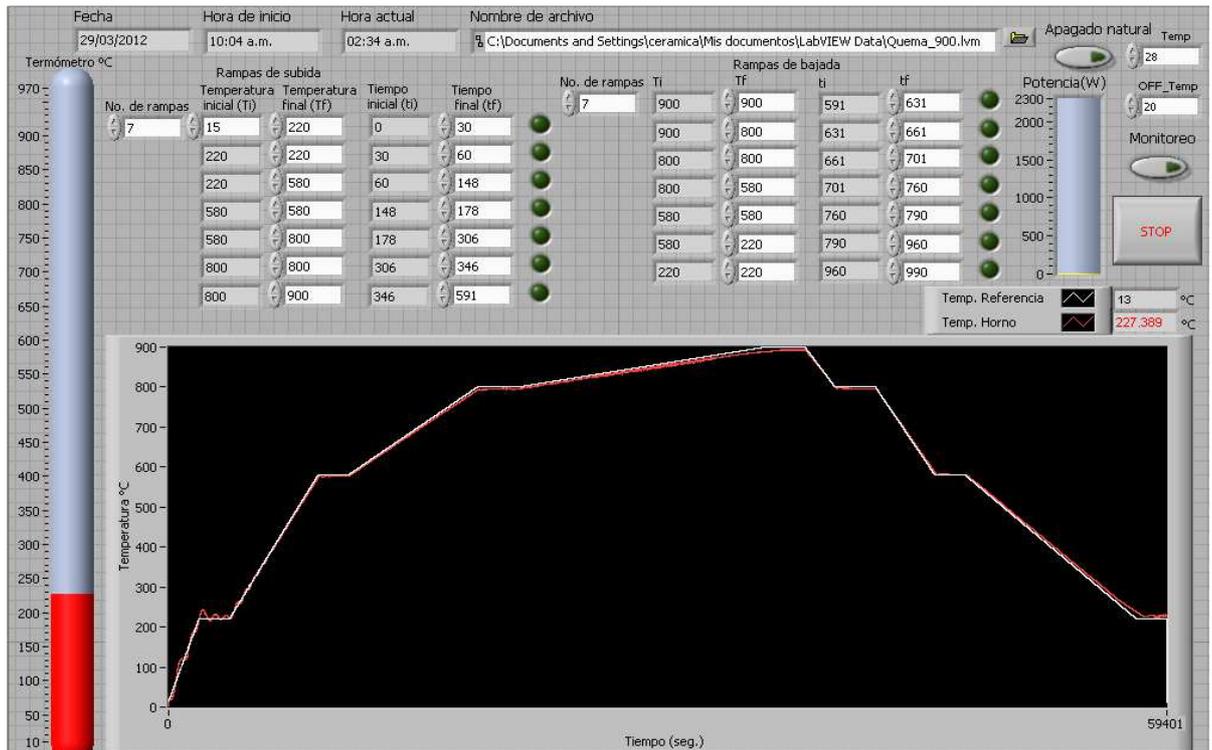


Figura 4.8. Trayectoria de temperatura con máximo de 900 °C.

### 4.3. Análisis de resultados del controlador difuso

Con el archivo con extensión “.lvm” generado, se graficaron en MATLAB tres trayectorias de temperatura con diferentes temperaturas máximas, en las cuales se grafica la temperatura del horno y la temperatura de referencia, en el dominio del tiempo (minutos).

En la Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 se observa que la temperatura del horno sigue la temperatura de referencia en todo momento a pesar de las fugas de calor, se presentó un error menor a 5 °C en ciertas zonas y un error mayor en otras zonas. En las rampas de subida superiores a 560 °C y pausas de 940 °C, 900 °C, 800 °C y 580 °C, la temperatura del horno se mantiene por debajo de la referencia.

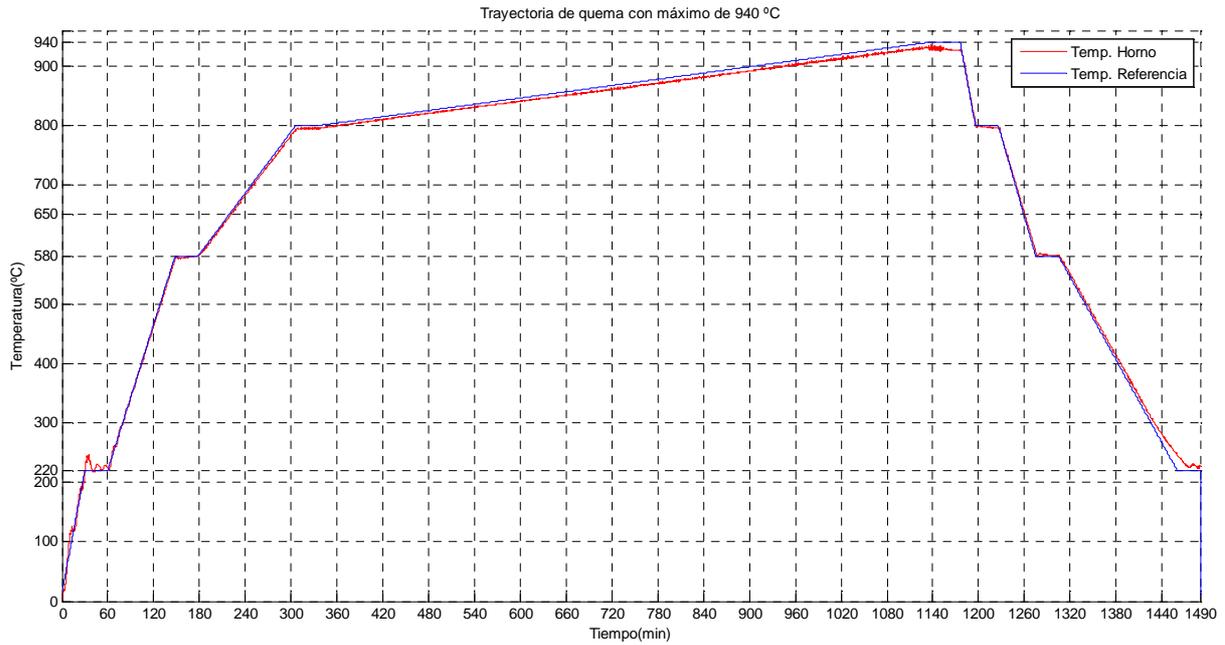


Figura 4.9. Perfil de temperatura con máximo de 940 °C.

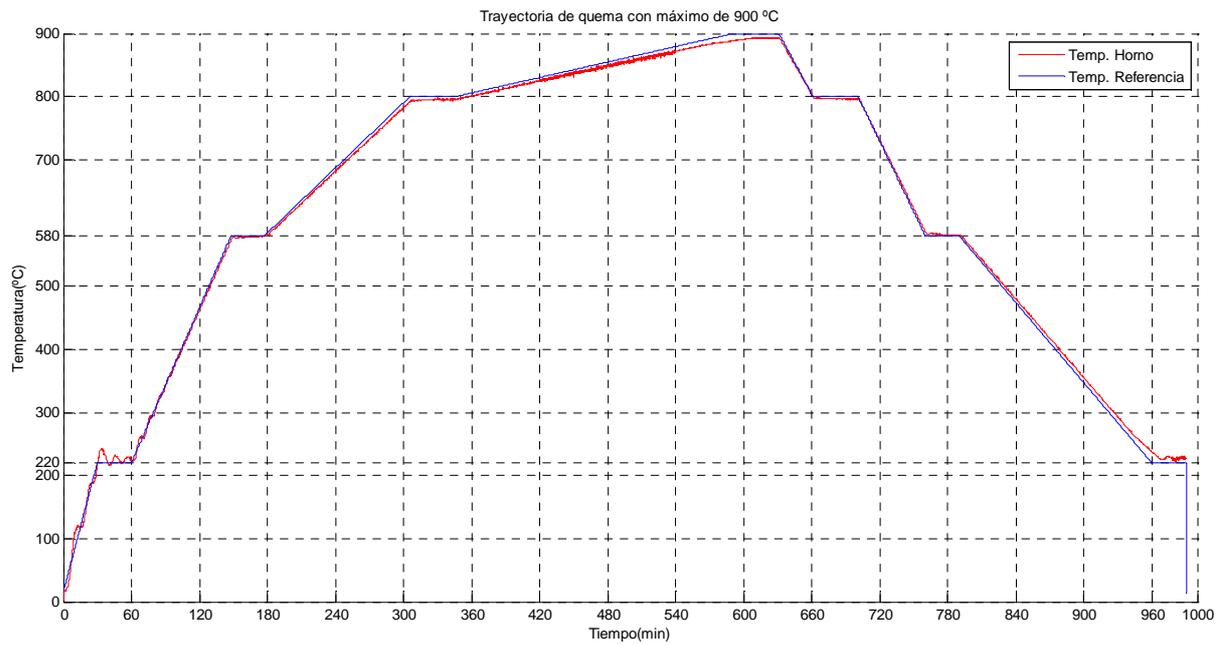
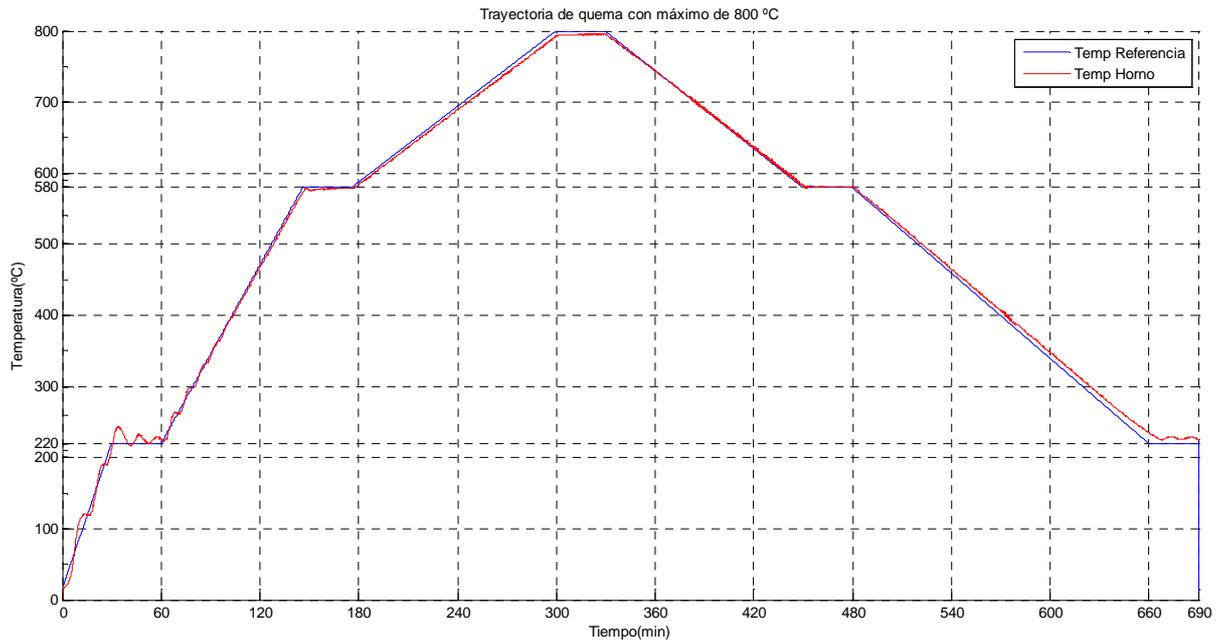
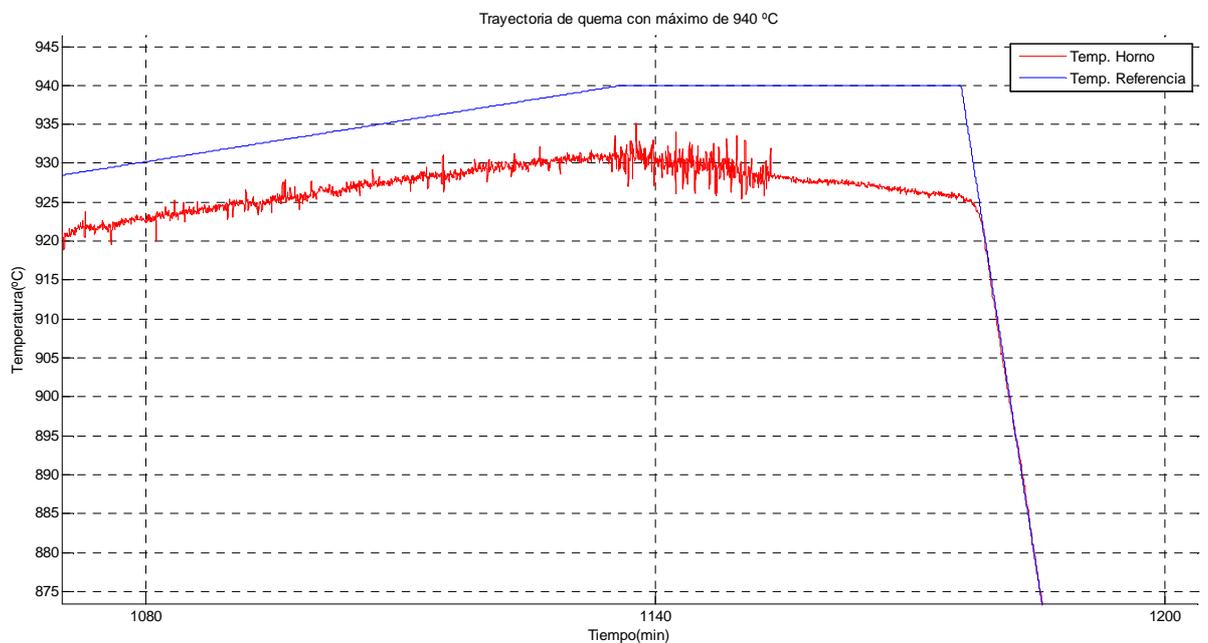


Figura 4.10. Perfil de temperatura con máximo de 900 °C.



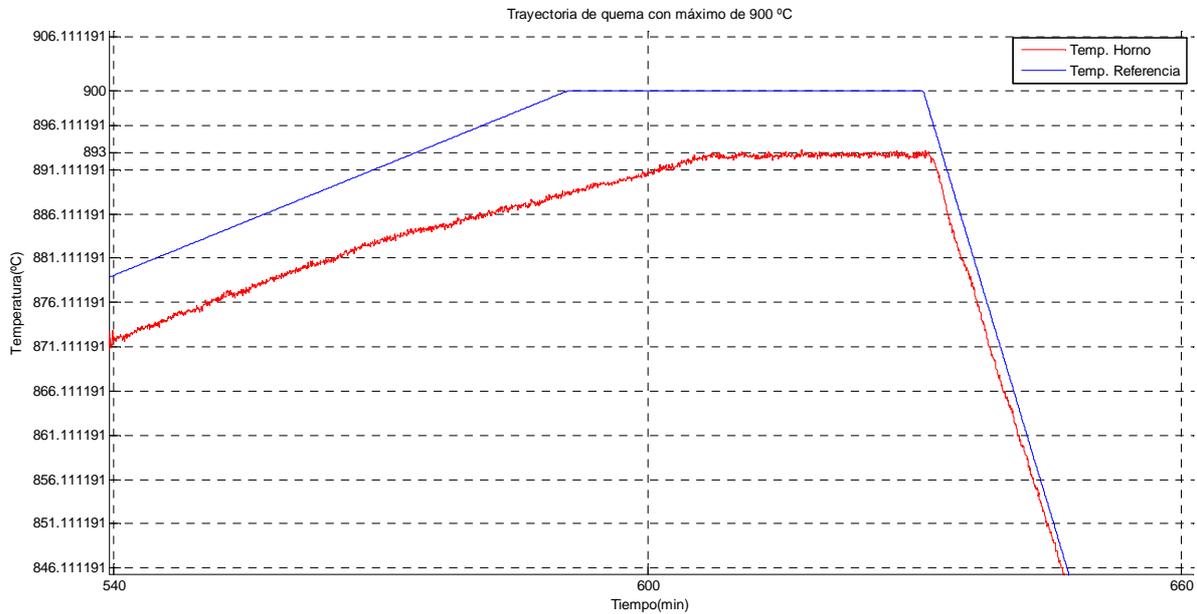
**Figura 4.11.** Perfil de temperatura con máximo de 800 °C.

Para observar mejor el error que presenta la temperatura del horno con respecto a la temperatura de referencia, se procedió a realizar acercamientos en zonas de interés. En la Figura 4.12 se observa que presenta un error promedio de 9 °C en la rampa de subida. En la pausa oscila con un mínimo de 7 °C de error, después desciende hasta llegar a 15 °C de error, el cual parece ser bastante, pero es menos del 2% de 940 °C esto es debido a que las perturbaciones son mayores a temperaturas altas.

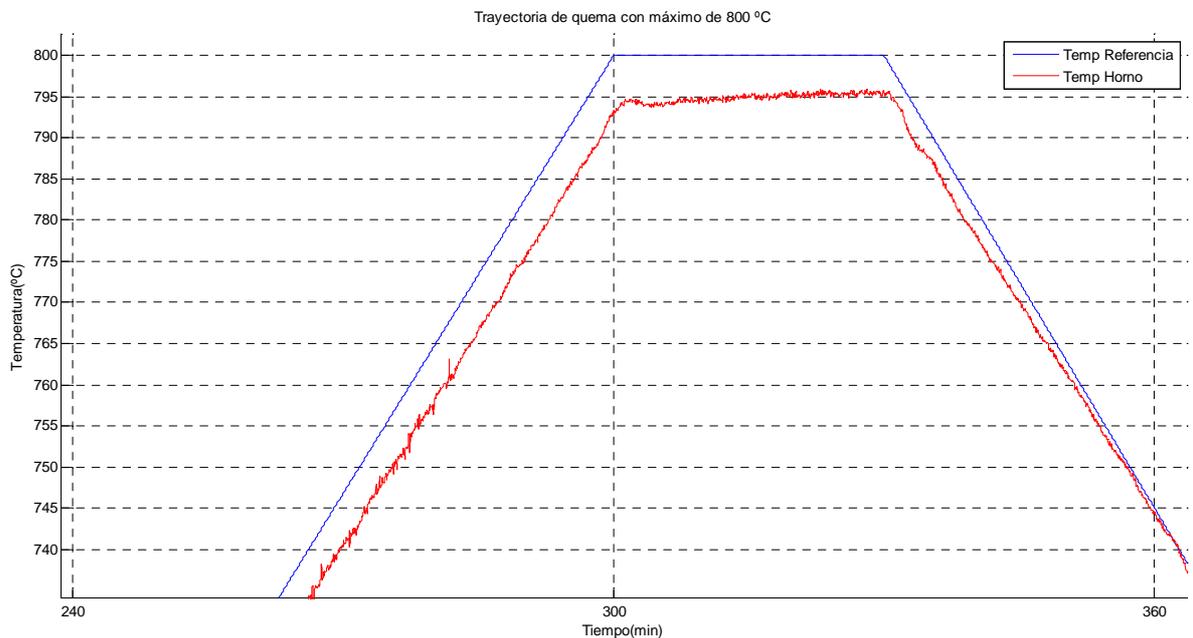


**Figura 4.12.** Pausa en 940 °C.

En la Figura 4.13 podemos observar un error máximo de 11 °C en la intersección de la rampa de subida y la pausa, para luego estabilizarse en 893 °C, 7 °C por debajo de la referencia. En la Figura 4.14 la rampa de subida presenta un error máximo de 6 °C y en la pausa un error promedio de 5 °C por debajo de la referencia, en este caso se estabiliza más rápido, que en la pausa de 900 °C.



**Figura 4.13.** Pausa en 900 °C.



**Figura 4.14.** Pausa en 800 °C.

Para el controlador difuso, resulta difícil seguir la trayectoria de una rampa de subida, por lo que se analizó su comportamiento en esas zonas.

En la Figura 4.15 se presenta un error creciente con un máximo de 7 °C en la primera rampa de subida, en la pausa tiene un error promedio de 5 °C y en la segunda rampa de subida tiene un error mínimo de 5 °C, el cual crece poco a poco hasta llegar a un error máximo de 11 °C cuando se alcanzan los 900 °C.

En la Figura 4.16 se presenta un error creciente con un máximo de 5 °C en la primera rampa de subida, en la pausa tiene un error máximo de 4 °C, el cual se reduce hasta llegar a 1 °C. En la segunda rampa de subida tiene un error mínimo de 1 °C, el cual crece poco a poco hasta llegar a un error máximo de 6 °C cuando se alcanzan los 800 °C.

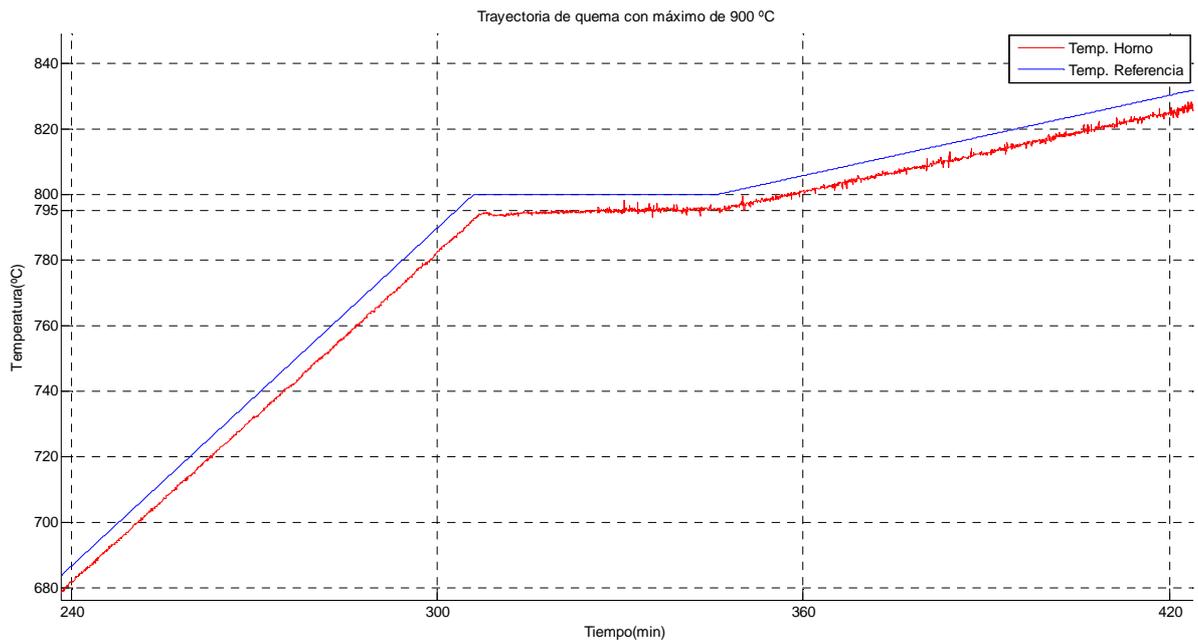


Figura 4.15. Pausa en 800 °C de subida.

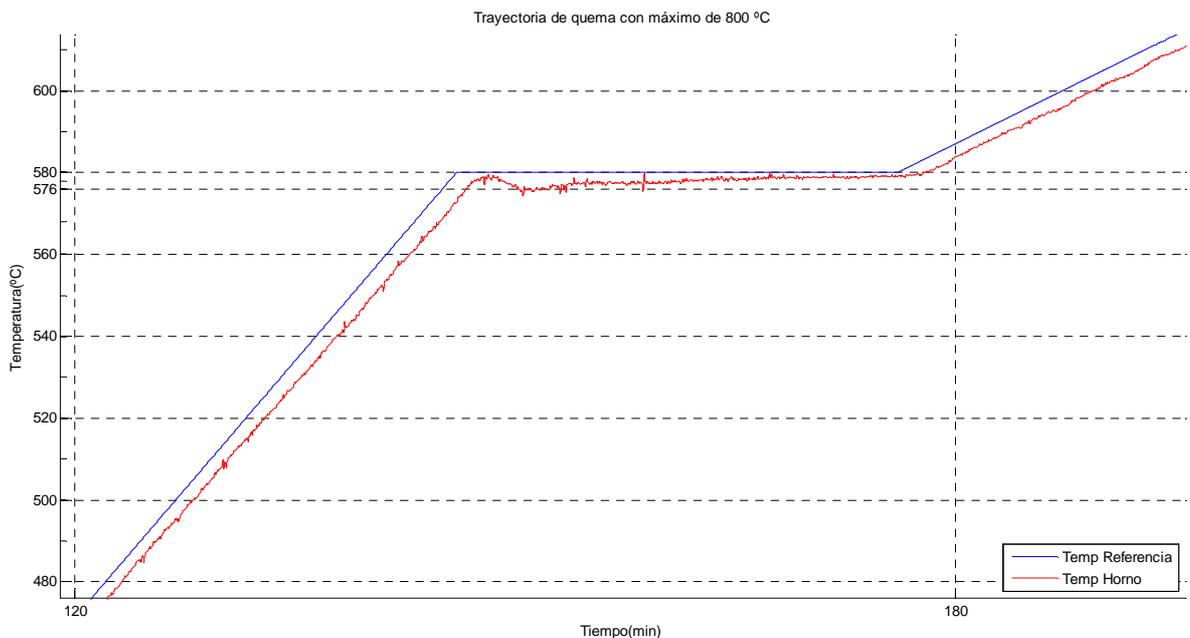
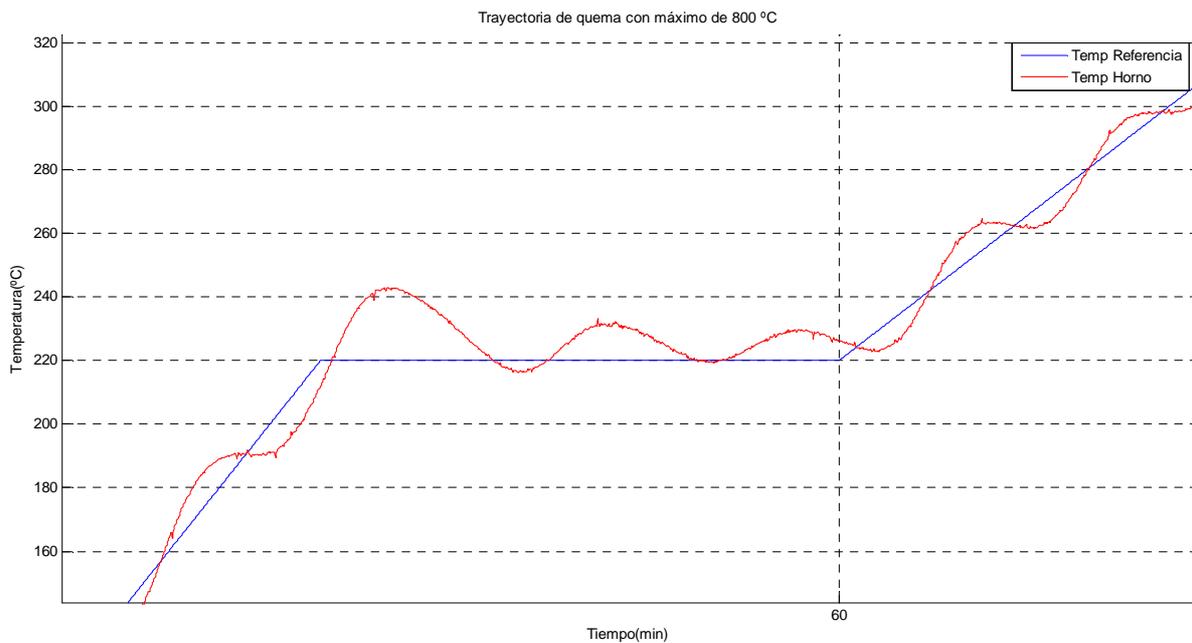


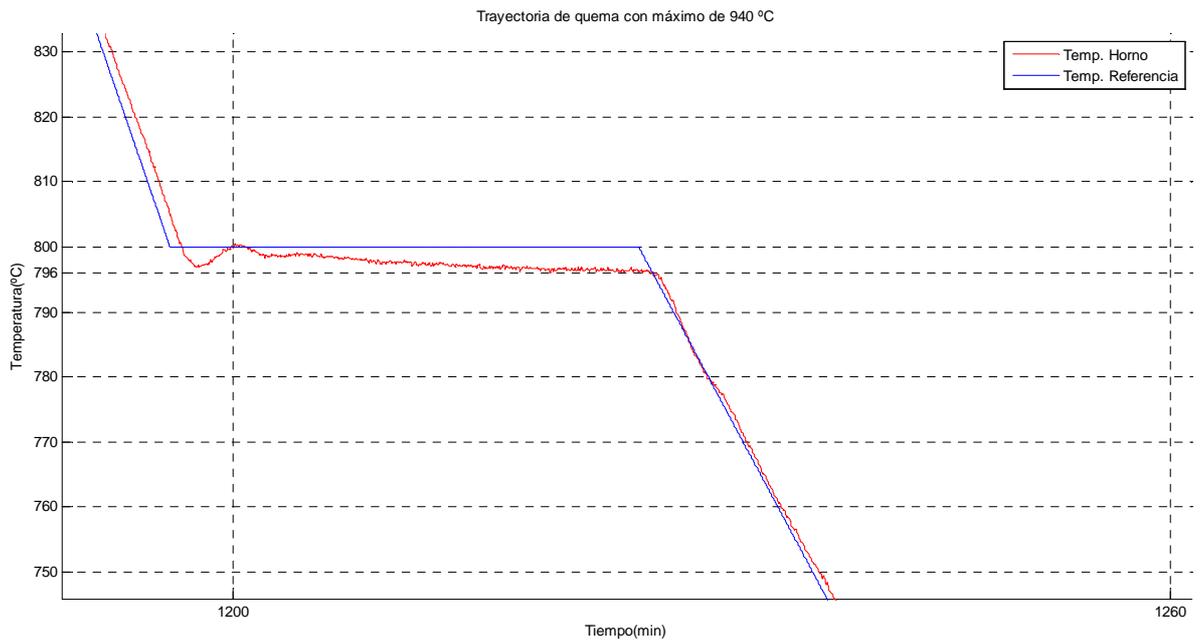
Figura 4.16. Pausa en 580 °C de subida.

En el caso de la Figura 4.17 el error oscila de una forma decreciente en las rampas y en la pausa. En la primera rampa de subida tiene un máximo de 20 °C por encima de la referencia y 12 °C por debajo de la referencia. En la pausa tiene un error máximo de 22 °C por encima de la referencia, 4 °C por debajo de la referencia y termina con un error de 6 °C por encima de la referencia. En la segunda rampa de subida tiene un error máximo de 9 °C por encima de la referencia y 6 °C por debajo de la referencia.



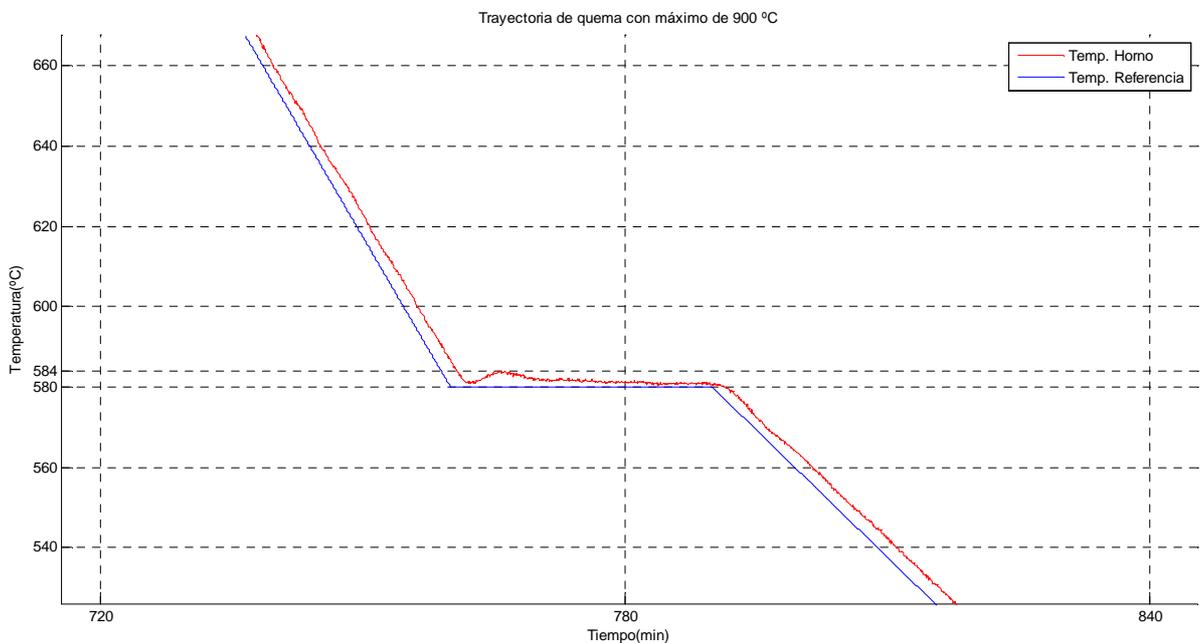
**Figura 4.17.** Pausa en 220 °C de subida.

En el caso de las rampas de bajada y pausas de bajada presenta un error menor en comparación con las rampas de subida. En la Figura 4.18 se presenta un error máximo de 5 °C por encima de la referencia en la primera rampa de bajada. En la pausa oscila un poco y después desciende con un error máximo de 4 °C por debajo de la referencia. En la segunda rampa de bajada oscila un poco y después se aleja de la referencia hasta descender a 580 °C con un error máximo de 7 °C por encima de la referencia.



**Figura 4.18.** Pausa en 800 °C de bajada.

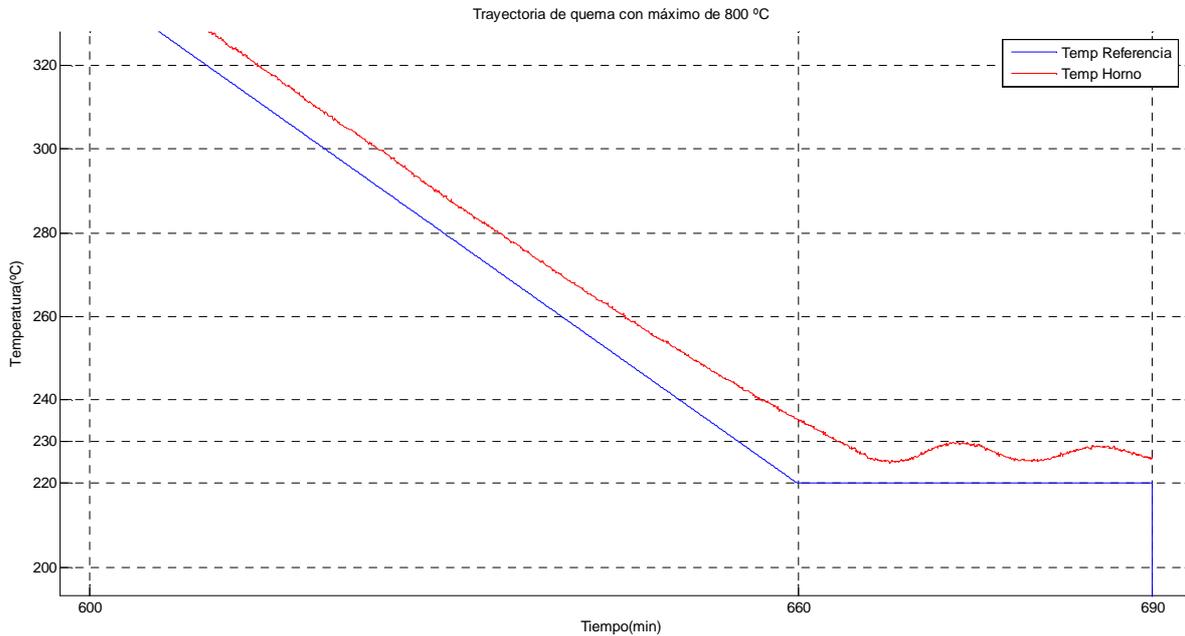
En la Figura 4.18 se presenta un error máximo de 7 °C por encima de la referencia en la primera rampa de bajada. En la pausa tiene un error máximo de 4 °C por encima de la referencia y después desciende a 1 °C por encima de la referencia. En la segunda rampa de bajada oscila un poco y después se aleja de la referencia hasta descender a 220 °C con un error máximo de 13 °C por encima de la referencia.



**Figura 4.19.** Pausa en 580 °C de bajada.

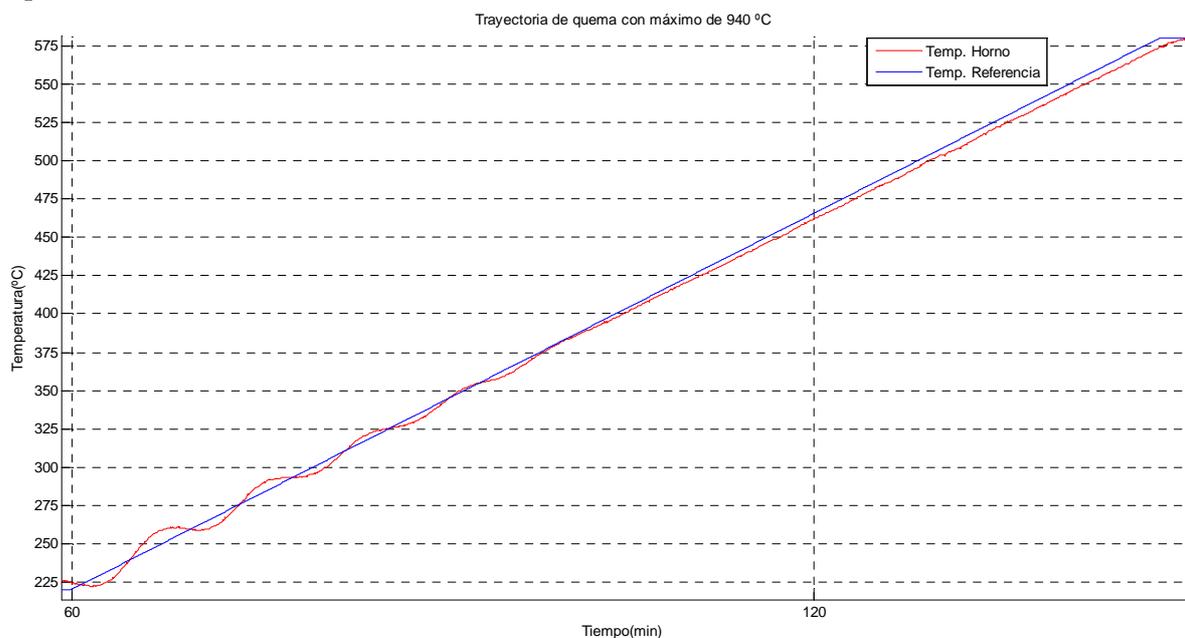
En la Figura 4.20 la temperatura del horno se mantiene por encima de la referencia en todo momento; presenta un error máximo de 15 °C en la primera rampa de bajada, en la pausa oscila de una

forma decreciente con un error máximo de 10 °C y terminando con un error de 6 °C. Esto es debido a que se le exigió que enfriara rápido.



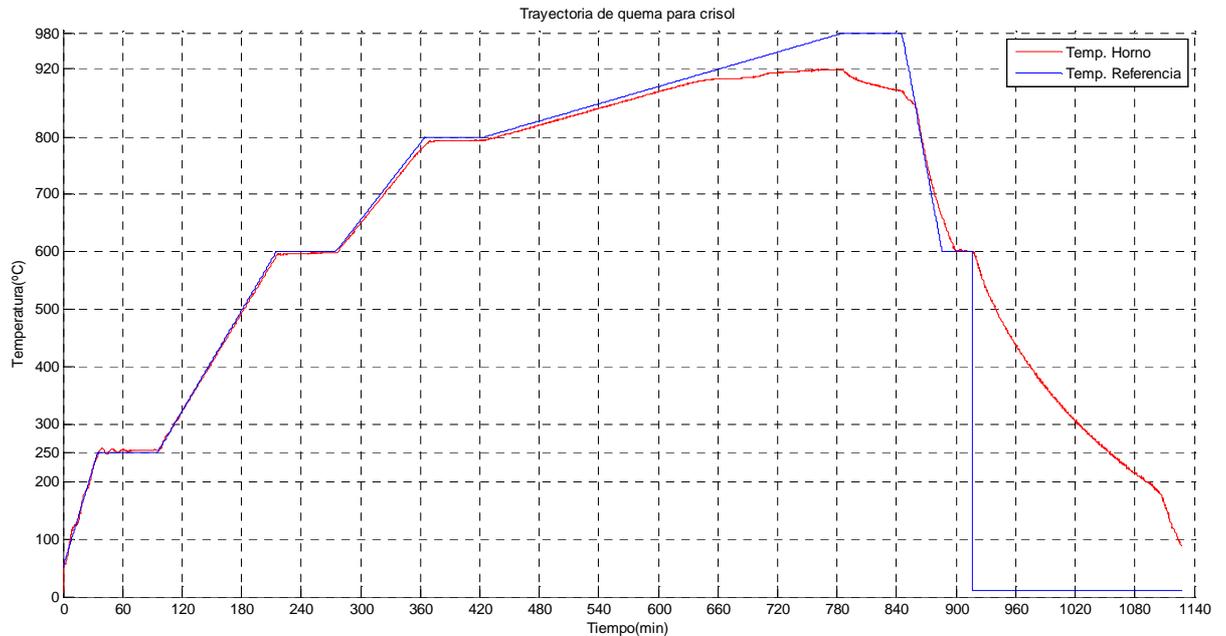
**Figura 4.20.** Pausa en 220 °C de bajada.

Al observar el comportamiento que sigue el controlador se observó que en la mayoría de las rampas de subida menores a 650 °C, por ejemplo, en la Figura 4.21, la temperatura del horno oscila al inicio de una forma decreciente y después se estabiliza separándose un poco de la referencia, manteniéndose por debajo de ésta. Algo similar sucede para la mayoría de las rampas de bajada, pero para temperaturas menores a 700 °C la temperatura del horno se mantiene por encima de la referencia, debido a que se enfría más lento.



**Figura 4.21.** Rampa de subida de 220 °C a 580 °C.

Se realizó un sinterizado de un crisol tipo horno, para los alumnos de la maestría en tecnología avanzada de manufactura de la UTM. Ellos propusieron la siguiente trayectoria de temperatura (Figura 4.22), en donde a partir de los 920 minutos se enfrió de manera natural. La temperatura del horno no llega a 980 °C, debido a que se le exigió que llegara a esa temperatura en un lapso de tiempo muy corto, además de que todavía se encontraba en fase de pruebas. El crisol tipo horno se sinterizó de la manera esperada, con lo que se obtuvieron resultados satisfactorios (Figura 4.23).



**Figura 4.22.** Trayectoria de temperatura para el crisol tipo horno.



**Figura 4.23.** Crisol tipo horno.



# Capítulo 5

## 5. Conclusiones

Por la complejidad del sistema, los factores externos que son difíciles de modelar y el tiempo que se hubiera invertido en tratar de realizar el modelo de todo el sistema, parece haber sido lo más adecuado para resolver el problema utilizando un controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo.

Se cumplieron los objetivos mencionados anteriormente y se obtuvo una buena medida de temperatura a pesar del error que presenta, el cual se considera despreciable. La interfaz del usuario cumple con los principios de usabilidad, mostrando gráficas de temperatura (real vs referencia), indicadores (tiempo, potencia y temperatura), rampa que está realizando y tiene la capacidad de guardar los datos de la quema para un análisis futuro o consulta del estudiante, lo que lo convierte en un sistema fácil de manejar, confiable y útil.

Los controladores difusos pueden adaptarse con facilidad relativa a sistemas que posean por su naturaleza una dinámica especial de comportamiento y que por lo tanto, presentan condiciones muy variables en cuanto a los puntos de operación. Sin embargo, en los controladores difusos es difícil asegurar su estabilidad siendo ésta una de sus principales desventajas.

De acuerdo al análisis realizado a las gráficas de trayectoria de temperatura, se puede decir que el control difuso responde de manera satisfactoria y estable, a pesar de que se presentaron errores que parecen grandes, el error máximo fue de apenas el 3.8%, para rampas y permanencias de subida mayores de 220 °C, para rampas y permanencia de bajada mayores a 500 °C se obtuvo un error máximo de 1.5 %. Es importante mencionar que el sistema siempre está sometido a perturbaciones las cuales son causadas por las fugas de calor que presenta el horno y éstas aumentan a mayor temperatura.

El controlador difuso proporcionó resultados satisfactorios y cumplió con las trayectorias de temperatura establecidas por los usuarios, mostrando un buen desempeño. Su realización fue sencilla gracias a la herramienta de lógica difusa de *LabVIEW* 8.5, lo complicado fue la calibración, debido a que se tenía que probar en el sistema real y las pruebas tardaban como mínimo 6 horas.

### 5.1. Trabajos futuros

- Implementar otros tipos de controladores, como: controlador neuro-difuso, control PID-difuso o un controlador difuso adaptativo.
- Poder monitorear la temperatura del horno remotamente.
- Implementar un dispositivo que enfríe y caliente más rápido sin perjudicar a la pieza.
- Implementar el controlador en un sistema embebido.

## 5.2. Costos

A continuación en la tabla VIII se muestra el costo del material que se utilizó en la implementación del controlador difuso.

**Tabla VIII.** Costo del material utilizado.

Componente	Número de componentes	Costo
Microcontrolador Atmega48A-PU	1	\$63.00
Amplificador operacional de precisión LT1012CN8	1	\$82.00
Compensación de junta fría LT1025CN8	1	\$99.00
Amplificador operacional TL072	1	\$7.00
Cable UTP (20 metros)	1	\$186.30
Base para C.I. de 8 pines	4	\$8.00
Base para C.I. de 28 pines	1	\$4.00
Resistencias de carbón de medio watt	13	\$13.00
Resistencia de carbón de 1 watt	1	\$1.50
Placa fenolica una cara de 10x20 cm.	1	\$21.00
Conector hembra Jack RJ45	1	\$28.00
Tubo de soldadura	1	\$15.00
Brocas para minitaladro	5	\$70.00
Cloruro férrico de 225 mililitros	1	\$25.00
Termopar tipo K West modelo TC-2C	1	\$1067.20
Terminales C/2 tornillos para C.I.	5	\$25.00
Potenciómetro de precisión	1	\$45.00
Capacitor cerámico de 4.7uf	1	\$4.00
Capacitor cerámico de 1uf	1	\$3.00
Total		\$1767.00

## Bibliografía

- [1] Ahmad M. Ibrahim; FUZZY LOGIC for Embedded System Applications; Newnes, 2004.
- [2] Alfredo G. M. Gámez, (*et. al.*), Controlador de un sistema eólico fotovoltaico utilizando un controlador fuzzy, energética, Vol XXX, No. 3, 2009.
- [3] Antonio Creus Solé; Instrumentación Industrial; Alfaomega, Sexta Edición, 1998.
- [4] Arias M. Oswaldo, Sistema de monitoreo de temperatura para horno de gas; Universidad Tecnológica de la Mixteca, Tesis de Licenciatura, 2006.
- [5] Bonifacio Martínez del Brío, Alfredo Sanz Molina; Redes Neuronales y Sistemas Borrosos; Alfaomega, Tercera edición, 2007.
- [6] Daniel J. López Amado, Diego García, Controlador difuso multivariable del perfil de temperatura de un horno; XI Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control, 2005.
- [7] Dennis G. Zill; Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado; Thomson, Sexta edición.
- [8] Diego A. Tibaduiza Burgos, Carlos E. Daza Orozco, Control fuzzy de velocidad para una transmisión hidrostática; Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquia, No. 44, pp. 137-143, 2008.
- [9] Emma del Carmen Vázquez Malagón; Materiales Cerámicos, propiedades, aplicaciones y elaboración.
- [10] Enrique Palacios, Fernando Remiro, Lucas J.; Microcontrolador PIC16F84 Desarrollo de proyectos; Alfaomega, Segunda Edición, 2006.
- [11] Floriberto Ortiz Rodríguez, Modelado y control PD-difuso en tiempo real para el sistema barra-esfera; CINVESTAV; Tesis de Maestría; Octubre 2004.
- [12] Germán H. Londoño, Sandra P. Londoño, Álvaro O. Gutiérrez; Curso Básico LabVIEW 6i; Universidad Tecnológica de Pereira, 2002.
- [13] Hernández, J., Sistema de monitoreo y control de encendido de un horno eléctrico basado en un control de potencia tipo integral; Universidad Tecnológica de la Mixteca, Tesis de Licenciatura, 2009.
- [14] Hernández Reyes José Antonio, Coronel Lemus Martha Esmeralda, Simulación de sistema difuso para el control de velocidad de un motor C.D; Tercer Congreso de Cómputo AGECOMP, UAEM, México.
- [15] H. V. Martínez, C. M. Sierra, Desarrollo de modelos matemáticos para la evolución de la temperatura en hornos eléctricos mediante balances de materia y energía; ISSN 0120-9833, 2005.
- [16] J.J. Vásquez Sanjuan, F. Santiago Espinosa, Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Temperatura mediante Instrumentación Virtual; International Conference on Electronic Design, 2006.
- [17] Jiménez, L., Algunas aplicaciones de la lógica difusa a teoría de control; Instituto Politécnico Nacional, Tesis de Licenciatura, Agosto 2000.
- [18] José A. Manrique; Transferencia de Calor; Harla, 1976.
- [19] José Rafael Lajara Vizcaíno, José Pelegrí Sebastiá; LabVIEW Entorno gráfico de programación; Alfaomega, Primera Edición, 2007.
- [20] Katsuhito Ogata; Ingeniería de control moderna; Prentice Hall, Tercera edición, 1998.

- [21] Kevin M. Passino & Stephen Yurkovich; Fuzzy Control; Addison Wesley 1998.
- [22] Lyupco N. Antovski, (*et. al.*), Fuzzy control system for thermal processes, journal of electrical & electronics engineering, Vol III, No. 1, 2003.
- [23] M. D. Hanamane, R. R. Mudholkar, Implementation of fuzzy temperature control using microprocessor; Journal of Scientific & Industrial Research, 2006.
- [24] Muhammad H. Rashid, Electrónica de potencia; Pearson Educación, Tercera Edición, 2004.
- [25] Nicolas K. Valverde, Henry K. Castro, Controlador difuso para un horno eléctrico resistivo; Congreso Nacional de Instrumentación (México), 2001.
- [26] Paul Rado; Introducción a la tecnología de la cerámica; Omega, 1990.
- [27] Pineda Cando Marco Antonio, Vivas Paspuel Atal Kumar, Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos; Escuela Politécnica Nacional de Quito; Tesis de Ingeniería; Noviembre 2008.
- [28] Skda Prommeaun, Sitchai Boonpiyathud, Fuzzy Logic based on LabVIEW for Speed Control of Two-Inertia System, Fukuoka International Congress Center, Japan, 2009.
- [29] Timothy J. Ross; Fuzzy Logic with engineering applications; John Wiley & Sons Ltd 2004.
- [30] W. Bolton; Mecatrónica Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica; Alfaomega; Tercera edición, 2006.

#### Sitios URL

- [URL1] <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-02-07-TC.pdf> “Boletín periódico del laboratorio de metrología MetAs”, Marzo 2011.
- [URL2] [http://sifunpro.tripod.com/piezas\\_ceramicas.htm](http://sifunpro.tripod.com/piezas_ceramicas.htm) “Producción de piezas cerámicas”, Mayo 2011.
- [URL3] <http://www.ni.com/pdf/manuals/3713031.pdf> “Manual de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008.
- [URL4] <http://www.nteinc.com/specs/5600to5699/pdf/nte5693.pdf> “Triac NTE5695 de la serie de media potencia, 400V a 40A”.
- [URL5] [http://www.albertolacalle.com/hci\\_principios.htm](http://www.albertolacalle.com/hci_principios.htm) “Principios de usabilidad”, Junio 2011.
- [URL6] <http://www.iseincstore.com/search.aspx?find=fuzzy+control> “Controladores de temperatura”, Febrero 2012.
- [URL7] <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1025fb.pdf> “LT1025 Micropower Thermocouple Cold Junction Compensator”.
- [URL8] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/9/0pzk9ai3y89h95zizkw2rq618zcy.pdf> “LT1012 amplificador de precisión”.
- [URL9] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl072.pdf> “TL072 amplificador operacional”.
- [URL10] <http://www.atmel.com/Images/8271S.pdf> “Microcontrolador ATmega48A”.
- [URL11] <http://www.fairchildsemi.com/ds/MO/MOC3031-M.pdf> “Optocoplador MOC3031 con detector de cruce por cero”.
- [URL12] <http://www.conocimientosfundamentales.unam.mx/vol1/filosofia/m01/t01/01t01s02c.html> “Principio del tercer excluido”.

## Apéndice A

### A.1. Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008

La tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008 de *National Instruments* brinda funcionalidad de adquisición de datos, es básica para aplicaciones de registro de datos, mediciones portátiles y experimentos académicos. Incluye el software registrador de datos para empezar a tomar medidas en minutos o puede ser programado usando *LabVIEW*, lenguaje *C* o utilizar el software para un sistema de medida personalizado NI DAQmx [URL4].

#### A.1 Especificaciones

Las características de la NI USB-6008 son las siguientes:

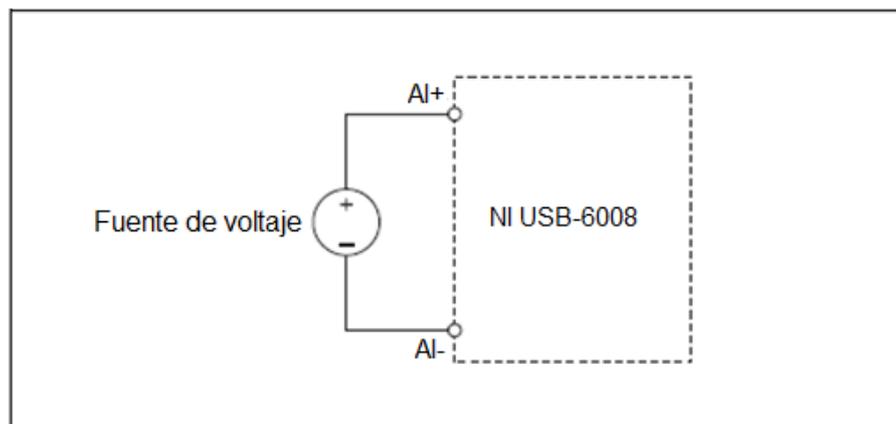
- 8 entradas analógicas (12 bits, 10kS/s).
- Conexión en modo diferencial y modo *single-ended*.
- Modo diferencial de  $\pm 20V$  de entrada, 12 bits y 4 entradas analógicas.
- Modo referenciado *single-ended* de  $\pm 10V$ , 11 bits y 8 entradas analógicas.
- 12 E/S digitales.
- Contador de 32 bits.
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s).
- Alimentación por USB.
- Compatible con *LabVIEW*, *LabWindows/CVI* y *Measurement Studio para Visual Studio.NET* y *Visual Basic 6*.
- Registro por NI-DAQmx y software interactivo *NI LabVIEW Signal Express LE*.

#### A.2 Conexiones y formas de uso

Existen dos formas de conexión de señales analógicas de voltaje:

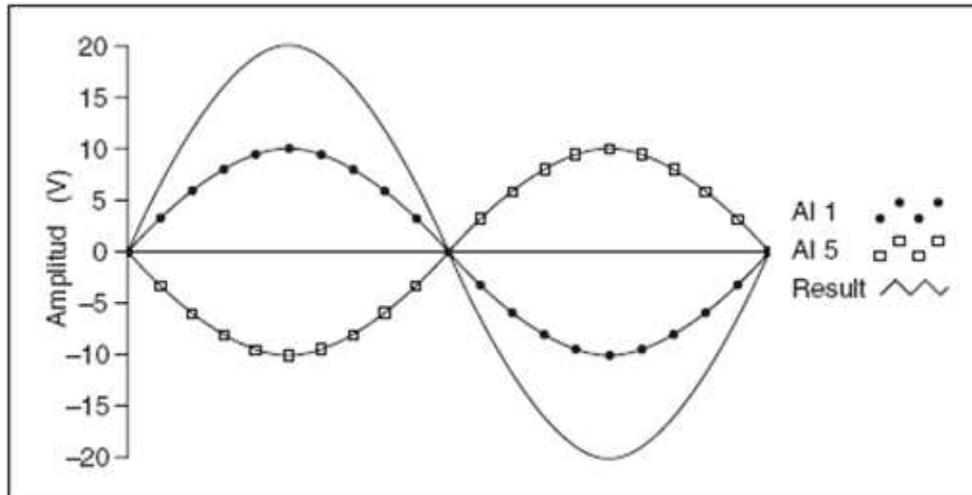
- Modo diferencial
- Modo referenciado *single-ended*

Para conectar señales de voltaje en modo diferencial, se conecta el positivo de la señal a la terminal AI+, y el negativo a la terminal AI-, como se muestra en la Figura A.1.



**Figura A.1.** Conexión de una señal de voltaje en modo diferencial.

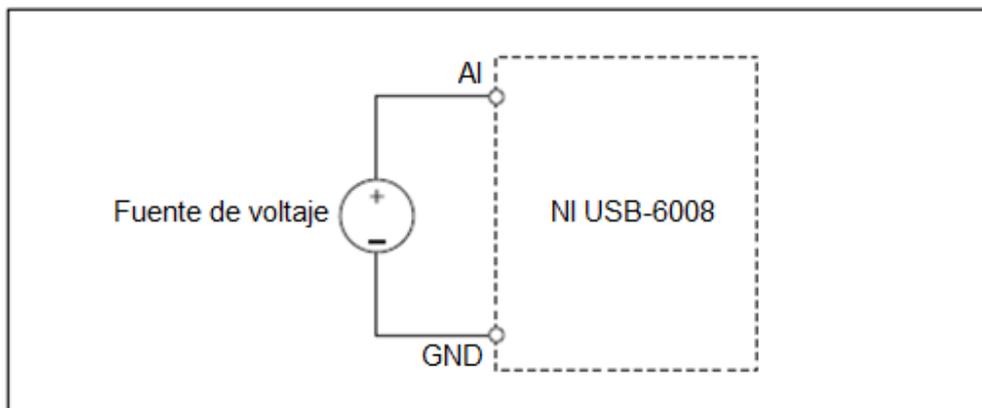
El modo de entrada diferencial puede medir señales en un rango de  $\pm 20V$ . El máximo voltaje en alguno de los pines es  $\pm 10V$  con respecto a tierra. Se puede observar un ejemplo en la gráfica de la Figura A.2 , si AI1 es  $+10V$  y AI5 es  $-10V$ , entonces la medición del dispositivo es de  $\pm 20V$ .



**Figura A.2.** Ejemplo de una medición diferencial a 20V.

Para conectar señales de voltaje en modo referenciado *single-ended* (RSE), se conecta el positivo de la señal de voltaje a la terminal AI deseada, y la tierra a la terminal GND, como se ilustra en la Figura A.3.

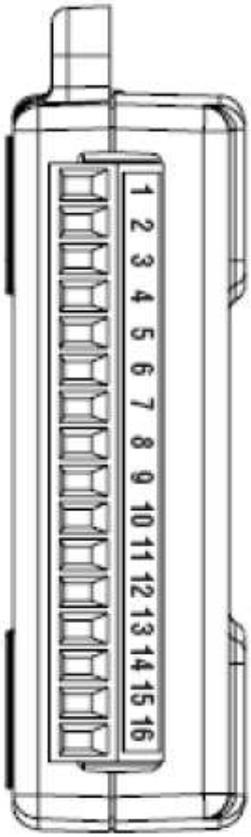
Cuando no hay señales conectadas a la terminal de entrada analógica, el resistor interno funciona como divisor de voltaje el cual causa que la terminal esté flotada y se tenga una medición de aproximadamente 1.4V, éste comportamiento es normal y no afecta a las mediciones cuando una señal es conectada.



**Figura A.3.** Conexión de señales de voltaje en modo single-ended (RSE).

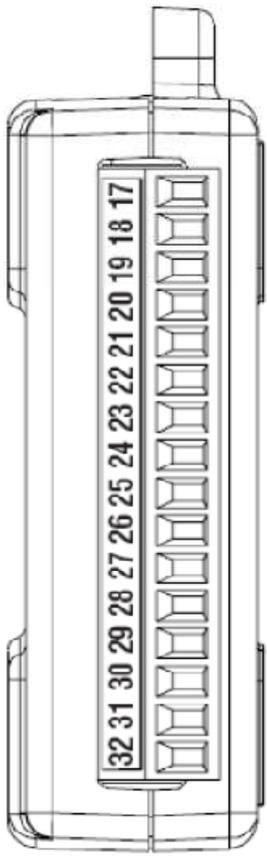
En la Tabla IX se muestra el diagrama de terminales de las entradas y salidas analógicas, y su forma de conectarse en ambas modalidades *single-ended* y diferencial.

**Tabla IX.** Diagrama de terminales analógicas.

Módulo	Terminal	Señal modo <i>single-ended</i>	Señal modo diferencial
	1	GND	GND
	2	AI0	AI0+
	3	AI4	AI0-
	4	GND	GND
	5	AI1	AI1+
	6	AI5	AI1-
	7	GND	GND
	8	AI2	AI2+
	9	AI6	AI2-
	10	GND	GND
	11	AI3	AI3+
	12	AI7	AI3-
	13	GND	GND
	14	AO0	AO0
	15	AO1	AO1
	16	GND	GND

En la Tabla X se muestra el diagrama de terminales de entradas y salidas digitales. Estas pueden configurarse individualmente como entradas o salidas, también se muestra la terminal de la fuente de voltaje y la del contador de eventos.

**Tabla X.** Diagrama de terminales digitales.

Módulo	Terminal	Señal
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0.6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	PF1 0
	30	+2.5 V
	31	+5 V
	32	GND

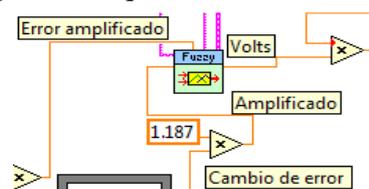
En la Tabla XI se muestra la descripción de las señales de la TAD NI USB 6008, de sus entradas y salidas analógicas en sus diferentes modos, así como de las entradas y salidas digitales y otras opciones con las que cuenta.

**Tabla XI.** Descripción de las terminales.

Nombre de la señal	Referencia	Dirección	Descripción
GND	----	-----	Tierra. Punto de referencia para <i>single-ended</i> medidas por AI. Punto de retorno de corriente en modo diferencial
AI<0...7>	Varios	Entrada	Canales de entradas analógicas 0 a 7, para medir en <i>single-ended</i> . Cada canal es una entrada de voltaje analógico. Para medidas en modo diferencial, AI0 y AI14 son las entradas positivas y negativas respectivamente del canal 0. Los siguientes pares también forman canales de entradas diferenciales:<AI1, AI5>, <AI2, AI6> y <AI3, AI7>.
AO0	GND	Salida	Canal 0 de salida analógica
AO1	GND	Salida	Canal 1 de salida analógica
P0.<1..7> P1.<0..3>	GND	Entradas o salidas	Señales de entradas y salidas digitales. Estas señales se pueden configurar individualmente como entradas o salidas.
+2.5 V	GND	Salida	+2.5 V referencia externa, proporciona un voltaje de referencia para el ADC
+5 V	GND	Salida	Fuente de voltaje de +5 V, el cual proporciona 200mA de máxima corriente.
PFI 0	GND	Entrada	Este pin es configurable como un contador de eventos de entrada, ( <i>Digital trigger</i> ).

## A.2. Diagrama a bloques del programa en *LabVIEW 8.5*

En la Figura A.5 se muestra el diagrama a bloques que se utilizó para realizar el control difuso y la interfaz de usuario, en donde se observa los bloques: de lectura y escritura, operaciones para obtener la temperatura del horno (Figura A.5 Zona A), mediante un *Case Structure* se obtuvieron las trayectorias de temperatura deseada (Figura A.5 Zona B), y el bloque más importante que es el de *Fuzzy* (Figura A.4) en éste se reciben las entradas de error amplificado y cambio de error amplificado, enviando una salida en volts hacia la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008.



**Figura A.4.** Bloque de lógica difusa.



## Apéndice B

### B.1 Código fuente del microcontrolador

El microcontrolador es el encargado de recibir la señal de control proveniente de la TAD, esta señal es transformada a un número de ciclos, realizando un control de encendido apagado. Para poder realizar esto se construyó un programa en lenguaje c el cual se encuentra descargado, en el microcontrolador Atmega48A-PU. A continuación se muestra el código del programa:

```
/ATMEGA48A
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
volatile unsigned char cuenta=0; //declaración del contador de ciclos
volatile float entrada1=1024;//variable que recibe el valor del ADCW
volatile float entpulso=1024;//variable que tiene el número de ciclos pedidos por el ADCW
volatile int band=1;//bandera

ISR(INT1_vect)//Interrupción externa INT1
{
  if(band==1)
  {
    cuenta++;//el contador se incrementa en uno por cada flanco de subida

    if (cuenta<=entpulso)
      PORTB=0x04;//mantiene en alto la salida PB2
    else
      PORTB=0x00;//pone en bajo PB2 (todo el puerto B)

    if(cuenta==100)
    {
      cuenta=0;//reinicia contador
      entpulso=(100*entrada1)/1024;//conversión de bits a ciclos
    }
  }
}

ISR (ADC_vect){
  entrada1=ADCW;
  if(entrada1<10)//Para que en un voltaje menor a 0.05 volts mantenga baja la salida
  {
    entpulso=0;
```

```
    PORTB=0x00;
    band=0;
}
else
    band=1;
}
ISR (TIMER1_COMPA_vect)
{
    ADCSRA=ADCSRA | 0x40; //inicia una nueva conversión
}

int main()
{
    DDRD=0x00; //Puerto D como entrada
    DDRB=0xFF; //Puerto B como salida

    EICRA=0b00001100; //flanco de subida int1
    EIMSK=0b00000010; //Habilita las interrupción 1

    ADMUX=0x00; //Habilita el ADC0
    ADCSRA=0xCE; //Inicia conversión, prescalador 64 y habilita interrupción por fin de conversión

    OCR1A=62500; //Interumpe al ADC cada 16us
    TCCR1A=0x00;
    TCCR1B=0x0A; //Prescalador 8
    TIMSK1=0x02; //Habilita la interrupción por coincidencia en el comparador A

    sei(); //Habilitador global de interrupciones
    while(1){ //Lazo infinito, permanece ocioso
        asm("nop");
    }
}
```

## Apéndice C

### C.1 Comparación del control difuso con un controlador PID

Para justificar de alguna manera el uso del controlador difuso, se comprobó el desempeño del sistema en simulación con un controlador PID. Para simular el comportamiento del sistema, se obtuvo su función de transferencia del sistema, en donde primero hay que obtener los parámetros de tiempo de establecimiento, retardo y constante, mediante la respuesta del sistema ante una entrada escalón, los cuales se presentan a continuación:

Constante  $k=920$

Retardo  $L=120$

Tiempo de establecimiento  $T=5200$

Con los parámetros obtenidos, se procedió a obtener la función de transferencia con una aproximación de pade de orden 1, de esta manera la función de transferencia que describe la relación de la entrada (volts) con la salida (temperatura °C) queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{-920s + 15.33}{5200s^2 + 87.67s + 0.01667}$$

Se comparó la respuesta de la función de transferencia con la respuesta real del sistema (Figura C.), obteniendo una aproximación pobre al sistema real.

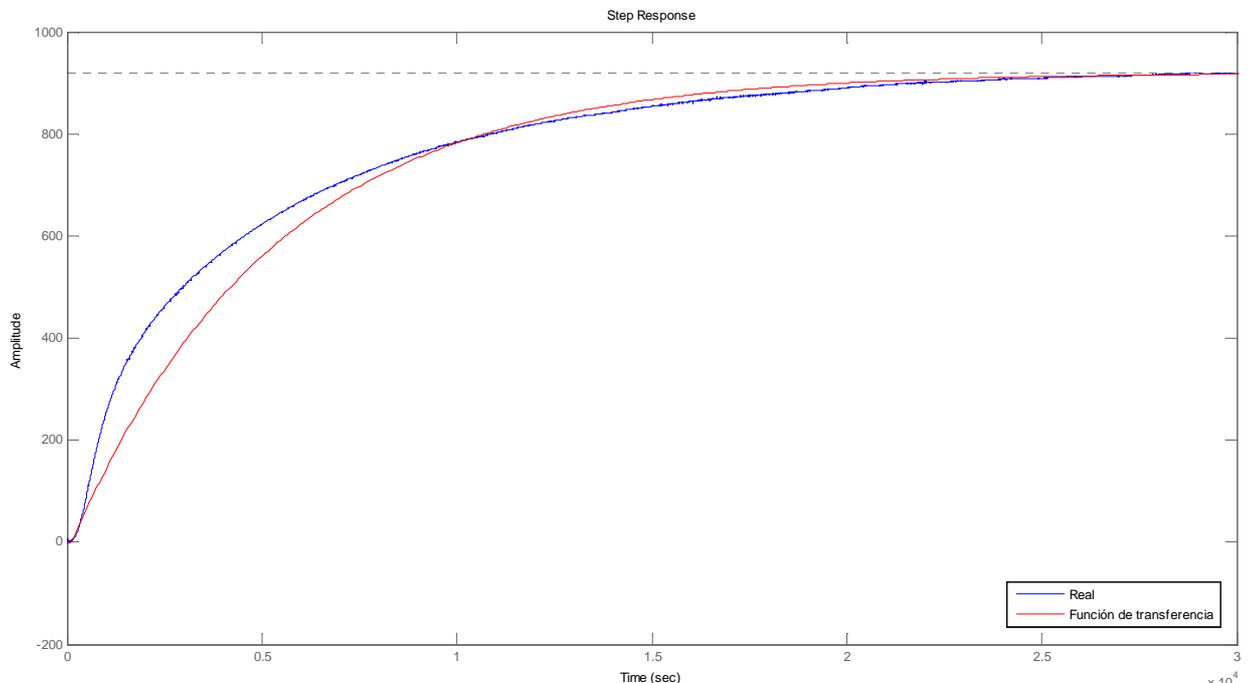


Figura C.1. Comparación de la respuesta del sistema real y de la función de transferencia

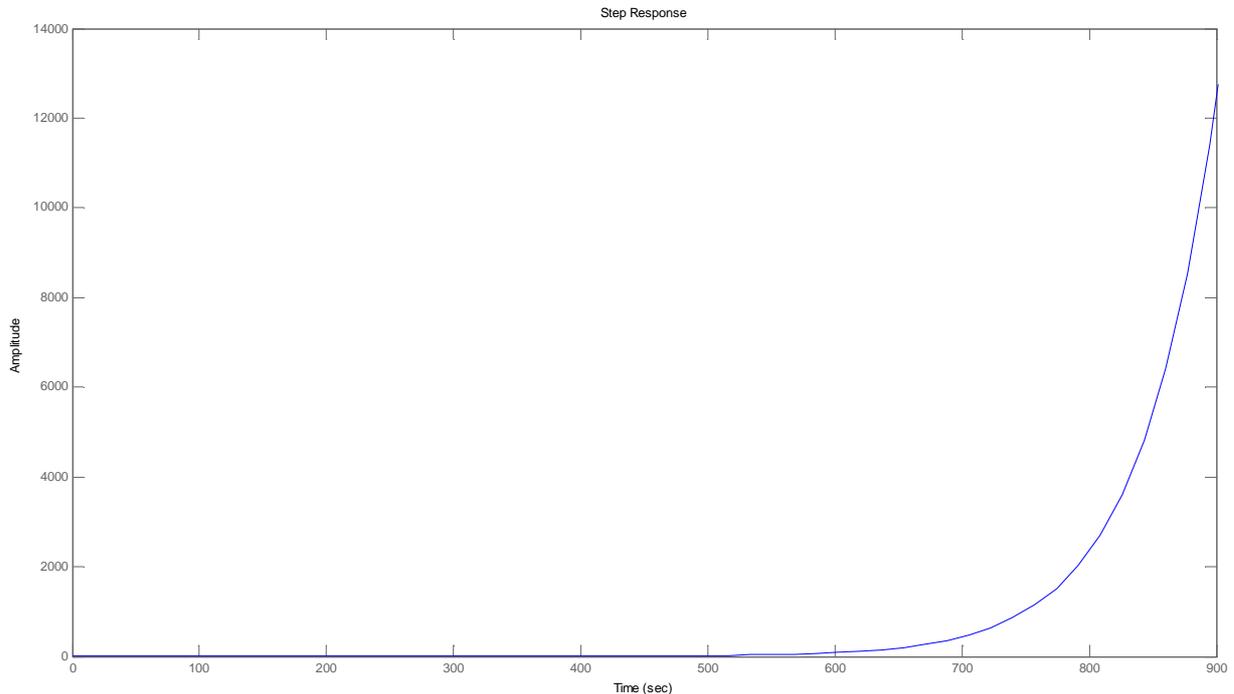
Para obtener el controlador se sintonizo mediante el primer método de Ziegler Nichol's, con el cual se obtuvieron las siguientes ganancias:

$$K_p=52$$

$$T_i=240$$

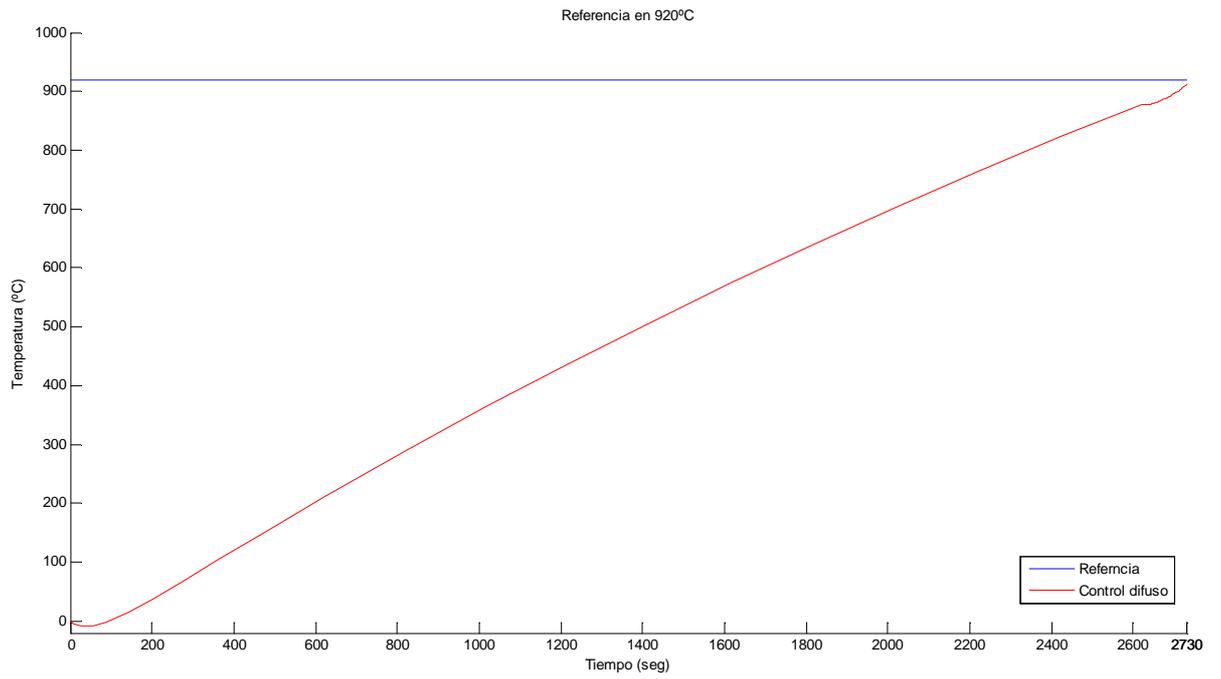
$$T_d=60$$

Se aplicó una entrada escalón a la función de transferencia, ya con el controlador PID agregado, obteniendo los resultados mostrados en la Figura C.2. El sistema se volvió inestable debido a que en la función de transferencia, con la acción de control en lazo cerrado, un polo se encuentra en el semiplano derecho, a pesar de que se modificaron las ganancias el sistema seguía comportándose igual.



**Figura C.2.** Respuesta del controlador PID ante una entrada escalón.

Se le aplicó una entrada con referencia de 920 °C al controlador difuso, obteniendo la Figura C., en la que se observa que llega a la referencia, presentando un mejor desempeño que el controlador PID. El controlador difuso llega a la referencia en un tiempo muy corto, algo que en el sistema real sería imposible de realizar; por lo que podemos decir que la función de transferencia del sistema no tiene una buena aproximación al sistema.



**Figura C.3.** Respuesta del controlador difuso.

