

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
TEMPERATURA DIFUSO PARA UN PROCESO INDUSTRIAL
DE PREHORMADO DE COPA PARA BRASIER

HELLMUNTH ANDRES STACEY HERNANDEZ

Proyecto de Grado

Licenciatura en Electrónica



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA

BOGOTÁ DC

2015

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
TEMPERATURA DIFUSO PARA UN PROCESO INDUSTRIAL
DE PREHORMADO DE COPA PARA BRASIER

POR:

HELLMUNTH ANDRES STACEY HERNANDEZ

DIRECTOR:

PROF. ALBERTO MORALES



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA

BOGOTÁ DC

2015

Nota de aceptación

Primer jurado

Segundo jurado

Tercer jurado

Director de Tesis

DEDICATORIA

A mi abuela Teresa (Q.E.P.D.) quien siempre me apoyó en mi formación académica, a mi amada esposa Karina por su paciencia y colaboración, a mis padres, a mis hermanas Andrea, Katherine y Leidy, a mis sobrinos Mariana, Valentina, Alejandra, Valeria y mi tocayito, ellos han sido y serán mi fuente de inspiración y el motivo más grande para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

- A la empresa Sissi SAS por su colaboración en este proyecto.
- Al profesor Alberto Morales quien no dudó en orientar y dirigir este trabajo de grado.
- Al profesor Julio Bonilla por su disposición y sus consejos en cuanto a la realización de este trabajo.
- A mi familia por su apoyo incondicional.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Advancing the Quality of Education</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 6	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura difuso para un proceso industrial de prehormado de copa para brasier
Autor(es)	Stacey Hernández, Hellmunth Andrés
Director	Morales, Alberto.
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2015. 61 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	Control difuso, Lógica difusa, temperatura, sensor, señal de error, prehormado, tiempo de respuesta, error de estado estacionario, potencia, voltaje, panel de control, Proceso industrial.

2. Descripción
<p>Trabajo de grado en el que se describe el proceso de diseño, elaboración e implementación de un sistema de control de temperatura difuso que controla la temperatura en dos moldes de aluminio que se utilizan para dar forma de copa de brasier a una espuma previamente forrada con tela.</p> <p>Dado que el sistema tradicional utilizado para este proceso al ser un control ON/OFF presenta unas falencias en cuanto a eficiencia, sensado de temperatura, tiempo de calentamiento, consumo de energía eléctrica entre otros, es necesario implementar otra estrategia de control que mejore dichas deficiencias, para este caso se planteó una estrategia de control inteligente que utiliza lógica difusa puesto que esta permite por medio de las experiencias brindadas por el</p>

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Advancing the Quality of Education</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 6	

experto de la planta el diseño de un controlador que sea eficiente para este tipo de procesos.

3. Fuentes

- Álzate E. J., Montes J. W. y Silva C. A. (2007), *Medición de temperatura: Sensores termoelectricos*: Universidad Tecnológica de Pereira Colombia.
- Beltrán Provoste C., *Medición de Temperatura*, Villa Rica Chile: Escuela Industrial San José
- Bonifacio M., Sanz Molina A., (2002), *Redes neuronales y sistemas difusos*. 2º Edición. © RA-MA Editorial.
- Pajares Encinas J. A., (2001), *Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW*, España, Universidad Rovira i Virgili.
- Pallas Areny, R., (2001), *Sensores y Acondicionadores de Señal*, Barcelona, España, Marcombo S.A.
- Pérez Cisneros M. A., Vernon J., *Sistemas de Lógica Difusa*, Guadalajara, México, Universidad de Guadalajara.
- Reynoso Mesa G., (2005), *Notas en Control Difuso*, Monterrey, México. Departamento de Mecatronica y Automatización, ITESM.
- Robayo Espinel E. M., (1997), *Control difuso Fundamentos y aplicación*, Colombia, Universidad del Norte, (Ediciones Uninorte).

4. Contenidos

El proyecto fue dividido en etapas con el fin de estructurarlo y abordar cada etapa individualmente. Estas se describen a continuación:

Etapa de Inicio: Esta etapa tuvo como finalidad profundizar en los aspectos teóricos y los criterios pertinentes para el progreso del proyecto, lo anterior se propuso con el objetivo de

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Advancing the Quality of Education</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 6	

recopilar información clara y concisa con el fin de tener herramientas para determinar el tipo de sensor apropiado, el diseño del controlador difuso, la etapa de potencia cuya carga es netamente resistiva, y por último se abordó el diseño del panel de control digital.

Etapa de desarrollo: Fue la parte del proyecto donde se realizaron todos los procedimientos lógicos y de programación pertinentes, así como como las simulaciones necesarias con ayuda de software con el fin de verificar el funcionamiento y estabilidad del controlador con su respectivo panel de control de usuario.

Etapa de fabricación: En esta etapa se fabricaron las PCB del sistema propuesto, se hicieron las modificaciones de las máquinas y de los moldes así como también algunas pruebas de calentamiento.

Etapa de Experimentación e implementación: Este capítulo hace referencia a las pruebas de medición de temperatura, pruebas de prehormado y puesta en marcha del controlador.

Al abordar este proyecto de grado por etapas, se pudo tener un orden lógico de investigación, simulación y desarrollo que fue crucial para cumplir con los objetivos propuestos.

Objetivo General

- Diseñar, construir e implementar un sistema de control difuso de temperatura para un proceso industrial de prehormado de copa para brasier.

Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un panel de control de usuario sencillo en donde el operador pueda ver la temperatura real de los moldes y modificar la temperatura de referencia.
- Implementar un sistema de control capaz de suplir las falencias que presenta el actual controlador con el fin de optimizar el proceso de prehormado de copa para brasier.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <i>Advancing the Quality of Education</i>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 6	

- Generar un plan de pruebas que permita monitorear constantemente el funcionamiento del controlador difuso, detectar de forma temprana alguna falla y proceder con una reparación eficiente según lo diagnosticado

5. Metodología

Para abordar este proyecto se decidió implementar la metodología Top Down dado que esta permite desglosar el proyecto en varias etapas con el fin de proporcionar una fácil concepción sobre los posibles inconvenientes en la elaboración del controlador, esta característica de esta metodología hace que las soluciones sean mucho más eficientes.

Algunas de las ventajas de esta metodología son¹:

- Rápida respuesta a los cambios y gran flexibilidad a las modificaciones.
- Captura de la información general en una sola locación central.
- Se generan menos errores en las operaciones, ya que hay una verificación en cada módulo.
- Aumento de la productividad, mejoría que surge del proceso de Top Down debido principalmente a la disminución de errores.

6. Conclusiones

- Para este reto fue relevante la optimización de los moldes y de la planta, parámetros muy importantes que se lograron mejorar solo con estas adecuaciones fueron el tiempo de calentamiento de los moldes y la conservación de temperatura, ya que estos cuentan con un buen aislamiento con la estructura física de la planta y las resistencias fueron incrustadas, por lo

¹ http://moodle2.unid.edu.mx/dts_cursos_md/lic/IC/EA/AM/06/Metodologias_de_diseno.pdf

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Advancing the Quality of Education</small>	FORMATO		
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE		
Código: FOR020GIB	Versión: 01		
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 5 de 6		

tanto la optimización de la planta y de los moldes ayudó a que se cumpliera uno de los objetivos principales que era el de mejorar dichas características.

- Se probaron varios diseños del control difuso, se observó en las pruebas que los controladores que eran más complejos dado que tenían más conjuntos difusos y por ende más reglas, no fueron tan eficientes como se pensaba inicialmente, pues impactaron negativamente en el tiempo de calentamiento. Debido a esta situación se implementó un controlador que contiene solo tres conjuntos en sus variables de entrada y de salida, este cumple con las expectativas y no afecta el tiempo de calentamiento.
- Aunque en el mercado hay diversos tipos de sensores de temperatura, queda claro que para este tipo de procesos en la industria el termopar es el más adecuado, puesto que cuenta con características muy importantes como su tipo de encapsulado, su fiabilidad en el sensado, su bajo coste, su robustez entre otras. La ubicación de la termocupla en el molde fue relevante, pues de esta depende la calidad en cuanto a la lectura de la temperatura.
- Con las mejoras de tiempo de calentamiento y de similitud de temperatura de los moldes con respecto a la temperatura de referencia, se estima que la producción de copa de espuma se incrementará un 10%, igualmente hay un ahorro en cuanto al material que se utiliza en este proceso dado que las pruebas de prehormado que el operario hacía para iniciar la producción no es necesaria. También se pronostica un ahorro de consumo de energía puesto que el controlador difuso no interrumpe abruptamente el voltaje AC en las resistencias de calentamiento.

Elaborado por:	Stacey Hernandez, Hellmunth Andres
Revisado por:	Morales, Alberto

Fecha de elaboración del Resumen:	04	03	2015
--	----	----	------

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2.1 Identificación del problema.....	2
1.2.2 Justificación.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 ANTECEDENTES.....	6
1.4.1 “CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA PARA CARGA RESISTIVA CON MICROCONTROLADOR DE 8 BITS”	6
1.4.2 “SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA INCUVADORA AVÍCOLA CON CONTROL DIFUSO Y LA PLATAFORMA LABVIEW”	6
1.4.3 “CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO ELÉCTRICO MEDIANTE LÓGICA DIFUSA 6	
Capítulo 2.....	8
ETAPA DE INICIO.....	8
2.1 El sensor de temperatura.....	8
2.1.1 Detectores de Temperaturas Resistivos (RTD)	9
2.1.1.1 Ventajas de una PT100.....	11
2.1.2 Termistor	11
2.1.3 El termopar	13
2.1.3.1 Tipos de Termopares.....	15
2.2 Lógica Difusa	17
2.2.1 Conjuntos Difusos.....	18
2.2.2 Funciones De Pertenencia.....	19

2.2.3	Variables Lingüísticas.....	20
2.2.4	Fuzzificación.....	20
2.2.5	Reglas Difusas.....	20
2.2.6	Defuzzificación.....	21
2.2.7	Ventajas.....	22
2.2.8	Desventajas.....	22
2.3	Etapa De Potencia.....	23
2.3.1	Detección de cruce por cero.....	23
2.3.2	Circuito electrónico de potencia.....	24
2.3.3	Características del Triac.....	25
Capítulo 3.....		27
ETAPA DE DESARROLLO.....		27
3.1	Circuito de instrumentación para las termocuplas.....	27
3.1.1	Simulación del circuito acondicionador AD595AQ.....	29
3.2	Diseño del controlador difuso.....	31
3.3	Simulación de la etapa de potencia.....	36
3.3.1	Simulación del cruce por cero.....	36
3.3.1	Simulación del circuito de potencia.....	38
3.4	Simulación del panel de control.....	39
3.4.1	El teclado.....	40
3.4.2	La LCD.....	41
3.5	Tarjeta de control y de potencia.....	42
Capítulo 4.....		44
ETAPA DE FABRICACIÓN.....		44
4.1	Fabricación del circuito de instrumentación AD595AQ.....	44
4.2	Fabricación de la etapa de potencia.....	45
4.4	Circuito I ² C para el teclado.....	47
4.5	Panel de control.....	48

4.6 Adecuaciones en la estructura física de la planta.....	48
4.7 Modificación en los moldes de aluminio	50
Capítulo 5.....	52
ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN E IMPLEMENTACIÓN	52
5.1 Instrucciones de manejo del controlador.....	52
5.2 Pruebas de Calentamiento.....	52
5.2.1 Pruebas de calentamiento con el control tradicional sin modificaciones en los moldes.....	53
5.2.2 Pruebas de calentamiento con el control tradicional con modificación en las resistencias.....	54
5.2.3 Pruebas de calentamiento con el control difuso	54
5.3 Pruebas de prehormado.....	57
CONCLUSIONES.....	58
BIBLIOGRAFIA	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre varios tipos de sensores	9
Tabla 2. Tipos de RTD	10
Tabla 3: Características del termistor 44004.....	13
Tabla 4: Tipos de termopares.....	15
Tabla 5: Temperatura Vs. Salida en mV Termopar tipo K	17
Tabla 6: Características máximas de funcionamiento BTA41 600B	26
Tabla 7: Relación de las reglas difusas	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Máquina prehormadora	2
Figura 2.1: Comportamiento de una PT100.	10
Figura 2.4: Diferentes encapsulados de termopares	14
Figura 2.5: Conjuntos difusos.	18
Figura 2.6: Funciones de pertenencia.	19
Figura 2.7: Reglas difusas.	21
Figura 2.8: Circuito detector de cruce por cero	24
Figura 2.9: Señal del cruce por cero	24
Figura 2.10: Aplicación del MOC302	24
Figura 2.11: Formas de onda del triac según el ángulo de disparo.....	25
Figura 3.1: Temperatura Vs. Salida de la termocupla	28
Figura 3.2: Temperatura Vs. Salida AD595AQ.....	28
Figura 3.3: Conexión básica AD595AQ	29
Figura 3.4: Simulación en Proteus AD595AQ	30
Figura 3.5: Salida AD595AQ Arduino	31
Figura 3.6: Esquema del controlador	31
Figura 3.7: Estructura del controlado.....	32
Figura 3.8: Conjuntos difusos variable error	32
Figura 3.9: Conjuntos difusos variable derror	33
Figura 3.10: Conjuntos difusos variable potencia	33
Figura 3.11: Reglas del controlador. Fuente: Propia	34
Figura 3.12: Comportamiento del controlador, error positivo	35
Figura 3.13: Comportamiento del controlador, error cero	35
Figura 3.14: Comportamiento del controlador, error negativo	36
Figura 3.15: Simulación del circuito de detección de cruce por cero	36
Figura 3.16: Señal de salida, simulación del circuito de detección de cruce por cero.....	37
Figura 3.17: Señal de salida real, circuito de detección de cruce por cero.....	37
Figura 3.18: Simulación de la etapa de potencia	38
Figura 3.19: Señal AC recortada por el triac.....	38
Figura 3.20: Disparo del triac.....	39
Figura 3.21: Circuito panel de control	39
Figura 3.22: Teclado matricial	40
Figura 3.23: LCD 20X4.....	41
Figura 3.24: Diagrama esquemático de la tarjeta de control y potencia.....	42

Figura 4.1: PCB AD595AQ. Fuente: Propia	44
Figura 4.2: PCB AD595AQ en 3D.....	44
Figura 4.3: PCB AD595AQ con las termocuplas.....	45
Figura 4.5: PCB de control y potencia.....	45
Figura 4.6: Tarjeta de control y potencia en 3D.....	46
Figura 4.7: Tarjeta de control y potencia real.	46
Figura 4.8: PCB teclado.....	47
Figura 4.9: PCB real del teclado.....	47
Figura 4.9: Panel de control.....	48
Figura 4.10: Superficies para fijar los moldes.....	49
Figura 4.11: Aislamiento de los moldes.....	49
Figura 4.12: Moldes aislados de la estructura de la Prehormadora.	50
Figura 4.13: Molde tradicional de copa para brasier.	50
Figura 4.14: Resistencias incrustadas en los moldes.....	51
Figura 5.1: Pruebas de calentamiento con control tradicional sin modificaciones.	53
Figura 5.2: Pruebas de calentamiento con el control tradicional.	54
Figura 5.3: Pruebas de calentamiento con el control difuso	55
Figura 5.4 Comportamiento del controlador ON – OFF.	56
Figura 5.5 Comportamiento del controlador difuso.	56
Figura 5.3: Estructura física de la planta con el control difuso.	57
Figura 5.4: Producto terminado.	57

Capítulo 1

1.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto tiene como objetivo principal desarrollar e implementar un sistema de control temperatura difuso con el fin de mejorar un proceso industrial que consiste en dar forma de copa de brasier a una espuma previamente forrada en tela.

Dado que el actual sistema al ser un control ON/OFF presenta unas falencias en cuanto a eficiencia, sensado de temperatura, tiempo de calentamiento, consumo de energía eléctrica entre otros, es necesario implementar otra estrategia de control que mejore dichas deficiencias, para este caso se plantea una estrategia de control inteligente que utiliza lógica difusa puesto que esta permite que por medio de las experiencias brindadas por el experto de la planta el diseño de un controlador que sea eficiente para este tipo de procesos, otra ventaja que presenta esta estrategia de control es que no requiere del modelamiento matemático de la planta para el diseño del mismo.

El proyecto fue dividido en etapas con el fin de estructurarlo y abordar cada etapa individualmente. Las etapas son:

Etapa de Inicio: Esta etapa hace referencia a la documentación teórica para escoger los diferentes componentes que hacen parte del controlador.

Etapa de desarrollo: Fue la parte del proyecto dedicada a las simulaciones electrónicas y códigos de programación necesarios para el desarrollo del proyecto

Etapa de fabricación: En esta etapa se fabricaron las PCB del sistema propuesto, se hicieron las modificaciones de las máquinas y de los moldes así como también algunas pruebas de calentamiento.

Etapa de Experimentación e implementación: Este capítulo hace referencia a las pruebas y puesta en marcha del controlador.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Identificación del problema

En la actualidad el proceso de prehormado de la copa está controlado por un sistema ON-OFF el cual opera de la siguiente forma:

La máquina en la que se pretende implementar el controlador de temperatura diseñado tiene dos moldes de aluminio los cuales son calentados por resistencias; la temperatura es censada por una termocupla instalada en cada molde, estas termocuplas están conectadas a dos controladores (ON/OFF) de temperatura donde está programada la temperatura solicitada, una vez que la temperatura de los moldes sea igual a la programada en el controlador, este por medio de un interruptor impide el flujo de energía en las resistencias; si la temperatura cesada es inferior, el flujo de corriente en las resistencias se mantiene hasta que el sensor detecta que la temperatura en los moldes aparentemente es igual a la programada en el controlador.



Figura 1.1: Máquina prehormadora. Fuente: Propia

Este tipo de control presenta las siguientes desventajas:

- La falta de mantenimiento del controlador y la ubicación del sensor, hace que la temperatura censada no sea igual a la temperatura real de los moldes, esto conlleva a errores en el prehormado de la copa como falta de profundidad, deformaciones, telas quemadas por exceso de temperatura etc.
- Al ser un control ON/OFF el incremento de consumo de energía es notable dado que al interrumpir y conectar constantemente el fluido de energía en las resistencias se generan sobre picos de corriente y estos se ven reflejados en el consumo de energía.
- Puede que la temperatura censada en el punto donde está ubicada la termocupla no sea la misma en otro punto del molde, este factor incide negativamente en el resultado del producto final.
- Debido a la falta de precisión de la lectura de la temperatura el operario tiene que acudir en muchas ocasiones a realizar diferentes pruebas variando la temperatura de referencia en el controlador hasta hallar un valor apto para iniciar el proceso de prehormado, durante estas pruebas tanto el tiempo que conllevan y el desperdicio del material como espuma, tela y pegante son factores que representan un costo adicional en el producto final.

1.2.2 Justificación

Teniendo en cuenta la importancia que representa el control de una variable física en la industria y la necesidad de cada día ir mejorando ese tipo de control con el fin de optimizar dichos procesos, es necesario plantear soluciones integrales que logren cumplir con determinados criterios como tiempo de respuesta, estabilidad, seguridad, fiabilidad,

entre otros; esto con el fin de tener mejoras relevantes en cuanto a calidad, productividad y eficiencia.

Con el respectivo análisis del control de temperatura que se utiliza en este proceso de prehomado se evidencia la necesidad de replantear la estrategia de control para este proceso dado que se identifican una serie de desventajas descritas anteriormente que dificultan esta labor y a su vez desperdicia ciertos recursos como materia prima y energía eléctrica, hoy en día en donde los recursos naturales disminuyen al mismo ritmo que la tecnología avanza es fundamental tener como criterio principal el ahorro de estos recursos naturales, especialmente en el ámbito de la industria pues históricamente es el campo que más ha afectado negativamente el medio ambiente.

Se propuso implementar una estrategia de control difuso dado que este puede aplicarse con sencillez a procesos de elevada complejidad que carecen de una previa identificación ya sea porque no se conoce información de su dinámica o porque la información que proviene de sus sensores es imperfecta.

Otro aspecto de gran importancia que se tuvo en cuenta para la presentación de este proyecto es que la propuesta permite la interacción de diferentes áreas de la electrónica como control, electrónica digital e instrumentación. Es necesario evidenciar el comportamiento de la variable de control (la temperatura), para cumplir con este aspecto se propone diseñar un panel de control de usuario que permita monitorear constantemente la variable controlada y realizar modificaciones en cuanto al valor de la temperatura deseada, es en esta parte del proyecto donde se evidencia la aplicación de la electrónica digital. En cuanto a la instrumentación electrónica; el papel de ésta no es menos importante debido a que es necesario aplicar métodos de linealización y diversos criterios sobre todo en los sensores escogidos para cumplir con la etapa de recolección de información.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar, construir e implementar un sistema de control difuso de temperatura para un proceso industrial de prehormado de copa para brasier.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un panel de control de usuario sencillo en donde el operador pueda ver la temperatura real de los moldes y modificar la temperatura de referencia.
- Implementar un sistema de control capaz de suplir las falencias que presenta el actual controlador con el fin de optimizar el proceso de prehormado de copa para brasier.
- Generar un plan de pruebas que permita monitorear constantemente el funcionamiento del controlador difuso, detectar de forma temprana alguna falla y proceder con una reparación eficiente según lo diagnosticado.

1.4 ANTECEDENTES

1.4.1 “CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA PARA CARGA RESISTIVA CON MICROCONTROLADOR DE 8 BITS”, Gustavo Adolfo Meneses Benavides, Universidad de Antioquia, Colombia, Año 2005.

Esta tesis describe todo el proceso de diseño de un controlador de temperatura difuso implementado en un PIC 16f876 de Microchip cuyo objetivo era controlar una temperatura producida en carga resistiva de diferentes valores, según el autor las pruebas se realizaron con un set point fijo de 25 °C y la refrigeración estaba a cargo de un cooler de 12V para PC.

1.4.2 “SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA INCUVADORA AVÍCOLA CON CONTROL DIFUSO Y LA PLATAFORMA LABVIEW”, Adán Cortés de la Cruz y Oscar Arenas Rosales, Universidad Autónoma de Zacatecas Francisco García Salinas, México, 2011

Este proyecto está basado en un sistema de control difuso de temperatura el cual es programado en LabVIEW utilizando las herramientas fuzzy, se utilizaron sensores de temperatura comerciales y una tarjeta de adquisición de datos (NI USB DAQ 6009) de National Instruments. Este sistema también cuenta con un control digital de encendido y apagado para la humedad la cual se eleva prendiendo o apagando unos humidificadores.

1.4.3 “CONTROL DE TEMPERATURA DE UN HORNO ELÉCTRICO MEDIANTE LÓGICA DIFUSA”, Issac Salomón Jiménez Escamilla, Universidad Tecnológica de la Mixteca, México, 2012

En esta tesis se muestra el proceso de construcción de un sistema de control de temperatura de un horno eléctrico utilizado para la creación de piezas de cerámica, este controlador trabaja con la diferencia entre la temperatura real y la temperatura deseada, esta diferencia (señal de error) es procesada por un microcontrolador que se encarga de hacer un control de encendido y apagado mediante ciclos completos, la interfaz de usuario fue desarrollada en LabVIEW y la adquisición de datos fue realizada por medio de una tarjeta de adquisición de datos.

Capítulo 2

ETAPA DE INICIO

Esta etapa tuvo como finalidad profundizar en los aspectos teóricos y los criterios pertinentes para el progreso del proyecto, lo anterior se propuso con el objetivo de recopilar información clara y concisa con el fin de tener herramientas para determinar el tipo de sensor apropiado que cumpliera con el requerimiento del sistema. Posteriormente se procedió a abordar la documentación acerca del control difuso con el fin de tener claros los parámetros del controlador, La tercera parte de esta etapa estuvo relacionada con la etapa de potencia cuya carga es netamente resistiva, y por último se aborda el diseño del panel de control digital; para escoger un panel adecuado se recopiló información proveniente de los operarios.

2.1 El sensor de temperatura

En el mercado existen muchos tipos de sensores creados con el propósito de medir temperatura. Para escoger un sensor adecuado que cumpliera con los requerimientos del sistema planteado, se tuvo en cuenta el costo, la fiabilidad en cuanto al censo, su topología física, el rango de temperatura, su precisión y la velocidad de respuesta. A continuación se muestra una tabla comparativa que muestra las principales características de diferentes sensores de temperatura.

Tipo de Sensor	Salida	Rango °C	Precision \pm °C	Robustez	Coste
Termopar	40 μ V/ C	-270 a 2300	1,5	Alto	Bajo
RTD platino	0,4 % °C	-200 a 600	0,2	Media	Medio
RTD niquel	0,4 % °C	-200 a 600	0	Media	Bajo
Termistor	5 % °C	-50 a 200	0,2	Alta	Medio
Semiconductor	10 mV/°C o 1 μ A/°C	-40 a 125	1,5	Media	Bajo
No Contacto	milivoltios	0 a 6000	arios, o \pm 0,001	Varias	Varios
Bimetalico	Desplazamiento	-100 a 300	2	Alta	Bajo
Pintura	Cambio de color	-30 a 1200	1 a 20	Media	Bajo

Tabla 1: Comparación de características entre varios tipos de sensores. Fuente: Pajares J. A., (2001), Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW

Los sensores que se tuvieron en cuenta fueron: El RTD (PT100), el Termopar, y el Termistor dado que son los más utilizados en la industria para controlar diferentes procesos de termo formado.

2.1.1 Detectores de Temperaturas Resistivos (RTD)

Un detector de temperatura resistivo (RTD) se basa en la variación de su valor resistivo cuando es sometida a determinada temperatura, lo anterior es posible dado que una RTD está compuesta básicamente de platino y este material cuenta con la propiedad de cambiar su resistencia eléctrica cuando es sometido a una temperatura.

METAL	SIMBOLO	RANGO DE TEMPERATURA
Cobre	Cu	- 200 °C a 260 °C
Molibdeno	Mo	- 200 °C a 200°C
Níquel	Ni	-80°C a 260°C
Níquel-Hierro	Ni-Fe	-200°C a 200°C
Platino	Pt	-240°C a 660°C

Tabla 2: Tipos de RTD. Fuente: Pajares Encinas J. A., (2001), Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW.

Para este caso se contempló utilizar una RTD tipo PT100 de platino que a 0°C presenta un valor resistivo de 100 ohmios.

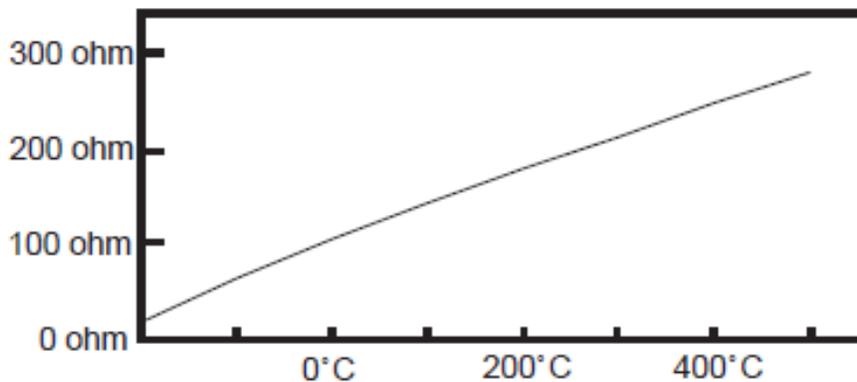


Figura 2.1: Comportamiento de una PT100. Recuperado de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1478>

Como se observa en la figura 2.1 el incremento de la resistencia no es lineal pero si es creciente, lo cual permite que por medio de tablas sea posible encontrar la temperatura exacta a la cual está sometida la PT100 en determinado momento.

2.1.1.1 Ventajas de una PT100

- Dependiendo del circuito de instrumentación, su exactitud en la medición puede ser muy buena dado que puede entregar precisiones de una décima de grado.
- No se descompone gradualmente sino que al fallar normalmente se rompe el hilo del material en que está fabricada.
- Una PT100 puede ser colocada a una distancia de hasta 30 mts del medidor sin que esto cause lecturas erróneas.

2.1.1.2 Desventajas de una PT100

- El costo es significativamente más alto en comparación con otros tipos de sensores.
- Son frágiles, por lo que no se recomienda usarlas en plantas que están en constante movimiento.

No se optó por este tipo de sensor por las desventajas descritas anteriormente, otro factor que influyó negativamente fue el hecho de que al tratar de adquirir una PT100 tocaba mandarla a hacer puesto las que estaban en el mercado solo tenían un rango de temperatura de hasta 150°C, además los fabricantes no brindaban mayor información sobre el material utilizado para su fabricación, dato que es muy importante para saber con exactitud cuál es la fórmula matemática que se puede aplicar para obtener el valor en grados centígrados de acuerdo con el estándar IEC751-1983.

2.1.2 Termistor

El termistor es un sensor de temperatura por lo general fabricado de un material semiconductor llamado óxido de metal el cual tiene la propiedad de variar su valor resistivo cuando se expone a diferentes temperaturas.

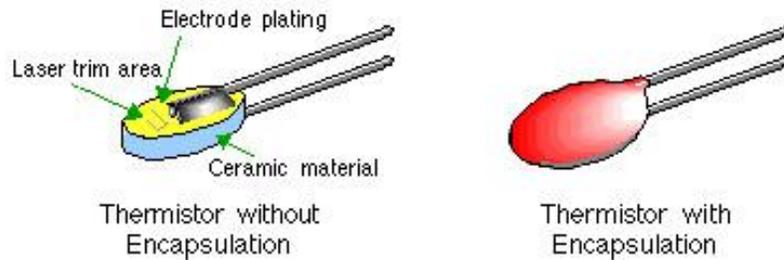


Figura 2.2: Formas del termistor. Fuente Pajares encinas, J. (2001). Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW .

El termistor físicamente es simple y robusto, la falla más probable es que el cable se separe del cuerpo del termistor y también el óxido de metal es propenso a ser dañado por la humedad este aspecto es mitigado mediante un encapsulado de cristal o resina epóxica.

Cada sensor tiene una resistencia nominal designada que varía proporcionalmente con la temperatura de acuerdo a una aproximación alineada. Los termistores tienen ya sea un coeficiente de temperatura negativo (NTC) o un coeficiente de temperatura positivo (PTC). El primero, y el más común, tiene una resistencia que disminuye al aumentar la temperatura y el segundo presenta mayor resistencia al aumentar la temperatura.

Se puede usar termistores PTC como dispositivos de corriente limitada para protección de circuitos (en lugar de fusibles) y como elementos de calentamiento en pequeños hornos de temperatura controlada. Estos sensores generalmente tienen una sensibilidad muy alta ($\sim 200 \Omega/^\circ\text{C}$), lo cual los hace extremadamente susceptibles a los cambios de

temperatura. A pesar de que tienen un rango rápido de respuesta, los termistores están limitados para uso en un rango de temperatura de 300 °C. Esto, junto con su alta resistencia nominal, ayuda a proporcionar medidas precisas en aplicaciones de menor temperatura.

El principal inconveniente que se observó en este sensor fue su forma física puesto que su estructura no permite un buen contacto con el molde de aluminio y su rango de temperatura es limitado (-90°C a 130°C) como se muestra en la siguiente tabla del termistor 44004.

Parámetro	Especificación
Resistencia a 25 °C	2252 ohmios (100 hasta 1M disponible)
Rango de Medida	-80 hasta +120 °C típico (250 °C máximo)
Capacidad de intercambio (tolerancia)	±0,1 o ±0,2 °C
Estabilidad por encima de 12 meses	<0,002 °C a 25 °C, <0,25 °C a 100 °C
Constante de tiempo	<1,0 segundos en aceite >60 segundos al aire libre

Tabla 3: Características del termistor 44004. Fuente Pajares encinas, J. (2001). Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW

2.1.3 El termopar

Un termopar o termocupla comúnmente llamado así en la industria, está fabricada por dos metales diferentes los cuales se unen y en esta unión o punto de contacto se produce un pequeño voltaje que varía dependiendo de la temperatura, este fenómeno se conoce como el efecto Seebeck.

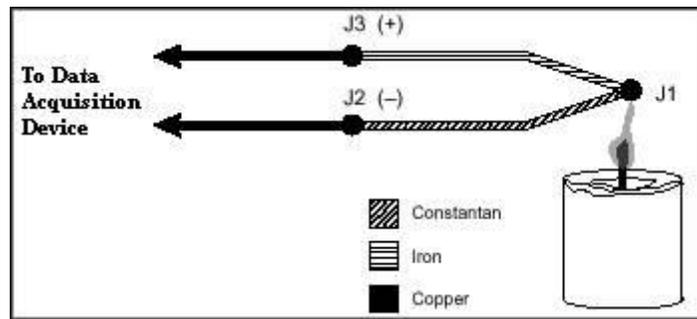


Figura 2.3: Termopar. Recuperado de <http://www.ni.com/white-paper/7108/es/>

Debido a sus características físicas, los termopares son el método preferido de medida de temperatura en muchas aplicaciones. Pueden ser muy duros, son inmunes a una descarga eléctrica y a la vibración, son útiles para un rango ancho de temperaturas, son simples de fabricar, no requieren ninguna corriente de excitación, no tienen auto calentamiento y pueden fabricarse muy pequeños. Ningún otro sensor de temperatura proporciona este grado de flexibilidad.



Figura 2.4: Diferentes encapsulados de termopares. Recuperado de <http://www.conatec.com/conatec/de/texto-home-4.asp?nombre=2457&cod=2457&sesion=1>

Como parte negativa, el termopar produce a la salida una señal baja relativa que es no-lineal. También el nivel bajo de señal exige un alto nivel de precaución tomada al instalarlo para minimizar las fuentes potenciales de ruido.

El hardware que mide o circuito de acondicionamiento requiere buena capacidad de rechazo del ruido. Los bucles de tierra pueden ser un problema para los sistemas sin aislar.

2.1.3.1 Tipos de Termopares

En el mercado se pueden conseguir diferentes tipos de termopares, estos difieren en su composición de los metales por lo cual presentan características diferentes como: rango de temperatura, precisión y aplicaciones, en la industria se prefiere generalmente termocuplas tipo K y J puesto que estas soportan temperaturas muy altas y tienen bajo costo, y las de tipo T dado que son muy precisas. A continuación se presenta una tabla comparativa de los diferentes tipos de termocuplas.

Tipo	Material positivo	Material Negativo	Precisión clase 2	Rango °C
B	Pt, 30%Rh	pt, 6%Rh	0,5% > 800 °C	50 a 1820
E	Ni, 10%Cr	Cu, 45%Ni	0,5% o 1,7 °C	-2700 a 1000
J	Fe	Cu, 45%Ni	0,75% o 2,2 °C	-210 a 1200
K	Ni 10%Cr	Ni, 2%Al 2%Mn 1%Si	0,75% a 2,2 °C	-270 a 1372
R	Pt, 13%Rh	Pt	0,25% o 1,5 °C	-50 a 1768
S	Pt, 10%Rh	Pt	0,25% o 1,5 °C	-50 a 1768
T	Cu	Cu, 45%Ni	0,75% o 1,0°C	-270 a 400

Tabla 4: Tipos de termopares. Fuente Pajares encinas, J. (2001). Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW

Se opta por escoger este tipo de sensor (tipo K) por las siguientes características:

- Su robustez y sus diferentes aspectos físicos como el diámetro y el largor de su encapsulado son pertinentes para un óptimo censado de temperatura en los moldes de aluminio.
- Su bajo costo.
- Son los más utilizados en la industria para este tipo de aplicaciones.
- Su tiempo de respuesta y su precisión son adecuados para garantizar una lectura aceptable.

En la siguiente tabla se relaciona el voltaje de salida en milivoltios con respecto a la variación en temperatura de un termopar de tipo K

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,00	0,02	0,06	0,10	0,14	0,18	0,22	0,26	0,29	0,33	0,37
10	0,37	0,41	0,45	0,49	0,53	0,57	0,61	0,65	0,69	0,73	0,77
20	0,77	0,81	0,85	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,08	1,12	1,16
30	1,16	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,40	1,44	1,48	1,52	1,56
40	1,56	1,60	1,64	1,68	1,72	1,76	1,80	1,84	1,88	1,92	1,96
50	1,96	2,00	2,04	2,08	2,13	2,17	2,21	2,25	2,29	2,33	2,37
60	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57	2,61	2,65	2,69	2,73	2,77
70	2,77	2,81	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,05	3,09	3,13	3,18
80	3,18	3,22	3,26	3,30	3,34	3,38	3,42	3,46	3,50	3,54	3,58
90	3,58	3,62	3,66	3,70	3,74	3,78	3,82	3,87	3,91	3,95	3,99
100	3,99	4,03	4,07	4,11	4,15	4,19	4,23	4,27	4,31	4,35	4,39
110	4,39	4,44	4,48	4,52	4,56	4,60	4,64	4,68	4,72	4,76	4,80
120	4,80	4,84	4,88	4,92	4,97	5,01	5,05	5,09	5,13	5,17	5,21
130	5,21	5,25	5,29	5,33	5,37	5,41	5,45	5,50	5,54	5,58	5,62
140	5,62	5,66	5,70	5,74	5,78	5,82	5,86	5,90	5,95	5,99	6,03
150	6,03	6,07	6,11	6,15	6,19	6,23	6,27	6,31	6,35	6,40	6,44
160	6,44	6,48	6,52	6,56	6,60	6,64	6,68	6,72	6,76	6,80	6,85
170	6,85	6,89	6,93	6,97	7,01	7,05	7,09	7,13	7,17	7,21	7,26
180	7,26	7,30	7,34	7,38	7,42	7,46	7,50	7,54	7,58	7,62	7,67
190	7,67	7,71	7,75	7,79	7,83	7,87	7,91	7,95	7,99	8,03	8,08
200	8,08	8,12	8,16	8,20	8,24	8,28	8,32	8,36	8,40	8,45	8,49
210	8,49	8,53	8,57	8,61	8,65	8,69	8,73	8,77	8,82	8,86	8,90
220	8,90	8,94	8,98	9,02	9,06	9,10	9,14	9,19	9,23	9,27	9,31
230	9,31	9,35	9,39	9,43	9,47	9,51	9,56	9,60	9,64	9,68	9,72
240	9,72	9,76	9,80	9,84	9,89	9,93	9,97	10,01	10,05	10,09	10,13
250	10,13	10,17	10,22	10,26	10,30	10,34	10,38	10,42	10,46	10,51	10,55
260	10,55	10,59	10,63	10,67	10,71	10,75	10,79	10,84	10,88	10,92	10,96
270	10,96	11,00	11,04	11,08	11,13	11,17	11,21	11,25	11,29	11,33	11,37
280	11,37	11,42	11,46	11,50	11,54	11,58	11,62	11,67	11,71	11,75	11,79
290	11,79	11,83	11,87	11,91	11,96	12,00	12,04	12,08	12,12	12,16	12,21
300	12,21	12,25	12,29	12,33	12,37	12,41	12,45	12,50	12,54	12,58	12,62

310	12,62	12,66	12,70	12,75	12,79	12,83	12,87	12,91	12,95	13,00	13,04
320	13,04	13,08	13,12	13,16	13,21	13,25	13,29	13,33	13,37	13,41	13,46
330	13,46	13,50	13,54	13,58	13,62	13,66	13,71	13,75	13,79	13,83	13,87
340	13,87	13,92	13,96	14,00	14,04	14,08	14,13	14,17	14,21	14,25	14,29
350	14,29	14,33	14,38	14,42	14,46	14,50	14,54	14,59	14,63	14,67	14,71
360	14,71	14,75	14,80	14,84	14,88	14,92	14,96	15,01	15,05	15,09	15,13
370	15,13	15,17	15,22	15,26	15,30	15,34	15,39	15,43	15,47	15,51	15,55
380	15,55	15,60	15,64	15,68	15,72	15,76	15,81	15,85	15,89	15,93	15,98
390	15,98	16,02	16,06	16,10	16,14	16,19	16,23	16,27	16,31	16,35	16,40
400	16,40	16,44	16,48	16,52	16,57	16,61	16,65	16,69	16,74	16,78	16,82

Tabla 5: Temperatura Vs. Salida en mV Termopar tipo K. Norma IEC 584-1:1995.
Recuperado de http://www.unet.edu.ve/~nduran/Teoria_Instrucontrol/termopares.pdf

2.2 Lógica Difusa

También conocida como Lógica Borrosa, se basa en reglas que utilizan técnicas para manejar la falta de precisión. Contrario a la lógica tradicional que trabaja con información definida y exacta. La lógica difusa también puede aplicarse con sencillez a procesos de elevada complejidad que carecen de una previa identificación ya sea porque no se conoce información de su dinámica o porque la información que proviene de sus sensores es imperfecta.

Este tipo de controladores tratan de implantar estrategias de control expresadas en términos lingüísticos por operadores de proceso, para ello se basan en lógica difusa permitiendo de esta manera trabajar con información que no es exacta para poder definir evaluaciones convencionales.

El control Difuso basado en la lógica difusa se puede aplicar en procesos complejos o cuando ciertas partes de un sistema a controlar son desconocidas y no pueden medirse de forma confiable, no se recomienda implementar este tipo de control cuando existe algún modelo matemático que solucione eficientemente el problema, algunos campos donde se utiliza el control difuso son: Control de tráfico, control de vehículos, hidroeléctricas, centrales térmicas, control en máquinas lavadoras, ascensores, entre otros..

2.2.1 Conjuntos Difusos

Un conjunto difuso es aquel en donde la función de pertinencia puede tener valores entre 0 y 1 lo contrario a los conjuntos clásicos dado que estos solo pueden ser 0 o 1, estos conjuntos difusos permiten dar una pertinencia diferente a parámetros que estén dentro de una función de membresía. En la siguiente imagen se muestran diferentes conjuntos difusos con sus respectivas etiquetas lingüísticas.

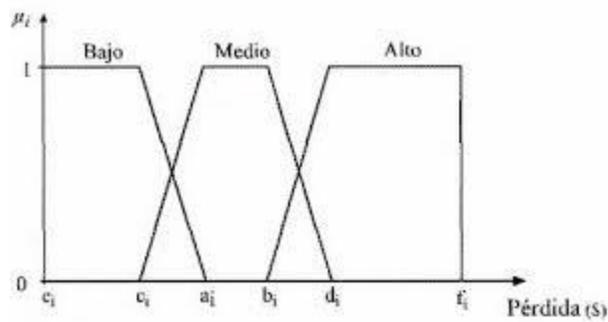


Figura 2.5: Conjuntos difusos. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-28072006000200009

Para contextualizar lo anteriormente descrito se puede tomar un ejemplo clásico del control difuso. En la teoría clásica si se clasificara a las personas altas las que tienen una altura mayor a 1.85 m, todas las personas que tengan una altura mayor o igual tendrían el mismo valor de pertinencia igual a 1 y las que no su valor de pertinencia sería 0. Debido a las características de los conjuntos difusos se pueden asignar valores de pertinencia que van desde 0 hasta 1, por ejemplo: si una persona tiene una altura de 1.80 m se le podría incluir al conjunto de los altos con un valor de pertinencia de 0.8.

2.2.2 Funciones De Pertenencia

Se trata de funciones que se encuentran en el intervalo de 0 a 1, las más utilizadas son: Trapezoidal, triangular, gaussiana, sigmoidea entre otras. Dichas funciones de pertinencia representan las coordenadas difusas del atributo.

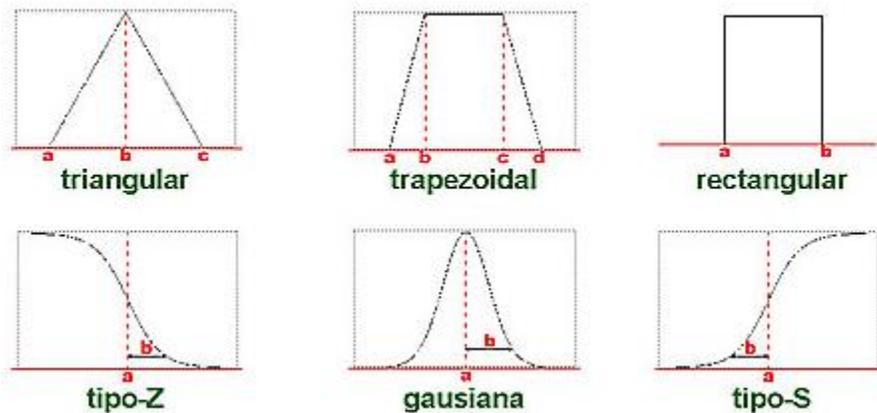


Figura 2.6: Funciones de pertenencia. Recuperado de <http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/FLEB/main/main22.htm>

En la anterior figura se muestra la forma de las funciones de pertinencia, a continuación se realiza una breve descripción de las más utilizadas.

- Trapezoidales y Triangulares: Son funciones lineales por tramos, pero presentan una discontinuidad en la primera derivada que hereda la acción de control.
- Exponenciales: Muestran un comportamiento adecuado y no representan discontinuidad en la derivada.
- Polinómicas: Son funciones sencillas de calcular y tienen una forma similar a las funciones de densidad normal.

2.2.3 Variables Lingüísticas

Una variable lingüística es la que su valor se representa mediante términos lingüísticos y el significado de esta se determina por medio de los conjuntos difusos, estas variables pueden ser la temperatura, velocidad, fluido, potencia etc. y estas a su vez pueden tomar diferentes valores como muy alta, alta mediana, pequeña, muy pequeña o cero, estos valores diferentes de la variable son llamados comúnmente términos lingüísticos, y son de gran utilidad en el momento de describir las variables de entrada dado que le ayuda al diseñador a entender y predecir la salida de la planta o problema a controlar

2.2.4 Fuzzificación

Este es un proceso que se encarga de convertir una variable real en un grado de pertinencia para lo cual es necesario definir los términos y variables lingüísticas así como las reglas que asocian la entrada con la salida del sistema, estas variables representan situaciones como positivo, negativo, alto, pequeño etc. Esta operación se realiza durante todo el tiempo en que la planta es controlada.

2.2.5 Reglas Difusas

Para realizar un control difuso es necesario tener reglas las cuales combinan uno o más conjuntos difusos de entrada y le asocian otro conjunto difuso de salida, por ejemplo: *si el error es positivo y la derivada del error es positivo grande entonces la potencia es máxima*; también se conocen como afirmaciones de tipo sí- entonces y están asociadas mediante operaciones lógicas como AND, OR, etc.

Las Reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se tiene sobre la relación entre las variables de entrada y las variables de salida, por lo general se requiere de varias reglas que determinan cual será el comportamiento del controlador y es en este proceso donde se pone a prueba la experiencia o agilidad del diseñador para comprender el funcionamiento de la planta y su posible comportamiento en la salida puesto que de este conocimiento depende la estrategia de control.

```
1. If (error is pmg) and (derror is pos) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
2. If (error is pmg) and (derror is cero) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
3. If (error is pmg) and (derror is neg) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
4. If (error is pg) and (derror is pos) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
5. If (error is pg) and (derror is cero) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
6. If (error is pg) and (derror is neg) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
7. If (error is pm) and (derror is neg) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
8. If (error is pm) and (derror is cero) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
9. If (error is pm) and (derror is pos) then (output1 is pot_myu_grande) (1)
10. If (error is cero) and (derror is pos) then (output1 is pot_peq) (1)
```

Figura2.7: Reglas difusas. Fuente: Propia

La base de reglas se representa por tablas, la más sencilla de realizar es la que consta de dos entradas y de una salida, a medida que se incrementa las variables lingüísticas más compleja es la tabla pero mucho más eficiente será el controlador, para cada regla puede estar asociado un valor entre cero y uno que sería el peso de la regla. Hay gran variedad de tipos de reglas pero solo dos son los más utilizados, las reglas difusas Mamdani y las reglas difusas de Takagi- Sugeno, en estos grupos la estructura de las reglas es la misma tanto para los controladores como para modelos, simplemente cambian las variables implementadas.

2.2.6 Defuzzificacion

La defuzzificación es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real, por medio de la inferencia difusa se obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada, dicha información está en términos difusos. La inferencia

borrosa genera un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real, es por eso es que existen diferentes métodos de defuzzificación como el de centro de área, método de la altura, máximo promedio eficaz, etc. los cuales arrojan resultados distintos, el más común es el centroide dado que con este método se transforma la salida difusa en un número real el cual es la coordenada x del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida.

2.2.7 Ventajas

- Las regulaciones de las variables se pueden realizar de forma rápida y comprensible, esto se aplica sobre todo cuando no hay ningún modelo de sistema controlado o cuando el modelo presente una estructura no lineal.
- El comportamiento de un sistema se describe con expresiones lingüísticas, por lo que es más sencillo que una descripción matemática.
- La base de reglas y la definición de la cantidad difusa se pueden ampliar o adaptar con posterioridad.

2.2.8 Desventajas

- El control difuso se basa en las experiencias de los controladores existentes o de las personas por lo tanto las fallas en la fase de creación solo se pueden corregir con posterioridad.
- Si un sistema es muy complejo en cuanto a su funcionamiento, así mismo será el trabajo que se requiere para el desarrollo del controlador difuso.

2.3 Etapa De Potencia

Para el diseño y construcción de la etapa de potencia es necesario primero conocer las características eléctricas de la planta.

- Voltaje de alimentación: 220 AC
- Corriente máxima : 15 Amperios
- 2 resistencias de calentamiento de 70 ohmios C/U en cada molde
- Tiempo de calentamiento: 1 hora aproximadamente

La etapa de potencia estará controlada por medio de una señal PWM que a su vez controla el disparo de un triac con el fin de variar el voltaje AC que fluye a través de las resistencias que calientan los moldes de aluminio para que de esta manera se pueda controlar la temperatura en los moldes.

2.3.1 Detección de cruce por cero

Para controlar la variación de voltaje AC por medio de un tirac es necesario detectar el cruce por cero de la onda, para esta tarea se utilizó el circuito integrado H11AA1 que contiene en su entrada dos LEDs infrarrojos conectados inversamente en paralelo y acoplados a un fototransistor NPN de silicio, este circuito integrado está diseñado principalmente para aplicaciones que requieren la detección y monitoreo de señales de corriente alterna.

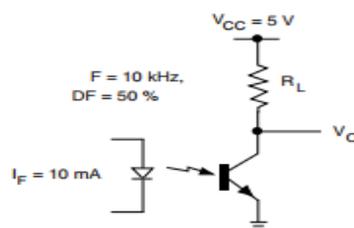


Figura 2.8: Circuito detector de cruce por cero. Fuente: Hoja de datos H11AA1
 La señal de salida del anterior circuito es captada por un pin digital del microcontrolador Atmega 328P configurado en modo de entrada con el fin de activar el tirac por medio de un MOC3023.

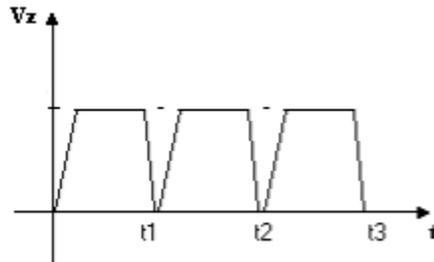


Figura 2.9: Señal del cruce por cero. Fuente: Propia

2.3.2 Circuito electrónico de potencia

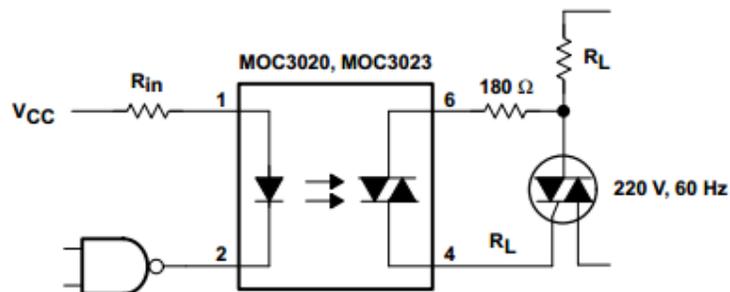


Figura 2.10: Aplicación del MOC302. Fuente: Hoja de datos MOC3023

La figura 2.10 es una aplicación básica del optoacoplador MOC3023 para cargas resistivas, para la aplicación en cuestión V_{cc} consiste en una señal que va a estar en estado alto durante determinado tiempo, cuando dicha señal está en alto el MOC3023 hace que el triac se dispare y actúe como interruptor cerrado lo cual conlleva a que la corriente fluya en la resistencia de carga. El voltaje AC en las resistencias depende del ancho de pulso del ciclo útil de la señal PWM cuya frecuencia es de 120Hz.

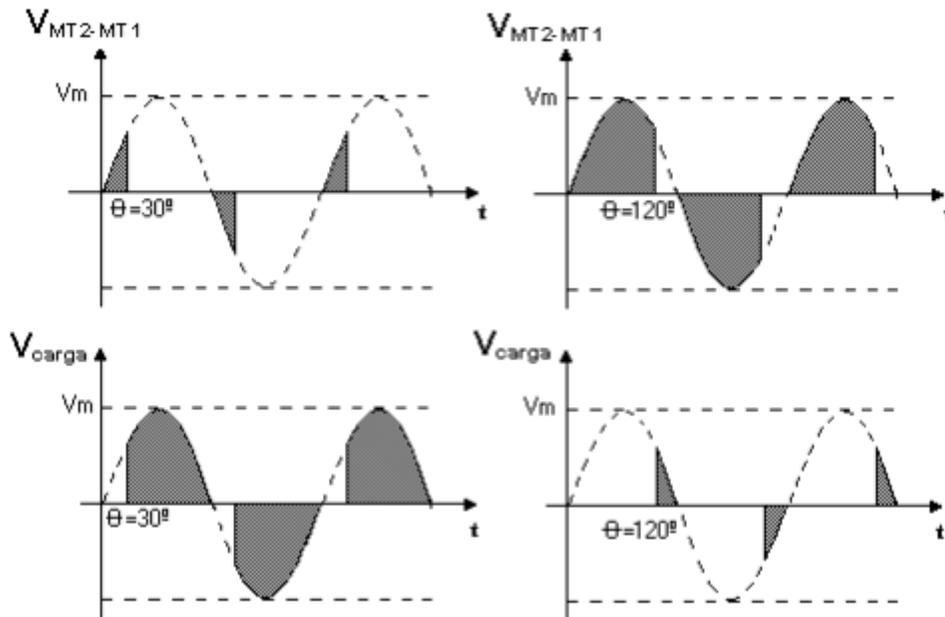


Figura 2.11: Formas de onda del triac según el ángulo de disparo. Recuperado de <http://www.fra.utn.edu.ar/download/carreras/ingenierias/electrica/materias/planestudio/quintoni/el/electronicaII/apuntes/triac.pdf>

2.3.3 Características del Triac

Puesto que la carga tiene un valor resistivo de 35 ohmios (aproximadamente dado que las dos resistencias están conectadas en paralelo) y el voltaje de alimentación AC es de 220 VAC, la corriente que fluye por dicha carga es de 6.28 Amperios por lo tanto se escoge el triac de referencia BTA 41 600B cuyo voltaje V_{DRM} es de 600V y la corriente I_{RMS} es de 40 Amperios a una temperatura de máxima de 70°C. Las anteriores características son mucho más grandes que las requeridas por el sistema por lo tanto el triac no trabajara tan forzado. A continuación se muestran las características eléctricas máximas de funcionamiento que brinda la hoja de datos de este dispositivo.

Symbol	Parameter			Value	Unit
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current (full sine wave)	RD91	$T_c = 80^\circ\text{C}$	40	A
		TOP3			
		TOP3 Ins.	$T_c = 70^\circ\text{C}$		
I_{TSM}	Non repetitive surge peak on-state current (full cycle, T_j initial = 25°C)	$F = 60\text{ Hz}$	$t = 16.7\text{ ms}$	420	A
		$F = 50\text{ Hz}$	$t = 20\text{ ms}$	400	
I^2t	I^2t Value for fusing	$t_p = 10\text{ ms}$		880	A^2s
dI/dt	Critical rate of rise of on-state current $I_G = 2 \times I_{GT}$, $t_r \leq 100\text{ ns}$	$F = 120\text{ Hz}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	50	$\text{A}/\mu\text{s}$
V_{DSM}/V_{RSM}	Non repetitive surge peak off-state voltage	$t_p = 10\text{ ms}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	$\frac{V_{DRM}}{V_{RRM} + 100}$	V
I_{GM}	Peak gate current	$t_p = 20\text{ }\mu\text{s}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$	8	A
$P_{G(AV)}$	Average gate power dissipation		$T_j = 125^\circ\text{C}$	1	W
T_{stg} T_j	Storage junction temperature range Operating junction temperature range			- 40 to + 150 - 40 to + 125	$^\circ\text{C}$

Tabla 6: Características máximas de funcionamiento BTA41 600B. Fuente: Hoja de datos BTA41 600B

Capítulo 3

ETAPA DE DESARROLLO

Una vez culminó la etapa anterior, el siguiente paso fue realizar todos los procedimientos lógicos y de programación pertinentes, así como como las simulaciones necesarias con ayuda de software con el fin de verificar el funcionamiento y estabilidad del controlador con su respectivo panel de control de usuario.

3.1 Circuito de instrumentación para las termocuplas

Debido a que el voltaje de salida de los termopares no es lineal con respecto a la variación de temperatura y es del orden de los milivoltios es necesario contar con un circuito de linealización y amplificación de esta señal, para suplir esta necesidad se implementa un circuito basado en el amplificador de instrumentación AD595AQ de Analog Devices, según el fabricante este amplificador de instrumentación está calibrado para este tipo de termocuplas y tiene una salida de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, por lo tanto puede ser utilizado como compensador lineal, otra característica importante de este circuito es que tiene una alarma de fallo que se activa si detecta que algún cable de la termocupla está abierto. En la figura 3.1 se puede ver la relación entre la temperatura sensada y el voltaje de salida de la termocupla en milivoltios.

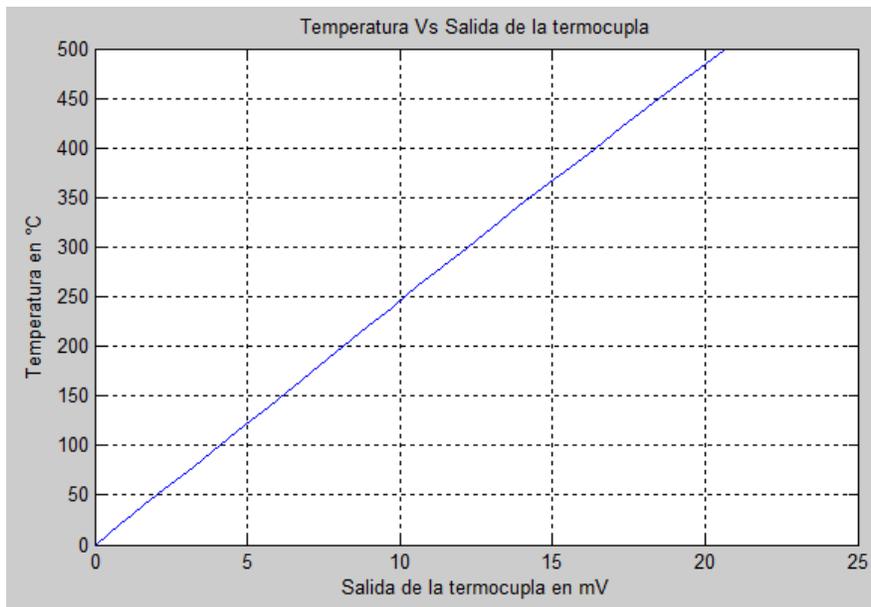


Figura 3.1: Temperatura Vs. Salida de la termocupla. Fuente: Propia

En la gráfica 3.2, el circuito integrado AD595AQ cumple con amplificar la señal de la termocupla y darle un valor de 10mV/ °C.

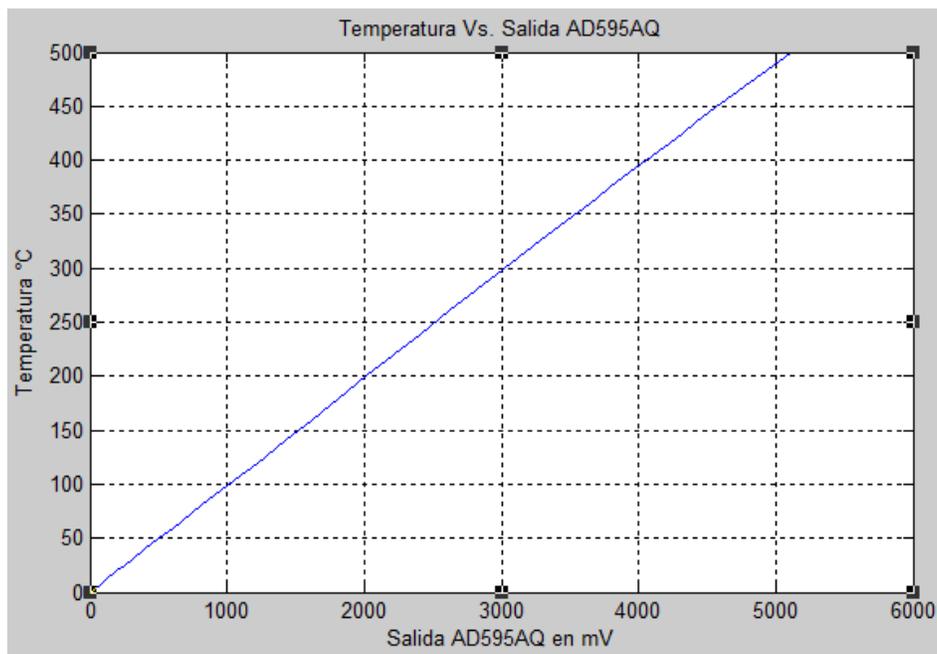


Figura 3.2: Temperatura Vs. Salida AD595AQ. Fuente: Propia

Los datos para la representación de las figuras 3.1 y 3.2 fueron tomados de la hoja de datos del amplificador de instrumentación AD595AQ del fabricante Analog Devices.

El Circuito integrado se puede alimentar con una fuente de voltaje de 5 voltios DC y el diagrama de conexión básico se puede observar en la siguiente figura.

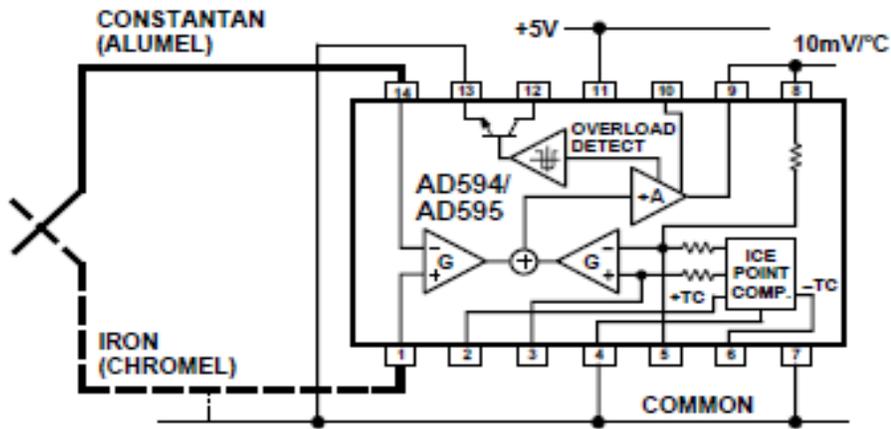


Figura 3.3: Conexión básica AD595AQ. Fuente Hoja de datos AD595AQ

3.1.1 Simulación del circuito acondicionador AD595AQ

Se procede a realizar la simulación del circuito con el fin de observar su correcto funcionamiento, a una temperatura de 25 °C se ve que en la salida del CI hay 250 mV.

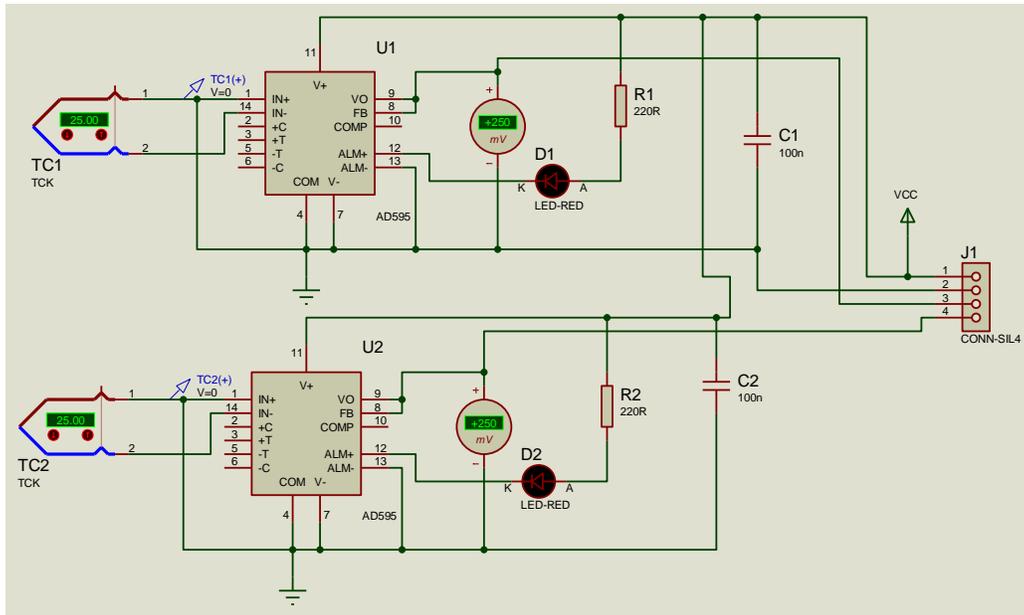


Figura 3.4: Simulación en Proteus AD595AQ. Fuente: Propia

Se utiliza el pin analógico A0 del microcontrolador como entrada, por este pin ingresa el voltaje de salida del AD595AQ el cual es procesado por el convertidor analógico digital de 10 bits, por medio de la línea de código 3.1 se obtiene el valor de la temperatura en grados centígrados que está censando la termocupla.

$$celcius = (5 * analogRead(analogInPin) * 100.0)/1024.0 \quad (3.1)$$

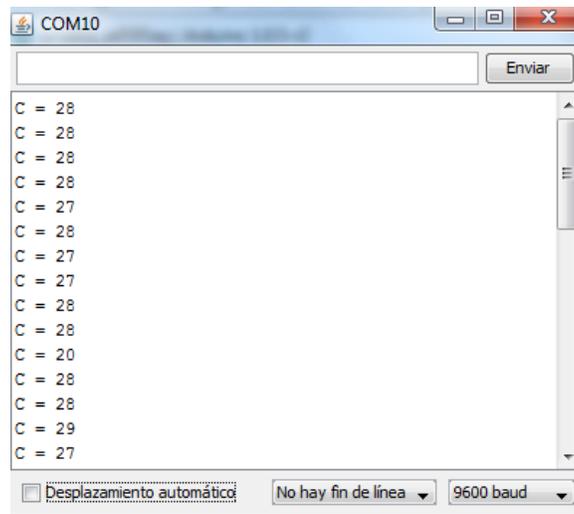


Figura 3.5: Salida AD595AQ Arduino. Fuente: Propia

3.2 Diseño del controlador difuso

Para el diseño del controlador se utilizó la herramienta de Matlab® Fuzzy, se utilizaron dos variables de entrada, el error y la derivada del error, y una variable de salida que es potencia, para realizar las reglas se utilizaron etiquetas lingüísticas como positivo grande, positivo mediano, negativo grande, negativo pequeño entre otras. En el siguiente diagrama de bloques se observa la arquitectura del controlador.

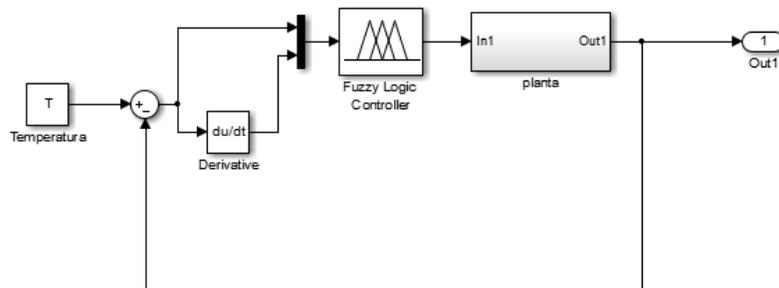


Figura 3.6: Esquema del controlador. Fuente: Propia

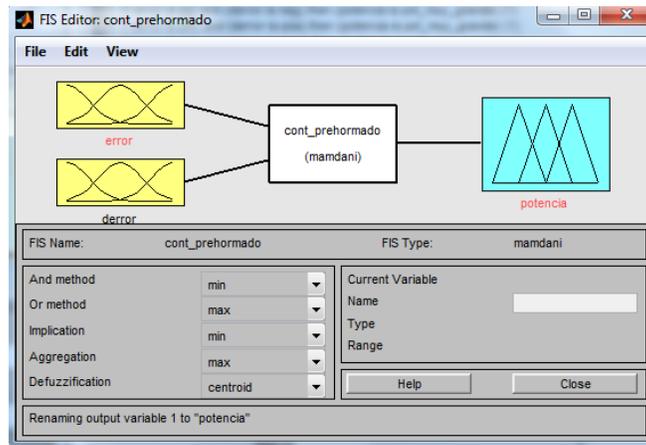


Figura 3.7: Estructura del controlador. Fuente: Propia

En la Variable de entrada error, la función de pertinencia tiene un rango de 0 a 1 y se utilizaron varios conjuntos difusos cuyas etiquetas lingüísticas son:

NEG= Negativo

Cero

POS= Positivo

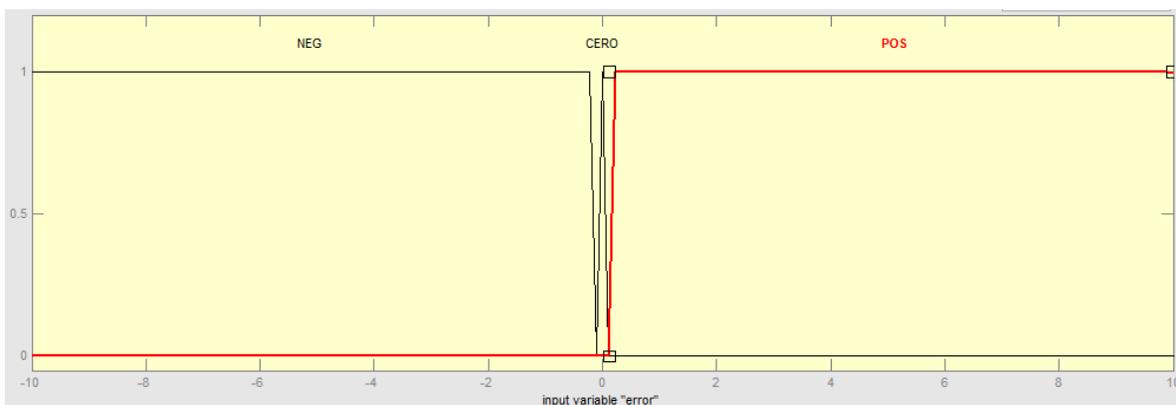


Figura 3.8: Conjuntos difusos variable error. Fuente: Propia

En la Variable de entrada derror que representa la derivada del error la función de pertinencia tiene un rango de 0 a 1 y los conjuntos difusos están representados por las etiquetas:

N = Negativo

Cero

P = Positivo

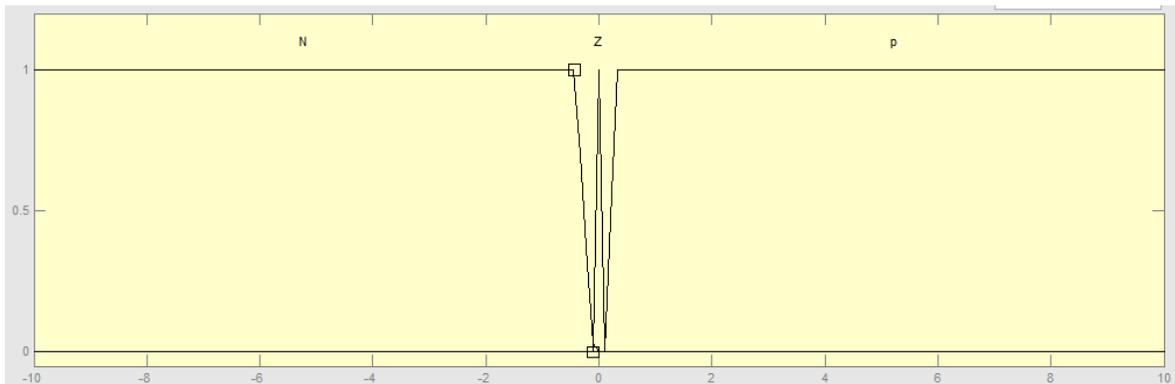


Figura 3.9: Conjuntos difusos variable derror. Fuente: Propia

La variable de salida potencia (POT) cuenta solo con tres conjuntos difusos y sus etiquetas son:

PMAX= Potencia maxima

Cero

PPEQ= Potencia pequeña

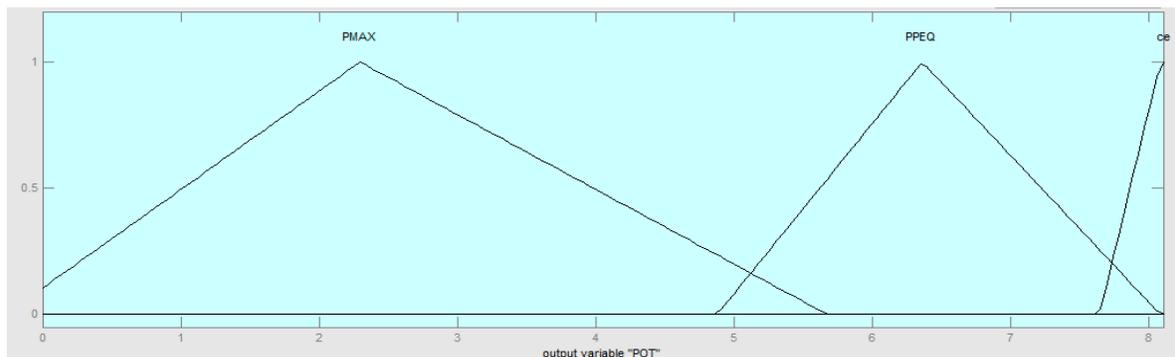


Figura 3.10: Conjuntos difusos variable potencia. Fuente: Propia

El controlador cuenta con 9 reglas de tipo Mamdani manejadas mediante la operación lógica and que describen su funcionamiento.

Se relaciona la siguiente tabla que muestra la interacción entre las variables y su respectiva salida.

$\frac{derror}{dt}$	error		
	POS	Cero	NEG
P	PMAX	PPEQ	CERO
Cero	PMAX	PPEQ	CERO
N	PMAX	PPEQ	CERO

Tabla 7: Relación de las reglas difusas. Fuente: Propia

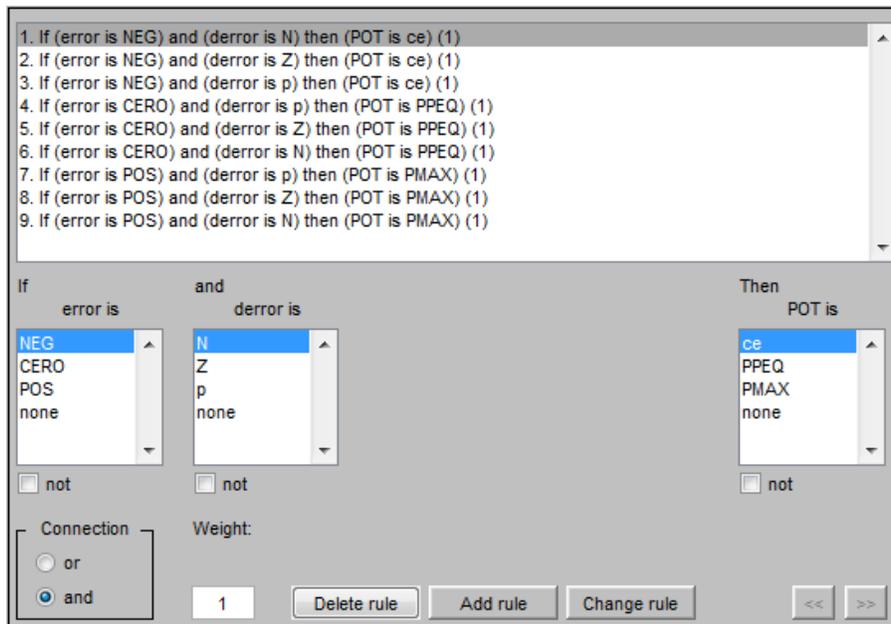


Figura 3.11: Reglas del controlador. Fuente: Propia

En las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 se observa la variación de la salida del controlador con respecto a la variación del error y la derivada del error.

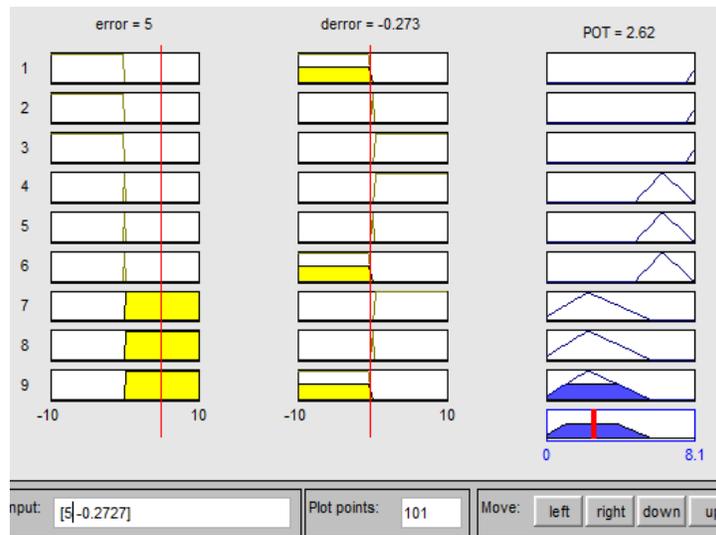


Figura 3.12: Comportamiento del controlador, error positivo. Fuente: Propia

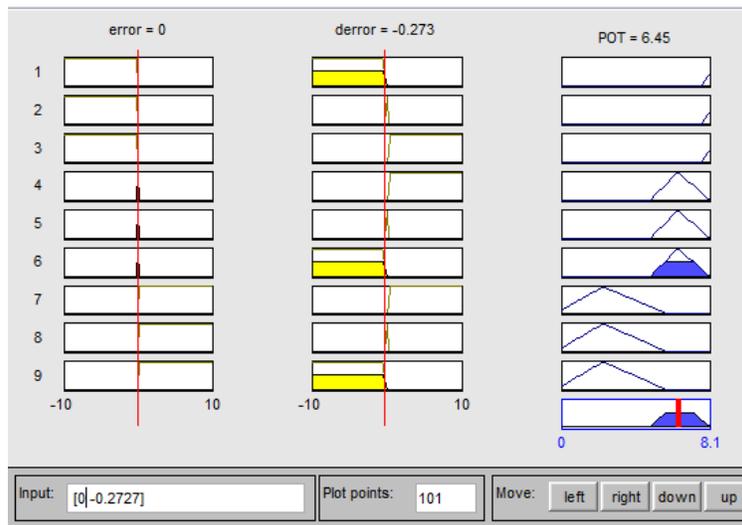


Figura 3.13: Comportamiento del controlador, error cero. Fuente: Propia

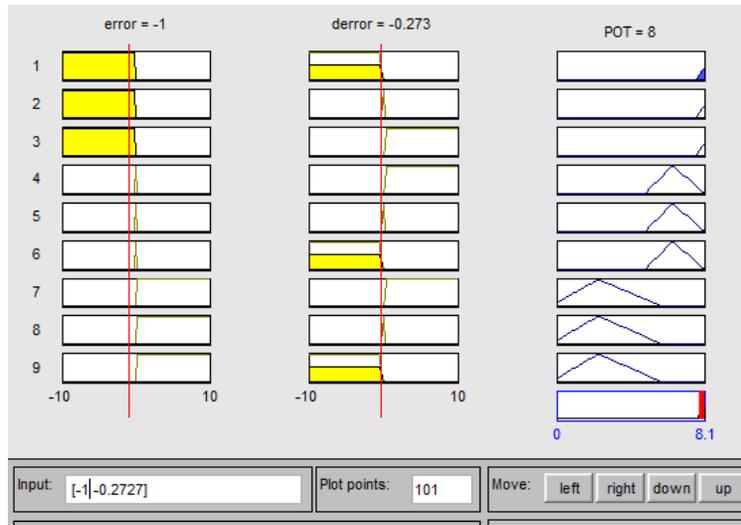


Figura 3.14: Comportamiento del controlador, error negativo. Fuente: Propia

Una vez realizado este proceso se crea el archivo con extensión .fis para luego ser implementado en el sistema de control embebido.

3.3 Simulación de la etapa de potencia

Esta simulación se hace con el fin de verificar el funcionamiento de la etapa de control con la etapa de potencia, el objetivo es observar el comportamiento de esta etapa cuando cambia el ancho de pulso de la señal PWM.

3.3.1 Simulación del cruce por cero

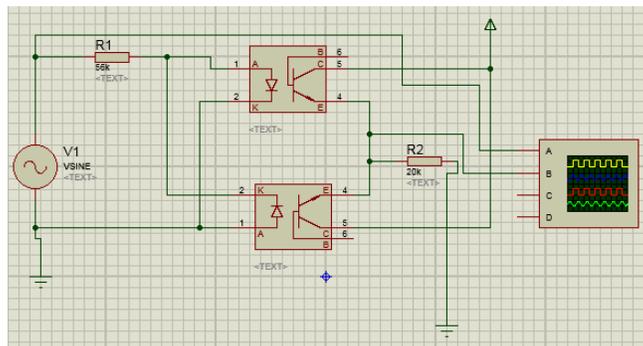


Figura 3.15: Simulación del circuito de detección de cruce por cero. Fuente: Propia

Puesto que el programa utilizado para realizar las simulaciones no cuenta con el componente H11AA1 se opta por utilizar dos optoacopladores cuyas entradas están conectadas en paralelo a la señal AC, la señal de salida cumple con las condiciones necesarias para ser captada por el microcontrolador.

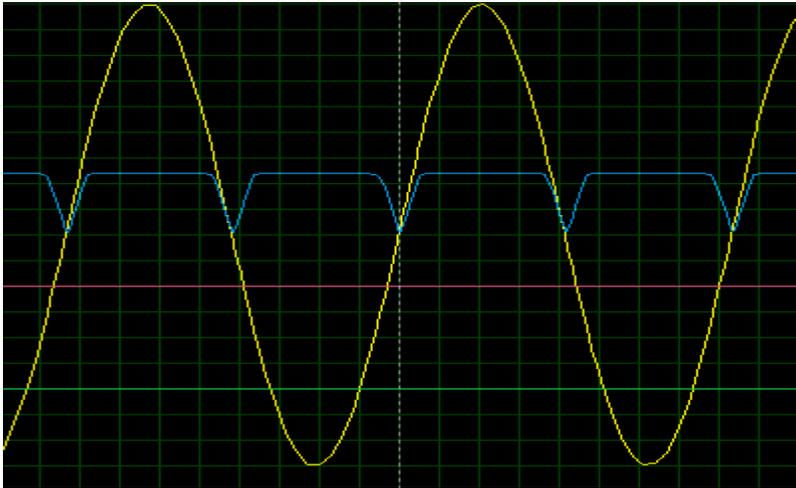


Figura 3.16: Señal de salida, simulación del circuito de detección de cruce por cero Fuente: Propia

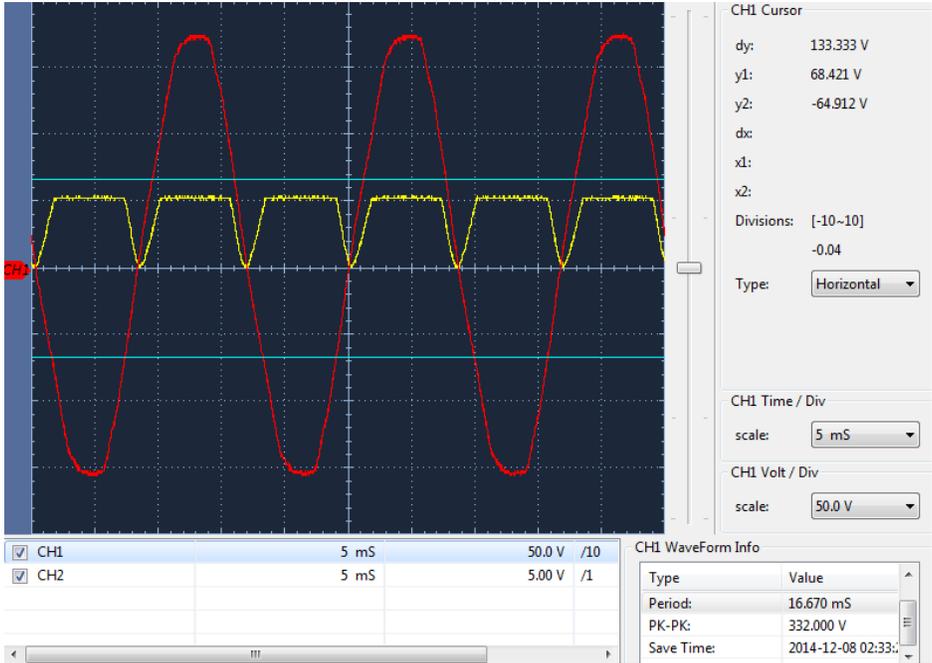


Figura 3.17: Señal de salida real, circuito de detección de cruce por cero. Fuente: Propia

3.3.1 Simulación de el circuito de potencia

Se interconecta el circuito de potencia con el circuito de detección del cruce por cero y se programa el microcontrolador con el fin de verificar el funcionamiento en el simulador.

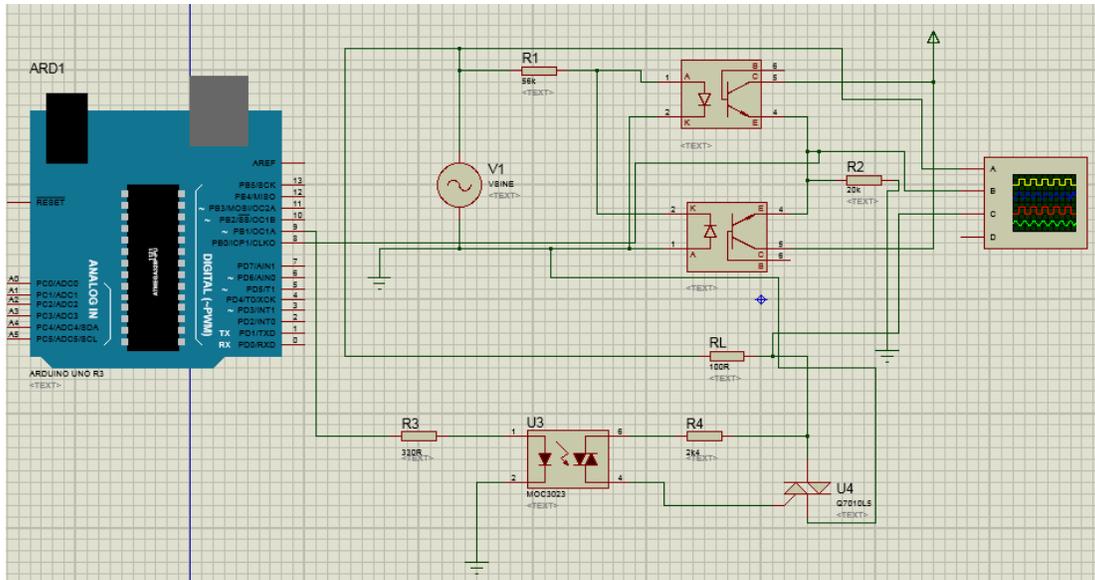


Figura 3.18: Simulación de la etapa de potencia. Fuente: Propia

Se programa en la tarjeta una salida tipo PWM con un ancho de pulso en su ciclo útil de un 50% y se observa un voltaje en la resistencia de carga de 60 V_{AC}, en la siguiente figura se evidencia como el triac recorta la señal AC.



Figura 3.19: Señal AC recortada por el triac. Fuente: Propia

Al hacer el montaje en protoboard de los circuitos anteriores reemplazando la resistencia de carga por un bombillo y al variar el valor del retardo se ve que la intensidad de luz en el bombillo varía según el ancho de pulso del ciclo útil de la señal PWM lo cual indica que el voltaje depende prácticamente de la modulación por ancho de pulso.



Figura 3.20: Disparo del triac. Fuente: Propia

3.4 Simulación del panel de control.

El panel de control está integrado por un teclado y una LCD .

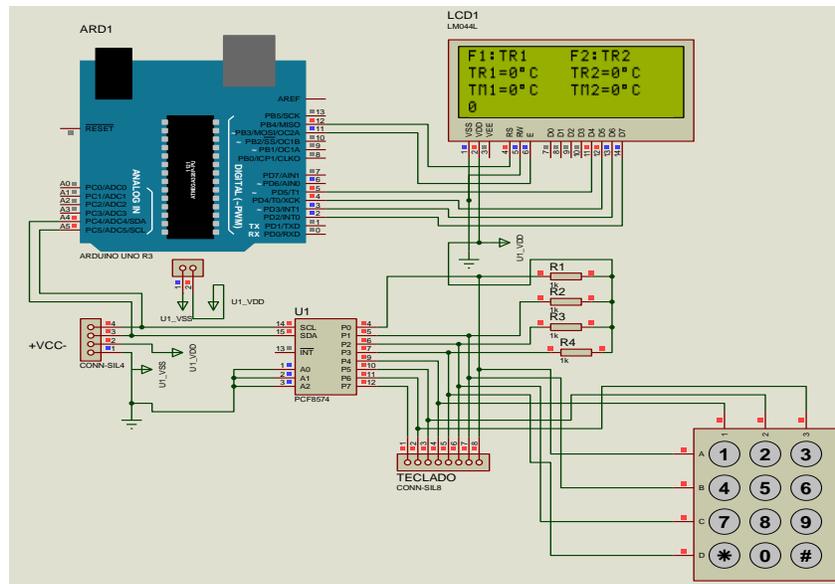


Figura 3.21: Circuito panel de control. Fuente: Propia

Puesto que el microcontrolador tiene 14 pines digitales y para la conexión del LCD y el teclado se requieren los 14 pines, fue necesario utilizar el protocolo I²C para la conexión del teclado con el microcontrolador, de esta manera solo se utilizan los pines A0 y A1 en vez de los 8 digitales, esta comunicación la realiza el circuito integrado PCF8574 el cual está configurado con la dirección 56.

3.4.1 El teclado

El teclado es el dispositivo que permite ingresar el valor de las temperaturas de referencia, este es de 4 filas por 4 columnas (4X4), en la columna N° 4 tiene las funciones F1, F2, F3 y F4. F1 se utiliza para que el operario modifique la temperatura en el molde 1 y F2 se utiliza para modificar la temperatura en el molde 2.



Figura 3.22: Teclado matricial. Fuente: Propia

3.4.2 La LCD

La LCD permite visualizar las temperaturas de referencia y las temperaturas presentes en los moldes, esta es de 4 filas por 20 columnas, como se observa en la figura 20 la LCD está mostrando unos parámetros los cuales son:

F1= Tecla que se utiliza para ingresar la temperatura de referencia del molde 1

F2= Tecla que permite ingresar la temperatura del molde 2.

TR1= Temperatura de referencia del molde 1

TR2=Temperatura de referencia del molde 2

TM1= Temperatura sensada en el molde 1

TM2= Temperatura sensada en el molde 2

La última fila de la LCD es utilizada para mostrar la temperatura de referencia que el operario está ingresando, si esta temperatura es mayor a 500 en esa fila se va a mostrar un mensaje de error puesto que la temperatura a ingresar debe ser menor a 500.



Figura 3.23: LCD 20X4. Fuente: Propia

Estos periféricos van ensamblados en la parte frontal de una caja metálica junto con dos LED que indican el estado de las salidas del controlador y un interruptor de encendido y apagado del sistema.

3.5 Tarjeta de control y de potencia

La tarjeta de control y de potencia está basada en dos microcontroladores Atmega328P conectados entre sí para permitir la comunicación serial, consecuentemente se configura un microcontrolador que solo se encarga de la etapa de potencia y de recibir los datos del control difuso que envía el microcontrolador transmisor que también se encarga del panel de control y el circuito de las termocupas.

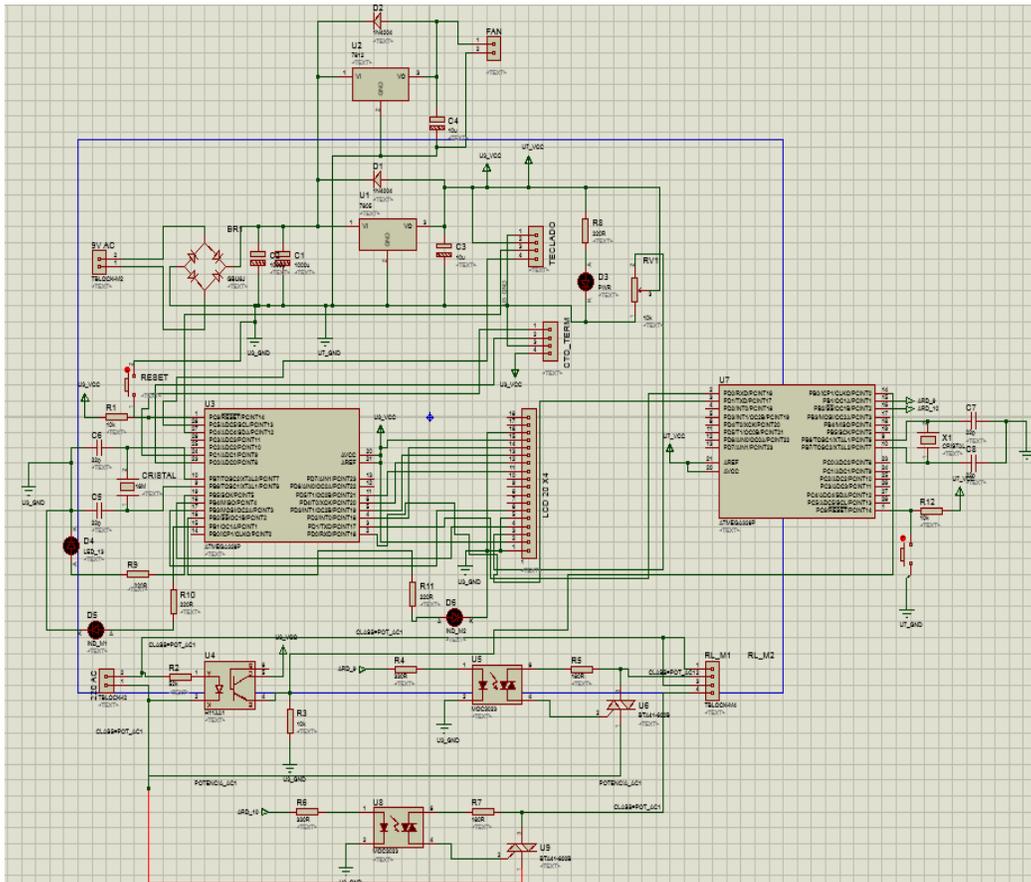


Figura 3.24: Diagrama esquemático de la tarjeta de control y potencia. Fuente: Propia

En la parte de potencia se encuentran el circuito detector de cruce por cero, y los dos circuitos de potencia, los triacs tienen un disipador de calor con el fin de evitar un sobrecalentamiento en estos dispositivos.

Capítulo 4

ETAPA DE FABRICACIÓN

4.1 Fabricación del circuito de instrumentación AD595AQ

Diseño del PCB correspondiente al circuito de instrumentación AD595AQ.

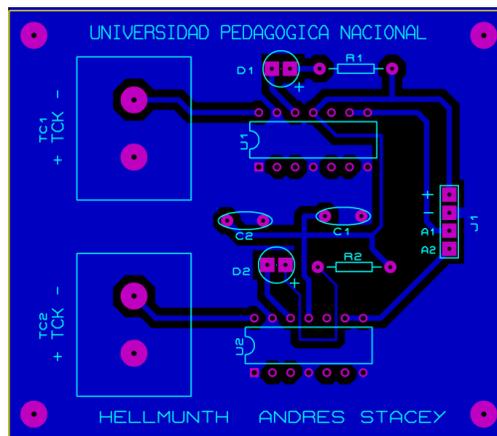


Figura 4.1: PCB AD595AQ. Fuente: Propia

La vista en tercera dimensión es una representación casi real de cómo va a quedar la baquelita con sus componentes electrónicos soldados, esto sirve para verificar la distribución de dichos componentes.



Figura 4.2: PCB AD595AQ en 3D. Fuente: Propia

La figura 4.3 muestra la PCB totalmente terminada y conectada a las termocuplas.



Figura 4.3: PCB AD595AQ con las termocuplas. Fuente: Propia

4.2 Fabricación de la etapa de potencia

En el capítulo 3 apartado 3.5 se muestra el diagrama esquemático de control y de potencia, se escogió ese mismo circuito y se adicionaron los diferentes conectores para hacer el diseño de la pcb.

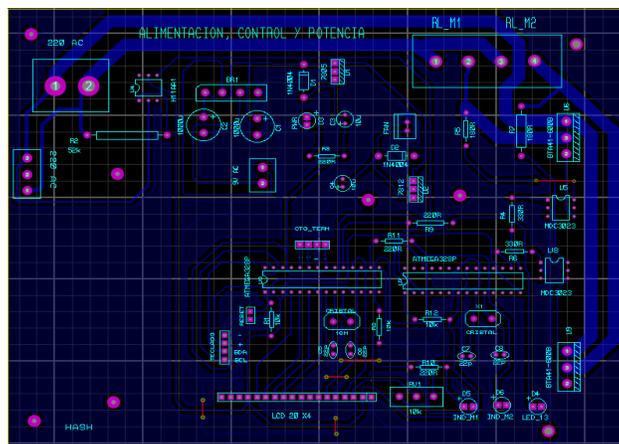


Figura 4.5: PCB de control y potencia. Fuente: Propia

4.4 Circuito I²C para el teclado

Como se indicó anteriormente en el apartado 3.4 fue necesario adaptar el circuito integrado PCF8574P con el fin de implementar el protocolo I²C para no utilizar tantos pines digitales del microcontrolador puesto que permite la comunicación entre la tarjeta de control y el teclado tan solo utilizando dos pines.

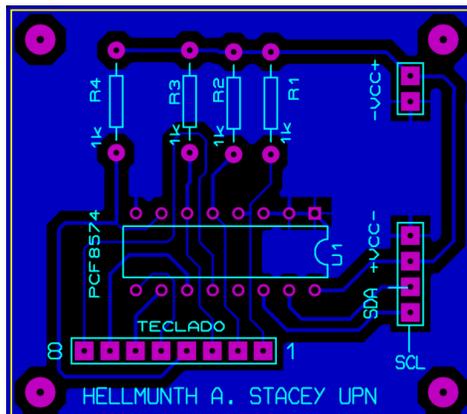


Figura 4.8: PCB teclado. Fuente: Propia



Figura 4.9: PCB real del teclado. Fuente: Propia

4.5 Panel de control

Todas las baquelitas con sus periféricos van distribuidas en un gabinete metálico, en la parte frontal de este gabinete se encuentra el panel de control, no fue necesario diseñar un PCB para la LCD ya que fue conectada directamente a la tarjeta de control.



Figura 4.9: Panel de control. Fuente: Propia

4.6 Adecuaciones en la estructura física de la planta

La planta cuenta con dos superficies rectangulares (superior e inferior) en donde van fijadas las resistencias con los moldes de aluminio como se observa en la siguiente imagen.



Figura 4.10: Superficies para fijar los moldes. Fuente: Propia

Los moldes llevan en su base una resistencia de calentamiento que por lo general es rectangular y tiene la misma medida del molde, básicamente toda la base del molde hace contacto con estas planchas, este sistema de fijado presenta deficiencias que impactan negativamente en cuanto al calentamiento de los moldes y la capacidad de conservar la temperatura puesto que la temperatura se dispersa hacia estas planchas lo que conlleva a que el controlador permanezca conmutando entre encendido y apagado.

Esta planta fue sometida a reestructuración con el fin de aislar las bases de los moldes de estas planchas por medio de unas barras de acero y tornillos que hacen que las bases tengan un mínimo contacto con la estructura de la máquina.



Figura 4.11: Aislamiento de los moldes. Fuente: Propia



Figura 4.12: Moldes aislados de la estructura de la Prehormadora. Fuente: Propia

4.7 Modificación en los moldes de aluminio

Existen diferentes tipos de moldes en el sentido del diseño de la copa, la medida, si tiene relleno o no, entre otros factores, por lo general Las resistencias de calentamiento estaban situadas en la base de los moldes.



Figura 4.13: Molde tradicional de copa para brasier. Fuente: Propia

Debido a que tanto la forma como la ubicación de la resistencia no era la adecuada, fue necesario hacer nuevos moldes que incluyeran orificios de un diámetro de 5/8" con el fin de incrustar dos resistencias circulares de 30 cm de largo que van conectadas en paralelo.



Figura 4.14: Resistencias incrustadas en los moldes. Fuente: Propia

Capítulo 5

ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN E IMPLEMENTACIÓN

5.1 Instrucciones de manejo del controlador

Se trató de diseñar un panel de control en donde la manipulación del panel de control fuera sencilla, a continuación se describen los pasos para poner en funcionamiento el controlador

- 1) Conectar a una fuente de alimentación de 220V AC
- 2) Presionar el interruptor de encendió
- 3) Ingresar por medio del teclado la temperatura de referencia
- 4) Presionar la tecla F1 si desea que la temperatura de referencia sea para el molde 1
- 5) Presionar la tecla F2 si desea que la temperatura de referencia sea para el molde 2
- 6) Si se requieren temperaturas diferentes en los moldes, repetir el paso 3, posteriormente acudir al paso 4 o 5 según se requiera.

5.2 Pruebas de Calentamiento

Se realizaron pruebas de calentamiento tanto con el control tradicional, con las adecuaciones de los moldes y con el control difuso. Los resultados de estas pruebas se describen a continuación.

5.2.1 Pruebas de calentamiento con el control tradicional sin modificaciones en los moldes

Esta fue la primera prueba de calentamiento que se realizó sin modificación alguna, en esta prueba es donde más se evidencia falla del controlador ON – OFF debido a que existe un error de estado estacionario de 50 °C aproximadamente, otra falencia que se observa es aislamiento de los moldes de la estructura física de la máquina, pues incide negativamente en el tiempo de calentamiento ya que este fue de hora y 20 minutos. Se muestran las mediciones realizadas en la figura 5.1.



Figura 5.1: Pruebas de calentamiento con control tradicional sin modificaciones. Fuente: Propia

5.2.2 Pruebas de calentamiento con el control tradicional con modificación en las resistencias.

Con las modificaciones descritas en el apartado 4.7 se hicieron pruebas de calentamiento con el controlador tradicional y se observó una mejora en cuanto al tiempo en que tardaban los moldes en llegar a la temperatura de referencia puesto que con el sistema tradicional la máquina se demoraba hora y 20 minutos aproximadamente en alcanzar la temperatura según lo informado por los operarios, con estas adecuaciones se alcanzó un tiempo de 40 minutos aproximadamente, pero aun así entre la temperatura de referencia y la temperatura de los moldes había una diferencia de 20 °C aproximadamente.



Figura 5.2: Pruebas de calentamiento con el control tradicional. Fuente: Propia

5.2.3 Pruebas de calentamiento con el control difuso

Al realizar varias pruebas de calentamiento con una temperatura de referencia de 200 °C se observa un breve calentamiento en los triacs el cual es mitigado por el disipador de aluminio que se adecuó para este fin, el tiempo en que los moldes alcanzan la temperatura de referencia es de 40 minutos aproximadamente, al realizar mediciones de

temperatura en diferentes puntos del molde se ve que aunque la temperatura no es homogénea tampoco difiere mucho de la temperatura de referencia ($\pm 4^{\circ}\text{C}$), después de probar varios controladores se puede determinar con un voltaje de 60 Voltios AC aplicados constantemente a las resistencias de calentamiento, los moldes conservan la temperatura ideal.



Figura 5.3: Pruebas de calentamiento con el control difuso. Fuente: Propia

Las figuras 5.4 y 5.6 son representaciones graficas aproximadas sobre el comportamiento del controlador ON – OFF y el controlador dufuso.

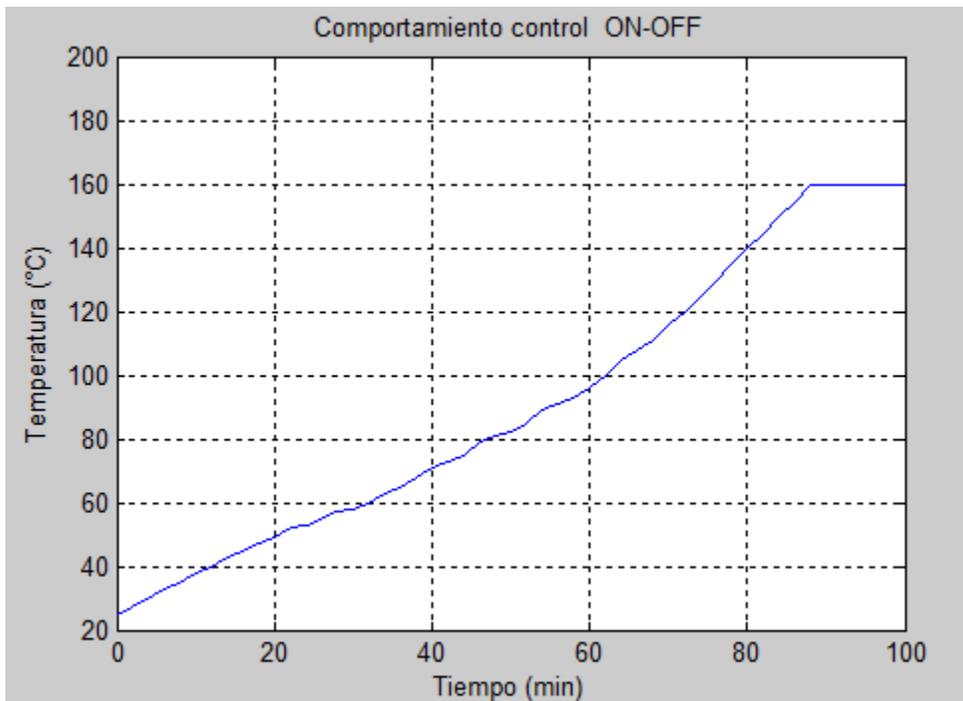


Figura 5.4 Comportamiento del controlador ON – OFF. Fuente: Propia

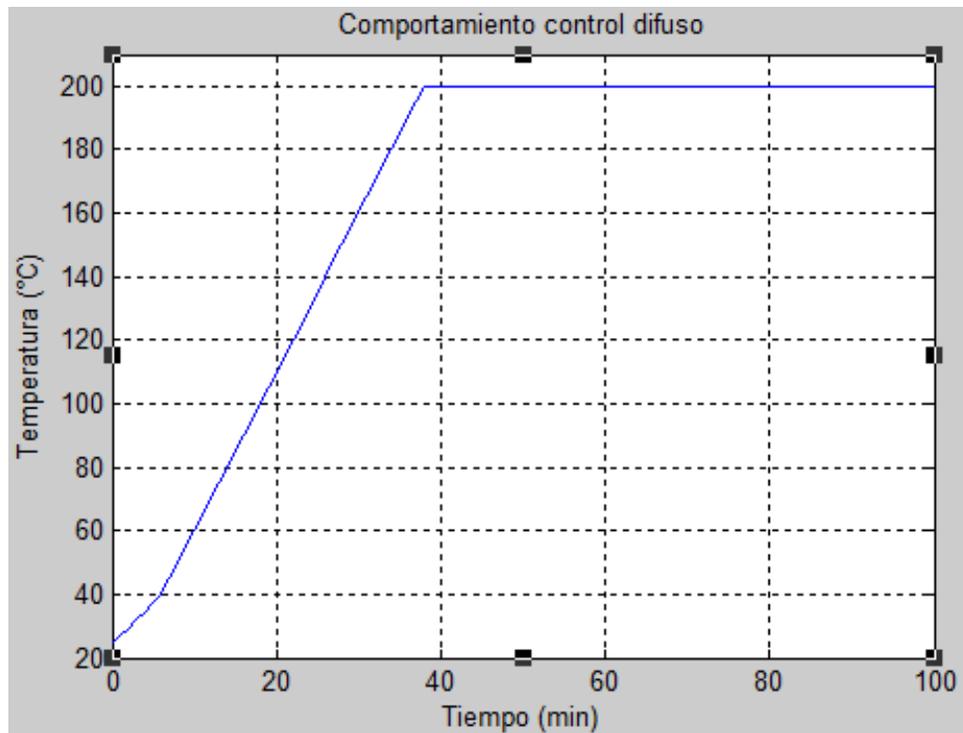


Figura 5.5 Comportamiento del controlador difuso. . Fuente: Propia

5.3 Pruebas de prehormado

Aunque no fue posible hacer pruebas de prehormado con la máquina que se estaba adecuando para el controlador debido a que aún le hace falta adecuar las bases de los moldes como se evidencia en la siguiente figura, se procedió a hacer dicha prueba en otra máquina con estructura física diferente.



Figura 5.3: Estructura física de la planta con el control difuso. Fuente: Propia

En la copa prehormada se observa una buena profundidad y textura, no se presentan quemaduras en la tela lo cual indica el buen funcionamiento del control difuso puesto que cumple con el principal objetivo de controlar la temperatura en los moldes.



Figura 5.4: Producto terminado. Fuente: Propia

CONCLUSIONES

- Si bien este controlador fue planteado para el proceso de prehormado de copa, en esta misma industria hay otros procesos en donde el control diseñado también se podría implementar, por ejemplo: en el secado del estampado, prehormado de telas y en la fusión de tela.
- Con este proyecto se pudo observar que no solo el campo de acción laboral del Licenciado en Electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional se encuentra en la educación, sino que también se puede incursionar en la industria, pues se cuenta con las herramientas necesarias para cumplir con los retos que ésta demande.
- Para este reto fue relevante la optimización de los moldes y de la planta, parámetros muy importantes que se lograron mejorar solo con estas adecuaciones fueron el tiempo de calentamiento de los moldes y la conservación de temperatura, ya que estos cuentan con un buen aislamiento con la estructura física de la planta y las resistencias fueron incrustadas, por lo tanto la optimización de la planta y de los moldes ayudó a que se cumpliera uno de los objetivos principales que era el de mejorar dichas características.
- Se probaron varios diseños del control difuso, se observó en las pruebas que los controladores que eran más complejos dado que tenían más conjuntos difusos y por ende más reglas, no fueron tan eficientes como se pensaba inicialmente, pues impactaron negativamente en el tiempo de calentamiento. Debido a esta situación se implementó un controlador que contiene solo tres conjuntos en sus variables de

entrada y de salida, este cumple con las expectativas y no afecta el tiempo de calentamiento.

- Al utilizar una plataforma de programación libre se pueden obtener muchas ventajas, pues la documentación que existe en la red es bastante, el desarrollo de librerías para determinados dispositivos hace que la programación y la implementación sean más sencillas, por lo tanto se puede llegar a desarrollar sistemas de control sencillos, eficientes y económicos como lo fue en este caso.
- Aunque en el mercado hay diversos tipos de sensores de temperatura, queda claro que para este tipo de procesos en la industria el termopar es el más adecuado, puesto que cuenta con características muy importantes como su tipo de encapsulado, su fiabilidad en el sensado, su bajo coste, su robustez entre otras. La ubicación de la termocupla en el molde fue relevante, pues de esta depende la calidad en cuanto a la lectura de la temperatura.
- Con las mejoras de tiempo de calentamiento y de similitud de temperatura de los moldes con respecto a la temperatura de referencia, se estima que la producción de copa de espuma se incrementará un 10%, igualmente hay un ahorro en cuanto al material que se utiliza en este proceso dado que las pruebas de prehormado que el operario hacía para iniciar la producción no es necesaria. También se pronostica un ahorro de consumo de energía puesto que el controlador difuso no interrumpe abruptamente el voltaje AC en las resistencias de calentamiento.

BIBLIOGRAFIA

- Álzate E. J., Montes J. W. y Silva C. A. (2007), *Medición de temperatura: Sensores termoeléctricos*: Universidad Tecnológica de Pereira Colombia.
- Beltrán Provoste C., *Medición de Temperatura*, Villa Rica Chile: Escuela Industrial San José
- Bonifacio M., Sanz Molina A., (2002), *Redes neuronales y sistemas difusos*. 2° Edición. © RA-MA Editorial.
- Pajares Encinas J. A., (2001), *Simulador de temperatura de un sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e interfaz de usuario LabVIEW*, España, Universidad Rovira i Virgili.
- Pallas Areny, R., (2001), *Sensores y Acondicionadores de Señal*, Barcelona, España, Marcombo S.A.
- Pérez Cisneros M. A., Vernon J., *Sistemas de Lógica Difusa*, Guadalajara, México, Universidad de Guadalajara.
- Reynoso Mesa G., (2005), *Notas en Control Difuso*, Monterrey, México. Departamento de Mecatronica y Automatización, ITESM.

- Robayo Espinel E. M., (1997), *Control difuso Fundamentos y aplicación*, Colombia, Universidad del Norte, (Ediciones Uninorte).