



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

TEMA:

SISTEMA DE CONTROL BASADO EN EL MÉTODO DE LÓGICA DIFUSA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO ELÉCTRICO UTILIZADO EN EL PROCESO DE ENSUELADO PARA LA FABRICACIÓN ARTESANAL DE CALZADO.

Trabajo de Graduación. Modalidad: Proyecto de Investigación, presentado previo la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.

SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Automatización

AUTOR: Richard Eduardo Sailema Medina.

TUTOR: Ing. Santiago Altamirano, Mg.

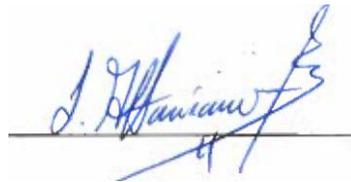
Ambato – Ecuador
Enero, 2020

CERTIFICACION DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el Tema:

"SISTEMA DE CONTROL BASADO EN EL METODO DE LOGICA DIFUSA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO ELECTRICO UTILIZADO EN EL PROCESO DE ENSUELADO PARA LA FABRICACION ARTESANAL DE CALZADO", del señor Sailema Medina Richard Eduardo, estudiante de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, de la Universidad Tecnica de Ambato, considero que el informe investigativo reúne los requisitos suficientes para que continúe con los trámites y consiguiente aprobación de conformidad con el Art. 16 del Capítulo II, del Reglamento de Graduación para Obtener el Título Terminal de Tercer Nivel de la Universidad Tecnica de Ambato.

Ambato, Enero 2020

A handwritten signature in blue ink, reading "S. Altamirano Mg.", is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large flourish at the end.

Ing. Santiago Altamirano Mg.

EL TUTOR

AUTORIA DEL TRABAJO

El presente trabajo de investigación titulado: "SISTEMA DE CONTROL BASADO EN EL METODO DE LOGICA DIFUSA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO ELECTRICO UTILIZADO EN EL PROCESO DE ENSUELADO PARA LA FABRICACION ARTESANAL DE CALZADO". Es absolutamente original, autentico y personal, en tal virtud, el contenido, efectos legales y academicos que se desprenden, del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Enero 2020



Richard Eduardo Sailema Medina

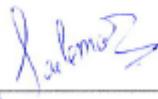
CC: 180383821-6

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo de Titulación como un documento disponible para la lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo los derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además autorizo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ambato enero, 2020



Richard Eduardo Sailema Medina

C.C. 1803838216

APROBACION DEL TRIBUNAL DE GRADO

La Comisión Calificadora del presente trabajo conformada por los señores docentes Ing. Patricio Córdova Mg. y Ing. Carlos Gordon PhD, revisó y aprobó el Informe Final del trabajo de graduación titulado "SISTEMA DE CONTROL BASADO EN EL METODO DE LOGICA DIFUSA PARA OPTIMIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO ELECTRICO UTILIZADO EN EL PROCESO DE ENSUELADO PARA LA FABRICACION ARTESANAL DE CALZADO.", presentado por el señor Richard Eduardo Sailema Medina, de acuerdo al Art. 17 del Reglamento de Graduación para obtener el título Terminal de tercer nivel de la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Patricia Urrutia Mg,
PRESIDENTA DEL TRIBUNAL



Ing. Patricio Córdova Mg.
DOCENTE CALIFICADOR



Ing. Carlos Gordon PhD.
DOCENTE CALICADOR

RESUMEN EJECUTIVO

En el taller de fabricación artesanal de calzado del Sr Julio Sailema, en el proceso de ensuelado de calzado, se identificó un deficiente sincronismo de tiempos y un control inadecuado de la temperatura del horno reactivador, lo que ha generado grandes pérdidas económicas y la falta de competitividad de la empresa. Se propuso entonces la implementación un controlador difuso para regular la temperatura del horno y sincronizar el tiempo de proceso de calentamiento de la suela. Para desarrollar esta propuesta, se analizó el estado del arte de la tecnología, se determinó un modelo matemático del comportamiento térmico del horno, luego se simuló el sistema de control y se implementó el proyecto en el área del trabajo. Al final, en los resultados se logró optimizar el proceso de ensuelado, pues se controló de manera eficiente la temperatura de las suelas evitando totalmente la pérdida o quema de estas y además se redujo en un 70% el tiempo de proceso de reactivación de suela.

ABSTRACT

In the workshop of Mr. Julio Sailema's artisanal footwear manufacturing, in the sole reactivation and gluing process, a poor timing and an inadequate control of the oven temperature was detected, which has generated great economic losses and incompetitiveness of the company. The implementation of a diffuse controller was then proposed to regulate the oven temperature and synchronize the sole reactivation process time. To develop this proposal, the state of the art of the technology was analyzed, a mathematical model of the thermal behavior of the furnace was determined, then the control system was simulated and the project was implemented in the work area. In the end, in the results, the dressing process was optimized, since the temperature of the soles was efficiently controlled, avoiding the loss or burning of the soles, and in addition the sole reactivation process time was reduced by 70%.

Índice de Contenido

CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes Investigativos	1
1.2 Contextualización del problema	3
1.3 Fundamentación Teórica	4
1.3.1 Fabricación artesanal de calzado	4
1.3.2 Horno Industrial	5
1.3.3 Lámparas de radiación infrarroja	6
1.3.4 Transferencia de Calor	7
1.3.5 Fundamentos de Sistema de Control	9
1.3.6 Fundamentos de Lógica Difusa	12
1.3.7 Controlador Difuso	16
1.3.8 Simulación de sistemas de control	18
1.3.9 Componentes del sistema de control	18
1.4 Objetivos	20
CAPÍTULO 2	22
METODOLOGÍA	22
2.1 Materiales	22
2.2 Métodos	22
2.2.1 Modalidad de la Investigación	22
2.2.2 Recolección de la Información	22
2.2.3 Procesamiento y Análisis de Datos	23
2.2.4 Desarrollo del Proyecto	23
CAPÍTULO 3	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1 Análisis de factibilidad	24
3.1.1 Factibilidad técnica	24
3.1.2 Factibilidad económica	24
3.1.3 Factibilidad bibliográfica	24
3.2 Análisis del proceso de reactivado de suelas	24
3.3 Análisis de Estado del Arte	29
3.4 Modelado Matemático del proceso	33
3.4.1 Parámetros y propiedades del horno eléctrico	33
3.4.2 Ecuaciones del Modelo Matemático	35

3.4.3	Linealización	38
3.4.4	Determinación de la función de transferencia	39
3.5	Diseño del controlador difuso	40
3.5.1	Identificación de las variables del sistema	41
3.5.3	Determinación del Universo del discurso	42
3.5.4	Determinación de los Términos Lingüísticos	42
3.5.5	Asignación de Funciones de Membresía	42
3.5.6	Determinación de Reglas de Control	44
3.5.7	Desarrollo del Método de Inferencia	44
3.5.8	Resultado del diseño del controlador difuso	50
3.6	Simulación	54
3.6.1	Software de simulación	54
3.6.2	Diagrama de bloques para simulación	54
3.6.3	Controlador difuso en fuzzyLogicDesigner	55
3.6.4	Respuesta del sistema	56
3.7	Implementación	57
3.7.1	Selección de equipos	57
3.7.2	Diseño general del sistema	63
3.7.3	Programación de Controlador Difuso en Python	64
3.7.4	Implementación de equipos	67
3.7.5	Montaje de sistema	77
3.7.6	Funcionamiento del sistema	79
3.8	Interpretación de Resultados	82
3.8.1	Control de potencia por PWM y ángulo de disparo	82
3.8.2	Análisis de respuesta del sistema	84
3.8.3	Análisis de eficiencia del proceso de ensuelado	86
3.8.4	Análisis de eficiencia en la producción	87
3.8.5	Análisis de eficiencia energética	88
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
4.1	Conclusiones	90
4.2	Recomendaciones	91
	BIBLIOGRAFÍA	92

Índice de Figuras

Fig.1. 1: Horno de calentamiento para calzado de control manual.....	6
Fig.1. 2: Sistema de control de lazo cerrado.	10
Fig.1. 3: Función Triangular.	13
Fig.1. 4: Esquema de una Relación difusa	14
Fig.1. 5: Modus Ponens difuso.....	16
Fig.1. 6: Partes de un controlador difuso	16
Fig.1. 7: Arquitectura SCADA.....	20
Fig.3. 1. Procesos de fabricación artesanal de calzado.....	25
Fig.3. 2. Horno reactivador de ajuste manual de temperatura.	28
Fig.3. 3. Esquema de horno reactivador propuesto e implementado	28
Fig.3. 4. Ilustración de del diseño del horno reactivador para taller artesanales.....	29
Fig.3. 5. Esquema de diseño de horno reactivador de suelas.....	34
Fig.3.6: Diagrama de bloques general del sistema	40
Fig.3. 7: Flujograma de diseño del controlador difuso.	41
Fig.3. 8: Funciones de membresía del error de temperatura.	43
Fig.3. 9: Funciones de membresía de la potencia eléctrica.	43
Fig.3. 10: Bloques del método de inferencia difusa	45
Fig.3. 11: Fusificación de la entrada del controlador.....	46
Fig.3. 12: Inferencia de reglas difusas	48
Fig.3. 13: Conclusión de inferencia de reglas.	49
Fig.3. 14: Defusificación por el método del centroide.....	50
Fig.3. 15: Curva de control	50
Fig.3. 16: Diagrama de bloques del controlador difuso con sus ecuaciones y funciones.	52
Fig.3. 17: Base de conocimientos de controlador difuso.....	53
Fig.3. 18: Sistema de control de lazo cerrado	55
Fig.3. 19: Controlador difuso diseñado en FuzzyLogicDesigner Matlab	55
Fig.3. 20: Controlador difuso diseñado en FuzzyLogicDesigner Matlab	56
Fig.3. 21: Respuesta del sistema al escalón.....	56
Fig.3. 22: Tarjeta de desarrollo raspberry pi CM3. [35].....	58
Fig.3. 23: Sensor de temperatura por infrarrojo.[36]	60
Fig.3. 24: Microcontrolador Arduino Nano. [37]	61
Fig.3. 25: Conversor de Potencia con entrada PWM. [38].....	62
Fig.3. 26: Pantalla HMI modelo NX4024T032. [39].....	63
Fig.3. 27: Esquema general del diseño del sistema	63
Fig.3. 28: Esquema en bloques de implementación del sistema de control.....	68
Fig.3. 29: Esquema de implementación de sensor de temperatura	69
Fig.3. 30: Esquema de la fase de conversión de potencia.	70
Fig.3. 31: Esquema de implementación de conversor de potencia	70
Fig.3. 32: Esquema de implementación de HMI.....	71
Fig.3. 33: Esquema de implementación de pulsadores de control	72
Fig.3. 34: Diagrama de bloques del algoritmo de control	73
Fig.3. 35: Esquema de implementación en el proceso térmico de la planta	76
Fig.3. 36: Esquema general de implementación del sistema.....	77
Fig.3. 37:Montaje del sistema de control	78
Fig.3. 38: Implementación del sensor de temperatura	78

Fig.3. 39: Horno eléctrico integrado con un sistema de control	79
Fig.3. 40: Lámparas en parte superior del horno eléctrico.....	79
Fig.3. 41: Encendido del sistema.	79
Fig.3. 42: Pantalla HMI implementada en el horno eléctrico	80
Fig.3. 43: Suela a punto de ser ingresada a la cámara de calentamiento	80
Fig.3. 44: Vista del proceso de calentado en ejecución	81
Fig.3. 45: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=0	82
Fig.3. 46: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=25%.....	82
Fig.3. 47: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=50%.....	83
Fig.3. 48: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=75%.....	83
Fig.3. 49: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=100%.....	83
Fig.3. 50: A) Curva con control difuso. B) Curva con control PID.....	84
Fig.3. 51: A) señal potencia con control difuso. B) señal de potencia con control PID	85
Fig.3. 52: respuesta del sistema real	86

Índice de Tablas

Tabla 1. 1 Operaciones básicas entre conjuntos difusos. [18].....	13
Tabla 3. 1. Procesos en el ensuelado de calzado.....	26
Tabla 3. 2. Características de lámpara halógena de radiación infrarroja	29
Tabla 3. 3. Estado del arte. [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34].....	32
Tabla 3. 4. Dimensiones de las lámparas IR marca USHIO	33
Tabla 3. 5. Propiedades y parámetros de la lámpara IR marca USHIO	33
Tabla 3. 6. Dimensiones y propiedades físicas de la cámara de reactivado	34
Tabla 3. 7: Propiedades de suela PVC.	35
Tabla 3. 8. Valores del universo del discurso	42
Tabla 3. 9. Términos lingüísticos	42
Tabla 3. 10. Funciones de membresía.	43
Tabla 3. 11. Reglas de control	44
Tabla 3. 12. Conversión de un valor nítido a valor difuso.....	46
Tabla 3. 13. Comparación de software para la simulación de un sistema de control.....	54
Tabla 3. 14. Especificaciones técnicas de tarjetas embebidas.....	57
Tabla 3. 15. Especificaciones técnicas de sensor IR industriales	59
Tabla 3. 16. Especificaciones técnicas de microcontroladores	60
Tabla 3. 17. Especificaciones técnicas de dimmer PWM.	61
Tabla 3. 18. Especificaciones de pantallas HMI.	62
Tabla 3. 19. <i>Código de programación</i>	64
Tabla 3. 20. <i>Código de programación</i>	65
Tabla 3. 21. <i>Código de programación</i>	65
Tabla 3. 22. <i>Código de programación</i>	65
Tabla 3. 23. <i>Código de programación</i>	66
Tabla 3. 24. <i>Código de programación</i>	66
Tabla 3. 25. <i>Código de programación</i>	67
Tabla 3. 26. <i>Código de programación</i>	67
Tabla 3. 27. Librerías de controlador.....	74
Tabla 3. 28. Objetos usados en la programación del sistema.....	75
Tabla 3. 29. Métodos usados en la programación del sistema.....	75
Tabla 3. 30. Requerimientos térmicos de suelas.....	81
Tabla 3. 31. Comparaciones de tiempos de control	85
Tabla 3. 32. Comparación de tiempo entre control difuso, PID y horno manual	86
Tabla 3. 33. Análisis de eficiencia de producción entre control difuso y control manual.....	87
Tabla 3. 34. Tabla de comparativa de tarifas de consumo en dólares.....	89

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere a un sistema de control basado en el método de lógica difusa para optimizar el funcionamiento de un horno eléctrico utilizado en el proceso de ensuelado en la fabricación artesanal de calzado.

Ante las pérdidas económicas y la falta de competitividad que tiene actualmente el sector de calzado artesanal en la provincia de Tungurahua, es necesario investigar detalladamente los diferentes problemas en los procesos de fabricación en un taller artesanal para mejorar la productividad y calidad del producto por medio de soluciones de automatización industrial. Puntualmente, en el taller de calzado de fabricación artesanal del Sr. Julio Sailema, en el proceso de ensuelado de calzado se detectó una deficiente sincronía de tiempos y un inadecuado control de temperatura del horno industrial, lo que ha producido retrasos en la producción y una baja calidad en el calzado, generando grandes pérdidas económicas y credibilidad para la empresa, por lo que fue necesario la implementación de un sistema de control de temperatura.

La presente es una investigación aplicada, bibliográfica y de campo, pues se utilizaron conocimientos teóricos y prácticos aprendidos en las aulas, datos de diversas fuentes bibliográficas y datos recolectados en el campo donde se implementó el proyecto.

La finalidad del proyecto de investigación fue: determinar el estado del arte de la tecnología que se implementó, determinar el modelo matemático de comportamiento térmico del horno eléctrico, diseñar y simular el sistema de control para estabilizar la temperatura del horno e implementar el proyecto en la planta real.

Estos objetivos fueron desarrollados en los siguientes capítulos:

En el capítulo 1, se describe el contexto de la situación problemática a través de un árbol del problema donde identifica las causas y efectos en el sector del calzado y el taller artesanal donde se aplica el proyecto.

En capítulo 2, se describe los antecedentes investigación hallados en las investigaciones de otros autores con respecto al tema, así como la fundamentación teórica como sustento conceptual de la investigación.

En el capítulo 3, se describe la metodología utilizada durante la investigación, la manera como sistemáticamente se fue desarrollando hasta cumplir con los objetivos establecidos en el capítulo 1.

En el capítulo 4, se describe el desarrollo de las actividades planteadas de forma detallada para cumplir con el proyecto, además se análisis e interpretan los resultados obtenidos al finalizar el proyecto.

Finalmente se tiene las conclusiones y recomendaciones fruto del análisis del capítulo 4 de la investigación.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

De la investigación y búsqueda realizada en repositorios de universidades nacionales, se encontró experiencia que sirvió de referencia para el desarrollo del proyecto propuesto. A continuación, se describen las investigaciones más relevantes.

En la tesis titulada “Análisis del reactivado (pegado) de calzado y su incidencia en el retraso en los procesos de producción” por Diego Orlando Cabezas realizada en el 2010 en la Universidad Técnica de Ambato para la empresa ARMANDINY, se implementa un sistema de control para gestionar la temperatura de reactivado y el tiempo de permanencia de las suelas en el horno, el cual utiliza un PLC Telemecanique sr2b201fu que se lo programa en el software Zelio Soft para controlar los sensores y actuadores del proceso, lo más novedoso es que se automatiza un horno cuya fuente de calor se basa en lámparas infrarrojas. Como resultado del análisis se establece que existen grandes pérdidas y defectos en la producción de calzado debido a la permanencia excesiva o muy corta de las suelas en el interior del horno, sin embargo, con la implementación del sistema de control este tiempo de permanencia es optimizado lo que mejora la producción de la empresa. [1]

En otra tesis titulada “Diseño, construcción y automatización de un horno eléctrico para el calentamiento de prepolymer y polyol en la elaboración de calzado para la empresa calzado CAAS” realizada por Patricio Geovanny Aguirre y Boris Alexander Sánchez en el año 2014 en la Universidad de las Fuerzas Armadas, se construye un horno eléctrico donde el elemento que proporciona la energía calorífica serán las resistencias eléctricas, para el sistema de control se utiliza un dispositivo Controlador de temperatura ESM-7720 para medición y control de temperatura, y un temporizador que regula el tiempo de funcionamiento del horno, estos se configuran

sin necesidad de algún software. Como resultado se tiene que en el horno de resistencias eléctricas existe el 92% de ganancia de calor a partir de un control “ON-OFF”, con una histéresis de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, con el que se tomaron datos cada minuto de la temperatura interna del horno, logrando obtener un registro que permitió dibujar la curva de control del horno, que fue satisfactoria para el proceso de calentamiento requerido. [2]

En la tesis titulada “Diseño de controladores PID difusos de las variables de nivel y temperatura de una plataforma de entrenamiento para el control de procesos continuos” realizada por John Sánchez Gómez y William Barrero Flores en el año 2015 en la Universidad Politécnica Salesiana, se desarrolla un controlador PID difuso en dos diferentes entornos, primero en el programa Matlab el cual posee el Toolbox Fuzzy Logic donde permite crear sistemas de lógica difusa de manera intuitiva, y después en el PLC s7-1200 en el lenguaje programación SCL, en cuyos resultados se observa que ambos métodos presentan dinámicas muy similares, validando como consecuencia la calidad del resultado obtenido con el control PID Difuso en el PLC s7-1200, y además se cumple que el control PID difuso provee una respuesta rápida y estable para el sistema cuando éste es sometido a diferentes variaciones del Set Point. Sin embargo, el control realizado en el PLC es más rápido que el control realizado en el programa Matlab y a su vez tiene un sobre impulso menor. [3]

En la tesis titulada “Construcción de un horno automatizado para el curado de pintura electrostática diseñado con lógica difusa, utilizando resistencias eléctricas y convección forzada, implementado en la empresa tridimensional”, realizada por Sebastián Alejandro Bastidas en el 2015 en la Universidad Politécnica Salesiana de Quito, se utiliza en un PLC SIMATIC Siemens S7-1200 donde los cálculos son programados con operaciones básicas para controlar el sistema, mientras que para la simulación del control de la planta se programa un sistema difuso en el software Labview. Se realiza la comparación entre la simulación del sistema difuso creado en Labview y los valores obtenidos en el PLC dando como resultado un error del 5.72%. Se establece que el control difuso es óptimo ya que el acabado de las piezas tiene un grado de vaguedad puesto que no tiene valores especificados, únicamente se ha definido según lo observado en la práctica. [4]

En la tesis titulada “Diseño y análisis comparativo de un sistema de control de temperatura con lógica difusa vs control proporcional integral derivativo (PID) en un prototipo de una torre de enfriamiento en una planta de procesos” realizada por el Ing. Jhony Ortiz Mata en el año 2016 en la Escuela Politécnica Nacional del Litoral, se utiliza la tarjeta de adquisición de datos DAQ USB-6009 de National Instruments para que las señales recibidas del sensor sean acondicionadas, digitalizadas y llevadas hasta la PC donde estos datos son procesados e interpretados por medio del software MATLAB en el cual están diseñados los controladores PID y Lógico Difuso. Los resultados muestran que los controladores PID y DIFUSO controlan la temperatura de la Glicerina y la del agua que circula en la torre de enfriamiento en el rango de 55 a 60 C. Además, la selección del controlador con el que se va a trabajar dependerá de la precisión con al que se desea que el sistema opere pues el rango de oscilación alrededor de la referencia de temperatura y el tiempo de estabilización es mayor con el controlador difuso que con el PID y el valor promedio del error es similar para ambos controladores. No se modela la planta sino de identifica la planta mediante la estimación paramétrica BOX Jenkin (BJ22321). Finalmente, el PID presenta mejor desempeño que el controlador Difuso ante cambios en la referencia y perturbaciones. [5]

1.2 Contextualización del problema

En el taller de fabricación artesanal de calzado del Sr. Julio Sailema, el problema surge en el proceso de reactivación de suelas, donde las suelas son calentadas a temperaturas altas en el interior de un horno a gas para activar sus propiedades pegantes y poder pegarlas al calzado. Tanto la temperatura como el tiempo requerido para el reactivado de suelas son calculados de forma empírica e intuitiva por parte del operador, generando un control inadecuado de la temperatura del horno y un deficiente sincronismo de tiempo de reactivado de suelas.

Los efectos que se detectaron (según el anexo 1) por el inadecuado control de temperatura del horno y el deficiente sincronismo de tiempo son suelas quemadas y mal preparadas por el exceso de temperatura, pérdidas de tiempo en el proceso de ensuelado y demoras periódicas en la producción. En consecuencia, se obtiene un producto final de mala calidad haciendo que se pierda la demanda del producto y se

tenga una baja producción de calzado, lo que desemboca en una baja rentabilidad para la empresa de fabricación artesanal.

En la empresa artesanal del Sr. Julio Sailema donde se implementó el proyecto, se realizó un sondeo de la calidad y cantidad de producción de calzado (ver anexo 1), y se calculó que en promedio se producen 60 pares de calzado diariamente, donde el 40% tienen fallas en el ensuelado de calzado. En consecuencia, los clientes no quedan satisfechos, por lo que dejan decomprar el producto, haciendo que la empresa obtenga pérdidas económicas considerables, trascendiendo en frecuentes despidos a los empleados, generando así otros problemas como el desempleo.

De este modo se propuso implementar un sistema de control de temperatura en un horno eléctrico basado en el método de lógica difusa para optimizar el proceso de ensuelado en la fabricación artesanal de calzado del taller del Sr. Julio Sailema.

1.3 Fundamentación Teórica

1.3.1 Fabricación artesanal de calzado

Los procesos para la fabricación artesanal de calzado son los siguientes [6]:

- Almacenamiento de materiales
- Diseño de modelos
- Corte de piezas
- Aparado de piezas
- Montaje de aparado sobre horma
- Ensuelado de calzado
- Acabado
- Almacenamiento del producto terminado

Proceso de ensuelado de calzado

Según [6], en el proceso de ensuelado de calzado se tienen tres subprocesos:

- Preparado de suela
- Reactivado de suela
- Prensado de suela

a) Preparado de suela

En el preparado de suela se utiliza pegamento tipo PVC y consiste en adherir pegamento de forma uniforme sobre los bordes de la parte interior de la suela y al calzado. Una vez cubiertas las suelas de pegamento se espera por 10 minutos a que se sequen, entonces la suela queda lista y preparada para el siguiente proceso que es el reactivado. Esto se la hace de manera manual.[6]

b) Reactivación de suela

En el calentamiento de suela se eleva la temperatura de la suela para activar las propiedades del pegamento adherido y dejarlo listo para el proceso de pegado. Se utiliza un horno industrial, el cual se lo regula a una temperatura aproximada de 60 grados centígrados, donde se inserta la suela y el calzado ambos a la vez, para después de un tiempo determinado sacarlos del horno e ir rápidamente al siguiente proceso.[6]

c) Prensado de suela

En el pegado de suela, el operador por medio de una maquina prensadora une la suela al calzado, aprovechando que las propiedades del pegamento están activadas debido al calor. El operador deja el calzado y la suela prensar durante un tiempo determinado. Lo saca de la prensa y lo enfría por un tiempo determinado y finalmente lo desmonta de la horma. [6]

1.3.2 Horno Industrial

Los hornos industriales son equipos o dispositivos para la industria térmica, utilizados para calentar piezas o elementos colocados dentro del interior a una temperatura superior a la temperatura ambiente los cuales son utilizados principalmente para, fundir, ablandar y calentar materiales para activar determinadas propiedades.[7]

Hornos en la industria del calzado

En la industria del calzado se utilizan hornos reactivadores de pegantes. En el cual el calzado y la suela se colocan en el interior del horno activador, este proceso se realiza elevando la temperatura del horno a un determinado nivel para activar las propiedades pegantes tanto de la suela como del calzado, una vez activadas, se extraen ambas piezas y se las prensa de forma manual o por medio de máquinas

(neumática o hidráulica). [8]. En la figura 1.1 se puede observar un horno típico utilizado en el ensuelado artesanal calzado.



Fig.1. 1: Horno de calentamiento para calzado de control manual. [8]

1.3.3 Lámparas de radiación infrarroja

Las lámparas halógenas de radiación infrarroja (IR), se comparan con los mecanismos tradicionales de calentamiento como la convección (aire caliente), donde estas emiten una cantidad mayor de energía por unidad de superficie que puede ser focalizada, concentrada, dirigida y reflejada en modo del todo similar a la luz [9].

Radiación infrarroja

La radiación infrarroja al igual que la radiación visible y ultravioleta forman parte de la radiación térmica que es generada como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia y se define como la parte del espectro electromagnético que se extiende desde alrededor desde 0.1 hasta 100 μ m. La radiación emitida por los cuerpos a temperatura ambiente está dentro del rango del espectro de radiación infrarroja, la cual se encuentra establecida desde 0.76 hasta 100 μ m. Los cuerpos empiezan a emitir radiación visible cuando alcanzan temperaturas de 800°K.[10]

La radiación infrarroja es la forma de calentamiento de cuerpos más potente y eficaz debido a que no se requiere contacto con las superficies de la sustancia a calentar.[9]

Tecnología IR

Se fabrican lámparas IR con longitudes de onda entre 3,5 μ m (ondas medias) y 0,9 μ m (ondas cortas). Y se utilizan estas de acuerdo al tipo de material a calentar. La eficiencia de la calefacción está influenciada por varios factores como la temperatura

del cuerpo calentador, la capacidad del cuerpo calentado de absorber calor, la forma, la posición y la proximidad del cuerpo calentado respecto a la fuente irradiada [9].

Según [9], la elección de la tecnología IR permite obtener enormes beneficios entre los cuales:

- Aumento de la velocidad de calentamiento del material.
- Ahorro energético.
- Control de las lámparas de manera fácil.
- No se requiere contacto con el producto
- Diseño de hornos más pequeños con respecto a las otras formas de calor.

1.3.4 Transferencia de Calor

En termodinámica el calor es una forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro sistema como consecuencia de la diferencia de temperatura y se denota por la letra Q . [10]

Razón de transferencia de calor

La cantidad de calor por unidad de tiempo se llama razón de transferencia de calor y se denota por \dot{Q} o también llama razón de transferencia de calor, esta tiene la unidad joules sobre segundos $\left[\frac{J}{s}\right]$ lo que equivale a Watts [W]. [10]

Cabe señalar que la potencia eléctrica es el trabajo realizado por unidad de tiempo y también está dado en Watts [W], y es un parámetro muy utilizado en modelados de sistemas térmicos con que tienen resistencias eléctricas.

Primera ley de la termodinámica

Conocida también como el principio de la conservación de la energía, expresa que, en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; solo puede cambiar las formas y según el principio de la conservación de la energía o balance de energía se expresa de la siguiente manera [10]:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que entra en el} \\ \text{sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total} \\ \text{que sale del} \\ \text{sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{energía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right) \quad (1.1)$$

Balance de energía para sistemas cerrados

Un sistema cerrado consta de masa fija, la energía total E para la mayor parte de los sistemas que se encuentran en la práctica consiste en la energía interna U y la relación de balance de energía se establece cuando solo se comprende transferencia de calor sin ninguna interacción de trabajo es[10]:

$$Q = mc_v \Delta T \quad (1.2)$$

Donde:

Q : es la cantidad neta de transferencia de calor en el sistema cerrado

m : es la cantidad de masa del sistema

ΔT : es la variación de temperatura del sistema cerrado

Mecanismos de transferencia de calor

a) Conducción

Es la transferencia de calor de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas, esta puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases[10]. La ley de Fourier de la conducción del calor describe el comportamiento de este mecanismo es:

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1.3)$$

Donde:

k : es la constante de conductividad térmica

Δx : es el espesor del material conductor de calor

ΔT : es la variación de temperatura

b) Convección

Es la transferencia de energía o calor entre una superficie sólida y un fluido (un gas o líquido) adyacente que se encuentra en movimiento, y aumenta cuando existe mayor rapidez de movimiento en el fluido. [10]

Es frecuente en los hornos eléctricos de tratamientos térmicos de baja y media temperatura (hasta 750 °C) realizar el calentamiento de la carga mediante una corriente de aire o atmósfera controlada a elevada temperatura, que cede calor a la carga por convección [7]. Este mecanismo de transferencia de calor es descrito por la ley de Newton de enfriamiento:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (1.4)$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : razón de transferencia de calor por convección

h : es el coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

A_s : area superficial a través de cual tiene lugar la convección

T_s : es la temperatura de la superficie

T_∞ : es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esa superficie

c) Radiación

La radiación es el modo de transferencia de energía o calor emitida por la materia u objeto en forma de ondas electromagnéticas o fotones como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La radiación no requiere la presencia de un medio interventor, de hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida y eficiente por lo que no sufre atenuación en un vacío[10]. Según la ley de Stefan-Boltzman la razón de transferencia de calor emitida por una superficie determinada a una cierta temperatura por unidad de tiempo viene dada por:

$$\dot{Q}_{rad} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T + 273)^4 \quad (1.5)$$

Donde:

\dot{Q}_{rad} : razón de transferencia de calor por convección

A : Superficie en metros cuadrados

ϵ : emisividad total de la superficie

σ : constante de Stefan-Boltzman $(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4})$

T : temperatura en $^\circ C$

1.3.5 Fundamentos de Sistema de Control

Sistema de control

Es el conjunto de elementos interrelacionados entre sí que poseen parámetros y variables característico que determinan el estado del sistema y tienen el objetivo el de regular o controlar algún proceso [11]. Existen los sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado

Sistema de control de lazo cerrado

Es un sistema retroalimentado de circuito cerrado que permite ejercer una acción de control de manera automática por medio de un controlador o regulador [11]. En la figura 1.2 se observa las partes básicas de un sistema de control de lazo cerrado.

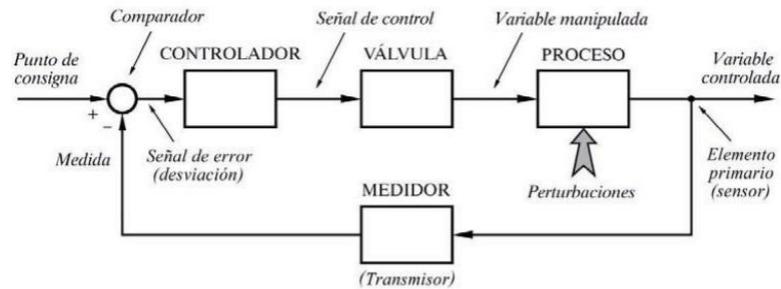


Fig.1. 2: Sistema de control de lazo cerrado. [11]

Un sistema de control de lazo cerrado tiene como entrada un set point o punto de consigna y como salida una variable controlada, en el dispositivo comparador la señal de error es generada realizando la diferencia entre el set point y la variable manipulada.[11]

a) Variables

En la Figura1 se muestra las variables del sistema, la variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.[12]

b) Controlador

Es un dispositivo que regula y gobierna el elemento final de regulación que es normalmente una válvula de control.[11]

c) Proceso

Es un conjunto de los elementos de una máquina o una planta física, y cuyo objetivo es realizar una operación específica [12],su operación es regulada por el controlador.

d) Sensor

Es un dispositivo también llamado transmisor que medie la variable controlada y transmite la señal de medida al controlador.[11]

Función de transferencia

Es una expresión matemática para un bloque que relaciona la salida con la entrada y representa el comportamiento dinámico de un sistema [11].Un ejemplo se observa en la ecuación (1.6) donde se tiene la función de transferencia de una resistencia eléctrica aplicando la ley de Ohm:

$$G(t) = \frac{i(t)}{v(t)} = \frac{1}{R} \quad (1.6)$$

Transformada de Laplace

Es una herramienta matemática para resolver fácilmente ecuaciones diferenciales lineales de manera sistemática, donde la ecuación diferencial es transformada a una ecuación algebraica en la que la variable compleja S sustituye al tiempo como variable independiente [11]. La ecuación (1.7) se describe una función en el dominio del tiempo aplicado a transformada de Laplace dando como resultado una función en el dominio de la frecuencia S .

$$L[f(t)] = F(s) \quad (1.7)$$

Respuesta a la rampa unitaria

Es la respuesta de un bloque o sistema, al ser excitada su entrada con una señal del tipo rampa unitaria [11]. En sistemas de control de lazo cerrado es muy importante determinar la respuesta a la rampa para analizar y corregir errores en el diseño.

Curva de control

La curva de control es el resultado de analizar la respuesta del sistema en todo el rango del error de la variable manipulada y verificar el comportamiento visualizando una gráfica que puede ser dos o tres dimensiones.[13]

Protocolos de comunicación

En el caso de sistema de control un protocolo de comunicación es un conjunto de normas que permite comunicar sistemas o dispositivos de manera estandarizada para la automatización industrial. El más utilizado en el control es protocolo de comunicación Modbus.[14]

a) Modbus

El protocolo Modbus es un protocolo abierto, es una estructura de mensajes desarrollada por Modicon en la década de los 70, utilizada para comunicaciones entre dispositivos maestro-esclavo/cliente-servidor. Muchos equipamientos industriales utilizan Modbus como protocolo de comunicación, y gracias a sus características[15]:

- Protocolo abierto
- Simplicidad.
- Facilidad.

b) RS-485

El estándar RS-485(Recomendad Standart-485) o EIA-485(Electronic Industries Alliance-485) es muy utilizado en la industria y sin dudas es uno de los estándares mas utilizados por el protocolo Modbus. La gran diferencia con RS-232, es que permite más de dos dispositivos por lo que se pueden tener varios esclavos en la red. Además, este estándar permite trabajar con tasas de comunicación que pueden llegar hasta 12Mbps y en algunos casos hasta 50Mbps, vale la pena recordar que cuando mayor es la longitud de la red menor sera la velocidad de comunicación, la distancia máxima de la red es de 1200m, y el número máximo de dispositivos en la red es de 32.[15]

Interfaz humano máquina

Es un dispositivo que permite la interacción entre el operario y el ordenador o de otra manera entre la persona y la tecnología [16]. Generalmente son pantallas donde se puede visualizar y manipular las variables del sistema.

1.3.6 Fundamentos de Lógica Difusa

Lógica difusa

En la lógica difusa una proposición puede ser parcialmente verdadera o falsa [17]. En conjuntos difusos la función de pertenencia que se utiliza es μ , y toman valores de entre cero (0)y uno (1) [18]. En la ecuación (1.8) se puede describir un conjunto difuso discreto:

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(X_i)}{X_i} \right\} \quad (1.8)$$

Operaciones básicas

Las operaciones básicas que se establecen entre conjuntos difusos se muestran a continuación en la tabla 1.1:

Tabla 1. 1 Operaciones básicas entre conjuntos difusos. [18]

	Operador	Símbolo	Operaciones con relaciones difusas
Unión	Max	\vee	$\mu_{\tilde{A} \vee \tilde{B}}(X) = \max(\mu_{\tilde{A}}(X), \mu_{\tilde{B}}(X))$
Intersección	Min	\wedge	$\mu_{\tilde{A} \wedge \tilde{B}}(X) = \min(\mu_{\tilde{A}}(X), \mu_{\tilde{B}}(X))$
Complemento	$1 - u$	\sim	$\mu_{\tilde{A}^c}(X) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(X)$

Función de membresía

Es aquella función que asocia a los elementos de un conjunto difuso con un grado de pertenencia de entre 0 y 1. Existen métodos que permiten asignar estos grados de pertenencia [18].

Las funciones de pertenencia son claves para el desarrollo controladores difusos, y pueden ser tener diferentes representaciones convencionales. Las más usadas son del tipo singleton, triangular, trapezoidal y gaussiana [19]. En la figura 1.3 se puede observar una función triangular típica utilizada en el control difuso

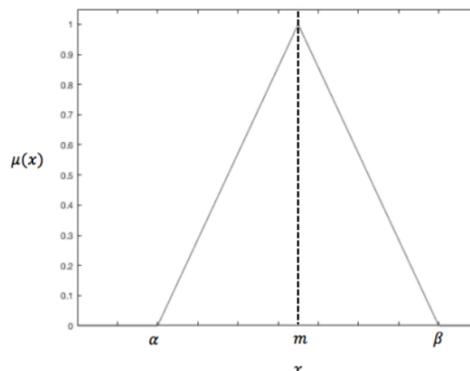


Fig.1. 3: Función Triangular.[20]

En la ecuación (1.9) se describe el comportamiento de la de la función de membresía triangular, en el rango del universo del discurso α, m la función crece y en el rango de m, β decrece, llegando a su punto máximo en m .

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq \alpha \\ \frac{x-\alpha}{m-\alpha} & \text{si } x \in (\alpha, m) \\ \frac{x-\beta}{m-\beta} & \text{si } x \in (m, \beta) \\ 0 & \text{si } x \geq \beta \end{cases} \quad (1.9)$$

Relaciones Difusas

Las relaciones difusas son conjuntos difusos definidos en conjuntos universales basadas en productos cartesianos. Representa que tan fuerte está asociado o es la relación entre elementos de dos o más conjuntos, no solo si dicha relación existe o no como sucede en los conjuntos certeros. La correspondiente figura 1.4 se ilustra el concepto [21].

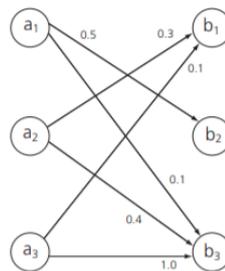


Fig.1. 4: Esquema de una Relación difusa [21]

Operaciones entre relaciones difusas

Las operaciones entre relaciones difusas son aplicadas a los valores de membresía de varios conjuntos [19]. A continuación, se consideran a las relaciones difusas R y S sobre el espacio cartesiano $X \times Y$:

- Unión: $\mu_{R \cup S}(x, y) = \max\{\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)\}$
- Intersección: $\mu_{R \cap S}(x, y) = \min\{\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)\}$
- Complemento: $\mu_{\bar{R}}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y)$
- Composición: $\mu_R(x, y) = \max\{\min(\mu_R(x), \mu_S(y))\}$

Razonamiento Difuso

Según [21] el razonamiento difuso se basa en reglas de inferencia de la forma:

SI <premisa>, ENTONCES <consecuencia>

Como es el caso en la lógica clásica, pero se utilizan conjuntos difusos, en lugar de conjuntos nítidos. Los conjuntos difusos definen variables lingüísticas y, por lo tanto, las reglas de inferencia difusa pueden modelar un sistema lingüísticamente. Los algoritmos difusos son matemáticamente equivalentes a las relaciones difusas y la inferencia difusa es equivalente a la composición difusa [21].

Variable lingüística

Una variable lingüística, es usada como entradas y salidas en controladores difusos, adopta valores con palabras que permiten describir el estado de un objeto o fenómeno; estas palabras se pueden representar mediante conjuntos difusos [18], su nomenclatura de manera general es la siguiente:

$$\text{variable lingüística: } [x, X, T(x), G, M]$$

Donde:

x : es el nombre que se le asigna a la variable lingüística.

X : es el universo del discurso.

$T(x)$: son los valores, términos o adjetivos lingüísticos que acepta la variable.

G : es la regla sintáctica que genera los valores lingüísticos.

M : es la regla semántica que asocia cada termino lingüístico con su significado.

Reglas Si – Entonces

Es el núcleo de un FSL o controlador lógico difuso y permite conectar conjuntos difusos, los antecedentes con sus consecuentes [18]. Su estructura es la siguiente:

- Si x es A, entonces y es B

Una computadora debe comprender y usar las reglas para concluir razonamientos, para lo cual estas reglas son interpretadas de manera matemática [22]. Existen dos maneras de interpretar matemáticamente las reglas difusas:

- Relación difusa: $R = A \times B$
- Implicación difusa: $I = A \rightarrow B$

Modus Ponens difuso

El Modus Ponens difuso sirve para concluir razonamientos usando la computadora por medio de una interpretación matemática, parte de los antecedentes para encontrar la consecuencia [18]. Como se observa en la figura 1.5 el Modus Ponens difuso se constituye por dos premisas un hecho que es un conjunto difuso A' y una regla que está representada por un producto cartesiano $R=A \times B$, para obtener la conclusión se debe realizar la composición entre la relación difusa y el hecho, de esta manera se puede computar un conjunto difuso B' [22] .

Premisa 1 (Hecho)	$x \text{ es } A'$	A'
Premisa 2 (Regla)	$\text{si } x \text{ es } A, \text{ entonces } y \text{ es } B$	$R = A \times B$
Conclusión	$y \text{ es } B'$	$B' = A' \circ R$

Fig.1. 5: Modus Ponens difuso.[22]

1.3.7 Controlador Difuso

Un controlador lógico difuso está formado por las siguientes partes: pre-procesamiento, fusificación, reglas de control, defusificación y pos-procesamiento [17]. En la figura 1.6 se observan estas etapas que son detalladas a continuación:

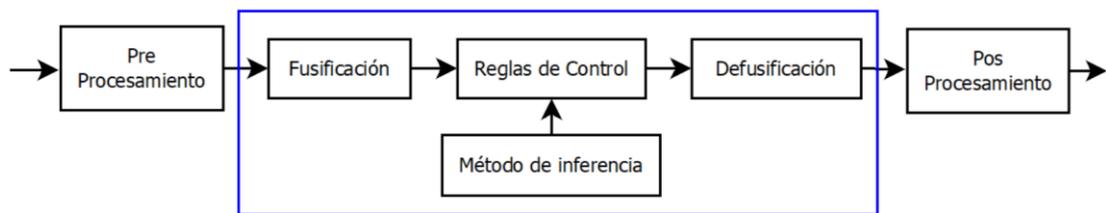


Fig.1. 6: Partes de un controlador difuso [22]

a) Pre-procesamiento.

En esta etapa se filtra, amplifica o muestrea la señal de entrada acondicionándola de tal manera que pueda ser ingresada al microcontrolador digital [22].

b) Fusificación.

Convierte el valor de la señal física en un valor difusa, es decir, convierte los datos de entrada en valores de pertenencia para cada uno de los valores lingüísticos o conjuntos difusos [18].

c) Reglas de control

Las reglas de control son reglas lingüísticas que determinan el comportamiento del controlador lógico difuso en el sistema y son creadas en base a la experiencia de expertos, el conocimiento de ingeniería de control o las acciones de control de un operador[18].

d) Método de inferencia

Es un algoritmo de razonamiento para que la computadora genere o infiera una conclusión mediante las premisas o el conjunto de reglas aplicadas al conjunto de

entrada. Existen 3 métodos de inferencia: Mamdani, Sugeno y Tsukamoto, pero el método más utilizado en la práctica y en la literatura es el de Mamdani [17].

Método de inferencia de Mamdani

El método de Mamdani según [22] utiliza como base de razonamiento lógico el Modus Ponens Difuso, una vez obtenidos los valores lingüísticos de la entrada y las reglas difusas, estas se relacionan y son operadas por medio del producto cartesiano y la composición, dando como resultado un conjunto lingüístico de salida el cual será defusificado, como en la ecuación (2.12).

$$\mu_{C'_i}(z) = \vee (\mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z)) \quad (2.12)$$

Defusificación

En esta etapa el controlador hace lo contrario a la fusificación, toma el conjunto difuso resultado de la inferencia y los convierte en un valor certero el cual determina la acción de control en el sistema [22]. Existen varios métodos de defusificación de entre los cuales para el diseño de controladores difusos se destaca el método del centroide.

Método del centroide

Es el método de defusificación más utilizado en controladores difusos, también llamado método de centro de área o centro de gravedad [19] y está descrita por la ecuación (1.10):

$$z_0 = \frac{\sum \mu(x)_i w_i}{\sum \mu(x)_i} \quad (1.10)$$

Donde:

$\mu(x)_i$: es la función de pertenencia en la salida función singletón

w_i : es valor del universo del discurso

e) Pos-acondicionamiento

En esta etapa la señal defusificada es acondicionada para ingresar a la planta y ejercer la acción de control. Dependiendo del caso se puede filtrar, amplificar o convertirla en una señal continua [22].

Procedimiento para el diseño del FSL

Según el libro titulado *Fuzzy logic with engineering applications*[19], para el diseño de un controlador difuso se recomienda seguir siguiente procedimiento:

- 1) Identificar las variables (entradas, salidas y estados) del proceso o planta.
- 2) Dividir el universo del discurso en varios subconjuntos difusos, otorgando a cada uno un nombre lingüístico.
- 3) Asignar una función de membresía para cada subconjunto difuso.
- 4) Determinar la base de reglas de control asignando las relaciones difusas entre los subconjuntos difusos de entradas y los subconjuntos difusos de las salidas
- 5) Elegir los factores de escala apropiados para las variables de entrada y salida para normalizar las variables al intervalo $[0, 1]$ o $[-1, 1]$
- 6) Fusificar las entradas al controlador.
- 7) Utilizar un razonamiento aproximado difuso para inferir la salida aportada por cada regla.
- 8) Determinar la conclusión de las salidas difusas generadas por cada regla.
- 9) Aplicar la defusificación para formar una salida nítida.

1.3.8 Simulación de sistemas de control

La simulación de sistemas de control se utiliza para analizar la respuesta transitoria o curvas de sistemas ya sea primer orden o segundo orden. Estas curvas pueden ser la respuesta al escalón, impulso o rampa. [12]

Algunos softwares utilizados para la simulación de sistemas de control son [23]:

- Matlab
- Java
- Labview
- Octave
- Python

1.3.9 Componentes del sistema de control

El conjunto de componentes tanto software como hardware en un sistema de control que sirven para poder comunicar, controlar y supervisar diversos dispositivos de

campo, así como controlar de forma remota todo el proceso, suele llamarse SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Además, suele incorporar una HMI (interfaz humano -maquina) que proporciona un control del proceso mucho más intuitivo y rápido tomando en cuenta las prestaciones que una interface tiene. Todo esto, tiene como fin ayudar a los operarios y supervisores, otorgándoles de un mejor control y la posibilidad de realizar cambios de forma prácticamente inmediata. [24]

Ordenador central

El ordenador centralo también llamada por sus siglas en ingles unidad terminal maestra (MTU), tiene como objetivo supervisar y recoger información del resto de subestaciones o unidades interrogándolas de manera periódica, para mantener las variables de los procesos dentro de los parámetros establecidos. Suele soportar la interface HMI.[24]

La estación maestra dependiendo del tipo de sistema SCADA a implementar, puede ser una PC con un software de supervisión y control. En muchos casos se opta por trabajar con un PLC con capacidad de comunicación que realizaría la tarea de leer la información de las unidades remotas.[25]

Ordenador remoto

También llamado unidad terminal remota (RTU), son dispositivos de nivel intermedio (entre el ordenador central y los instrumentos de campo), reciben señales del ordenador central y controlan todas las señales de entrada y salida del campo como válvulas, equipos de medición (sensores), motores, etc. Estas pueden ser PC industriales, PLC o microcontroladores y están situados en los nodos estratégicos de los sistemas. [24]

Instrumentos de campo

Son todos aquellos dispositivos que realizan la automatización y el control del sistema (PLC, controladores y actuadores) así como los que capturan información (sensores y/o alarmas). [24]

Red comunicación

Pueden ser prácticamente cualquier tipo de BUS (RS 232, RS 422 Y RS 485), se puede conectar mediante protocolo TCP/IP por medio de cualquier tipo de red industrial, llegando hasta comunicación inalámbrica. [24]

En la Figura 1.7 se puede observar los componentes de un sistema SCADA:

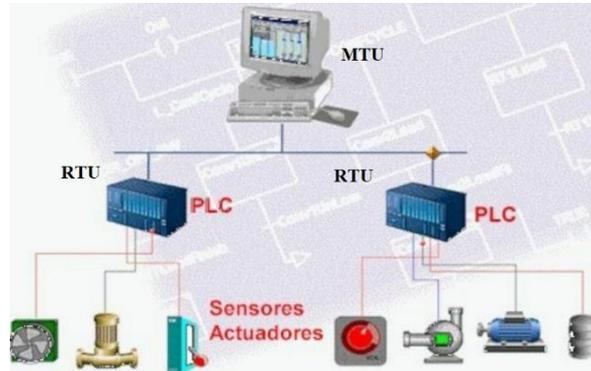


Fig.1. 7: Arquitectura SCADA. [26]

1.4 Objetivos

El objetivo de la investigación consistió en diseñar un sistema de control basado en la lógica difusa para optimizar el funcionamiento de un horno eléctrico utilizado en el proceso de ensuelado para la fabricación artesanal de calzado del Sr. Julio Sailema, para lo cual se trazaron cuatro objetivos específicos: en primer lugar, se determinó el estado del arte de los controladores basados en lógica difusa aplicados a hornos eléctricos, luego, se modeló matemáticamente el comportamiento térmico del horno eléctrico, se diseñó un sistema de control con lógica difusa en el software matlab, donde además se realizó una simulación para estabilizar la temperatura del horno y finalmente se implementó en el sistema de control con el nuevo en el nuevo horno eléctrico en el proceso de reactivado de suelas realizando diferentes pruebas de funcionamiento. Para cumplir el objetivo se tuvo que realizar las siguientes actividades:

- Recolección de material bibliográfico acerca de lógica difusa orientado a hornos eléctricos tales como tesis, artículos científicos, libros, etc.
- Síntesis del material bibliográfico por medio de tablas, especificando los datos más relevantes para la investigación
- Elaboración de tablas de resultados

- Obtención de los parámetros y variables del funcionamiento de un horno eléctrico infrarrojo.
- Definición una ecuación diferencial que represente la planta física y función de transferencia de la planta física.
- Diseño del controlador difuso de acuerdo a las especificaciones del método y a los parámetros del comportamiento térmico del horno.
- Simulación y optimización del controlador lógico difuso.
- Simulación y optimización del controlador lógico difuso.
- Selección de la tecnología, interfaz de usuario y equipos a utilizar mediante tablas comparativas.
- Programación y montaje de los dispositivos del sistema de control del horno.
- Realización de pruebas de funcionamiento y optimización del sistema de control.
- Elaboración del trabajo escrito.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Para el desarrollo de la metodología se utilizó los siguientes materiales:

- Fichas: para tomar datos extraídos de las diferentes fuentes bibliográficas tales como libros, tesis de investigación y artículos científicos y datos de campo extraídos del taller artesanal
- Registros: para obtener información relevante del área de implementación de la investigación en base a observaciones.

2.2 Métodos

2.2.1 Modalidad de la Investigación

La presente es una investigación aplicada ya que se utilizaron conocimientos teóricos, técnicos y prácticos adquiridos en las aulas.

Es una investigación bibliográfica porque se hizo uso de recursos bibliográficos orientados a los sistemas de control y modelamiento matemático que sirvieron para el desarrollo la propuesta a la solución del problema.

Es una investigación de campo, porque se recolecto datos y parámetros dentro del entorno taller artesanal del Sr Julio Sailema, que ayudaron en el estudio y optimización del proceso de reactivado de suelas.

2.2.2 Recolección de la Información

Para la recolección de la información se utilizó uso documentos bibliográficos técnicos como tesis, revistas, artículos científicos y observaciones tomados de repositorios de diferentes universidades. Además, se realizaron visitas en la zona de trabajo para verificar y recolectar datos que fueron utilizados en el diseño e implementación del sistema.

2.2.3 Procesamiento y Análisis de Datos

En el proceso y análisis de datos se establecieron las siguientes etapas:

- Definición del foco de estudio por medio del análisis de las variables dependiente e independiente
- Recopilación de datos que aporten información técnica por medio de tesis, libros, revistas, periódicos, encuestas
- Clasificación de información para almacenar datos útiles y deshacer los datos no relevantes
- Interpretación de la información procesada por medio de gráficos, tablas y esquemas estadísticos.

2.2.4 Desarrollo del Proyecto

En el desarrollo del presente proyecto, de acuerdo a los objetivos planteados se realizaron las siguientes actividades:

- Recolección de material bibliográfico acerca de lógica difusa orientado a hornos eléctricos tales como tesis, artículos científicos, libros, etc.
- Síntesis del material bibliográfico por medio de tablas, especificando los datos más relevantes para la investigación.
- Elaboración de los resultados y conclusiones.
- Obtención de los parámetros y variables del funcionamiento de un horno eléctrico infrarrojo.
- Definición una ecuación diferencial que represente la planta física y función de transferencia de la planta física.
- Diseño del controlador difuso de acuerdo a las especificaciones del método y a los parámetros del comportamiento térmico del horno.
- Simulación y optimización del controlador lógico difuso.
- Selección de la tecnología, interfaz de usuario y equipos a utilizar mediante tablas comparativas.
- Programación y montaje de los dispositivos del sistema de control del horno.
- Realización de pruebas de funcionamiento y optimización del sistema de control.
- Elaboración del trabajo escrito.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de factibilidad

3.1.1 Factibilidad técnica

El presente proyecto de investigación es técnicamente factible debido a que los equipos y elementos electrónicos utilizados emplean tecnología basada en software y hardware libre y están disponibles en el mercado nacional.

3.1.2 Factibilidad económica

El presente proyecto es económicamente factible puesto que los recursos empleados en la investigación fueron financiados tanto por el investigador como la empresa.

3.1.3 Factibilidad bibliográfica

Las fuentes bibliográficas utilizadas en el presente proyecto de investigación son de libre acceso y se los puede encontrar en la biblioteca de la institución y/o en páginas web. Tales fuentes bibliográficas son: libros, artículos científicos, revistas y periódicos.

3.2 Análisis del proceso de reactivado de suelas

a) Procesos de la fabricación artesanal de calzado

En el taller del Sr Julio Sailema para la fabricación artesanal de calzado se siguen un conjunto de procesos, los cuales son: almacenamiento de materia prima, corte de piezas, aparado, montaje, ensuelado y terminado del calzado. En la figura 3.1 se puede observar un diagrama de bloques describiendo estos procesos.

PROCESO DE FABRICACIÓN DE CALZADO

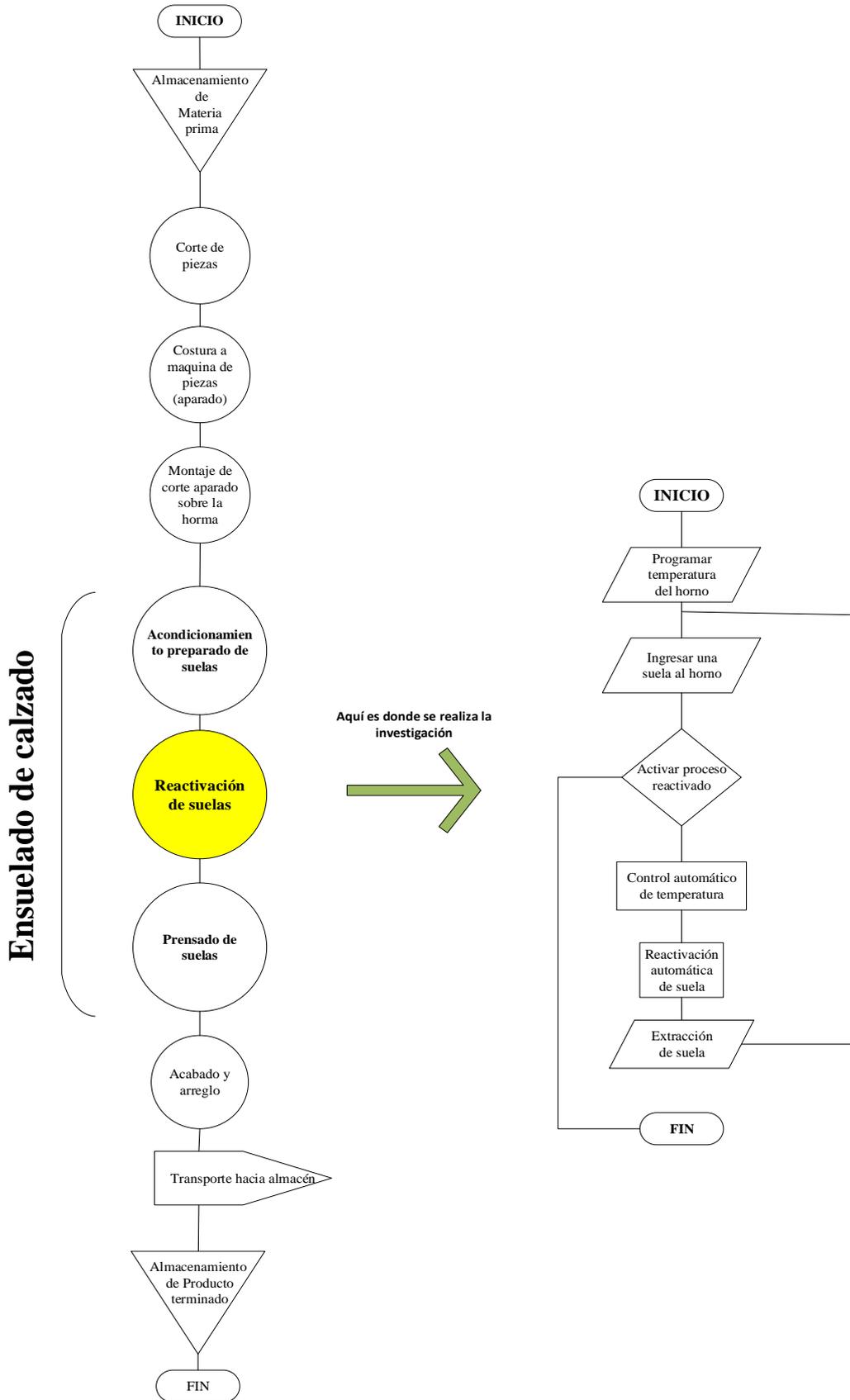
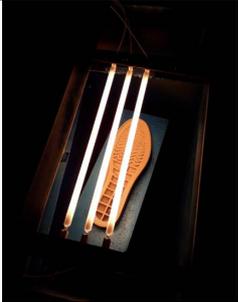


Fig.3. 1. Procesos de fabricación artesanal de calzado

b) Proceso de ensuelado de calzado

A continuación, en la tabla 3.1, se describe el proceso de ensuelado de calzado desarrollado en el taller artesanal de calzado del Sr. Julio Sailema. Este proceso se divide en 3 subprocesos: preparado de suela, reactivado de suela y prensado de suela.

Tabla 3. 1. Procesos en el ensuelado de calzado

ENSUELADO DE CALZADO	
Preparado de suela	
En el preparado de suela, primero, se limpia la suela con un líquido anti-grasa para depurar las impurezas presentes en la suela. Después se unta o adhiere pegamento especial sobre la suela y la base exterior del calzado.	
Reactivado de suela	
En el reactivado de suela básicamente se calienta la suela a una temperatura dentro del rango de los 50 y 60°C para activar las propiedades adherentes de la suela.	
Prensado de suela	
Se une el calzado junto a la suela a presión dejando bien compactado de tal manera que no se desunen ante ninguna adversidad	

Elaborado por: Investigador

c) Localización del reactivado de suelas

La reactivación de suelas se localiza en el proceso de ensuelado de calzado y esto se puede observar si se vuelve a la figura 3.1, donde esquemáticamente se presentan todos los pasos a seguir en la fabricación artesanal de calzado y se resalta la localización del proceso de reactivado de suelas, explicando los pasos del proceso con el sistema de control propuesto a través de un diagrama de flujo.

d) Horno actual en el proceso de reactivado de suela

El horno del taller de calzado del Sr Julio Sailema que se utiliza actualmente en el proceso de reactivado ilustrado en la figura 3.2, es un horno manual a gas y funciona por transferencia de calor por convección, el cual según los resultados del anexo 1, no tiene las garantías para reactivar suelas de manera eficiente debido a los siguientes puntos:

- El control de la temperatura del horno es de ajuste manual y se lo hace por medio de una perilla.
- El control del tiempo de reactivado de suela es calculado de manera empírica por parte del operador.
- Existe la amenaza frecuente de fugas de gas del horno poniendo en peligro integridad física del operador y el taller mismo.

Por lo tanto, las suelas se queman frecuentemente y se reactivan de manera ineficiente durante el proceso afectando directamente a la producción y a la calidad del calzado. En la figura 3.2 se puede observar el horno y las condiciones en la cual este trabaja.



Fig.3. 2. Horno reactivador de ajuste manual de temperatura.

En consecuencia, para la optimización del proceso de reactivación y por ende del ensuelado de calzado, se propuso el cambio de la estructura del horno y del sistema de transferencia de calor.

e) Horno con transferencia de calor por radiación

Se diseña una nueva estructura del horno (ver diseño en anexo 2), el cual utiliza una transferencia de calor por radiación utilizando lámparas halógenas infrarrojas para mejorar o hacer más eficiente el calentamiento de las suelas, a continuación, en la figura 3.3 se observa un esquema un horno reactivador de radiación infrarroja para suelas.

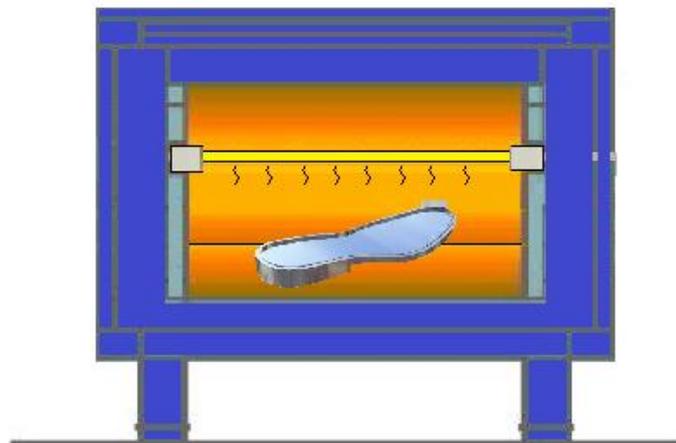


Fig.3. 3. Esquema de horno reactivador propuesto e implementado

Las lámparas halógenas con tecnología infrarroja utilizadas para horno son de la marca USHIO y sus detalles se presentan a continuación en la tabla 3.2 junto a una ilustración.

Tabla 3. 2. Características de lámpara halógena de radiación infrarroja

Características	Valores	
Marca	USHIO	
Modelo	QIH240-1000	
Potencia	1000 Watzz	
Voltaje	220 Voltios	
Corriente	4.5 Amperios	
Diámetro	0.03 metros	
Largo	0.3 metros	

Elaborado por: Investigador

f) Justificación de diseño de horno

El horno reactivador como se puede ver en la figura 3.4 fue diseñado exclusivamente para uso en talleres artesanales. Debido a que en el proceso de ensuelado opera solamente una persona, el horno se adaptó para uso de un solo operador. No se pudo diseñar un horno donde intervenga más de un operador porque en los talleres artesanales los recursos económicos no son suficientes para contratar más de un empleado para un mismo proceso, además de que los sueldos de un empleado son dados por docena fabricada.

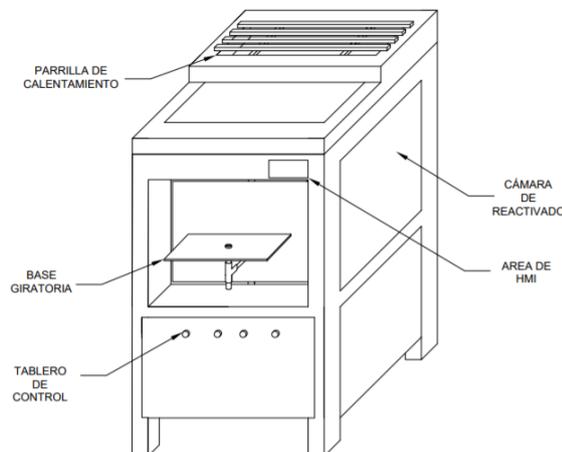


Fig.3. 4. Ilustración de del diseño del horno reactivador para taller artesanales.

Elaborado por: Investigador

3.3 Análisis de Estado del Arte

El enfoque de la investigación es el control difuso aplicado a hornos eléctricos. Pues, se han desarrollado varios estudios y publicaciones en diferentes tipos de hornos,

sobre todo los que se basan en la transferencia de calor por convección, como en [28], [29], [30],[31],[32], donde se hace uso de resistencias eléctricas y controladores programados con lógica difusa, sin embargo, no se han encontrado investigaciones aplicadas a hornos cuya transferencia de calor sea radiación donde se usen lámparas halógenas de radiación infrarroja, como se pretende realizar en la actual investigación.

Cabe señalar que se tienen diferentes tipos de diseños de controladores difusos y cada uno es aplicado de acuerdo a la necesidad del proceso y al objetivo de control. Como por ejemplo en los estudios correspondientes de [28] se diseña un controlador PID difuso experto para un horno eléctrico el cual supera al control PID convencional y logra mejorar el tiempo de respuesta del proceso y estabilidad de la temperatura del horno [1].

En [29], se controla un horno de fusión de vidrio integrado en un sistema lineal y no lineal por medio de un controlador híbrido basado en un control PI convencional y un control difuso, donde el sistema no lineal es regulado por reglas de expertos y estas son trasladadas al control difuso, al final se logra mejorar de manera eficiente el comportamiento térmico del horno. En [30], se simula y compara un control PID difuso y un control PID convencional en un horno no lineal a través del software Matlab donde los resultados indican que la rapidez, la estabilidad y la capacidad anti-interferencia de control PID difusa son superiores a los de control PID convencional. En [33], se implementa un control de temperatura de una bañera basado en la lógica booleana en combinación de conjuntos difusos proporcional derivativo y al final se obtiene un control rápido del tiempo de respuesta del sistema.

En [31], se diseña en el software Labview un control difuso PD (Proporcional Derivativo) y luego se lo implementa en un horno eléctrico de cocción de piezas cerámicas con el cual se obtiene una respuesta estable de temperatura con respecto a la señal de referencia. En [34] se utiliza el control difuso para dirigir redes neuronales artificiales, para un horno solar orientado al secado de plantas y vegetales, los resultados son excelentes debido a que se logra disminuir el tiempo de secado de 96 horas a 5.1 horas en promedio. Y en [32], se simula e implementa un controlador difuso PI en un horno de cámara de resistencia indirectos, y se compara

con controlador PID convencional, en los resultados se obtiene una mejora en el tiempo de respuesta del horno pero no en el error estacionario.

Del estado del arte se determina que los controladores difusos son implementados en costosos hardware y software con licencia pagada. Los softwares por excelencia utilizados para programar la lógica difusa son Labview y Matlab por lo que es factible dejar aportes de investigación de implementación en controladores difusos de hardware y software libre, usando por ejemplo arduino, odroid, raspberry, etc, en los lenguajes de programación C, Java o Python tanto como requiera la investigación.

Además, no existen aplicaciones de controladores difusos en hornos eléctricos con transferencia de calor por radiación, siendo esto un buen antecedente para realizar la propuesta. A continuación, en la tabla 3.3 se tiene una descripción del análisis del estado del arte del proyecto de investigación:

Tabla 3. 3. Estado del arte. [28][29][30][31][32][33][34]

Artículo/Tesis	Tipo de Horno	Tipo de controlador difuso	Descripción	Resultados
Application of Expert Fuzzy PID Method for Temperature Control of Heating Furnace Año: 2012	Horno eléctrico con temperatura límite de 780°C	Control PID difuso experto	Se tiene un conmutador selectivo que selecciona el control PID clásico o el sistema difuso experto.	Los resultados de simulación muestran que el controlador PID fuzzy experto es superior al controlador PID convencional en el sobreimpulso, tiempo de subida y la velocidad de tiempo respuesta y además tiene mayor robustez.
Diseño y simulación de un controlador difuso de temperatura empleando el congresor basado en relaciones booleanas Año: 2012	Control de temperatura para una bañera.	Controlador difuso Proporcional Integral	Consiste en realizar una aplicación desde un punto de vista Booleano y luego emplear conjuntos difusos para tener una implementación tipo CBR	Se logra implementar un controlador CBR combinado con conjuntos difusos generando un comportamiento mejor que el controlador booleano
Control De Temperatura de un Horno Eléctrico mediante Lógica Difusa Año: 2012	Horno eléctrico para la cocción de piezas cerámicas.	Controlador difuso Proporcional Derivativo	Se diseña, simula e implementa un controlador Proporcional derivativo y se lo compara en simulación con controlador PID	El control difuso responde de manera satisfactoria y estable con un error máximo de sobrepico de 3.8%, proporcionando resultados satisfactorios y cumpliendo con las trayectorias de temperatura establecidas por los usuarios
Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso Año: 2012	Horno solar para el secado de plantas y vegetales utilizando control difuso.	El control difuso regido por un conjunto de redes neuronales	El sistema propuesto consta de un colector solar, un sistema de transmisión por medio de una banda transportadora y un recipiente contenedor de aceite (el cual es utilizado para calentar el producto e iniciar el proceso de deshidratación)	Se logra disminuir el tiempo de secado que tradicionalmente era de 96 h a un tiempo de secado de 5,1 h en promedio
Temperature Control of Electric Furnace Based on Fuzzy PID Año: 2011	Simulación de un horno eléctrico con una temperatura límite de 1000°C	Controlador PID difuso	Se crea una simulación de un control PID difuso a través de Matlab, y se compara los resultados con un control PID tradicional simulado en matlab y un	El resultado de simulación muestra que la rapidez, la estabilidad y la capacidad anti-interferencia de control PID difusa son superiores a los de control PID tradicional.
Hybrid Algorithm With Fuzzy System and Conventional PI Control for the Temperature Control of TV Glass Furnace Año:2003	Horno de fusión de vidrio para tubo de imagen de televisión de 300 toneladas	Controlador PI y Controlador difuso combinados en cascada	El control PI regula la parte lineal del sistema y el controlador difuso regula la parte no lineal del sistema con reglas de expertos humanos	Este trabajo ha demostrado que sin conocer un modelo completo de un sistema complejo, control de lógica difusa puede mejorar el rendimiento de los procesos industriales, completándolo controles convencionales.
Application of Temperature Fuzzy Controller in an Indirect Resistance Furnace Año: 2002	Hornos de cámara resistencia indirectos.	Es un controlador difuso tipo PD realizado en matlab	Se realiza una simulación con un modelado matemático no lineal y se compara la respuesta con el horno físico. Se analiza las mejoras del controlador difuso con respecto a un controlador PID digital	Se tiene una mejora en la velocidad de respuesta en comparación a un controlador PID digital, aunque no se estabiliza totalmente el error de estado estacionario.

3.4 Modelado Matemático del proceso

Se determinó el modelo matemático del comportamiento térmico del horno analizando los parámetros y propiedades que intervienen en el proceso, luego se establecieron las leyes físicas termodinámicas para obtener ecuaciones matemáticas del modelo y finalmente se efectúa la transformada de Fourier para obtener la función de transferencia.

3.4.1 Parámetros y propiedades del horno eléctrico

a) Sistema de transferencia de calor

El sistema de transferencia de calor del horno eléctrico se basa en la radiación infrarroja para lo cual se utilizaron lámparas halógenas IR. Las lámparas implementadas son de la marca USHIO del modelo QIH240-1000 y sus dimensiones se describen en la tabla 3.4 y sus propiedades y parámetros se describen en la tabla 3.5.

Tabla 3. 4. Dimensiones de las lámparas IR marca USHIO

Dimensiones físicas	Valor	
Largo (m)	0.3	
Diámetro (m)	0.05	
Área superficial (m)	0.0471	

Elaborado por: Investigador

Tabla 3. 5. Propiedades y parámetros de la lámpara IR marca USHIO

Propiedades Eléctricas	Valor
Potencia (W)	1000
Voltaje (V)	240
Corriente (A)	4.5
Propiedades Termodinámicas	Valor
Resistencia (Ω)	57
Masa (kg)	0.0589
Calor específico (KJ/kg. $^{\circ}$ K)	0.1300
Emisividad	0.8

Elaborado por: Investigador

b) Estructura del horno reactivador

El diseño esquemático fue realizado en el software autocad y se lo puede observar en la figura 3.5, donde están descritas las diferentes partes del horno reactivador: la cámara de calentamiento o reactivado, la base giratoria, la parrilla de reactivado y el área del hmi.

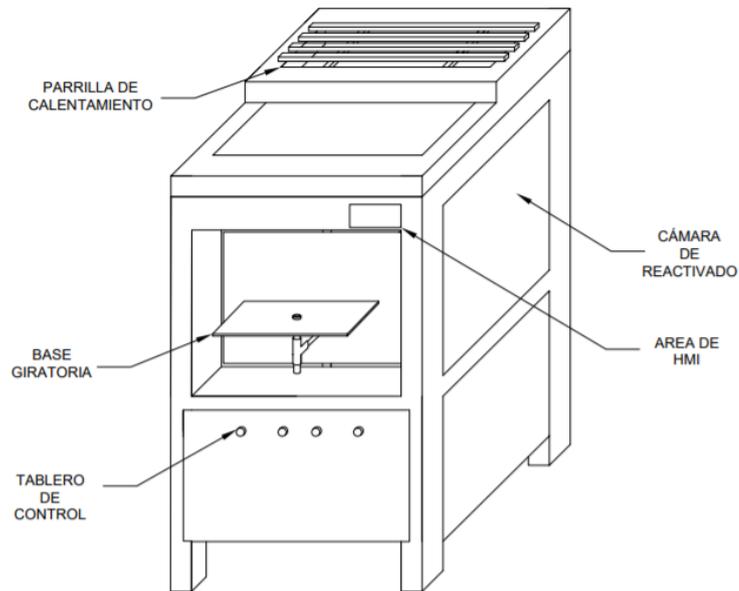


Fig.3. 5. Esquema de diseño de horno reactivador de suelas
Elaborado por: Investigador

La cámara de reactivado está diseñada con fibra de vidrio que es un material aislante y reflectivo a la transferencia de calor. A continuación, en la tabla 3.6, se establecen sus medidas y propiedades:

Tabla 3. 6. Dimensiones y propiedades físicas de la cámara de reactivado

Dimensiones	Valor
Largo (m)	0.67
Ancho (m)	0.53
Alto (m)	1.26
Área de trabajo (m ²)	0.12
Propiedades	
Calor específico (KJ/kg.°K)	0.010
Emisividad	0.01
Conductividad térmica W/m °C	0.043

Elaborado por: Investigador

En el análisis matemático del horno la energía o calor transferido a las paredes del horno es despreciable. Esto debido a que las propiedades de las paredes son de fibra de vidrio que es un material aislante cuya conductividad térmica es 0.043 [W/m °C] [10].

c) Pieza a calentar

Para este caso la mayoría de las suelas utilizadas en la fabricación artesanal son de material tipo PVC (Policloruro de vinilo) que es un derivado del petróleo. Las suelas tienen las propiedades descritas en la tabla 3.7.

Tabla 3. 7: Propiedades de suela PVC.

Propiedades	Valor	
Masa (kg)	0.1139	
Calor específico (KJ/kg.°K)	0.750	
Emisividad	0.4	

Elaborado por: Investigador

3.4.2 Ecuaciones del Modelo Matemático

En el sistema térmico del horno de acuerdo a la primera ley de la termodinámica se tiene que:

$$P(t) = \Delta U_r + \dot{Q}_{RAD} + \dot{Q}_{CONV} \quad (3.1)$$

$P(t)$: Potencia Eléctrica suministrada en W (Watts)

ΔU_r : Variación de Energía Interna de la resistencia

\dot{Q}_{RAD} : Razón de transferencia de calor por radiación de la resistencia térmica

\dot{Q}_{CONV} : Razón de transferencia de calor por convección de la resistencia térmica

Energía interna de la resistencia.

$$\Delta U_r = m_r * C_r * \frac{dT_r}{dt} \quad (3.2)$$

c_1 : Capacidad calorífica

m_r : Masa de la resistencia térmica

C_r : Calor específico promedio de la resistencia térmica

T_r : Temperatura de la resistencia termica en grados Kelvin

La razón de transferencia de calor por radiación de la resistencia térmica:

$$\dot{Q}_{RAD} = \varepsilon * \sigma * A_r * T_r^4 \quad (3.3)$$

Q_{RAD} : Razón de transferencia de calor por radiación de la resistencia térmica
 ε : Emisividad total de la superficie A_r

σ : Constante de la ley de Stefan – Boltzman ($5.6 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$)

A_r : Área superficial de la resistencia térmica

T_s : Temperatura de la resistencia térmica en K (grados Kelvin)

La razón de transferencia de calor por radiación de la resistencia térmica

$$\dot{Q}_{CONV} = h * A_r * (T_r - T_h) \quad (3.4)$$

Q_{CONV} : Razón de transferencia de calor por convección de la resistencia térmica

h : coeficiente de transferencia de calor por convección ($\frac{W}{m^2 * K}$)

A_r : Área superficial de la resistencia expuesta a la convección

T_h : Temperatura del horno en K (grados Kelvin)

Sin embargo, para el sistema, la razón de transferencia de calor por convección es depreciable, por lo que:

$$\dot{Q}_{CONV} \cong 0$$

Reemplazando ecuaciones (3.2) y (3.3) en ecuación (3.1) se tiene:

$$P(t) = \Delta U_r + \dot{Q}_{RAD} + \dot{Q}_{CONV}$$

$$P(t) = m_r * C_r * \frac{dT_r}{dt} + \varepsilon * \sigma * A_r * T_r^4 + 0$$

Además, en el sistema se desprecia la pérdida de energía en las paredes del horno debido a la gran eficiencia de la transferencia de calor por radiación.

Para simplificar la ecuación se crean nuevas constantes:

$$c1 = m_r * C_r$$

$$k1 = \varepsilon * \sigma * A_r$$

Entonces:

$$P(t) = c1 * \frac{dT_r}{dt} + k1 * T_r^4 \quad (3.5)$$

Se tiene la ecuación (3.5) no lineal en función de la potencia suministrada y la temperatura de la resistencia térmica, sin embargo, se requiere que la ecuación esté en función de la potencia suministrada y la temperatura de la pieza a calentar.

Para lo cual, se sabe que el balance de energía para sistemas cerrados de masa fija (pieza a calentar) es:

$$Q_{neta} = \Delta U_p$$

Q_{neta} : Transferencia de calor neto suministrado a la pieza a calentar

ΔU_p : Variación de energía interna de la pieza a calentar

En términos de la razón de transferencia de calor se tiene:

$$\dot{Q}_{RAD(r \rightarrow p)} = m_p * C_p * \frac{dT_p}{dt}$$

$\dot{Q}_{RAD(r \rightarrow p)}$: Razón de transferencia de calor por radiación entre la superficie de la resistencia térmica y la pieza

m_p : Masa de la pieza a calentar en Kg

C_p : Calor específico promedio de la pieza a calentar

T_p : Temperatura de la pieza a calentar en K (grados Kelvin)

Y por la ley de Stefan-Boltzman se tiene:

$$\varepsilon * \sigma * A_r * (T_r^4 - T_p^4) = m_p * C_p * \frac{dT_p}{dt}$$

De donde se despeja T_r :

$$T_r = \left(\frac{m_p * C_p}{\varepsilon * \sigma * A_r} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{1}{4}}$$

Se generan nuevas constantes para simplificar ecuación:

$$c_2 = m_p * C_p$$

$$k_1 = \varepsilon * \sigma * A_r$$

Entonces se tiene:

$$T_r = \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.6)$$

Finalmente se reemplaza ecuación (4.6) en (4.5), se resuelve y se obtiene:

$$P(t) = c_1 * \frac{d \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{1}{4}}}{dt} + k_1 * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$P(t) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} * \frac{d^2 T_p}{dt^2} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} + \frac{c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} + c_2 * \frac{dT_p}{dt} + k_1 * T_p^4 \quad (3.7)$$

Como resultado del modelar el sistema se obtiene la ecuación(3.7) que es una ecuación no lineal de segundo orden.

3.4.3 Linealización

a) Punto de equilibrio.

Para calcular el punto de equilibrio del modelo no lineal se considera la temperatura de la pieza a calentar en 60°C (340°K)

En el punto de equilibrio no existen variaciones de temperatura ni potencia suministrada por lo que las derivadas en función del tiempo de primer o segundo orden son nulas.

Entonces de la ecuación (3.7) no lineal de segundo orden se tiene:

$$P(t) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} * \frac{d^2 T_p}{dt^2} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{3}{4}} + \frac{c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{3}{4}} + c_2 * \frac{dT_p}{dt} + k_1 * T_p^4$$

Para el punto de equilibrio:

$$t_p = 400^\circ K ; \frac{d^2 T_p}{dt^2} = 0 ; \frac{dT_p}{dt} = 0$$

Se obtiene:

$$P(t) = k_1 * T_p^4$$

$$P(t) = (0.18703 * 10^{-8}) * (400)^4$$

$$P(t) = 48W$$

b) Linealización del modelo no lineal.

Se tiene la ecuación no lineal como una función de $P(t)$, $T_p(t)$, $\frac{dT_p(t)}{dt}$ y $\frac{d^2 T_p(t)}{dt^2}$ igualada a cero.

$$f\left(P(t), T_p(t), \frac{dT_p(t)}{dt}, \frac{d^2 T_p(t)}{dt^2}\right) = 0$$

Para linealizar la ecuación se toma el primer término de la función desarrollada en las series de Taylor para cada variable:

$$\left. \frac{df}{dP} \right|_0 \Delta P(t) + \left. \frac{df}{dT_p} \right|_0 \Delta T_p(t) + \left. \frac{df}{d\dot{T}_p} \right|_0 \Delta \dot{T}_p(t) + \left. \frac{df}{d\ddot{T}_p} \right|_0 \Delta \ddot{T}_p(t) = 0$$

Donde:

$$\Delta P(t) = P(t) - P_0(t)$$

$$\Delta T_p(t) = T_p(t) - T_{p0}(t)$$

$$\Delta \dot{T}_p(t) = \dot{T}_p(t) - \dot{T}_{p0}(t)$$

$$\Delta \ddot{T}_p(t) = \ddot{T}_p(t) - \ddot{T}_{p0}(t)$$

Entonces se reemplaza la función en cada término y se resuelve:

$$\left. \frac{df}{dP} \right|_0 \Delta P(t) = \frac{d}{dP(t)} \left(-P(t) + \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} * \frac{d^2 T_p}{dt^2} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} + \frac{c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{3}{4}} + c_2 * \frac{dT_p}{dt} + k_1 * T_p^4 \right) \Bigg|_0 \Delta P(t)$$

$$\left. \frac{df}{dP} \right|_0 \Delta P(t) = (-1) * \Delta P(t) = -\Delta P(t)$$

$$\left. \frac{df}{dT_p} \right|_0 \Delta T_p(t) = \frac{d}{dT_p} \left(-P(t) + \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} * \frac{d^2 T_p}{dt^2} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} + \frac{c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{3}{4}} + c_2 * \frac{dT_p}{dt} + k_1 * T_p^4 \right) \Bigg|_0 \Delta T_p(t)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{df}{dT_p} \right|_0 \Delta T_p(t) &= -\frac{3 * c_1 * c_2}{4 * k_1} * \ddot{T}_p * T_p^3 * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{7}{4}} - \frac{3c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * T_p^3 * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{7}{4}} + 4 * k_1 * T_p^3 \Bigg|_0 \Delta T_p(t) \\ &= 4 * k_1 * t_{p0}^3 \Delta T_p(t) \end{aligned}$$

$$\left. \frac{df}{d\dot{T}_p} \right|_0 \Delta \dot{T}_p(t) = \frac{d}{d\dot{T}_p} \left(P(t) - \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} * \frac{d^2 T_p}{dt^2} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} + \frac{c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{3}{4}} + c_2 * \frac{dT_p}{dt} + k_1 * T_p^4 \right) \Bigg|_0 \Delta \dot{T}_p(t)$$

$$\left. \frac{df}{d\dot{T}_p} \right|_0 \Delta \dot{T}_p(t) = -\frac{3 * c_2}{16 * k_1^2} \ddot{T}_p * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{7}{4}} - \frac{3 * c_2}{16 * k_1} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{7}{4}} \Bigg|_0 \Delta \dot{T}_p(t) = c_2 \Delta \dot{T}_p(t)$$

$$\left. \frac{df}{dT_p} \right|_0 \Delta \ddot{T}_p(t) = \frac{d}{dT_p} \left(P(t) - \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} * \frac{d^2 T_p}{dt^2} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} + \frac{c_1}{4} * \frac{dT_p^4}{dt} * \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{\frac{3}{4}} + c_2 * \frac{dT_p}{dt} + k_1 * T_p^4 \right) \Bigg|_0 \Delta \ddot{T}_p(t)$$

$$\left. \frac{df}{dT_p} \right|_0 \Delta \ddot{T}_p(t) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1} \left(\frac{c_2}{k_1} * \frac{dT_p}{dt} + T_p^4 \right)^{-\frac{3}{4}} \Bigg|_0 \Delta \ddot{T}_p(t) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * T_{p0}^3} \Delta \ddot{T}_p(t)$$

Y se obtiene la siguiente ecuación linealizada:

$$\Delta P(t) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * t_{p0}^3} \Delta \ddot{T}_p(t) + c_2 \Delta \dot{T}_p(t) + 4 * k_1 * t_{p0}^3 \Delta T_p(t) \quad (3.8)$$

3.4.4 Determinación de la función de transferencia

Una vez linealizado el modelo de segundo orden, se obtiene la función de transferencia de la planta aplicando Transformada de Laplace a la ecuación (3.8) linealizada:

$$\Delta P(t) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * T_{p0}^3} \Delta \ddot{T}_p(t) + c_2 \Delta \dot{T}_p(t) + 4 * k_1 * T_{p0}^3 \Delta T_p(t)$$

Aplicando Transformada de Laplace se obtiene:

$$P(s) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * t_{p0}^3} [s^2 T(s) - sT_p(0) - \dot{T}_p(0)] + c_2 [sT(s) - T_p(0)] + 4 * k_1 * t_{p0}^3 T(s)$$

Se asume las condiciones iniciales igual a cero, por lo tanto:

$$P(s) = \frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * t_{p0}^3} s^2 T(s) + c_2 s T(s) + 4 * k_1 * t_{p0}^3 T(s)$$

$$P(s) = T(s) \left[\frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * t_{p0}^3} s^2 + c_2 s + 4 * k_1 * t_{p0}^3 \right]$$

$$G(s) = \frac{T(s)}{P(s)}$$

$$\frac{T(s)}{P(s)} = \frac{1}{\frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * t_{p0}^3} s^2 + c_2 s + 4 * k_1 * t_{p0}^3}$$

Y se obtiene la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1}{\frac{c_1 * c_2}{4 * k_1 * t_{p0}^3} s^2 + c_2 s + 4 * k_1 * t_{p0}^3}$$

$$G(s) = \frac{1}{697.036 s^2 + 85.0426 s + 0.9351} \quad (3.9)$$

3.5 Diseño del controlador difuso

Para el diseño del controlador difuso se requiere inicialmente el diagrama de bloques del sistema de control para poder definir las variables y parámetros que intervienen en el proceso térmico y de control. En la figura 3.7, se tiene un diagrama de sistema de control de lazo cerrado que esquematiza el horno eléctrico y el control difuso.

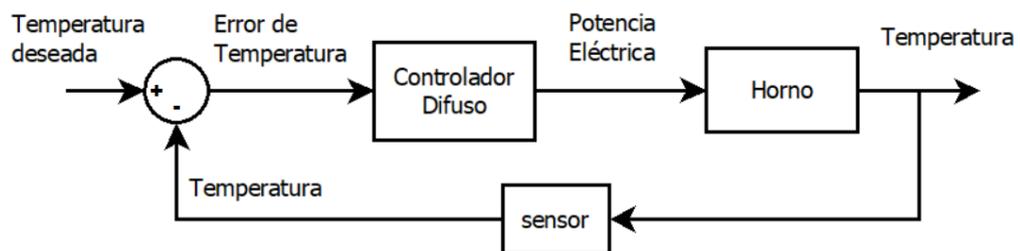


Fig.3.6: Diagrama de bloques general del sistema
Elaborado por: Investigador

A continuación, para el diseño de un controlador difuso se sigue el procedimiento recomendado en [19], resumido en el siguiente diagrama de la figura 3.6 :



Fig.3. 7: Flujograma de diseño del controlador difuso.
Elaborado por: Investigador

3.5.1 Identificación de las variables del sistema

De acuerdo al diagrama de bloques de la anterior figura 4.1, el horno eléctrico o también llamado planta del sistema tiene dos variables, una variable de entrada que representa a la potencia eléctrica suministrada a la resistencia de calentamiento y una variable de salida que representa a la temperatura de carga del horno.

- **Variable de entrada** = Potencia eléctrica
- **Variable de salida** = Temperatura

3.5.2 Asignación de las variables lingüísticas

Para el caso del controlador, se tiene como variable de entrada el error de temperatura que es la diferencia entre la temperatura deseada y la temperatura de salida del horno, y como variable de salida se tiene a la potencia eléctrica regulada, las mismas que son establecidas como variables lingüísticas en el diseño del controlador difuso.

- **Variable lingüística entrada:** Error de temperatura
- **Variable lingüística salida:** Potencia eléctrica

3.5.3 Determinación del Universo del discurso

El universo del discurso es también conocido como el rango de dominio de una variable lingüística y se lo define de la siguiente manera en la tabla 3.8.

Tabla 3. 8. Valores del universo del discurso

Variable lingüística	Universo del discurso	Unidad
Error de temperatura	Min=-120 Max= 120	Centígrados (°C)
Potencia eléctrica	Min=0 Max=2000	Watts (W)

Elaborado por: Investigador

3.5.4 Determinación de los Términos Lingüísticos

A cada variable lingüística se asignan diferentes términos lingüísticos que serán subconjuntos difusos dentro del universo del discurso de las variables lingüísticas. Se dividirá el universo del discurso y cada término tendrá un nombre o sintaxis específico, como en la tabla 3.9:

Tabla 3. 9. Términos lingüísticos

Variable lingüística	Términos lingüísticos	Abreviatura
Error de temperatura	Error negativo Error Zero Error Positivo pequeño Error positivo mediano Error positivo grande Error positivo extremo	EN EZ EPP EPM EPG EPX
Potencia eléctrica	Potencia Zero Potencia Pequeña Potencia Mediana Potencia Larga Potencia Extrema	PZ PP PM PL PX

Elaborado por: Investigador

3.5.5 Asignación de Funciones de Membresía

A cada término lingüístico se le asocia un conjunto difuso que estará compuesto de una función de membresía con un respectivo universo del discurso. A continuación, se tiene la tabla 3.10 con la descripción.

Tabla 3. 10. Funciones de membresía.

Error de temperatura		
Termino lingüístico	Función de membresía	Universo del discurso (°C)
EN	Trapezoidal	-120, -120, -10, 0
EZ	Triangular	-5, 0, 5
EPP	Triangular	0, 20, 40
EPM	Triangular	20, 60, 100
EPG	Triangular	80, 100, 120
EPX	Triangular	100, 120, 120
Potencia Eléctrica		
Termino lingüístico	Función de membresía	Universo del discurso (W)
PZ	Triangular	0, 0, 200
PP	Triangular	0, 200, 400
PM	Triangular	200, 400, 600
PG	Triangular	400, 1000, 1500
PX	Trapezoidal	1000, 1500, 2000, 2000

Elaborado por: Investigador

En la figura 3.8 y 3.9 se observa estas funciones de membresía graficadas en Python:

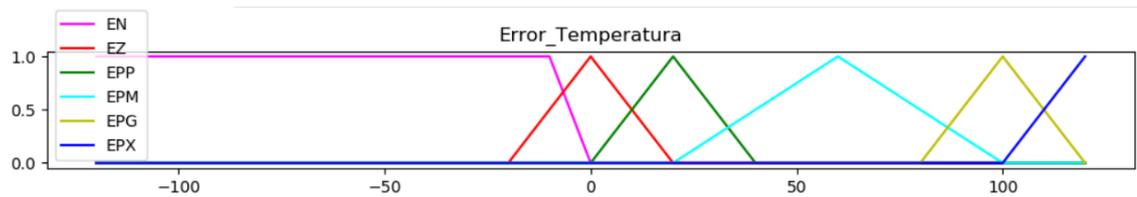


Fig.3. 8: Funciones de membresía del error de temperatura.

Elaborado por: Investigador

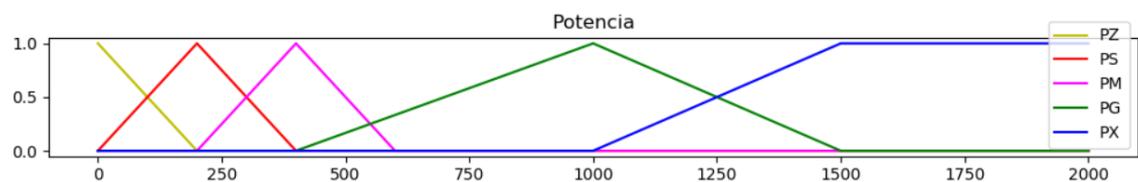


Fig.3. 9: Funciones de membresía de la potencia eléctrica.

Elaborado por: Investigador

3.5.6 Determinación de Reglas de Control

En esta etapa del diseño se relacionan los conjuntos difusos de los términos lingüísticos de entrada (error de temperatura) y los términos lingüísticos de salida (potencia eléctrica) y se determina las reglas de control:

1. Si error de temperatura es EPX entonces potencia es PX
2. Si error de temperatura es EPG entonces potencia es PG
3. Si error de temperatura es EPM entonces potencia es PM
4. Si error de temperatura es EPP entonces potencia es PP
5. Si error de temperatura es EZ entonces potencia es PZ
6. Si error de temperatura es EN entonces potencia es PZ

Se tiene entonces 6 reglas lingüística resumidas en la siguiente tabla 3.11:

Tabla 3. 11. Reglas de control

Error de temperatura	Potencia
EPX	PX
EPG	PG
EPM	PM
EPP	PP=]l
EZ	PZ
EN	PZ

Elaborado por: Investigador

3.5.7 Desarrollo del Método de Inferencia

Para que la computadora pueda interpretar matemáticamente las reglas de control y tomar decisiones en la compensación del error se utiliza el método de inferencia de Mandami, el diagrama de proceso se visualiza en la figura 3.10. Los programas donde se programa el controlador son Matlab (para la simulación) y Python (para la implementación), los cuales tienen disponibles librerías para poder procesar el razonamiento de un controlador lógico difuso.

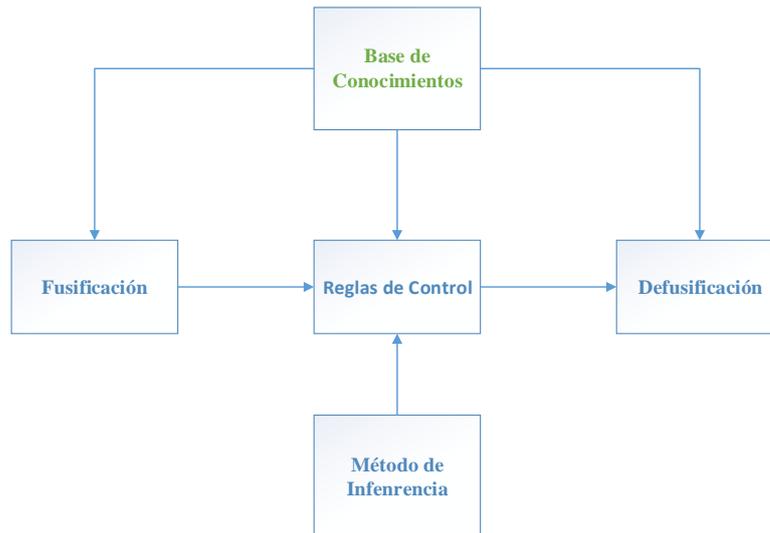


Fig.3. 10: Bloques del método de inferencia difusa
Elaborado por: Investigador

a) Fusificación

La fusificación toma un valor nítido y lo convierte a un valor difuso. Para este caso el valor nítido es el error de temperatura y se lo convierte a un valor difuso dentro los términos lingüístico EPX, EPG, EPM, EPP, EZ, y EN establecidos previamente. Por ejemplo, si se tiene un valor de error temperatura de 60 °C, en la fusificación se analiza este valor para cada termino lingüístico establecido representado por un conjunto difuso, en el cálculo se determina que este valor cae dentro del rango del conjunto difuso EPM (Error positivo medio), debido a que este conjunto difuso abarca el valor de 60 °C al estar en el rango de (20 -100), como se ve en la Figura 3.11:

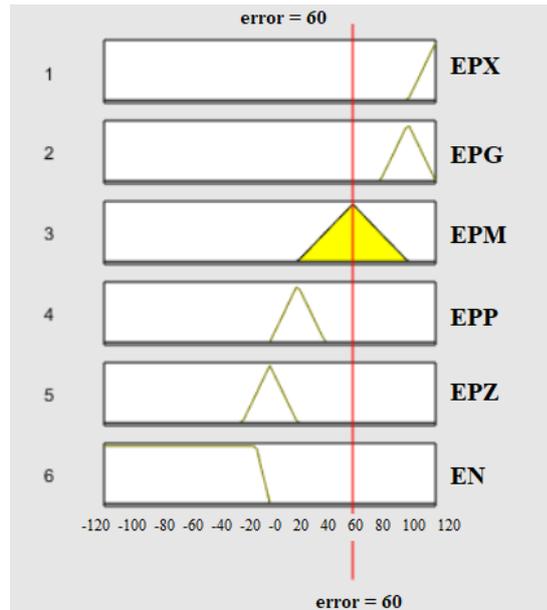


Fig.3. 11: Fusificación de la entrada del controlador.

Elaborado por: Investigador

Entonces de esta manera el error de temperatura (valor nítido) es convertido a un valor difuso y se lo toma como un conjunto singletón cuya función de pertenencia es $\mu_{EPM}(60)$ como se muestra en la tabla 3.12:

Tabla 3. 12. Conversión de un valor nítido a valor difuso

Valor nítido	Valor difuso
60	$\mu_{EPM}(60)$

Elaborado por: Investigador

Cabe señalar que puede generarse más de un valor difusificado cuando el valor nítido (error de temperatura) cae dentro de un rango en el que están más de un conjunto difuso.

Este procedimiento de fusificación se realiza para los valores del error de temperatura que ingresen al controlador difuso para llevarlos al siguiente paso que es la inferencia de reglas difusas.

b) Inferencia de reglas difusas

La inferencia difusa es un algoritmo de razonamiento que utiliza el ordenador para la toma de decisiones y acción del controlador frente a los errores de temperatura que ingresan. Este se basa en una base de conocimientos y reglas de control que se

crearon de acuerdo a las variables lingüísticas asignadas. La inferencia se basa en la siguiente ecuación creada por Mandami:

$$\mu_{B'i}(z) = \mu_{Ei}(x_0) \wedge \mu_{Bi}(y) \quad (3.10)$$

Donde:

- $\mu_{Ai}(x_0)$ representa el valor fusificado del error de temperatura
- $\mu_{Bi}(y_0)$ representa valores difusos de la potencia eléctrica de salida.

Esta ecuación se realiza la operación difusa MIN entre los valores difusos $\mu_{Ai}(x_0)$ y $\mu_{Bi}(y_0)$, obteniendo un subconjunto de salida que es el valor inferencia para cada regla.

A continuación, se presentan las fórmulas de inferencia utilizadas para cada regla, las cuales pueden ser programadas en cualquier lenguaje de programación tales como Python o Matlab gracias a las librerías de lógica difusa disponibles.

- **regla 1:** $u_{B'1}(y) = u_{EN}(x_0) \wedge u_{PZ}(y)$
- **regla 2:** $u_{B'2}(y) = u_{EZ}(x_0) \wedge u_{PZ}(y)$
- **regla 3:** $u_{B'3}(y) = u_{EPP}(x_0) \wedge u_{PP}(y)$
- **regla 4:** $u_{B'4}(y) = u_{EPM}(x_0) \wedge u_{PM}(y)$
- **regla 5:** $u_{B'5}(y) = u_{EPG}(x_0) \wedge u_{PG}(y)$
- **regla 6:** $u_{B'6}(y) = u_{EPX}(x_0) \wedge u_{PX}(y)$

Por ejemplo:

Si el error de temperatura es de 30°C, estese convierte en un valor difuso dado por la función $\mu_{EPM}(30)$. Entonces para la inferencia de reglase realiza la operación MIN entre $\mu_{EPM}(30)$ y $u_{Potencia}(y)$ de acuerdo al conjunto de reglas establecidas y generar un nuevo subconjunto $u_{B'}(y)$:

- **regla 1:** $u_{P'1}(y) = u_{EN}(30) \wedge u_{PZ}(y)$
- **regla 2:** $u_{P'2}(y) = u_{EZ}(30) \wedge u_{PZ}(y)$
- **regla 3:** $u_{P'3}(y) = u_{EPP}(30) \wedge u_{PP}(y)$
- **regla 4:** $u_{P'4}(y) = u_{EPM}(30) \wedge u_{PM}(y)$
- **regla 5:** $u_{P'5}(y) = u_{EPG}(30) \wedge u_{PG}(y)$

- **regla 6:** $u_{p'_6}(y) = u_{EPX}(30) \wedge u_{PX}(y)$

La operación MIN hace que la función $u_{Potencia}(y)$ sea cortada por el valor $\mu_{EPM}(60)$ generando un nuevo subconjunto difuso como se ve en la figura 3.12:

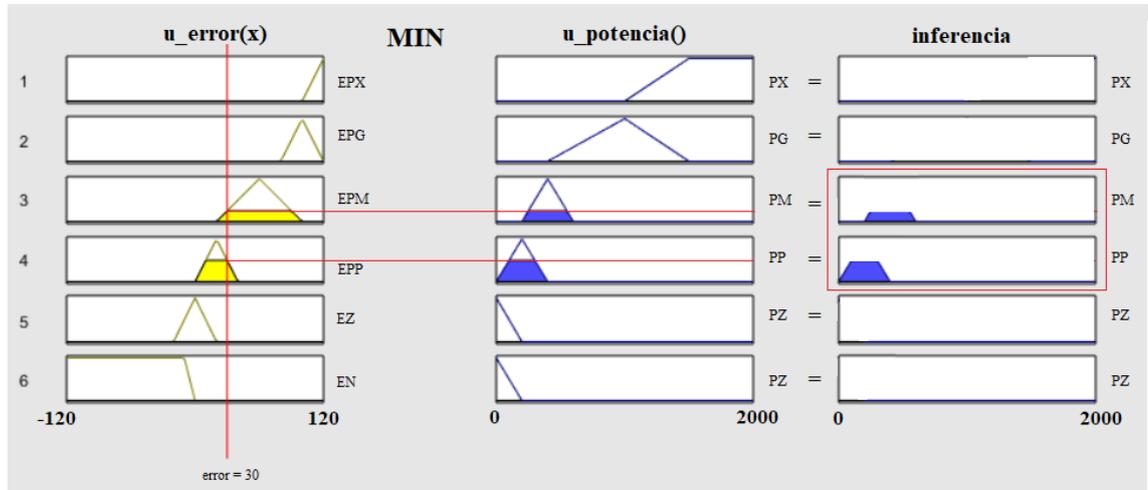


Fig.3. 12: Inferencia de reglas difusas
Elaborado por: Investigador

De esta manera se obtiene la inferencia de reglas para cada valor de error de temperatura ingresado al controlador difuso.

c) Conclusión de inferencia de reglas difusas

Para el obtener el conjunto total o conclusión de las reglas difusas se realiza la operación MAX de todos los subconjuntos encontrados al procesar las reglas de control. Matemáticamente se define en la siguiente ecuación:

$$u_{B'_t}(y) = u_{B'_1}(y) \wedge u_{B'_2}(y) \wedge u_{B'_3}(y) \wedge u_{B'_4}(y) \wedge u_{B'_5}(y) \quad (3.11)$$

En la operación MAX los conjuntos de las funciones de pertenencia cortadas se unen, formando un conjunto difuso denominado conclusión de la inferencia.

Del ejemplo anterior, ahora por medio del operador MAX se unen los subconjuntos generados, quedando de la siguiente manera:

$$u_{POTENCIA}(y) = u_{P'_1}(y) \cup u_{P'_2}(y) \cup u_{P'_3}(y) \cup u_{P'_4}(y) \cup u_{P'_5}(y)$$

Y gráficamente se muestra en la figura 3.13:

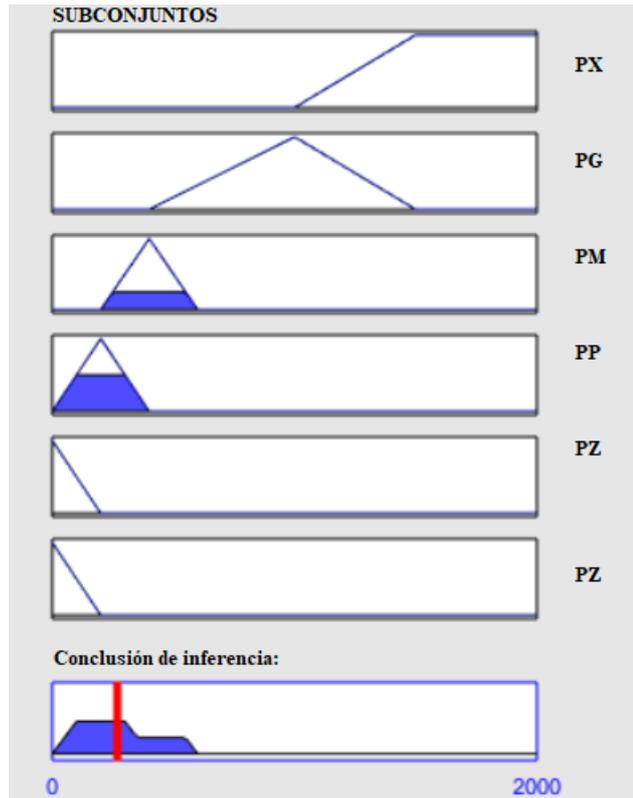


Fig.3. 13: Conclusión de inferencia de reglas.
Elaborado por: Investigador

d) Defusificación

Se aplica a la ecuación del método del centroide con cual se convierte al conjunto difuso concluido en un valor nítido es decir en un valor apropiado para la acción de control de la planta del sistema. El método de defusificación más usado en el diseño de controladores es el método del centroide descrito en la ecuación siguiente:

$$z_0 = \frac{\sum \mu(x)_i w_i}{\sum \mu(x)_i} \quad (3.12)$$

Donde:

z_0 = es el valor nítido real para la acción de control
 $\mu(x)_i$ = es el valor de la función de pertenencia del conjunto
 w_i = es el número de elementos del universo del discurso

Por ejemplo, en la figura 3.14 se tiene al conjunto de la conclusión de inferencia y cuando se aplica el método del centroide, este se corta en un punto específico de tal manera que obtiene un valor único, siendo el resultado final para la salida del controlador. En este caso se obtiene un valor nítido de 269.

Pues, dada la ecuación y reemplazando los valores de la función de membresía se obtiene tiene:

$$z_0 = \frac{\sum u_{POTENCIA}(y) * 2000}{\sum u_{POTENCIA}(y)}$$

$$z_0 = 269$$

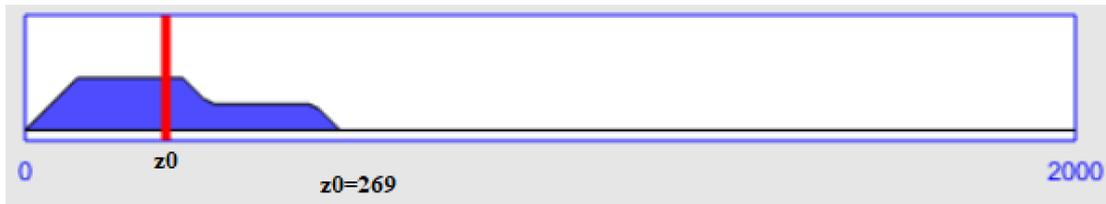


Fig.3. 14: Defusificación por el método del centroide.
Elaborado por: Investigador

Donde z0 es la acción de control que modifica el valor de la potencia eléctrica de la planta.

3.5.8 Resultado del diseño del controlador difuso

En la figura 3.15 se observa la curva de control generada donde se grafican todos los puntos de temperatura versus potencia.

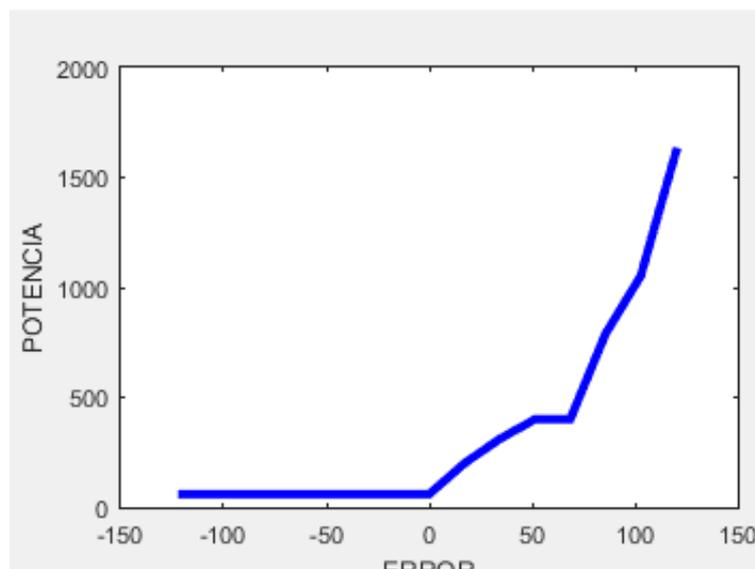


Fig.3. 15: Curva de control
Elaborado por: investigador

La curva de control describe un crecimiento de la potencia eléctrica de la siguiente manera: a mayor error positivo de temperatura, mayor es la potencia, y a mayor error negativo menor es la potencia eléctrica. La potencia eléctrica es nula cuando el error es nulo.

En la figura 3.16 se tiene un diagrama muy de tallado del controlador difuso con su entradas y salidas, donde se encuentran las ecuaciones utilizadas en cada proceso del controlador: fusificación, inferencia, y defusificación. Además, en la figura 3.17 se puede observar la base de conocimientos que guarda la información de las variables lingüísticas con sus respectivas funciones.

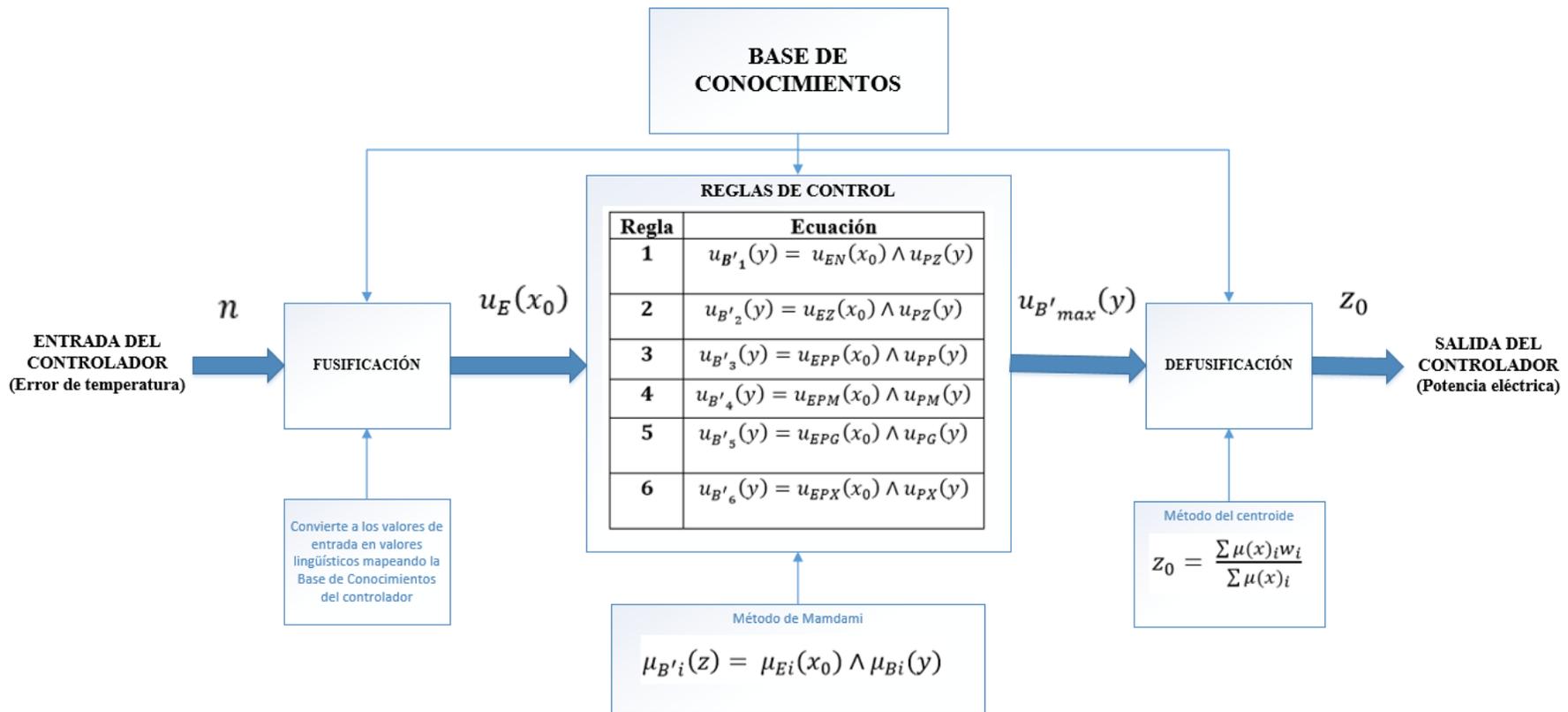


Fig.3. 16: Diagrama de bloques del controlador difuso con sus ecuaciones y funciones.
Elaborado por: Investigador

BASE DE CONOCIMIENTOS

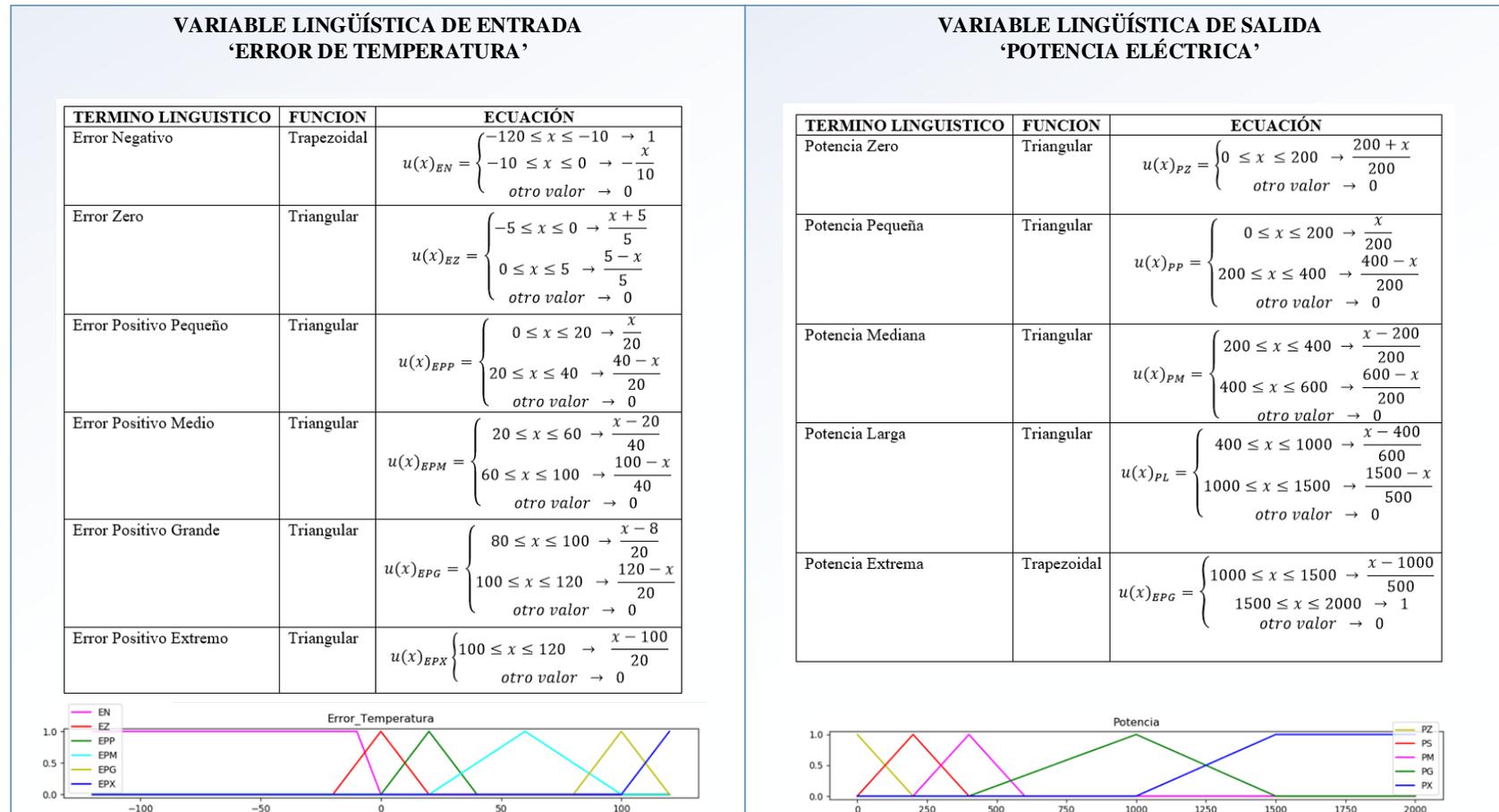


Fig.3. 17: Base de conocimientos de controlador difuso
Elaborado por: Investigador

3.6 Simulación

3.6.1 Software de simulación

Se realiza una tabla comparativa para seleccionar el software para la simulación del sistema de control, a continuación, en la tabla 3.13 se detallan las características de los programas más usados:

Tabla 3. 13. Comparación de software para la simulación de un sistema de control.

	Matlab	Labview	Octave	Python
Lenguaje de programación	Lenguaje m	Lenguaje grafico en bloques	Lenguaje m	Lenguaje python
Herramienta de lógica difusa	Fuzzy Logic designer	Fuzzy Logic	Librerías sin interfaz gráfica	Librerías sin interfaz gráfica
Herramienta de simulación	Aplicación Simulink	Poderoso Entorno grafico	No tiene, se tiene que desarrollar	No tiene, se tiene que desarrollar
Software libre	no	no	si	si

Elaborado por: Investigador

De acuerdo a la tabla se considera el uso del software Matlab debido a su herramienta para simulación para sistemas de control: Simulink, en donde se puede simular sistemas de control por medio de bloques. Además, se puede integrar la herramienta *fuzzy logic designer* y determinar fácilmente la respuesta del sistema.

No se considera a Labview por su complejidad en la programación de la simulación, aunque posee unas excelentes herramientas gráficas. Tampoco Octave y Python, pese a ser softwares libres, no poseen interfaz gráfica de simulación salvo que se podría programarlas sin embargo aquello no es el foco de la investigación.

3.6.2 Diagrama de bloques para simulación

Para la simulación del sistema de control se hace de uso de la herramienta Simulink. Primero se programa un bloque para el control difuso en FuzzyLogicDesigner y luego se programa un bloque que simule a la planta ingresando la función de transferencia

determinada en la sección anterior. Luego se añaden los bloques de escalón y un comparador, todos estos en un sistema de lazo cerrado tal como se observa en la figura 3.18, y finalmente se evalúa la respuesta del sistema.

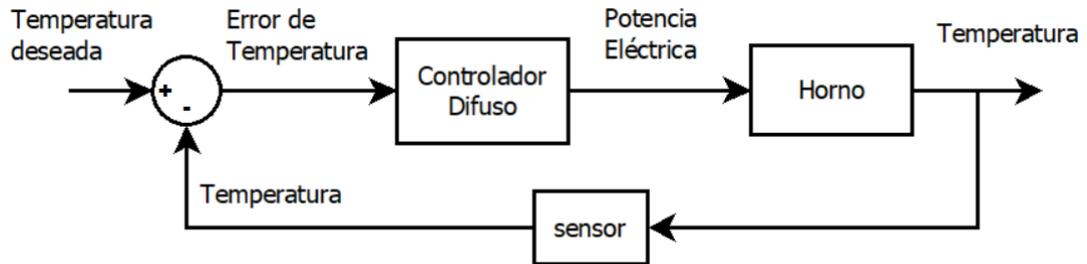


Fig.3. 18: Sistema de control de lazo cerrado
Elaborado por: Investigador

3.6.3 Controlador difuso en fuzzyLogicDesigner

Para la simulación del bloque del controlador, se hace uso aplicación FuzzyLogicDesigner de Matlab para poder programarlo, el cual es importado hasta Simulink como bloque de control para que genere una acción de control a la planta del sistema. En la figura 3.19 se observa el controlador creado en Matlab con la interfaz de fuzzyLogicDesigner.

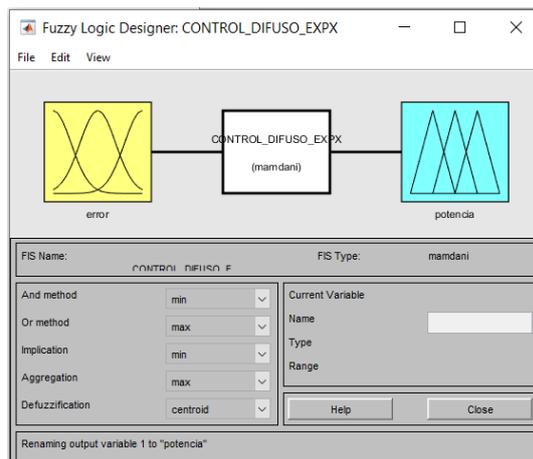


Fig.3. 19: Controlador difuso diseñado en FuzzyLogicDesigner Matlab
Elaborado por: Investigador

La figura 3.20 muestra un diagrama de simulación que está compuesto principalmente por un set point (función escalón), un restador, un controlador difuso y la función de transferencia del horno, integrados en un control de lazo cerrado.

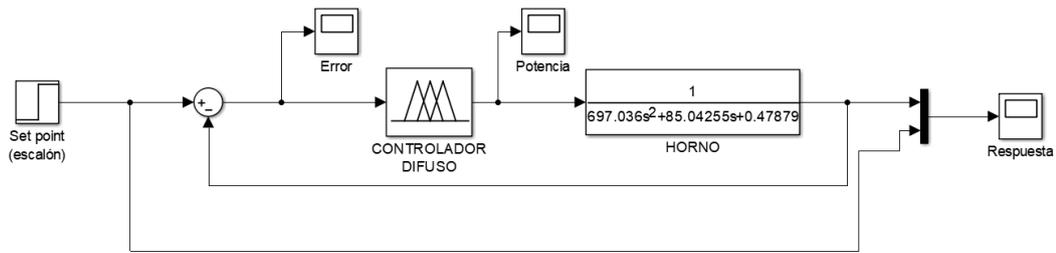


Fig.3. 20: Controlador difuso diseñado en FuzzyLogicDesigner Matlab
Elaborado por: Investigador

El setpoint es una función escalón a la cual se le asigna un valor deseado, luego se tiene la señal de error de temperatura que es la diferencia entre el set point y la salida realimentada del horno que es la temperatura medida, estos están interconectados en un restador. La señal de error ingresa al controlador difuso y es procesada mediante el algoritmo difuso para obtener una señal de salida conocida como acción de control que es conectada directamente al horno representado por función de transferencia determinada en la sección anterior. Finalmente, por medio de un bloque visualizador se obtiene la respuesta del sistema al escalón.

3.6.4 Respuesta del sistema

A continuación se obtiene la respuesta del sistema al escalón a un valor de 60 °C, generando un tiempo de establecimiento de 30 segundos como se observa en la figura 3.21, tiempo en el que el sistema se estabiliza con el valor deseado.

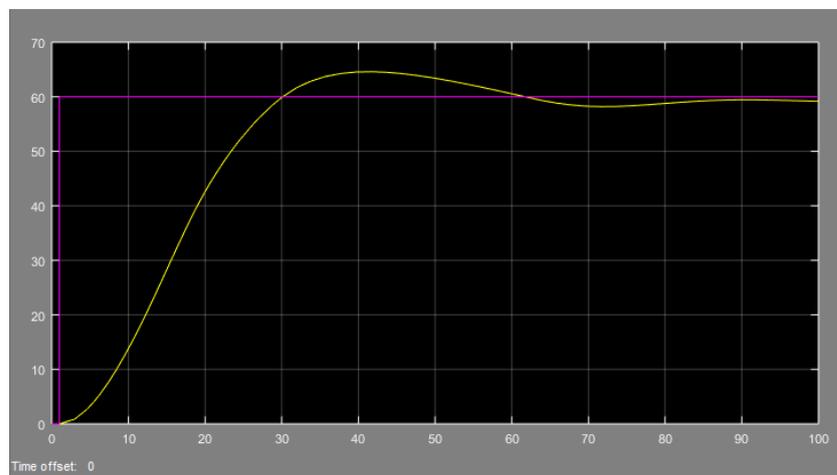


Fig.3. 21: Respuesta del sistema al escalón
Elaborado por: Investigador

Esta gráfica es importante porque muestra el tiempo en que las suelas son calentadas a la temperatura requerida que generalmente es 60 °C, mientras más rápido son calentadas, se optimiza el tiempo en el ensuelado de calzado. En la sección de

resultados, estos datos son interpretados y comparados con el sistema actual de calentamiento de suelas, es decir con el horno de control manual.

3.7 Implementación

3.7.1 Selección de equipos

Dispositivo controlador

El dispositivo de control es aquel donde se programa el controlador difuso y sirve como estación maestra, la cual soporta el HMI (interfaz humano máquina) y donde además se gestiona y procesan los datos adquiridos del sensor de temperatura y actuador. A continuación, en la tabla 3.14 se realiza una comparación de tres tarjetas de desarrollo embebido industriales.

Tabla 3. 14. Especificaciones técnicas de tarjetas embebidas

Parámetro	Raspberry Pi CM3	Odroid xu4	Siemens Iot 2040
Voltaje	5 VDC - 2.5 A	5VDC - 4 A	9-36 VDC
Entradas/salidas digitales	48 GPIO	30 GPIO	Extendible
Entradas/salidas Analógicas	4 salidas PWM	2 entradas/ 1 salida PWM	Extendible
Procesador	Broadcom BCM2837 64bits 1.2Ghz	Samsung Exynos5422- 4xCortex1.4GHz	Intel Quark X10201.2 Ghz
Memoria RAM	1GB	2 GB	1 GB
Almacenamiento	4GB EMMC	64GB Microsd-EMMCC	8-32GB microSD
Software	Linux - Python	Linux-Java	Linux –Node red
Puertos	HDMI USB UART	ETHERNET USB --	ETHERNET USB UART
Precio	\$ 240	\$150	\$ 585

Elaborado por: Investigador

De acuerdo a la tabla 3.12, el costo de la tarjeta de desarrollo Iot2040 es alto y no posee pines GPIO sin embargo presenta una estructura muy robusta, mientras que la tarjeta ODROID XU4 tiene las mejores características con respecto a Raspberry Pi Cm3 e IOT2040, pero no posee una fuente de recursos de ayuda en la web para resolver problemas como raspberry pi cm3.

Se selecciona la tarjeta de desarrollo raspberry pi CM3 debido a la disponibilidad de librerías que existe en Python para control difuso. El sistema operativo se basa en Debian y los pines y puertos pueden ser programados en el lenguaje de programación Python que es un lenguaje de alto nivel y muy fácil de aprenderlo siendo además un excelente aporte para la investigación e ingeniería. En la figura 3.22 se tiene una ilustración de raspberry pi cm3.



Fig.3. 22: Tarjeta de desarrollo raspberry pi CM3. [35]

Dispositivo transmisor

a) Sensor de temperatura

Debido a la transferencia de calor por radiación emitida por las lámparas IR es indispensable utilizar sensores infrarrojos para determinar la temperatura del material (que para el caso es la suela), porque estos no requieren contacto para medir la temperatura. A continuación, en la tabla 3.15 se realiza la comparación de dos sensores infrarrojos diseñados para ambientes industriales:

Tabla 3. 15. Especificaciones técnicas de sensor IR industriales

Parámetro	DFROBOT TS-01	Raitek CMLTV3
Voltaje de operación	5-24 VDC	24 VDC
Corriente de operación	20 mA	20mA
Temperatura de medición	-70°C a 380 °C	-20°C a 500 °C
Distancia max de sensado	120 cm	100 cm
Temperatura de trabajo	-40°C a 85 °C	-20°C - 70 °C
Señal de salida	0-3 V	0-5 V
Precisión	+/-0.5%	+/-1.5%
Interfaz digital	-	RS232
Precio	\$120	\$350

Elaborado por: Investigador

Ambos sensores IR de temperatura muestran características técnicas adecuadas para medir los datos de temperatura del horno, pues se requiere una temperatura medida máxima de 120 grados, y estos sensores superan en gran manera este requerimiento. Sin embargo, el costo del sensor Dfrobot ts-01 es más bajo que el sensor Raitek cmltv3 y más aun con especificaciones técnicas similares, por lo tanto, se selecciona a dfrobot TS-01 para la implementación, a pesar de que Raitek cmltv3 ofrece que los datos están acondicionados una interfaz de comunicación RS232, pero esto se puede resolver adicionando al sensor dfrobot ts-01 una tarjeta arduino nano con un modulo rs485 para la interfaz de comunicación. En la figura 3.23 se ilustra el sensor de temperatura.



Fig.3. 23: Sensor de temperatura por infrarrojo.[36]

b) Microcontrolador

Para la adquisición de los datos de temperatura medidos por el sensor, se requiere de un acondicionamiento de señal para que se convierta la señal analógica en señal digital y pueda ser enviada hacia la raspberry pi cm3. En la tabla 3.16 se tienen las características técnicas más importantes de tres microcontroladores arduino comparados.

Tabla 3. 16. Especificaciones técnicas de microcontroladores

Especificaciones\Modulo	Arduino Uno	Arduino nano	Arduino micro
Voltaje de entrada	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Voltaje de salida	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Entradas/Salidas digitales	14/14 5VDC	14/14 5VDC	20/20 5VDC
Frecuencia de salida	16 MHz	16 MHz	16 MHz
Entradas/salidas Analógicas	6	8	12
Procesador	ATmega 168 o 328	ATmega 168 o 328	ATmega 32U4
Dimensiones	8 cm x 5.5 cm	4.5 cm x 1.8 cm	4.8 cm x 1.7 cm
USB	No	Si	NO
Precio	\$ 12	\$6	\$9

Elaborado por: Investigador

La placa de arduino uno es grande en relación a arduino nano y micro aunque todos los microcontroladores poseen entradas y salidas digitales necesarias para el

proyecto. Por lo tanto, se seleccionó al arduino nano debido a su reducido tamaño y bajo costo. En la figura 3.24 se ilustra un arduino nano.

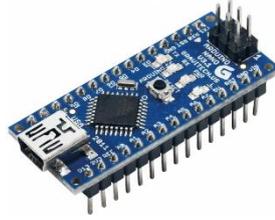


Fig.3. 24: Microcontrolador Arduino Nano. [37]

Dispositivo actuador

El actuador es un convertor de potencia que se requiere para poder cambiar la señal digital a una señal de alta potencia que permita regular la entrada de voltaje en la resistencia del calefactor infrarrojo del horno. A continuación, en la tabla 3.17 se observan las especificaciones de dos dispositivos convertidores de potencia, también llamados dimmer activados por PWM.

Tabla 3. 17. Especificaciones técnicas de dimmer PWM.

Parámetro	Leading EDGE Dimmer	RobotDyn Dimmer
Señal PWM	3.3-5V	3.3-5V
Frecuencia máxima	10 KHz	50 Hz
Voltaje de alimentación	5 V 100 mA	5 V 100 mA
Rango de Voltaje AC de entrada	100-240 VAC	110-240 VAC
Frecuencia AC	50-60 Hz	50-60 Hz
Corriente para carga resistiva	16 A	5 A
Costo	\$ 90	\$40

Elaborado por: Investigador

Se selecciona el dispositivo Leading EDGE Dimmer por su alta capacidad de carga resistiva de 16 Amperios, este dispositivo puede recibir una señal PWM de 3.3 o 5 V

de un microcontrolador para regular o convertir la potencia de hasta 240 VAC y es muy compatible con las lámparas IR pues cumple con el requerimiento del voltaje máximo de entrada. En la figura 3.25 se ilustra el conversor de potencia:

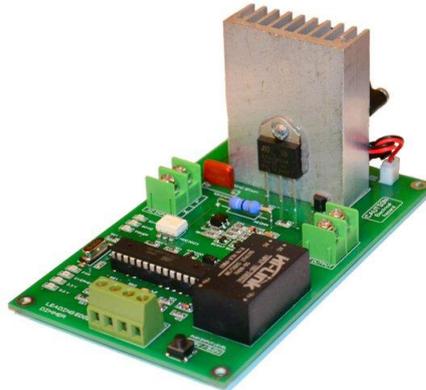


Fig.3. 25: Conversor de Potencia con entrada PWM. [38]

Dispositivo HMI

Para ingresar y visualizar datos del setpoint y temperatura del control, es necesario realizar la correcta selección del dispositivo HMI que se adapte a la necesidad del operador y el sistema en los criterios de tamaño y estabilidad. En la tabla 3.18, se puede observar tres pantallas HMI con distintas características.

Tabla 3. 18. Especificaciones de pantallas HMI.

Parámetros	Pantalla Nextion HMI Serial	Pantalla RPi HMI SPI	Pantalla RPi HMI HDMI
Modelo	NX4024T032	XPT2046	HDMI LCDv2
Voltaje de consumo	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Corriente de consumo	85 mA	50 mA	50 mA
Resolución de pantalla	400x240 TFT	480 × 320 TFT	800 × 480
Tamaño	3.2 inc	3.5 inc	5 inc
Interfaz de comunicación	Serial	SPI	HDMI
Memoria	4 MB Flash	--	--

	2Kbytes RAM		
Precio	\$ 43.68	\$ 26	\$ 60

Elaborado por: Investigador

Se selecciona a la Pantalla Nextion del modelo NX4024T032, pues al tener una interfaz de comunicación serial se puede integrar fácilmente a la comunicación del sistema con raspberry pi CM3. Además, esta pantalla ofrece un software de diseño personalizado de HMI's lo que facilita en gran manera la implementación de la interfaz hombre-máquina. en la figura 3.26 se ilustra la pantalla seleccionada.



Fig.3. 26:Pantalla HMI modelo NX4024T032. [39]

3.7.2 Diseño general del sistema

En la Figura 3.27 se observa un esquema de diseño general del sistema en donde se requieren básicamente un dispositivo HMI para ingresar y visualizar datos del sistema, un dispositivo de control en donde se programa el controlador con lógica difusa y procesan los datos, un dispositivo de adquisición de datos de temperatura, un dispositivo actuador para la conversión de la acción de control PWM en potencia y planta (en este caso es el horno eléctrico) cuyo proceso es regulado por el sistema de control.

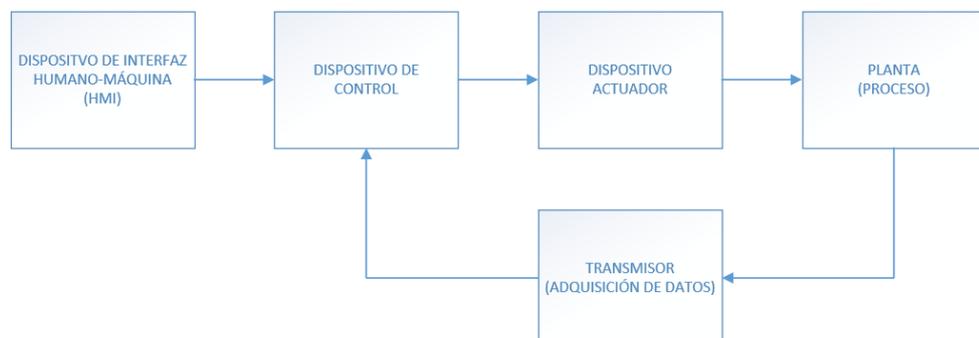


Fig.3. 27: Esquema general del diseño del sistema
Elaborado por: Investigador

El sistema consta de los siguientes dispositivos:

- Dispositivo controlador

- Dispositivo Transmisor
- Dispositivo Actuador
- Dispositivo HMI

3.7.3 Programación de Controlador Difuso en Python

Para programar el controlador que se diseñó previamente en la sección 4.4 se utiliza el lenguaje de programación python, el cual viene instalado por defecto en el sistema operativo Raspbian que es una distribución de Linux exclusivamente para el ordenador raspberry Pi y todas sus versiones incluido su versión industrial raspberry pi CM3 que es el ordenador que se usa en la investigación. A continuación, se detalla y describe la programación del controlador en las siguientes líneas de código.

a) Instalación de Librerías

Desde la consola del sistema se instalan y actualizan las librerías para cálculos matemáticos y graficas de funciones.

```
sudo apt-get update
sudo apt-get install python3-numpy
sudo apt-get install python3-scipy
sudo apt-get install python3-matplotlib
```

También se instalan las librerías de diseño de de lógica difusa:

```
sudo apt-get install git
sudo git clone https://github.com/scikit-fuzzy/scikit-fuzzy.git
cd scikit-fuzzy
sudo python setup.py install
```

b) Creación de script

Se importan al script las librerías descritas en la tabla 3.19, estas son necesarias para el desarrollo del programa.

Tabla 3. 19. Código de programación.

Código	Descripción
<i>import numpy as np</i>	Es un librería con funciones matemáticas
<i>import skfuzzy as fuzz</i>	Es un librería con funciones de lógica difusa
<i>import matplotlib.pyplot as plt</i>	Es una librería con funciones para graficar funciones matemáticas

Elaborado por: Investigador

Se crea una clase con el nombre “horno” y en su interior un método con el nombre “controlador” el cual tendrá un argumento para recibir a la señal de error como entrada del controlador. Esta clase es importante para poder instanciar objetos junto a otras clases en otros módulos y optimizar el código:

Tabla 3. 20. Código de programación.

Código	Descripción
<i>class horno():</i>	Dentro de esta clase se crearan todos los atributos y métodos para el controlador
<i>def controlador(self, variable_error):</i>	Es un método que contiene un argumento para la señal de error en la entrada
<i>self.error = variable_error</i>	Atributo error que lee el argumento de entrada

Elaborado por: Investigador

Se crean variables para representar al Universo del discurso, para el error de temperatura y para la potencia eléctrica, como en la tabla 3.21:

Tabla 3. 21. Código de programación

Código	Descripción
<i>x_error_temp = np.arange(-120, 121, 1)</i>	Crea una abscisa para las funciones con un rango desde -120 hasta 120
<i>x_potencia = np.arange(0, 101, 1)</i>	Crea una abscisa para las funciones con un rango desde 0 a 1000

Elaborado por: Investigador

Se generar las funciones de membresía de las variables lingüísticas:

Tabla 3. 22. Código de programación

Código	Descripción
<i>EN = fuzz.trapmf(x_error_temp, [-60, -60, -10, -0])</i>	Funciones de membresía para la variable de error de temperatura
<i>EZ = fuzz.trimf(x_error_temp, [-20, 0, 5])</i>	
<i>EPP = fuzz.trimf(x_error_temp, [0, 5, 10])</i>	
<i>EPM = fuzz.trimf(x_error_temp, [5, 10, 15])</i>	
<i>EPG = fuzz.trimf(x_error_temp, [10, 40, 60])</i>	
<i>EPX = fuzz.trimf(x_error_temp, [40, 100, 100])</i>	
<i>PZ = fuzz.trimf(x_potencia,[0, 0, 10])</i>	Funciones de membresía para la variable de la
<i>PS = fuzz.trimf(x_potencia,[0, 10, 20])</i>	

$PM = \text{fuzz.trimf}(x_{\text{potencia}}, [10, 20, 30])$	potencia eléctrica
$PG = \text{fuzz.trimf}(x_{\text{potencia}}, [20, 50, 75])$	
$PX = \text{fuzz.trapmf}(x_{\text{potencia}}, [50, 75, 100, 100])$	

Elaborado por: Investigador

A continuación, se realiza la inferencia difusa: por medio de la fusificación, reglas de control y defusificación.

- **Fusificación**

Se fuzifica la entrada de la señal error en los conjuntos difusos de la variable lingüística error:

Tabla 3. 23. Código de programación.

Código	Descripción
$EN_{\text{fuz}} = \text{fuzz.interp_membership}(x_{\text{error_temp}}, EN, \text{self.error})$	Al error de temperatura que ingresa al controlar se lo procesa dentro cada conjunto difuso para ser fusificado
$EZ_{\text{fuz}} = \text{fuzz.interp_membership}(x_{\text{error_temp}}, EZ, \text{self.error})$	
$EPP_{\text{fuz}} = \text{fuzz.interp_membership}(x_{\text{error_temp}}, EPP, \text{self.error})$	
$EPM_{\text{fuz}} = \text{fuzz.interp_membership}(x_{\text{error_temp}}, EPM, \text{self.error})$	
$EPG_{\text{fuz}} = \text{fuzz.interp_membership}(x_{\text{error_temp}}, EPG, \text{self.error})$	
$EPX_{\text{fuz}} = \text{fuzz.interp_membership}(x_{\text{error_temp}}, EPX, \text{self.error})$	

Elaborado por: Investigador

- **Reglas de control**

Se corta los conjuntos difusos en el conjunto B, por medio de las reglas de control establecida:

Tabla 3. 24. Código de programación.

Código	Descripción
$\text{rule}_1 = \text{np.fmin}(EN_{\text{fuz}}, PZ)$	Si error es EN entonces potencia es PZ
$\text{rule}_2 = \text{np.fmin}(EZ_{\text{fuz}}, PZ)$	Si error es EZ entonces potencia es PZ
$\text{rule}_3 = \text{np.fmin}(EPP_{\text{fuz}}, PS)$	Si error es EPP entonces potencia es PS
$\text{rule}_4 = \text{np.fmin}(EPM_{\text{fuz}}, PM)$	Si error es EPM entonces potencia es PM
$\text{rule}_5 = \text{np.fmin}(EPG_{\text{fuz}}, PG)$	Si error es EPG entonces potencia es PG
$\text{rule}_6 = \text{np.fmin}(EPX_{\text{fuz}}, PX)$	Si error es EPX entonces potencia es

	PX
--	----

Elaborado por: Investigador

- **Conjunto resultante**

Se obtiene el conjunto resultante también denominado conclusión, realizando la composición en la programación:

Tabla 3. 25. Código de programación.

Código	Descripción
<i>union = np.fmax(rule_1, np.fmax(rule_2, np.fmax(rule_3, np.fmax(rule_4, np.fmax(rule_5, rule_6))))))</i>	Se suman todos los conjuntos cortados en la reglas de control, a este conjunto se le denomina como la conclusión de la inferencia difusa

Elaborado por: Investigador

- **Defusificación**

Finalmente, por medio del método del centroide se programa la defusificación:

Tabla 3. 26. Código de programación.

Código	Descripción
<i>self.control_value = fuzz.defuzz(x_potencia, union, 'centroid') return self.control_value</i>	Para la defusificación se utiliza el método del centroide con el que obtiene a partir del conjunto concluido por la inferencia una valor nítido o certero listo para ser enviado al actuador

Elaborado por: Investigador

Para ver el script de forma detallada revisar el anexo 3.

3.7.4 Implementación de equipos

Para la implementación del sistema de control, el sistema se ha dividido en cuatro fases o etapas que se pueden observar en la figura 3.28. Cabe señalar que todos los materiales y costos se utilizados en la implementación se encuentran descritos en el anexo 12.

En esta sección se detallan los esquemas de conexiones, acondicionamiento y programación de los equipos según las siguientes fases:

- Fase de adquisición de datos
- Fase de conversión de potencia
- Fase de Interfaz humano-máquina
- Fase de control
- Fase de Planta

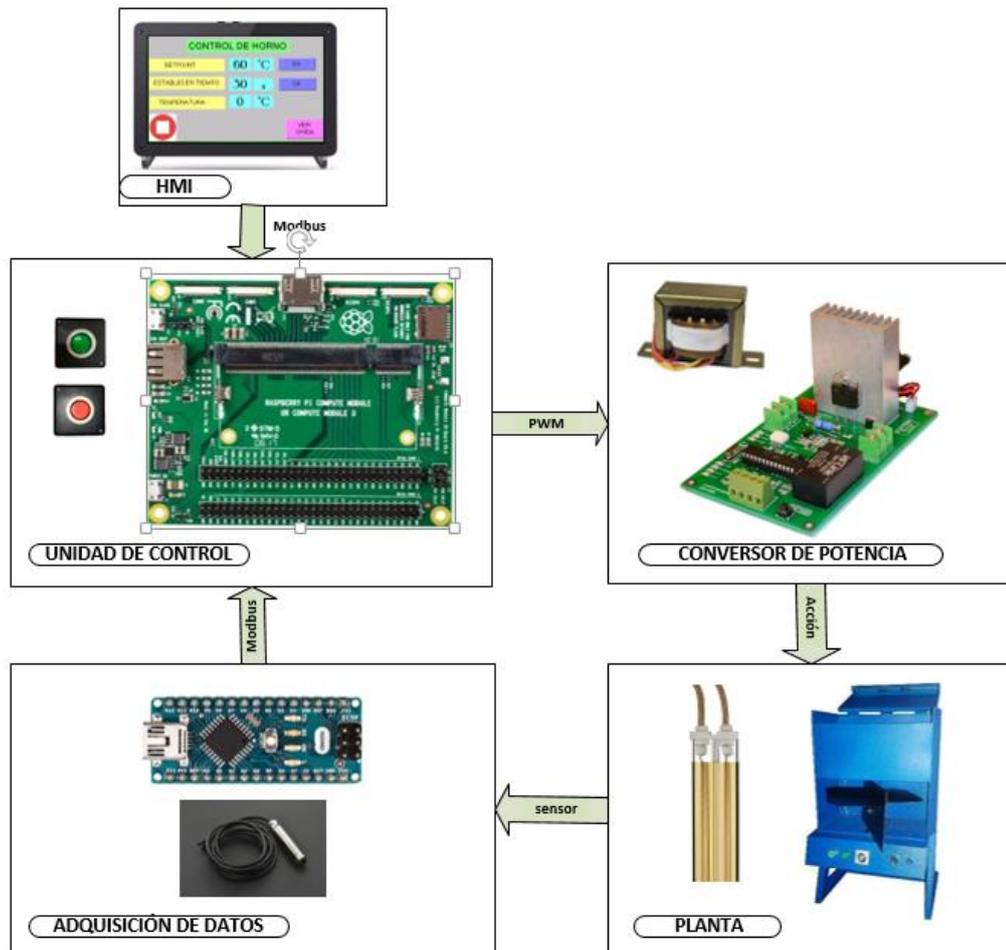


Fig.3. 28: Esquema en bloques de implementación del sistema de control
Elaborado por: Investigador

a) Fase de adquisición de datos

Sensor de temperatura

En esta sección de la implementación se hace uso de un sensor de temperatura infrarrojo para medir la temperatura del horno y enviar el valor medido hacia el controlador. El sensor utilizado es el Dfrobot TS-01 industrial, el cual permite determinar la temperatura de un objeto detectando la radiación infrarroja que este emite, luego lo convierte en una señal eléctrica analógica de entre 0 a 3 VDC. Esta señal medida debe ir directamente hacia el dispositivo controlador o raspberry pi

CM3, pero antes, esta debe ser procesada y convertida en una señal digital para lo cual se requiere de un microcontrolador, que para este caso se seleccionó el arduino nano.

El protocolo de comunicación utilizado es Modbus implementado sobre RS-485, y sirve para comunicar arduino y raspberry pi, para lo cual se utilizan los dispositivos max485. En la figura 3.29 se tiene el esquema de implementación entre el arduinonano y la raspberry pi CM3 y los dispositivos de comunicación max485.

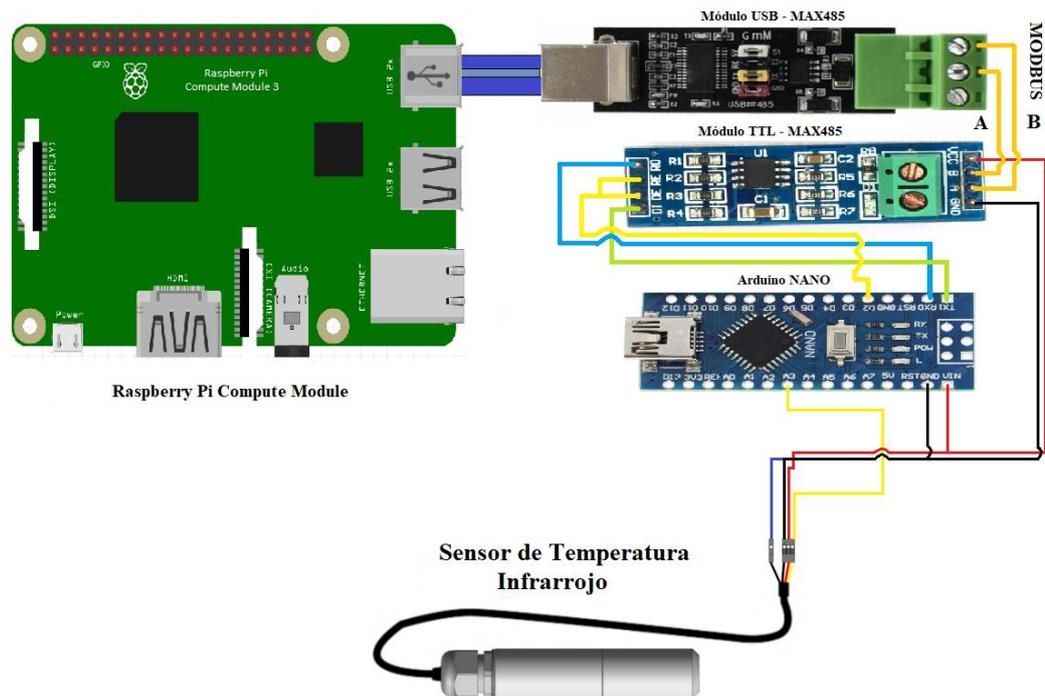


Fig.3. 29: Esquema de implementación de sensor de temperatura
Elaborado por: Investigador

Los códigos de programación de raspberry y de arduino se pueden observar en el Anexo 4 y Anexo 5 respectivamente.

b) Fase conversión de potencia

En la fase de conversión de potencia se utiliza el dispositivo actuador industrial Leading EDGE Dimmer que es un regulador de potencia AC de 220V por medio de una señal PWM de 3.3 VDC. Este básicamente se basa en un módulo de disparo que activa un TRIAC para modular el voltaje alterno, el cual esta sincronizado con un detector de cruce por cero que permite que una señal PWM intervenga en la conversión de potencia desde un microcontrolador.

En este caso la señal PWM es la acción de control generado por el controlador y su objetivo es regular la potencia resistiva de las lámparas infrarrojo que calientan horno. En la figura 3.30 se tiene un esquema de entradas y salidas de la conversión de potencia, donde se tiene a la señal PWM como entrada de control digital, la fuente de 220 VAC como entrada de potencia, y la salida AC como la salida de potencia controlada o convertida.

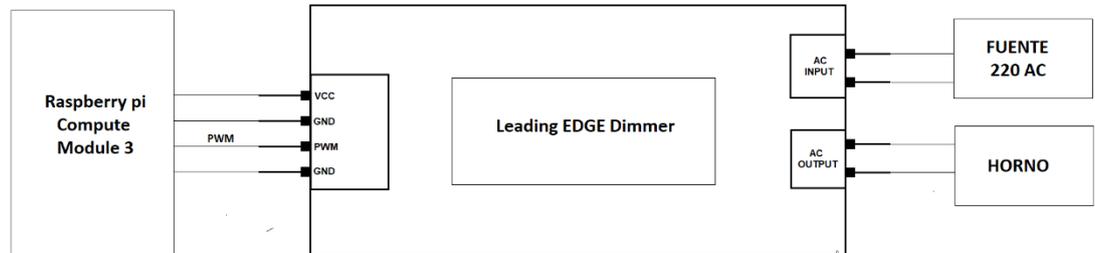


Fig.3. 30:Esquema de la fase de conversión de potencia.
Elaborado por: Investigador

De acuerdo a la programación realizada en el controlador en el ordenador raspberry pi industrial que se puede ver en Anexo 6, se conecta el pin GPIO 18 hacia la entrada que recibe el PWM del dispositivo dimmer, el pin 2 hacia la entrada VCC y el pin 4 hacia la entrada GROUND del dimmer. A los pines AC input se conectan la fuente de 220 VAC de dos fases y a los pines AC output se conectan los terminales de potencia del horno. En la figura 3.31 se observan las conexiones entre los dispositivos en esta fase. El diagrama de pines de raspberry pi CM3 se puede observar en el anexo 10.

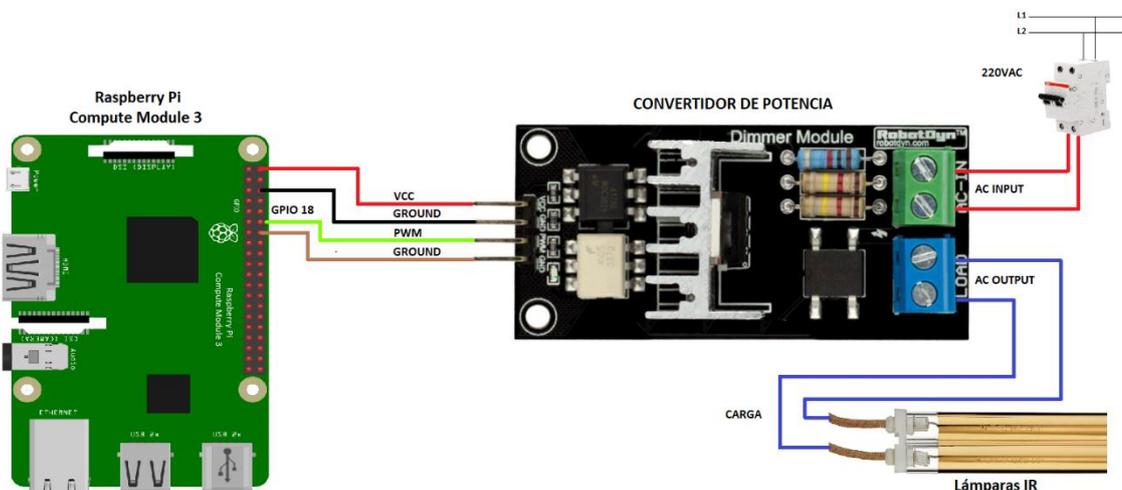


Fig.3. 31: Esquema de implementación de conversor de potencia
Elaborado por: investigador

Pantalla HMI

En la fase de implementación del HMI se utiliza la pantalla NEXTION modelo NX4024T032 de 3.2 pulgadas. En el Anexo 7 se puede observar la programación de la pantalla HMI en el software Nextion Editor, y en el Anexo 8 la programación en Python para la comunicación con el ordenador.

Cabe señalar que la comunicación entre el ordenador y la pantalla es serial por lo que se conectan los pines TX y RX a los pines RX y TX de la pantalla respectivamente como se observa en la figura 3.32.

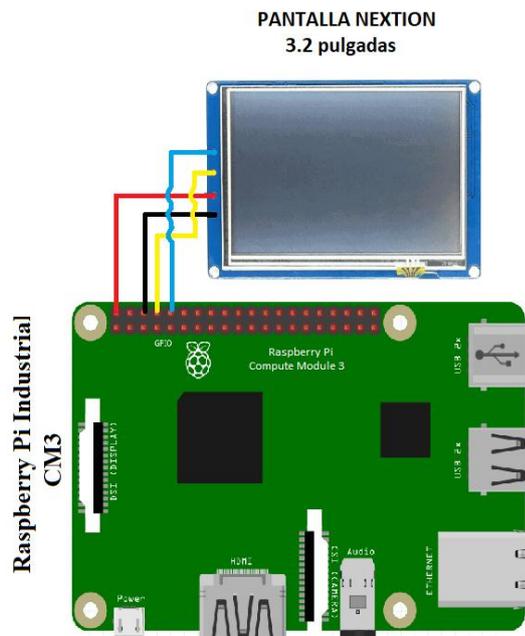


Fig.3. 32: Esquema de implementación de HMI
Elaborado por: Investigador

Pulsadores de Control

Los pulsadores de control son parte muy importante de la interfaz humano-máquina para poder controlar el proceso. El operador activa el proceso de calentamiento de suela con el pulsador de control de color verde cada vez que requiera calentar la suela. El pulsador rojo sirve como paro de emergencia para bloquear el proceso o apagar la maquina en caso de algún accidente. A continuación, en la figura 3.33 se puede observar el esquema de implementación donde las terminales del pulsador verde están conectadas en el pin GPIO 21 y el pin GROUND, y las terminales del pulsador rojo están conectadas en el pin GPIO 24 y el pin GROUND.

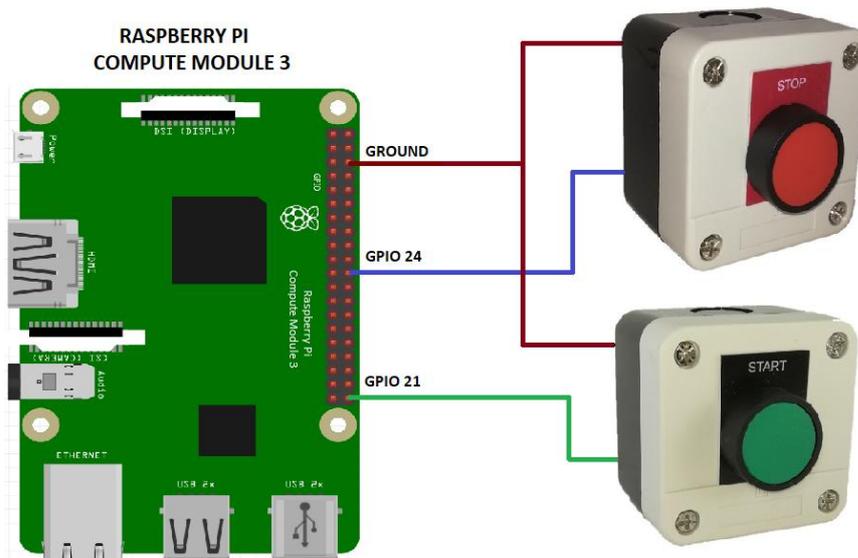


Fig.3. 33: Esquema de implementación de pulsadores de control
Elaborado por: Investigador

En el código de programación de los pulsadores se puede observar en la Anexo 9.

d) Unidad de control

En la unidad de control u estación central se tiene principalmente el ordenador embebido Raspberry Pi Compute Module 3, en donde interactúan los sensores y actuadores del sistema a manera de maestro y esclavo. La base elemental de esta unidad es el controlador difuso para el control automático de temperatura.

En ésta sección además se realiza la programación de los scripts para el control de los diferentes módulos con los que el ordenador interactúa. A continuación, en la figura 3.34 se tiene un diagrama de bloques que abarca el desarrollo de un algoritmo de control en el cual están integradas todas las librerías de programación creadas para el funcionamiento del sistema de control, como la librería de control difuso, la librería de PWM para conversión de potencia, la librería de adquisición de datos de temperatura y la librería de visualización de datos para la pantalla HMI.

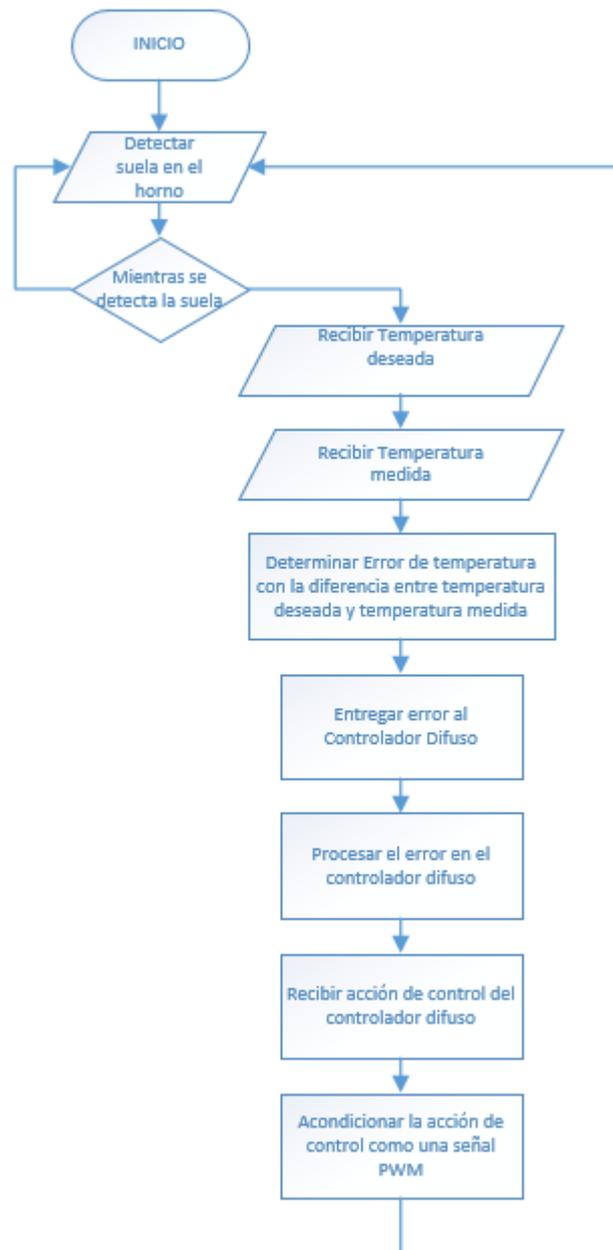


Fig.3. 34: Diagrama de bloques del algoritmo de control
Elaborado por: Investigador

Programación de ordenador raspberry Pi CM3

Raspberry Pi CM3 funciona en el sistema operativo Rasbian que es una distribución de Linux y su lenguaje programación se basa en el lenguaje de programación Python el cual viene instalado por defecto en el sistema operativo. Para ver la programación del dispositivo de forma detalla puede revisar los anexos 3, 4, 6 y 8.

Librerías utilizadas en el código de programa

Estas librerías son parte del paquete `horno_difuso0`, que se crea para contener la programación de tres clases que son ejes en el funcionamiento del controlador. A continuación, en la tabla 3.27, se describen las líneas de código para la importación de estas clases:

Tabla 3. 27. Librerías de controlador.

Código	Descripción	Anexo
<i>from controlador_difuso_P import horno</i>	Clase del controlador difuso: se encuentran todas las funciones y métodos del controlador difuso	Anexo 3
<i>from pwm import pwm1</i>	Clase del generador de PWM: se encuentra las funciones y métodos para poder generar desde el pin 18 una señal PWM para el dimmer conversor de potencia	Anexo 6
<i>from ardRxDato import sensor</i>	Clase del sensor de temperatura: se encuentran todas las funciones y métodos para realizar adquirir datos de temperatura del sensor IR	Anexo 4
<i>From pantalla import hmi</i>	Clase de la pantalla HMI: Esta clase posee todos los métodos para enviar y recibir datos desde la pantalla HMI al dispositivo de control	Anexo 8

Elaborado por: Investigador

Objetos instanciados en el código de programación

Además, se crean objetos para poder efectivizar las clases de las librerías, a continuación, en la tabla 3.28 se observa las líneas de código y su descripción:

Tabla 3. 28. Objetos usados en la programación del sistema

Código de instanciación	Descripción
<i>miControlador = horno()</i>	Objeto de la clase del controlador difuso
<i>miPwm = pwmI()</i>	Objeto de la clase de la señal PWM
<i>miTem = sensor()</i>	Objeto de la clase del sensor de temperatura
<i>miPantalla = hmi()</i>	Objeto de la clase de la pantalla HMI

Elaborado por: Investigador

Llamado de métodos

Se tienen varios métodos para el uso de las funciones de las clases. A continuación, en la tabla 3.29, estos métodos son detallados y descritos:

Tabla 3. 29. Métodos usados en la programación del sistema

Código	Descripción
<i>miPantalla.hmiRx()</i>	Método que lee un dato enviado desde la pantalla HMI, que para este caso es el setpoint
<i>miPantalla.hmiTx()</i>	Método que envía el dato de temperatura hacia la pantalla HMI para que sea visualizada por el operador
<i>miTemp.recibirDato()</i>	Método que recibe dato del sensor para poder obtener la señal de error por medio de la diferencia entre el setpoint y la temperatura
<i>miControlador.controldifuso(error)</i>	Método del controlador difuso el cual recibe a su entrada la señal de error
<i>miControlador.controlvalue</i>	Método del controlador difuso que genera una acción de control del en un rango de 0 a 100
<i>miPwm.actPwm(acción)</i>	Método para ingresar la acción de control y regular la potencia del horno

Elaborado por: Investigador

e) Fase de Planta

En la fase de planta se tiene el proceso térmico del horno, este básicamente funciona con las lámparas infrarrojas eléctricas alimentadas a 220 VAC que serán las que reciban la acción de control del controlador por medio del convertor de potencia. A continuación, en la figura 3.35, se observa el esquema de las conexiones eléctricas del horno.

Son tres lámparas que van en paralelo y están a una distancia de 30 centímetros con respecto a la base giratoria de suelas que recibirá la radiación de las lámparas. En la parte superior de la estructura del horno se encuentra una parrilla que también recibe la radiación de las lámparas y sirve para calentar el calzado durante la reactivación de las suelas.

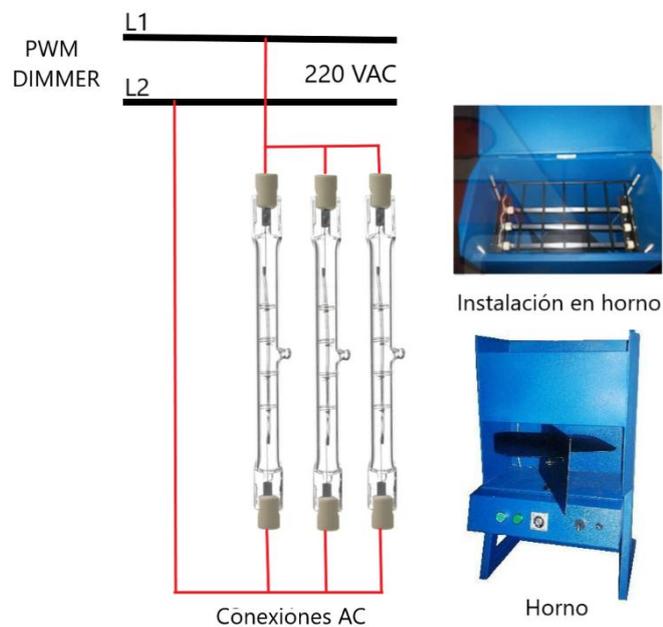


Fig.3. 35: Esquema de implementación en el proceso térmico de la planta
Elaborado por: Investigador

Finalmente, integrando todas las fases o etapas se tiene el siguiente esquema general del prototipo del sistema, ilustrado en la figura 3.36:

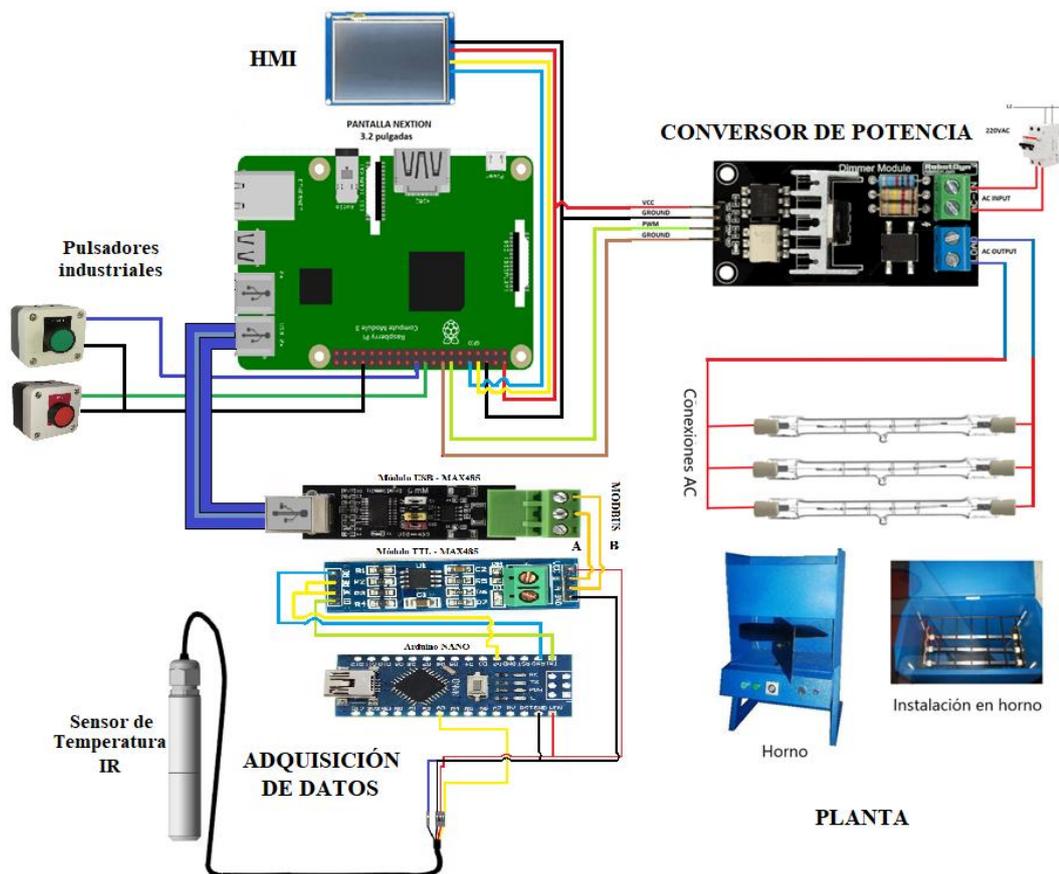


Fig.3. 36: Esquema general de implementación del sistema
Elaborado por: Investigador

3.7.5 Montaje de sistema

Se acondiciona y programa los equipos de acuerdo a los esquemas de implementación para luego proceder al montaje del sistema en donde se integran todas las fases de implementación.

En la figura 3.37 se visualiza el montaje del sistema de control que se implementó para el horno eléctrico reactivador de transferencia de calor por radiación. Se pueden observar los diferentes componentes electrónicos utilizados: el ordenador raspberry pi CM3 y el módulo rs485 a usb, el microcontrolador arduino nano y al módulo de comunicación max485, los cables terminales del sensor de temperatura, el hmi y los botones de activación y paro de emergencia y finalmente el convertidor PWM de potencia, todos dentro de una caja eléctrica aislada para protegerlos de fugas eléctricas.



Fig.3. 37: Montaje del sistema de control
Elaborado por: Investigador

En la figura se 3.38 se visualiza el sensor de temperatura infrarrojo implementado dentro de la base de la suela el cual se encuentra protegido de la radiación de calor de las lámparas.

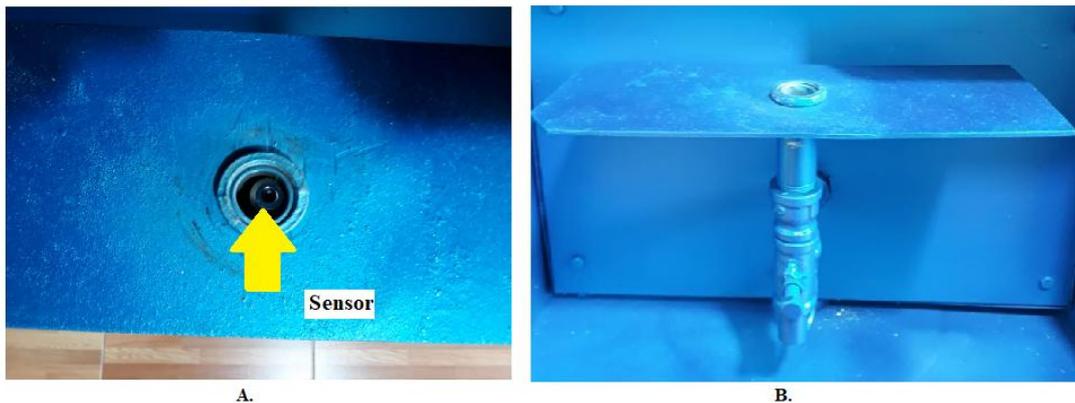


Fig.3. 38: Implementación del sensor de temperatura
Elaborado por: Investigador

En la figura 3.39 se tiene una imagen integral de sistema de control implementado en la planta, donde en la parte superior se logra visualizar la pantalla HMI y en la parte inferior el panel de control con botoneras. Así mismo en la figura 3.40 se logra visualizar las lámparas infrarrojo de calentamiento.



Fig.3. 39: Horno eléctrico integrado con un sistema de control
Elaborado por: Investigador



Fig.3. 40: Lámparas en parte superior del horno eléctrico
Elaborado por: Investigador

3.7.6 Funcionamiento del sistema

A continuación, se presenta una explicación del funcionamiento de la implementación y los resultados en las diferentes pruebas realizadas. Además, se puede observar de forma detalladamente el funcionamiento en un manual de usuario creado por el investigador en el anexo 12.

Programación de temperatura

Para probar el funcionamiento del sistema se hace uso de la interfaz implementada. Se tiene como interfaz una pantalla HMI y un panel de tres pulsadores de control como se ve en la figura 3.41. El sistema se enciende al activar el interruptor ON-OFF, luego se tiene un pulsador verde para activar el calentado automático de suelav un pulsador rojo para paro de emergencia.



Fig.3. 41: Encendido del sistema.
Elaborado por: Investigador

En la pantalla HMI que se observa en figura 3.42, se visualiza un recuadro donde se puede introducir la temperatura deseada y un botón de OK para enviar el dato al controlador. Además, se tiene un recuadro que visualiza la temperatura que mide el sensor y el número de suelas detectado por el sistema de control.



Fig.3. 42:Pantalla HMI implementada en el horno eléctrico
Elaborado por: Investigador

Una vez programado la temperatura se procede a ubicar la suela en la base giratoria del horno como se muestra en la figura 3.43, para introducir la suela a la cámara de calentamiento del horno y ejecutar el proceso. Para ejecutar el proceso se tiene en el panel de control un pulsador en configuración normalmente abierto que al ser pulsado envía una señal al controlador para arrancar el proceso de calentamiento.



Fig.3. 43: Suela a punto de ser ingresada a la cámara de calentamiento
Elaborado por: Investigador

En la figura 3.44se visualiza el proceso de reactivado de suela en ejecución, donde se pueden apreciar las lámparas halógenas de radiación infrarroja que están encendidas irradiando energía a la suela en el interior de la cámara de calentamiento del horno.



Fig.3. 44: Vista del proceso de calentado en ejecución
Elaborado por: Investigador

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se realizaron en las instalaciones del taller artesanal de calzado del Señor Julio Sailema en donde se realizó la implementación del sistema de control del horno eléctrico.

Se trabajó con tres modelos de suelas de PVC. Donde las suelas son reactivadas de manera eficiente, pues estas alcanzan la temperatura deseada para ser reactivadas. Sin embargo, el tiempo de reactivación para cada una es distinto como se ve en la tabla 3.30.

Tabla 3. 30. Requerimientos térmicos de suelas

Suela	Temperatura	Tiempo de calentado
Start	55 °C	40 segundos
Ely	60 °C	60 segundos
Marielita	50 °C	30 segundos

Elaborado por: Investigador

Cabe señalar que en [1], se realiza un estudio del reactivado de suelas para determinar las temperaturas adecuadas que estas deben alcanzar las suelas para ser reactivadas. Al final se concluye que una suela debe estar lista cuando alcanza las temperaturas que están dentro del rango de 55° a 60°C.

3.8 Interpretación de Resultados

3.8.1 Control de potencia por PWM y ángulo de disparo

A continuación, se determina la forma de onda de salida del dispositivo de control de potencia para los valores de señal PWM 0%, 25%, 50%, 75% y 100% generada desde el ordenador raspberry pi 3.

a) PWM = 0%



Fig.3. 45: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=0

$$\text{Escalando: } x = 1.40 * \frac{84.85}{12} = 9.89 \text{ V} \rightarrow \text{VoltajeRMS} = 9.89 \text{ V}$$

b) PWM = 25%



Fig.3. 46: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=25%

$$\text{Escalando: } x = 6.31 * \frac{84.85}{12} = 44.62 \text{ V} \rightarrow \text{VoltajeRMS} = 44.62 \text{ V}$$

c) PWM = 50%



Fig.3. 47: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=50%

$$\text{Escalando: } x = 8.57 * \frac{84.85}{12} = 60.59 \text{ V} \rightarrow \text{VoltajeRMS} = 60.59 \text{ V}$$

d) PWM = 75%



Fig.3. 48: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=75%

$$\text{Escalando: } x = 10.1 * \frac{84.85}{12} = 71.41 \text{ V} \rightarrow \text{VoltajeRMS} = 71.41 \text{ V}$$

f) PWM = 100%



Fig.3. 49: Forma de onda del dispositivo cuando PWM=100%

$$\text{Escalando: } x = 11.6 * \frac{84.85}{12} = 82.04 \text{ V} \quad \rightarrow \quad \text{Voltaje}_{RMS} = 82.04 \text{ V}$$

Interpretación:

Este dispositivo controla la potencia a partir de una señal PWM sincronizado con la red eléctrica excitando un triac mediante pulsos de ancho variable sincronizados por línea. Y de acuerdo a las formas de ondas determinadas por el osciloscopio, el valor RMS cuando el ciclo de trabajo del pwm es igual 100% llega al 96% del valor del voltaje rms de la onda completa, y cuando el pwm es 0% el valor rms llega al 11% del valor rms de la onda completa. En el anexo 14 se tiene un informe de tallado del análisis del dispositivo de control de potencia utilizado en el proyecto.

3.8.2 Análisis de respuesta del sistema

a) Respuesta del sistema con control difuso y PID en simulación

El sistema de control del horno fue simulado en dos controladores diferentes. Primero, fue simulado el controlador difuso diseñado, y luego en un control PID, generando las curvas de temperatura de la figura 3.45:

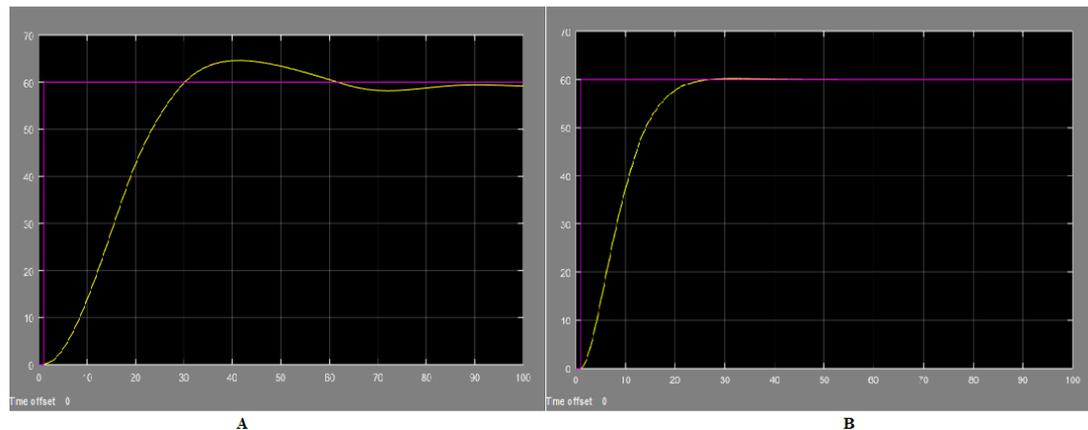


Fig.3. 50: A) Curva con control difuso. B) Curva con control PID
Elaborado por: Investigador

Interpretación:

En el control PID, la respuesta del sistema describe una disminución muy rápida del error en estado estacionario que la respuesta del control difuso, sin embargo, el control difuso alcanza más rápido la temperatura deseada, pues el tiempo de subida en la respuesta es más rápido y esta sobre los 30 segundos como se describe en la tabla 3.31.

Tabla 3. 31. Comparaciones de tiempos de control

	Tiempo de estabilización(seg)	Tiempo de subida (seg)
Control PID	30	30
Control Difuso	85	29

Elaborado por: Investigador

En la siguiente figura 3.46 se visualiza la forma de la señal de potencia de los controladores PID y difuso durante el proceso de ejecución del proceso:

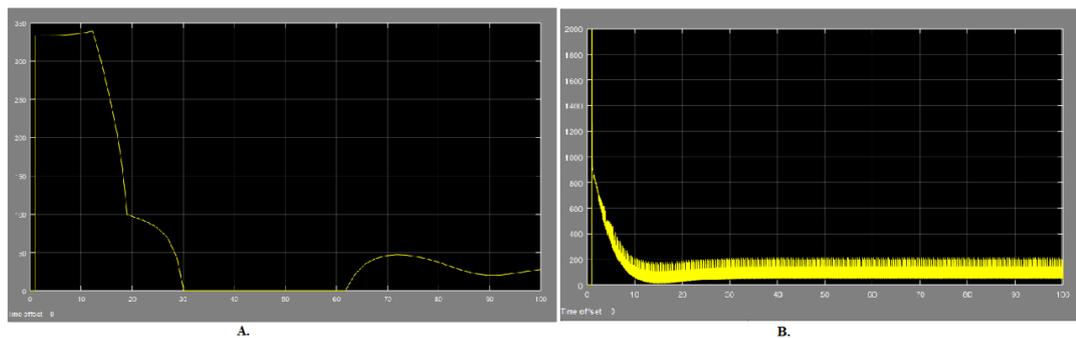


Fig. 3. 51:A) señal potencia con control difuso. B) señal de potencia con control PID
Elaborado por: Investigador

Interpretación:

La lectura que se hace de las gráficas es que la señal de potencia con el control difuso llega a cero cuando se alcanza la temperatura deseada y se mantiene allí hasta que la temperatura descienda. Mientras que en el control PID la señal de potencia nunca llega a cero, esto es debido al control derivativo aplicado en el control PID lo que permita al control leer la trayectoria futura del error y evitar que la señal de potencia llegue a cero.

b) Respuesta del controlador difuso en la planta real

En la figura 4.47 se puede observar la respuesta con pequeña señal de ruido superpuesta.

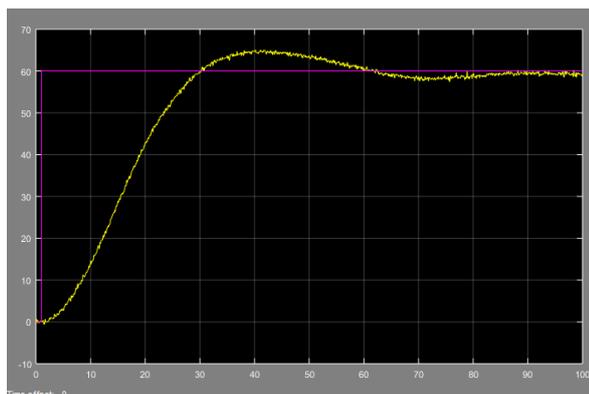


Fig.3. 52: respuesta del sistema real
Elaborado por: Investigador

Interpretación:

El controlador difuso aplicado a la planta real genera un tiempo de respuesta de 32 segundos para una temperatura deseada de 30°C, esto coincide con el tiempo en la simulación.

3.8.3 Análisis de eficiencia del proceso de enselado

El análisis se hace con respecto al horno convencional de control manual hasta ahora usado en el taller de calzado del Sr Julio Sailema.

Análisis de eficiencia de tiempo de reactivado

Por medio del análisis de campo se determinó que el tiempo de reactivado de una suela en horno de control manual es aproximadamente de 120 segundos hasta alcanzar la temperatura deseada de aproximadamente 60°C. A continuación, en la tabla 3.32 se hace una comparación de tiempos de reactivado del horno con control difuso y el horno con control manual.

Tabla 3. 32. Comparación de tiempo entre control difuso, PID y horno manual

Cantidad de suelas	Horno con control difuso	Horno manual
1 suela	30 segundos	60 segundos
6 suelas	180 segundos	360 segundos
12 suelas	360 segundos	720 segundos
24 suelas	720 segundos	1440 segundos

Elaborado por: Investigador

Interpretación:

De acuerdo a la tabla anterior 3.32 para reactivar 24 suelas, con el control difuso se requiere un tiempo de 720 segundos que equivale a 12 minutos y con el control manual se requiere un tiempo de 1140 segundos que equivalen a 24 minutos, esto hace que se reduzcan los tiempos de reactivación en un 50% al utilizar un control difuso en el horno.

3.8.4 Análisis de eficiencia en la producción

En promedio se producen 60 pares de calzado diariamente que corresponden a 120 suelas, para lo cual se hizo un cuadro comparativo analizado en 4 días, entre el control lógico difuso (CLD) y el control manual (M) del horno, como se observa en la siguiente tabla 3.33.

Tabla 3. 33. Análisis de eficiencia de producción entre control difuso y control manual

Datos	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Total	
	CLD	M	CLD	M	CLD	M	CLD	M	CLD	M
Lotes	120	120	120	120	120	120	120	120		
Suelas quemadas	0	1	0	1	0	1	0	0	0	3
Mal reactivadas	1	7	0	5	0	7	1	9	2	27
total	1	8	0	6	0	8	1	9	2	30

Elaborado por: Investigador

Interpretación:

Con el control lógico difuso en 4 días de operación no se perdió ninguna suela dentro del horno como sucedió con el control manual con el cual se quemaron 3 suelas. Además, con el control manual del horno, 27 suelas tuvieron problemas de reactivación pues se desprendieron del prensado cuando estas fueron revisadas en el área de inspección, mientras que con el control difuso solo se tuvo 3 suelas que se desprendieron del prensado por una mala reactivación. De esta manera se considera que existe alta eficiencia de producción, reduciendo en un 100% las pérdidas de

suela por quema en el exceso de temperatura y reduciendo en un 88% las suelas de mala calidad por mala reactivación gracias nuevo sistema de control implementado.

3.8.5 Análisis de eficiencia energética

De acuerdo a la tabla 3.32 por cada 4 docenas de suelas reactivadas se requiere un tiempo de 24 minutos. En un taller artesanal común en promedio se reactivan 4 docenas diarias de suelas para el pegado correspondiente, en el mes se tiene a un total de 80 docenas de suelas reactivadas. Entonce se realiza una regla de tres para determinar el tiempo total de consumo de potencia:

$$\text{Tiempo de consumo por mes} = \frac{80 \text{ docenas} * 24 \text{ minutos}}{4 \text{ docenas}} = 480 \text{ minutos}$$

Ahora se divide para 60 y transformar el tiempo a horas, y se obtiene:

$$\text{Tiempo de consumo por mes: } \frac{480}{60} = 8 \text{ Horas}$$

Esto significa que en el proceso de reactivación de las suelas, el horno está encendido y activado durante aproximadamente 8 horas al mes. Y si se multiplica este valor por la cantidad de potencia de consumo del horno eléctrico que es de 3 KW se obtiene el siguiente consumo eléctrico:

$$\text{Potencia consumida} = 3 \text{ KWatts} * 8 \text{ Horas} = 24 \text{ KWatts/hora}$$

Significa que el horno eléctrico consume un total de 24 000 Watss de potencia eléctrica por cada 80 docenas de suelas durante un mes. Consecuentemente, se determina el valor del Kwatio/hora para saber cuánto dinero le costara al taller artesanal por el uso del horno eléctrico, pues según [40], el costo del kw/hora en el Ecuador es de 10.47 centavos de dólar, y el consumo total de potencia por mes es de 24 KW/h, se multiplica:

$$\text{\$tarifa de costo} = 24 \text{ KW} * 0.1047 \text{ dólar} = 2.51 \text{ dólares}$$

En un mes el costo por el consumo de energía es \$ 2.51 dólares, y si comparamos este dato con el consumo económico del horno a gas que se usa comúnmente en el taller artesanal se tiene un considerable ahorro.

En la tabla 3.34 se tiene la descripción de las tarifas de consumo en dólares del horno reactivador a gas y el horno reactivador inteligente:

Tabla 3. 34. Tabla de comparativa de tarifas de consumo en dólares
Elaborado por: Investigador

<i>TIPO DE HORNO</i>	Cantidad de suelas	Tarifa de consumo \$	<i>TIPO DE HORNO</i>	Cantidad de suelas	Tarifa de consumo \$
Horno a gas	50 suelas	3.00 dólares	Horno eléctrico con control	50 suelas	1.57 dólares
	80 suelas	4.80 dólares		80 suelas	2.51 dólares
	120 suelas	7.20dólares		120 suelas	3.77 dólares
	500 suelas	30.00dólares		500 suelas	15.69 dólares

Interpretación:

Existe un gran ahorro económico de consumo de energía al utilizar el horno reactivador con inteligente frente a un horno manual a gas, pues se calculó un ahorro económico del 49% en cada lote de 500 suelas lo que hace que aumente la rentabilidad de la empresa. En el anexo 13 se puede revisar un análisis de protección de equipos donde se desarrolla la metodología y recomendaciones de seguridad eléctrica para la implementación del proyecto.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Con respecto al estado del arte se concluye que los controladores difusos en su mayoría son eficientes si se los diseña en base a la experiencia de controles PI o PID sobre todo en aplicaciones de control de temperatura.
- El modelo matemático de un horno con lámparas de radiación es demasiado complejo con respecto a un horno con resistencias común, esto debido a que en el modelo matemático se generó una ecuación diferencial no lineal donde la temperatura está elevada al cuadrado como consecuencia del uso de la ley de Steven-Boltzman, por eso fue necesario linealizar la ecuación y poder obtener la función de transferencia.
- Una ventaja en el diseño de controladores difusos es que no es necesario determinar el modelo matemático, salvo que se requiera analizar la respuesta del sistema en simulación.
- En simulación el control difuso logró ser más rápido que el control PID, generando un tiempo de subida de la curva de 25 segundos mientras que el control PID se generó un tiempo de subida de 30 segundos, sin embargo, el control difuso tarda más en estabilizar la temperatura de la suela.
- La eficiencia de la transferencia de calor por radiación de las lámparas halógenas IR, hace que se supere rápidamente la temperatura deseada para la reactivación de las suelas (60°C), sin embargo, el controlador difuso logró estabilizar la curva de temperatura en tiempo promedio de 30 segundos, evitando que las suelas se quemaran por el exceso de temperatura.
- El sistema de control implementado en el horno logró optimizar el reactivado de suelas y esto se comprobó en los resultados obtenidos al reactivar 24 suelas,

reduciendo en un 100% las pérdidas de suela por un exceso de temperatura y además se logró agilizar el tiempo de reactivado en un 50%.

4.2 Recomendaciones

- En este tipo de proyecto de implementación se recomienda trabajar con normas de seguridad industrial sobre todo para el manejo de altos voltajes debido a las diferentes amenazas que puede generar por la falta de conocimiento práctico.
- Para próximas investigaciones se recomienda monitorear los parámetros del horno eléctrico de forma remota e inalámbrica para aplicaciones industriales que así lo requieran
- Simular la planta en un programa creado en python para estimular el uso de software libre y evitar el uso de software con licencia pagada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Cabezas, “Análisis del reactivado de calzado y su incidencia en el retraso en los procesos de producción en la empresa ARMANDINY de la ciudad de Ambato,” Universidad Tecnica de Ambato, 2010.
- [2] P. Aguirre and B. Sánchez, “Diseño, construcción y automatización de un horno eléctrico para el calentamiento de Prepolymer y Polyol en la elaboración de calzado para la empresa calzado CAAS,” Universidad de las Fuerzas Armadas, 2014.
- [3] J. Sánchez and W. Barrera, “Diseño de controladores PID difusos de las variables de nivel y temperatura de una plataforma de entrenamiento para el control de procesos continuos,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, 2015.
- [4] S. Bastidas, “Contrucción de un horno automatizado para el curado de pintura electrostática, diseñado con lógica difusa utilizando resistencias eléctricas y convección forzada, implementado en la empresa Tridimensional,” Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [5] J. Ortiz, “Diseño y análisis comparativo de un sistema de control de temperatura con lógica difusa vs control proporcional integral y derivativo PID en un prototipo de una torre de enfriamiento en una planta de procesos,” Escuela Superior Politécnica de Litoral, 2016.
- [6] QUIMINET, “El proceso para fabricar calzado | QuimiNet.com.” [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/el-proceso-para-fabricar-calzado-18313.htm>. [Accessed: 15-Jan-2019].
- [7] J. Astigarraga, *Hornos Industriales de Resistencias*, Primera Ed. Madrid: McGRAW-HIL, 1994.
- [8] “hornos para calzado.” [Online]. Available: http://www.emar.com.mx/old_emar/horno_calzado.htm. [Accessed: 10-Oct-2019].
- [9] “Techologia IR | Lamparas infrarrojos - Helios Quartz.” [Online]. Available: <https://www.heliosquartz.com/prodotti/tecnologia-ir/?lang=es>. [Accessed: 25-Sep-2019].
- [10] Y. Çengel and A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, Cuarta Edi. Mexico D.F: McGRAW-HILL, 2011.
- [11] A. Roca, *Control Automático de Procesos Industriales*, Primera. Madrid: Diaz de Santos, 2014.
- [12] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, 2010.
- [13] “J060: Curva Voltaje vs Potencia de panel Solar de Panasonic usando Matlab/Simulink | Matlab/Simulink and Renewable Energy [Jorge Mírez].” [Online]. Available: <https://jmirez.wordpress.com/2010/09/21/j060-curva-voltaje-vs-potencia-de-panel-solar-de-panasonic-usando-matlab-simulink/>. [Accessed: 26-Dec-2019].

- [14] “Protocolos de comunicación industriales - LOGICBUS.” [Online]. Available: <https://www.logicbus.com.mx/blog/protocolos-de-comunicacion-industriales/>. [Accessed: 17-Dec-2019].
- [15] “¿Qué es MODBUS?” [Online]. Available: <https://blog.ars-electronica.com.ar/que-es-modbus-funcionamiento>. [Accessed: 09-Oct-2019].
- [16] A. Rodríguez, *Sistemas SCADA*, Segunda Ed. Mexico D.F: MARCOMBO, 2007.
- [17] D. J. Norris, *Beginning Artificial Intelligence with the Raspberry Pi*, Primera Ed. New Hampshire: Apress, 2017.
- [18] P. Ponce, *Inteligencia Artificial con Aplicaciones en la Ingeniería*, Primera Ed. Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2010.
- [19] T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*, Tercera Ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2010.
- [20] J. Garcia, “Controlador difuso de temperatura,” Universidad Autonoma de Queretano, 2017.
- [21] A. M. Ibrahim, *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*. Burlington: Newnes, 2004.
- [22] E. Zamora, “Lógica Difusa - 3.2.2 Razonamiento Difuso (Regla Si-Entonces) - Hackeando Tec - YouTube,” 2015. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=46u5gqd0QDI&list=PLIyIZGa1sAZoWAwE_tL7zCv3wi1ISrBa0&index=21. [Accessed: 01-Oct-2019].
- [23] “Simulación de sistemas de control (Presentación PowerPoint) - Monografias.com.” [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos102/simulacion-sistemas-control/simulacion-sistemas-control.shtml>. [Accessed: 17-Dec-2019].
- [24] AUTRACEN, “Sistemas SCADA - Autracen.” [Online]. Available: <http://www.autracen.com/sistemas-scada/>. [Accessed: 08-Jan-2019].
- [25] “Componentes en un sistema SCADA – Instrumentacion, Control y Automatizacion Industrial.” [Online]. Available: <https://instrumentacionycontrol.net/componentes-en-un-sistema-scada/>. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [26] “Industrial ethernet.” [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/CorbuWi/industrial-ethernet-27736932>. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [27] “Calentador Infrarrojo | Ushio America, Inc.” [Online]. Available: <https://www.ushio.com/products/heater/>. [Accessed: 25-Sep-2019].
- [28] S. Dequan, G. Guili, G. Zhiwei, and X. Peng, “Application of Expert Fuzzy PID Method for Temperature Control of Heating Furnace,” *Procedia Eng.*, vol. 29, pp. 257–261, 2012.
- [29] U.-C. Moon and K. Y. Lee, “Hybrid Algorithm With Fuzzy System and Conventional PI Control for the Temperature Control of TV Glass Furnace,”

IEEE Transactions Control Syst. Technol., vol. 11, pp. 548–54, 2003.

- [30] Y. Han, J. Jinling, C. Guangjian, and C. Xizhen, “Temperature Control of Electric Furnace Based on Fuzzy PID,” in *International Conference on Electronics and Optoelectronics*, 2011, p. 4.
- [31] I. Jimenez, “Control de Temperatura de un Horno Electrico mediante Logica Difusa,” Universidad Tecnologica de Mixteca, 2012.
- [32] Z. Radakovic, V. Milosevic, and S. Radakovic, “Application of Temperature Fuzzy Controller in an Indirect Resistance Furnace,” *Appl. Energy*, vol. 73, pp. 167–182, 2002.
- [33] H. Espitia and J. Soriano, “Diseño y simulación de un controlador difuso de temperatura empleando el congresor basado en relaciones booleanas,” *Tecnura*, vol. 16, p. 32, 2011.
- [34] A. Castañeda, A. Gonzalez, R. Guzman, and O. Ibarra, “Desarrollo de un Horno Solar para el Secado de Plantas y Vegetales usando Control Difuso,” *Acta Univ.*, vol. 22, pp. 14–19, 2012.
- [35] “Compute Module 3.” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/compute-module-3/>. [Accessed: 09-Oct-2019].
- [36] “TS01 Non-contact IR Temperature Sensor 0-3V - DFRobot.” [Online]. Available: [https://www.dfrobot.com/product-1823.html?search=temperature sensor](https://www.dfrobot.com/product-1823.html?search=temperature%20sensor). [Accessed: 09-Oct-2019].
- [37] “Arduino Mega 2560.” [Online]. Available: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/>. [Accessed: 09-Oct-2019].
- [38] “PWM 16A 3500W Triac Leading EDGE Dimmer 50HZ 60HZ de KRIDA Electronics en Tindie.” [Online]. Available: https://www.tindie.com/products/bugrovs2012/pwm-16a-3500w-triac-leading-edge-dimmer-50hz-60hz/?fbclid=IwAR2dIP6FVfptGn0aPD3LOjkx_cngZc_pthEohv5-SeLocVrnsx7xTfAqZjY. [Accessed: 09-Oct-2019].
- [39] “Pantalla inteligente táctil LCD 3.2” Nextion NX4024T032 | HeTPro.” [Online]. Available: <https://hetpro-store.com/pantalla-inteligente-tactil-lcd-3.2-nextion-nx4024t032/>. [Accessed: 02-Jan-2020].
- [40] “Ecuador está entre los cinco países con las tarifas eléctricas más bajas de la región,” 2019. [Online]. Available: <https://lahora.com.ec/noticia/1102238518/ecuador-esta-entre-los-cinco-paises-con-las-tarifas-electricas-mas-bajas-de-la-region>. [Accessed: 12-Nov-2019].

ANEXOS

ANEXO 1

Análisis de producción y calidad del calzado en el taller artesanal del Sr Julio Sailema

Tabla1. Producción en una semana.

	Suelas buenas	Suelas quemadas	Suelas mal preparadas	Total de suelas
Día 1	109	1	10	120
Día 2	104	2	14	120
Día 3	104	1	13	120
Día 4	101	1	18	120
Día 5	108	1	11	120
Día 6	107	2	11	120
TOTAL	633	8	77	720

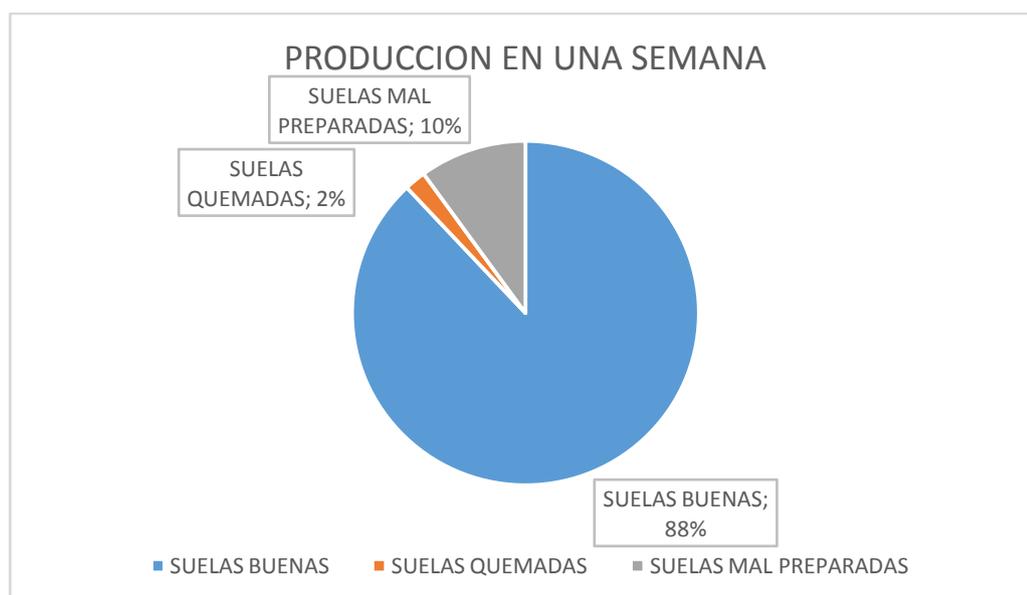
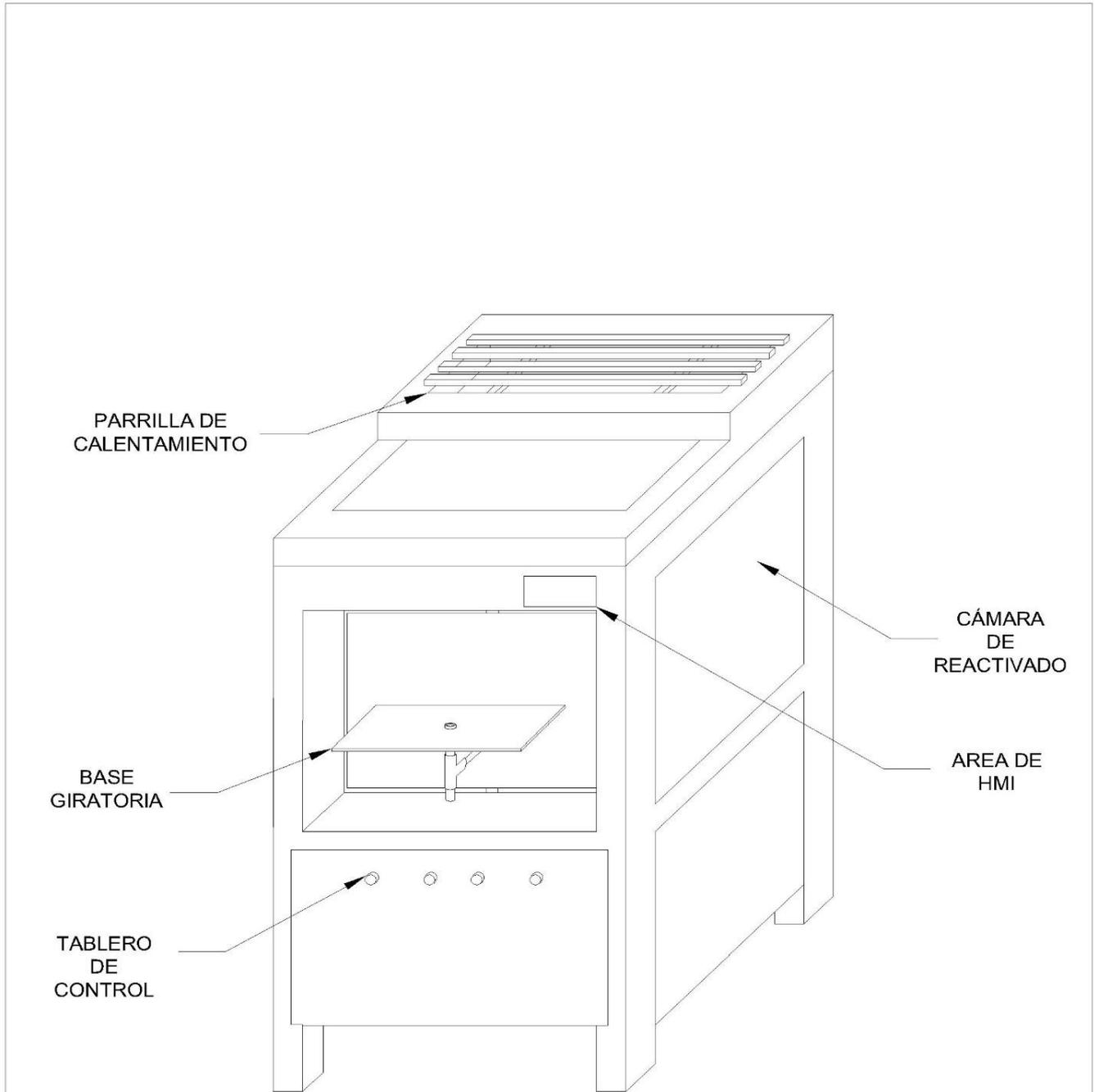


Ilustración1. Diagrama de pastel de la producción semanal de calzado

Interpretación:

El 12 % de las suelas tratadas en el proceso de reactivación se suelas sufren algún desperfecto, de las cuales el 2 % son quemadas debido al control inadecuado de temperatura.

ANEXO 2



NOMBRE:

RICHARD EDUARDO
SAILEMA MEDINA

TEMA DEL PROYECTO:

"ESTRUCTURA DE HORNO
REACTIVADOR DE SUELAS"

ESCALA DEL DIBUJO:

1:10

LÁMINA:

1

ANEXO 3

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO

```
#LIBRERIAS
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz

class horno():
def controlador(self, variable_error):
    self.error = variable_error
#UNIVERSO DEL DISCURSO DE LAS VARIABLES
    x_error_temp = np.arange(-120, 121, 1)
    x_potencia = np.arange(0, 101, 1)

#GENERANDO FUNCIONES DE MEMBRESIA
    EN = fuzz.trapmf(x_error_temp, [-120, -120, -10, -0])
    EZ = fuzz.trimf(x_error_temp, [-20, 0, 5])
    EPX = fuzz.trapmf(x_error_temp, [0, 5, 120, 120])

    PZ = fuzz.trimf(x_potencia,[0, 0, 10])
    PM = fuzz.trimf(x_potencia,[0, 20, 30])
    PX = fuzz.trapmf(x_potencia,[20, 80, 100, 100])

#INFERENCIA
#Fusificacion
# Fuzificando la entrada nítida Error en los conjunto difusos de la variable lingüística error
    EN_fuz = fuzz.interp_membership(x_error_temp, EN, self.error)
    EZ_fuz = fuzz.interp_membership(x_error_temp, EZ, self.error)
    EPX_fuz = fuzz.interp_membership(x_error_temp, EPX, self.error)

#Reglas de control
    #Cortando conjuntos difusos en B, por medio de la reglas de control establecidas
    previamente
        rule_1 = np.fmin(EN_fuz, PZ)
rule_2 = np.fmin(EZ_fuz, PM)
        rule_6 = np.fmin(EPX_fuz, PX)

#Union
    union = np.fmax(rule_1, np.fmax(rule_2, rule_6))

# DEFUZIFICACION
self.control_value = fuzz.defuzz(x_potencia, union, 'centroid')
    return self.control_value

#para cortar la funcion B union
#corte_union = fuzz.interp_membership(x_potencia, union, self.control_value)
```

ANEXO 4

CÓDIGO DE PROGRAMACION EN PYTHON DE LA CLASE SENSOR PARA ADQUIRIR DATOS DE TEMPERATURA DEL HORNO ELECTRICO POR A TRAVÉS DE MODBUS RS-485 (ARDUINO - RASPBERRY)

```
import serial
import time
from pymodbus.client.sync import ModbusSerialClient as ModbusClient #initialize a serial
RTU client instance
import logging

class sensorTemperatura():
    def __init__(self):
        self.client= ModbusClient(method= "rtu",
        port="/dev/ttyUSB0",
        stopbits = 1,
        bytesize = 8,
        parity = 'N',
        baudrate= 9600)

        self.connection = self.client.connect() #siempre empiezo conectandome

        logging.basicConfig()
        log = logging.getLogger()
        log.setLevel(logging.DEBUG)
    #Esclavo: 1
    def consultarTempArduino_A(self):
        print("conexion: ",self.connection) #verifico conexion
        self.temps = self.client.read_input_registers(1, 1, unit=0x02) # leo dato de
arduino y guardo variable
        return self.temps.registers[0] #devuelvo cuando solicita el controlador el
controlador
        #client.close()
    #Esclavo: 2
    def consultarTempArduino_B(self):
        try:
            print("conexion: ",self.connection) #verifico conexion
            temps2 = self.client.read_input_registers(1, 1, unit=0x03) # leo dato de
arduino y guardo variable
            self.temperature1= temps2.registers[0]
            #self.temperature2= temps2.registers[1]
            #return self.temperature1 #devuelvo cuando lo solicita elcontrolador
            return self.temperature1 #devuelvo temperatura el 2do sensor
        except:
            return self.temperature1
            pass
    def consultarTempArduino_C(self):
        try:
            print("conexion: ", self.connection)
            temps3 = self.client.read_input_registers(2, 1, unit=0x03)
            self.temperature2 = temps3.registers[0]
            return self.temperature2
```

```
except:
    return self.temperature2
pass
```

ANEXO 5

PROGRAMACIÓN DE ARDUINO NANO PARA ADQUISICIÓN DE DATOS DE TEMPERATURA

```
#include <modbus.h>
#include <modbusDevice.h>
#include <modbusRegBank.h>
#include <modbusSlave.h>

modbusDevice regBank;
modbusSlave slave;

#define RS485TxEnablePin 2 //pin para activar comunicacion
#define RS485Baud 9600
#define RS485Format SERIAL_8N1 // even (E) , oven (O)

//#define Entrada1 3
#define LED3 3
#define pulsador 4
#define Entrada3 5
#define Entrada4 6
#define Entrada5 7
#define Entrada6 8
#define Entrada6 9

void setup()
{
    //Assign the modbus device ID.
    regBank.setId(3);

    // Entradas Digitales

    regBank.add(10000);
    regBank.add(10001);
    regBank.add(10002);

    //Add Analog Input registers to the register bank
    regBank.add(30001);
    regBank.add(30002);
    regBank.add(30003);

    //Add Analog Output registers to the register bank
    regBank.add(40001);
    regBank.add(40002);
```

```

slave._device = &regBank;

slave.setBaud(&Serial,RS485Baud,RS485Format,RS485TxEnablePin);
pinMode(pulsador, INPUT);
pinMode(LED3,OUTPUT);
}

void loop()
{
  unsigned int ADC_Value = analogRead(A3); // lee la entrada analogica A3 y la
  guarda
  float i = ((double)ADC_Value*450/614.4-70); //convierte los valores en centigrados

  regBank.set(30002, (word) i); //from 0 - 1023, guarda el dato en el registro 30002

  slave.run();
}

```

ANEXO 6

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN EN PYTHON PARA QUE RASPBERRY ENVIÉ UNA SEÑAL PWM HACIA EL DISPOSITIVO CONVERTOR DE POTENCIA

```

import time
import RPi.GPIO as GPIO

class pwm1():

    def __init__(self):
        GPIO.setmode(GPIO.BCM)
        led = 18
        GPIO.setup(led, GPIO.OUT)
        self.p = GPIO.PWM(led, 100) #objeto

    def actPwm(self, dc):
        self.p.start(0)
        self.p.ChangeDutyCycle(dc)

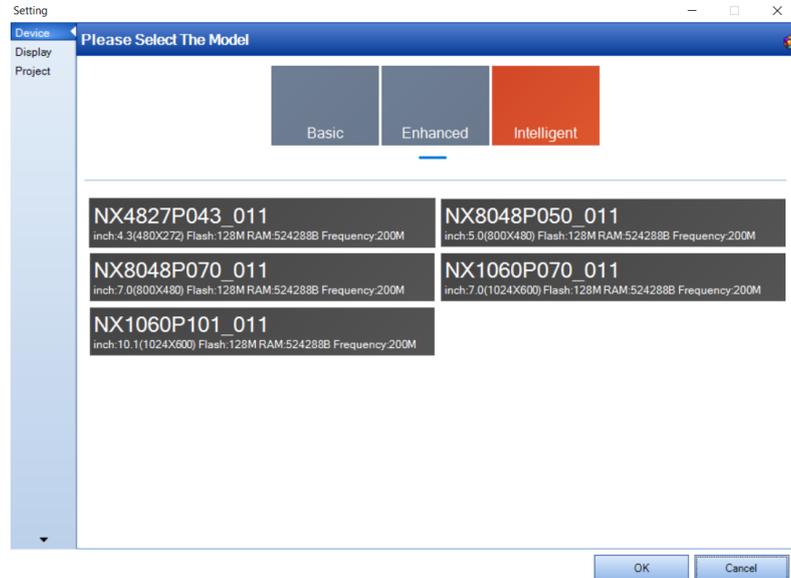
    def descPwm(self):
        self.p.stop()
        GPIO.cleanup()

```

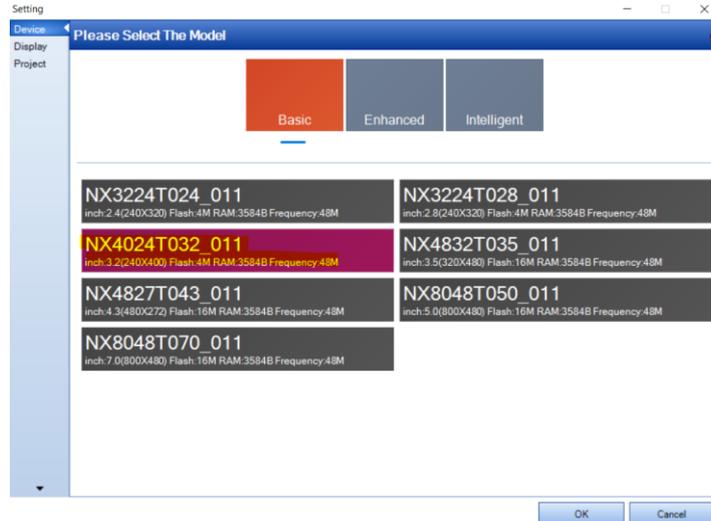
ANEXO 7

Procedimiento de Programación de pantalla HMI.

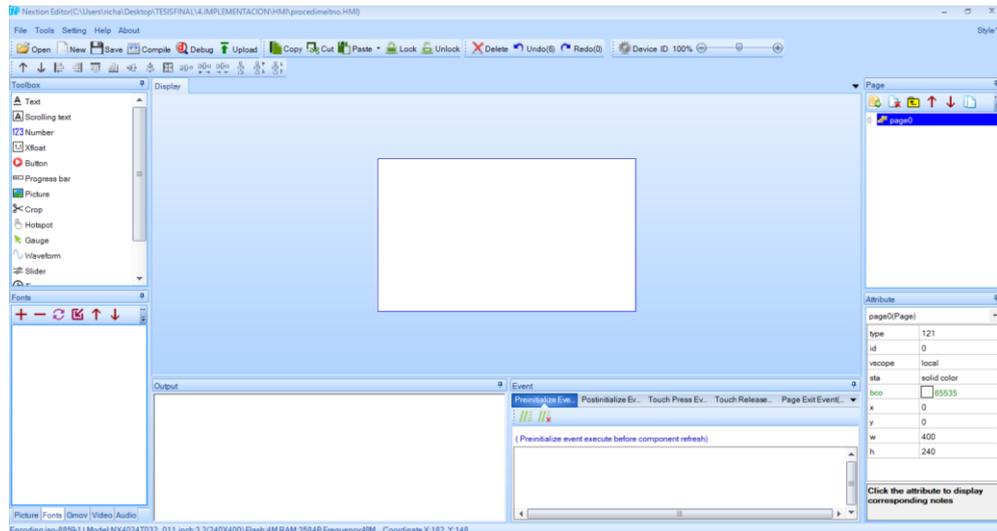
1. Instalar el programa desde la página de Nextion Editor y ejecutar el software
2. Crear un nuevo proyecto, dando el click en la pestaña NEW, donde le parece el siguiente cuadro:



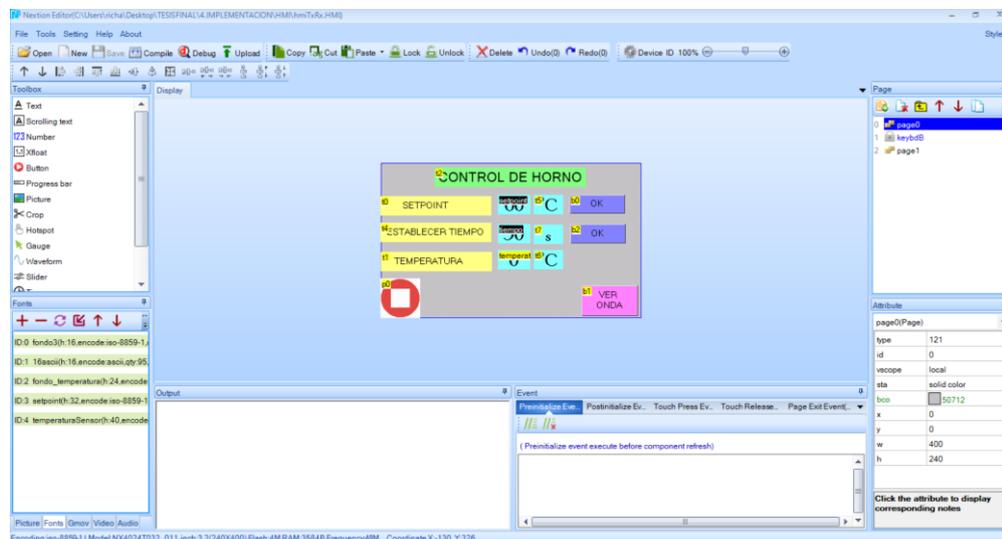
3. Seleccionar el modelo de pantalla, para el proyecto se tiene la Pantalla HMI modelo NX4024T032:



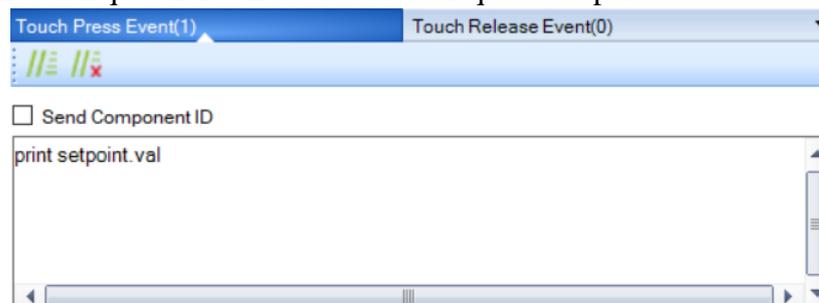
4. Se abrirá una interfaz de desarrollo, donde en la parte izquierda se tiene botones, cuadro de texto, cuadro de tipo de números, formas de ondas y una gran cantidad de herramientas para poder diseñar la pantalla HMI.



5. Se comienza arrastrar las herramientas que se necesitan, para el caso del proyecto se necesita de dos botones, 4 cuadros de texto. Simplemente se da click en el icono de herramientas y este aparecerá en la pantalla virtual en blanco:



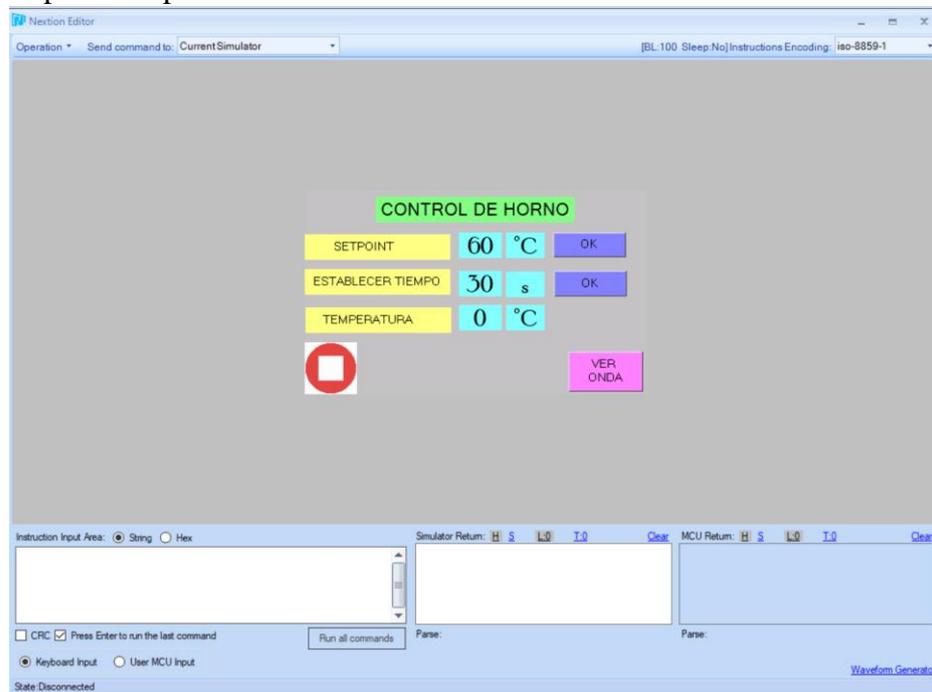
6. Una vez con obtenido el diseño del HMI, se procede a programar los botones, y cuadros de entradas de datos. El siguiente cuadro muestra la programación de un botón que envía un datos cada vez que se es pulsado.



7. Los cuadros de entrada de datos se los programa dando click en el cuadro y en la parte derecha inferior aparecen sus propiedades. En la siguiente figura, el cuadro setpoint es configurado en objname para establecer el nombre “setpoint”.

setpoint(Number)	
type	54
id	1
objname	setpoint
vscope	global
sta	solid color
style	flat
key	numeric keyboa...
font	3
bco	34815
pco	0

8. De esta manera se van configurando todos los iconos que forman la pantalla HMI. Luego dando click en la pestaña DEBUG se realiza la simulación del HMI para comprobar el funcionamiento:



9. Finalmente se compila la pantalla HMI dando clic en la pestaña COMPILE y el archivo generado debe ser guardado en una memoria SD para luego conectar esta memoria dentro de la pantalla HMI para que el programa sea cargado.

ANEXO 8

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA TRANSMITIR Y RECIBIR DATOS DESDE EL ORDENADOR HASTA LA PANTALLA HMI POR A TRAVÉS DEL PUERTO SERIAL

```
class hmi():
    def __init__(self):
        self.send = serial.Serial(
            port='/dev/serial0',
            baudrate = 9600,
            parity=serial.PARITY_NONE,
            stopbits=serial.STOPBITS_ONE,
            bytesize=serial.EIGHTBITS,
            #timeout=3
        )

    def leerDatos(self):
        datos_iniciales_str = self.send.read(4).decode('utf-8') #recibe 4 bits
        self.datos_iniciales = ord(datos_iniciales_str[0]) #en el espacio [0], se encuentra
el valor codificado en ASCII
return self.datos_iniciales

    def escribirDatos(self, enviar_temp_hmi):
        value = str(enviar_temp_hmi).encode('utf-8')
        trama = b'temperatura.val=' + value + b'\xff\xff\xff'
        self.send.write(trama)

    def escribirNumSuela(self, contador):
        value = str(contador).encode('utf-8')
        trama = b'suela.val=' + value + b'\xff\xff\xff'
        self.send.write(trama)
    def escribirSuelaDetectada(self):
        trama = b'mensaje.txt=' + "'Suela"+\x22\x5C\x72\x22+"detectada!'"'.encode('utf-
8') + b'\xff\xff\xff'
        self.send.write(trama)
    def escribirEsperandoSuela(self):
        trama = b'mensaje.txt=' + "'Ingrese una"+\x22\x5C\x72\x22+"nueva
suela'"'.encode('utf-8') + b'\xff\xff\xff'
        self.send.write(trama)
    def leerSalir():
self.send.timeout = 0.1
        salir_str = self.send.read(4).decode('utf-8') #recibe 4 bits
self.salir = ord(datos_iniciales_str[0]) #en el espacio [0], se encuentra el valor
codificado en ASCII
return self.salir
```

ANEXO 9

CÓDIGO EN PYTHON DEL PROGRAMA MAIN DE PYTHON DONDE SE CONCATENAN TODAS LAS LIBRERIAS PARA EL FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL PROGRAMA.

```
from pantallaHMI import hmi

from modulo_planta import procesos_planta
import RPi.GPIO as GPIO
import time

GPIO.setwarnings(False)
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(21, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP) #pin en estado alto por defecto,
activar proceso
GPIO.setup(27, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP) #pin en estado alto por defecto,
terminar proceso
GPIO.setup(25, GPIO.OUT)

miPantalla = hmi() # creo un objeto de la clase pantalla
miProceso = procesos_planta() #creo objeto de la clase procesos

while 1:
    w = 0
    while w != 3:
        print("Recibo seleccion de controlador.")
        seleccion = miPantalla.leerDatos()
        print("A seleccionado la opcion numero: ", seleccion)

        if seleccion==1:
            print("Ingrese el setpoint: ")
            setpoint = miPantalla.leerDatos() # método para esperar el dato del hmi
            print("El setpoint es: ", setpoint)
            w=3 #termina bucle
        if seleccion==2:
            print("Ingrese el tiempo: ")
            miTiempo = miPantalla.leerDatos() #método para esperar el dato del hmi
            print("El tiempo de calenatamiento es de: ", miTiempo)
            w=3 #termina bucle
        if seleccion == 3:
            w = 0 #continua bucle

    contador = 0
    inicio = 0
    g = 2
    while inicio!=3:

        # Si GPIO_21 ingresa un 1, el Indicador se apaga
```

```

if GPIO.input(21) == 1:
    GPIO.output(25, GPIO.LOW)
    time.sleep(0.5)
# Si GPIO_21 ingresa un 0, comienza el proceso
if GPIO.input(21)==0:
    print("Suela detectada...")
    miPantalla.escribirSuelaDetectada()
    contador = contador + 1
    miPantalla.escribirNumSuela(contador)
    time.sleep(1)
    GPIO.output(25, GPIO.HIGH)

    if seleccion==1:
        miProceso.proceso_inteligente(setpoint, g )
        g = g + 1 # para que se active de manera alternada el
sensor B y sensor C de temperatura
        if seleccion==2:
            miProceso.proceso_ON_OFF(miTiempo)

        GPIO.output(25, GPIO.LOW) # Apago led para indicar fin de
proceso

    print("Esperando una suela nueva..")
    miPantalla.escribirEsperandoSuela()

if GPIO.input(27) == 1: #pulsador de termino de proceso, es el pulsador es
normalmente cerrado
    print("De vuelta al inicio")
    print("Seleccione tipo de proceso: INTELIGENTE O
TEMPORIZADO?")
    inicio = 3
    miPantalla.regresarMenu()

```

ANEXO 10
DIAGRAMA DE PINES DEL ORDENADOR RASPBERRY PI CM3.

RPi Compute Mod Dev Board - J5 Header						
GPI0#	NAME				NAME	
0	GPI0 0	1			2	Ground
1	GPI0 1	3			4	5.0 VDC Power
2	GPI0 2 (I ² C) SDA1 [ALT0]	5			6	Ground
3	GPI0 3 (I ² C) SCL1 [ALT0]	7			8	3.3 VDC Power
4	GPI0 4 GPCLK0 [ALT0]	9			10	Ground
5	GPI0 5	11			12	1.8 VDC Power
6	GPI0 6	13			14	Ground
7	GPI0 7 SPI0_CE1_N [ALT0]	15			16	VG0 Power
8	GPI0 8 SPI0_CE0_N [ALT0]	17			18	Ground
9	GPI0 9 SPI0_MISO [ALT0]	19			20	3.3 VDC Power
10	GPI0 10 SPI0_MOSI [ALT0]	21			22	Ground
11	GPI0 11 SPI0_SCLK [ALT0]	23			24	1.8 VDC Power
12	GPI0 12 PWM0 [ALT0]	25			26	Ground
13	GPI0 13 PWM1 [ALT0]	27			28	VG0 Power
14	GPI0 14 (UART) TxD0 [ALT0]	29			30	Ground
15	GPI0 15 (UART) RxD0 [ALT0]	31			32	3.3 VDC Power
16	GPI0 16	33			34	Ground
17	GPI0 17	35			36	1.8 VDC Power
18	GPI0 18 PWM0 [ALT5]	37			38	Ground
19	GPI0 19 PWM1 [ALT5]	39			40	VG0 Power
20	GPI0 20	41			42	Ground
21	GPI0 21	43			44	3.3 VDC Power
22	GPI0 22	45			46	Ground
23	GPI0 23	47			48	1.8 VDC Power
24	GPI0 24	49			50	Ground
25	GPI0 25	51			52	VG0 Power
26	GPI0 26	53			54	Ground
27	GPI0 27	55			56	5.0 VDC Power
	RUN	57			58	Ground
	GPI047_CTL_1V8	59			60	Ground

Attention! The GPI0 pin numbering used in this diagram is intended for use with WiringPi / Pi4J. This pin numbering is not the raw Broadcom GPIO pin numbers.

<http://www.pi4j.com>

Ilustración. Ordenador industrial raspberry pi CM3

ANEXO 11

MATERIALES Y COSTOS

A continuacion en la tabla 1, se enlista todos los equipos y dispositivos utilizados en el proyecto con su respectivo y al final el costo total del proyecto implementado.

Tabla 1. Lista de materiales y costos

ID	Nombre	Costo
ID_01	Raspberry Pi CM3	180.00
ID_02	Arduino Nano	5.50
ID_03	Módulo RS-485	3.00
ID_04	Sensores Dfrobot TS01	240.00
ID_05	Pantalla HMI NEXTION	50.00
ID_06	PULSADOR INDUSTRIAL (VERDE)	3.00
ID_07	PULSADOR INDUSTRIAL (ROJO)	3.00
ID_07	LED INDICADOR INDUSTRIAL	3.00
ID_08	INTERRUPTOR INDUSTRIAL ON-OFF	4.00
ID_09	Convertor de potencia KRIDA con entrada pwm	90.00
ID_10	Lámparas halógenas de radiación infrarroja	240.00
ID_11	Chasis-estructura de Horno	200.00
ID_13	Cables de alta potencia	20.00
ID_14	Braker-disyuntor de 220V	7.00
TOTAL:		1048.50

El total invertido en el proyecto de investigación fue de \$ 1028.50 dólares .

ANEXO 12

**CONTROL DE HORNO ELECTRICO DE
RADIACION INFRARROJA**

VERSIÓN 1.0

**GUIA PRÁCTICA DE USUARIO PARA EL
MANEJO DEL CONTROL DEL HORNO
ELÉCTRICO**



21 de Diciembre del 2019

Ambato - Ecuador

ÍNDICE

<u>1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA</u>	
<u>1.1 Objeto</u>	
<u>1.2 Alcance</u>	
<u>1.3 Funcionalidad</u>	
<u>1.3 Precauciones</u>	
<u>2 PARTES DEL SISTEMA</u>	
<u>2.1 Estructura de horno reactivador</u>	
<u>2.2 Pantalla HMI</u>	
<u>2.3 Pulsadores de control</u>	
<u>2.4 Base de horno para suelas</u>	
<u>2.5 Cámara de reactivación de horno</u>	
<u>3 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA</u>	
<u>3.1 Diagrama de flujo</u>	
<u>3.1 Instrucciones de uso</u>	
<u>3.2 Video</u>	

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

1.1. Objeto

El objetivo es desarrollar un manual de usuario para el correcto manejo del sistema de control de un horno eléctrico, el cual es capaz de optimizar el proceso de enselado en la fabricación artesanal de calzado agilizando la reactivación de suelas y evitando pérdidas por excesos de temperatura.

1.2. Alcance

Este manual pretende ser una guía de práctica para cualquier usuario sin conocimientos técnicos en electrónica.

1.3. Funcionalidad

El presente horno eléctrico posee un control inteligente de temperatura que permite la eficiente reactivación de suelas. Tiene integrado un HMI (interfaz humano máquina) para una fácil interacción entre el operador y el horno. Además, pulsadores de activación y desactivación de proceso.

1.4. Precauciones

- Para manipular el circuito eléctrico del horno se recomienda considerar todos los cables están energizados, aun luego de realizar la maniobra de corte. Se deberá comprobar con el multímetro digital la ausencia de tensión, para luego comenzar a trabajar sobre los mencionados cables.
- Cuando trabaje sobre el circuito eléctrico con tensión, no olvidar de usar los elementos de protección adecuados
- Las herramientas eléctricas de mano, deben estar convenientemente protegidas frente a contactos eléctricos.
- Los sistemas de seguridad (llaves térmicas, diferencial), no deben ser manipulados bajo ningún concepto, puesto que su función de protección quedaría anulada.
- No tirar del cable para desenchufar algún objeto. Hay tomarlo siempre del cuerpo del enchufe.
- No colocar cables cerca de la superficie caliente del horno.
- Este equipo industrial funciona con 220 VAC no utilice voltaje de 110 VAC debido a la potencia de lámparas de radiación cuya potencia es de 1000 Watts.

2. PARTES DEL SISTEMA

2.1. Estructura del Horno reactivador

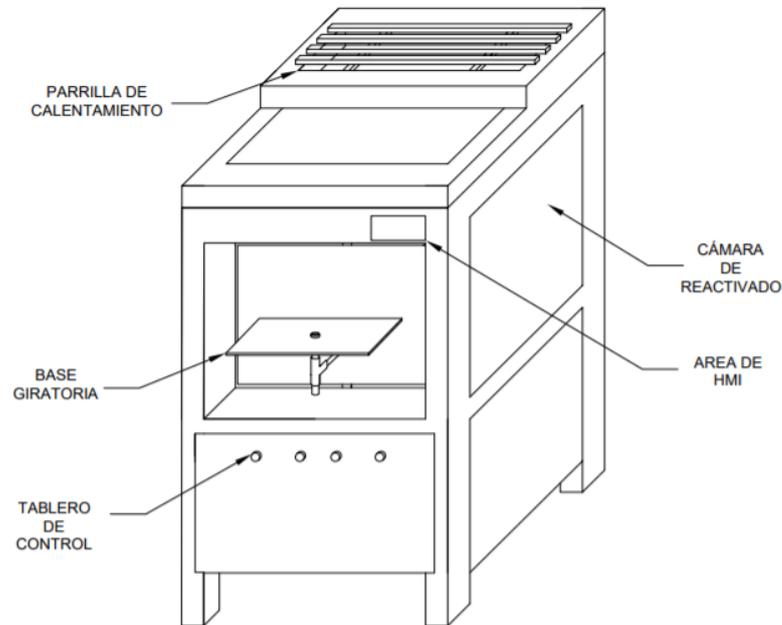


Ilustración 1. Estructura del horno reactivador

2.2. Pantalla HMI

Es la interfaz con el que el operador y el horno se comunican, ya sea para establecer la temperatura del horno, así como para visualizar



Ilustración 2. Partes de pantalla HMI

2.3. PULSADORES DE CONTROL

Son un conjunto de botones que sirven para encender el sistema y activar o desactivar el proceso de reactivación.



Ilustración 3. Pulsadores de control

2.4. BASE DE HORNO PARA SUELAS

Es el área donde se ubica las suelas para ingresarla a la cámara de reactivación.



Ilustración 4. Base de horno para establecer suela

2.5. CÁMARA DE REACTIVACIÓN DE HORNO

Es el área donde se ejecuta el proceso de reactivación de las suelas, en este sitio se puede alcanzar la temperatura máxima de 120° C.



Ilustración 5. Cámara de reactivación de suelas

3. FUNCIONAMIENTO SISTEMA

3.1. Diagrama de flujo

A continuación, se puede observar un diagrama de flujo que presenta los pasos para el correcto funcionamiento del sistema.

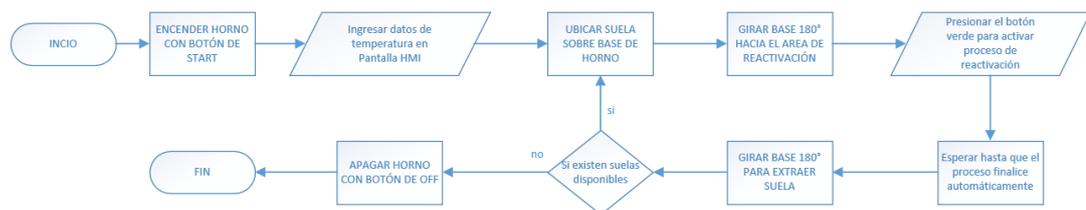
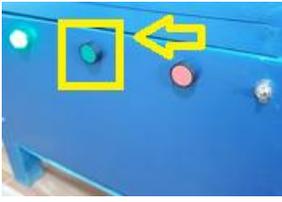
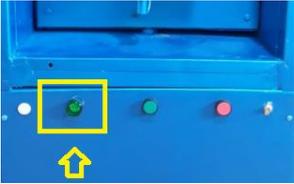


Ilustración 6. Diagrama del flujo del funcionamiento paso a paso del sistema

3.2. Instrucciones de uso

Para un correcto funcionamiento del horno siga los siguientes pasos detallados a continuación:

#	Acción	Figura
1	Encender Horno	
2	Seleccionar modo de operación	
3	Ingresar Datos de temperatura en pantalla	
4	Ubicar suela sobre base exterior de horno y girar base de horno 180° grados hacia área de reactivado	
5	Presionar botón verde para activar proceso de reactivado	
6	Leer Datos	

7	Esperar hasta que el proceso finalice automáticamente, verificando el indicador verde	
8	Volver a girar base de horno para extraer suela	
9	Repetir procedimiento si existen más suelas que reactivar, en caso contrario apagar horno	

3.3. Video

Para visualiza en video el modo de uso puede visitar el link del funcionamiento del sistema en youtube:

https://www.youtube.com/watch?v=KfNQgbtGQ_s&feature=youtu.be

ANEXO 13

Análisis de prevención de riesgos eléctricos en el sistema

Para el análisis de riesgos se sigue la metodología graficada en la ilustración 1:

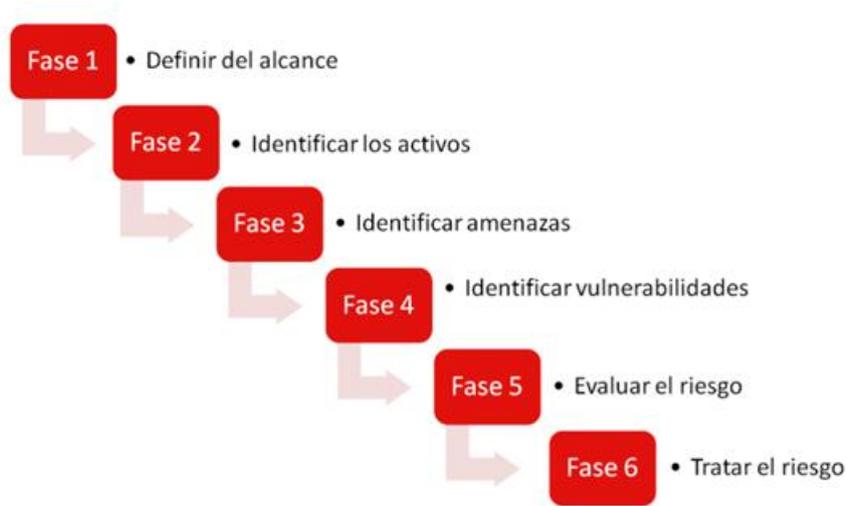


Ilustración 1. Metodología del análisis de riesgos eléctricos del sistema

Fase 1: Definición del alcance

Evaluar y prevenir los posibles riesgos eléctricos de los equipos electrónicos implementados en el horno y su incidencia en uso por el operador.

Fase 2: Identificación de los activos

En la tabla 1 se puede observar componentes eléctricos y electrónicos del sistema con algunos de sus parámetros necesarios para el análisis:

Tabla 1. Equipos electrónicos del sistema

ID	Nombre	Nivel Potencia	Voltaje de Alimentación	Ubicación	Crítico
ID_01	Raspberry Pi CM3	Baja Potencia	5 VDC	Caja de derivación del horno	NO
ID_02	Arduino Nano	Baja Potencia	5 VDC	Caja de derivación del horno	NO
ID_03	Módulo RS-485	Baja Potencia	5 VDC	Caja de derivación del horno	NO
ID_04	Sensor Dfrobot TS01	Baja Potencia	5 VDC	Cámara de reactivación de Horno	NO

ID_05	Pantalla HMI NEXTION	Baja Potencia	5 VDC	Cubierta frontal exterior del horno	NO
ID_06	PULSADOR INDUSTRIAL (VERDE-ROJO)	Baja potencia	5 VDC	Cubierta frontal exterior del horno	NO
ID_07	LED INDICADOR INDUSTRIAL	Alta potencia	220 VDC	Cubierta frontal exterior del horno	SI
ID_08	INTERRUPTOR ON-OFF	Alta potencia	220 VAC	Cubierta frontal exterior del horno	SI
ID_09	Convertor de potencia KRIDA con entrada pwm	Alta potencia	220 VAC PWM = 5 VDC	Caja de derivación del horno	SI
ID_10	Lámparas halógenas de radiación infrarroja	Alta potencia	220 VAC	Cámara de reactivación del horno	Si

Los equipos que son más susceptibles a riesgos son los que son de alta potencia tales como el convertor de potencia KRIDA, los pulsadores y el led indicador industrial.

Fase 3: Identificación de riesgos eléctricos

Amenazas en el sistema

En la tabla 2, se enlista las posibles amenazas dentro del sistema que puedan perjudicar tanto al operador como a los equipos electrónicos.

Tabla 2. Posibles amenazas dentro del sistema eléctrico

Amenazas	CAUSA	CONSECUENCIA
Cortocircuito	Mal aislamiento de cables. Rotura de cables de manera accidental Sobretensiones eléctrica	Quemaduras y choque eléctrico en el operador o técnico Daño permanente de las tarjetas y módulos electrónicos de lámparas infrarrojas
Arco eléctrico	Humedad y corrosión. Acumulación de polvo e impurezas en la superficie de aislamiento de cables Aproximación a elementos	Falla en dispositivos de conexión Quemaduras y lesiones personas, debido a la explosión directa

	conductores. Sobretensiones debido a lugar estrecho Falla de material aislante de cables o tarjeta conversor de potencia	
Electrocución	No usar equipos de protección personal	Electrocución , quemaduras.
Sobrecarga	Sobretensiones en la fuente de alimentación de corriente alterna del horno	Quema de aislante de cables Daño en las tarjetas electrónicas
Incendio y explosión debido a cortos circuitos	Chispas en los cables de las lámparas que generen fuego en el pegamento adherente de las suelas	Perdida de materiales, riesgo de quemaduras y muerte.

Vulnerabilidad de equipos

Cada equipo electrónico posee vulnerabilidades eléctricas debido a que tienen un límite de tensión y corriente para su funcionamiento, tal como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Vulnerabilidades de los equipos electrónicos

ID	Nombre	Vulnerabilidad
ID_01	Raspberry Pi CM3	Daño permanente a tener voltaje superior a 12 VDC
ID_02	Arduino Nano	Daño permanente a tener voltaje superior a 16 VDC
ID_03	Módulo RS-485	Daño permanente a tener voltaje superior a 5 VDC
ID_04	Sensor Dfrobot TS01	Daño permanente a tener voltaje superior a 24 VDC
ID_05	Pantalla HMI NEXTION	Daño permanente a tener voltaje superior a 5 VDC
ID_06	PULSADOR INDUSTRIAL (VERDE-ROJO)	No
ID_07	LED INDICADOR	No

	INDUSTRIAL	
ID_08	INTERRUPTOR ON-OFF	No
ID_09	Convertor de potencia KRIDA con entrada pwm	Daño en la tarjeta si ingresa más de 5 VDC en la entrada de alimentación digital
ID_10	Lámparas halógenas de radiación infrarroja	No

Fase 4: Evaluación de riesgos

Calculo de probabilidad

En la tabla 4 se establece un valor cuantitativo para describir el alcance de las amenazas.

Tabla 4. Valores de cuantificación

Cuantitativo	Descripción
1	La amenaza se presenta una vez al año.
2	La amenaza se presenta una vez al mes.
3	La amenaza se presenta una vez a la semana.

A continuación, en la tabla 5 se establece un valor para cada amenaza de acuerdo al nivel de probabilidad:

Tabla 5. Amenazas con niveles de probabilidad

Amenaza	Probabilidad
Cortocircuito	1
Arco eléctrico	1
Electrocución	1
Sobrecarga	3
Incendio y explosión debido a cortos circuitos	1

Calculo de impacto

En la tabla 6, se establece un valor cuantitativo para describir el alcance del impacto que puede ocasionar la amenaza en la empresa.

Tabla 6. Valores de cuantificación para establecer el nivel de impacto

Cuantitativo	Descripción
--------------	-------------

1	El daño derivado de la amenaza no tiene consecuencias relevantes para la empresa
2	El daño derivado de la amenaza tiene consecuencias relevantes para la empresa
3	El daño derivado de la amenaza tiene consecuencias graves y relevantes para la empresa

A continuación, en la tabla 7 se establece un valor de impacto para cada amenaza de acuerdo al nivel de impacto de la tabla 6:

Tabla 7. Nivel de impacto de las amenazas

Amenaza	Impacto
Cortocircuito	1
Arco eléctrico	3
Electrocución	1
Sobrecarga	2
Incendio y explosión debido a cortos circuitos	3

Fase 6: Cálculo de riesgo

Para el cálculo del grado de riesgos se utiliza la siguiente ecuación:

$$riesgo = probabilidad \times impacto$$

Quedando los cálculos de la siguiente manera:

Tabla 8. Nivel de riesgo para cada amenaza

Amenaza	Riesgo	Grado
Cortocircuito	1	Bajo
Arco eléctrico	3	Medio
Electrocución	1	Bajo
Sobrecarga	6	Alto
Incendio y explosión debido a cortos circuitos	3	Medio

De la tabla 8 se determina que existe un riesgo alto de sobrecargas en el sistema.

Resultados de valores obtenidos

Tabla 9. Valores de los resultados obtenidos en las amenazas y riesgos

#	Amenaza	Consecuencia en equipos	Consecuencia en personas	Grado de Riesgo
1	Cortocircuito	Daño permanente	Quemaduras y electrocución	Bajo (1)
2	Arco eléctrico	Daño y quema permanente	Quemaduras, muerte	Medio (6)
3	Electrocución	-	Lesiones, muerte	Bajo (1)
4	Sobrecarga	Daño y quema permanente	Electrocución	Alto (6)
5	Incendio y explosión debido a cortos circuitos	Destrucción	Lesiones, muerte	Medio (3)

Fase 5: Control de riesgos

De los resultados obtenidos, se planifica un control de riesgos en base a implementación de protecciones y recomendaciones establecidas según las normas IEC 898, 947, CEI 479-84 y IEC 60364.

ARCO ELECTRICO

Primero el riesgo de arco eléctrico que, pese a tener la probabilidad de ocurrencia relativamente baja este tiene gran impacto en el caso que se llegara a suceder y se tiene que tomar una medida de prevención.

- Las conexiones eléctricas y tarjetas electrónicas deben son perfectamente aisladas, etiquetadas y separadas entre sí a una distancia prudencial para evitar el arco eléctrico, como se ve en la figura siguiente.
- Se instala una caja eléctrica de protección para proteger a los circuitos eléctricos de agentes como el polvo y corrosión cuya medida es de 30x30cm como la que se muestra a continuación

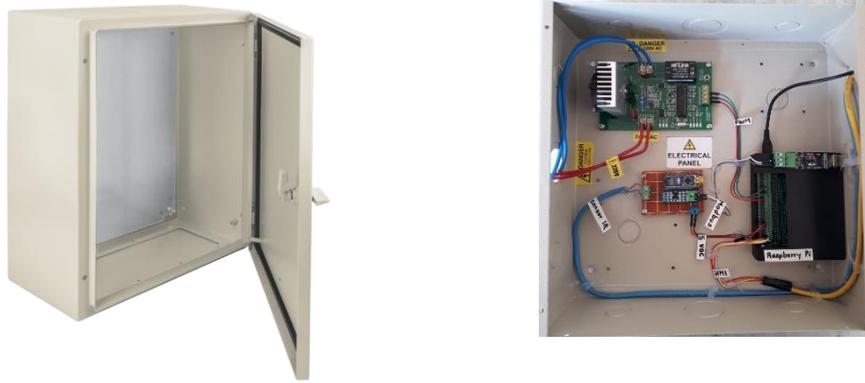


Ilustración 2. Caja de protección eléctrica

- Se sugirió en el manual de usuario, realizar una limpieza de polvo en los cables y tarjetas electrónicas periódicamente. Por lo menos una vez cada año.

SOBRETENSIONES

- Se instala un breaker o disyuntor 220V para prevenir las consecuencias de las sobretensiones, como establece la norma Normas IEC 898 y 947 el cual debe estar alejado de las personas una distancia de 2.5 metros



Ilustración 3. Breaker de 220 V

- Se instala una puesta a tierra para evitar que descargan eléctricas sobre el cuerpo humano.

ELECTROCUCIONES

- Se sugiere que al momento en el que se requiera revisar los circuitos electrónicos de control utilizar los equipos adecuados tales como: máscara, gafas, guantes, calzado aislante para evitar los riesgos de electrocuciones
- Leer el manual de usuario.

INCENDIO O EXPLOSIÓN

- Los cables de las lámparas generadores deben estar perfectamente aisladas y evitar chispas que lleguen a tocar el pegamento de la suela.
- Deben además estar alejadas de la suela tanto como la estructura del horno lo permita.

Finalmente, en la tabla 10 se presenta una lista de chequeo de la instalación eléctrica y sistema electrónico de control para verificar si se cumplen con control de riesgos analizado. En base a las normas IEC 898 y 947.

Tabla 10. Listado de verificación del control riesgos

Lista	CUMPLE	NO CUMPLE	NO APLICA
Las targetas y modulos electrónicos se encuentran aislados en el momento de los trabajos eléctricos.	X		
Existe la debida conexión a tierra de los equipos eléctricos.	X		
Los conductores están debidamente aislados.	X		
Existe dispositivos de protección de sobrecargas	X		
Las lámparas mantienen su debida ubicación.	X		
Existe señalización de peligros en el área de trabajo.	X		
El tiempo de exposición de una persona a temperatura mayor de 38°C es el adecuado.			X

ANEXO 14

INFORME DE ANÁLISIS DE DISPOSITIVO DE CONTROL POTENCIA

Tema:

Análisis de funcionamiento del dispositivo de control de potencia Leading Edge Dimmer implementado en el horno eléctrico.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general:

Analizar del funcionamiento del dispositivo de control potencia Leading Edge Dimmer implementado en el horno eléctrico.

1.2. Objetivos:

- Comprender el funcionamiento teórico de un dispositivo regulador de potencia por control de ángulo de disparo
- Calcular el valor voltaje teórico rms del dispositivo para diferentes valores de pwm
- Determinar la forma de onda de la entrada y salida del dispositivo para diferentes valores de pwm por medio de un osciloscopio

2. Introducción

El presente informe se realizó con la finalidad de comprender el funcionamiento del dispositivo de control de potencia Leading Edge Dimmer, el cual controla la potencia a partir de una señal PWM sincronizado con la red eléctrica excitando un triac mediante pulsos de ancho variable sincronizados por línea. Se usa un transistor bipolar operando como fuente de corriente y como llave.

El dispositivo consta de tres etapas como es el circuito de cruce por cero, circuito de control y circuito de potencia. Con estos tres circuitos integrados por este dispositivo se puede controlar la onda sinusoidal según el Angulo alfa.

3. Materiales

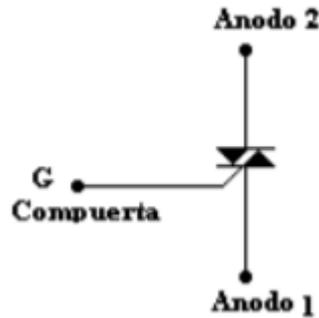
- Dispositivo Leading Edge Dimmer
- Osciloscopio
- Cables de conexión
- Fuente 110 VAC
- Lámpara 110 VAC
- Raspberry Pi 3

4. Marco Teórico

Triac

El triac es un dispositivo semiconductor de tres terminales que se usa para controlar el flujo de corriente promedio a una carga, con la particularidad de que conduce en ambos sentidos y puede ser bloqueado por inversión de la tensión o al disminuir la corriente por debajo del valor de mantenimiento. El triac puede ser disparado independientemente de la polarización de puerta, es decir, mediante una corriente de puerta positiva o negativa. Cuando el triac conduce, hay una trayectoria de flujo de corriente de muy baja

resistencia de una terminal a la otra, dependiendo la dirección de flujo de la polaridad del voltaje externo aplicado. [1]



[1]

Optoacoplador Moc

Un optoacoplador, también llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor activado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac. De este modo se combinan en un solo dispositivo semiconductor, un fotoemisor y un fotorreceptor cuya conexión entre ambos es óptica. Su funcionamiento se basa en el empleo de un haz de radiación luminosa para pasar señales de un circuito a otro sin conexión eléctrica [1]

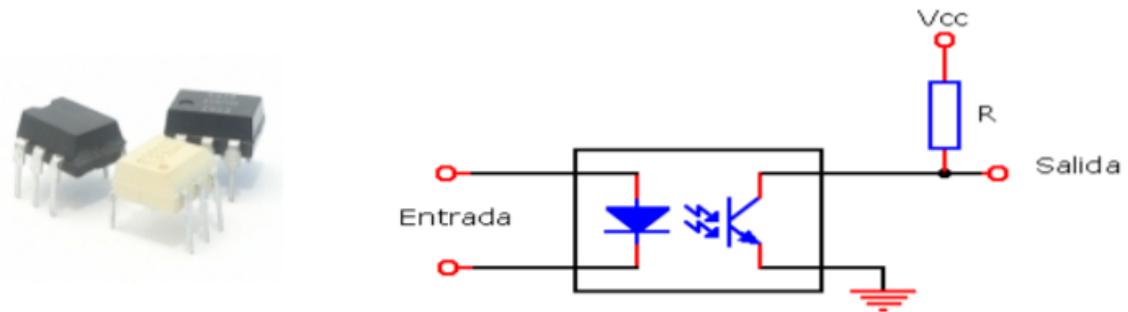


Figura1. Circuito típico opto acoplador[1]

Microcontrolador PIC

Los microcontroladores son computadores digitales integrados en un chip que cuentan con un microprocesador o unidad de procesamiento central (CPU), una memoria para almacenar el programa, una memoria para almacenar datos y puertos de entrada salida. El funcionamiento de los microcontroladores está determinado por el programa almacenado en su memoria. Este puede escribirse en distintos lenguajes de programación. Además, la mayoría de los microcontroladores actuales pueden reprogramarse repetidas veces. [1]

PWM

Por sus siglas en ingles Pulse Width Modulation , significa Modulación por ancho de pulso, está formada por una señal de onda cuadrada que no siempre tiene la misma

relación entre el tiempo que está en alto y el tiempo que está en bajo. El tiempo que la señal se encuentra en el nivel alto, se lo denominada como tiempo on (Ton) mientras que el tiempo que está en nivel bajo se lo denomina tiempo off (Toff). La suma del tiempo on y el tiempo off es el periodo de la señal (T). Una de las características más importante de una señal PWM es su Dutty Cycle o Ciclo de Trabajo, ya que este es el que varía el PWM. [2]

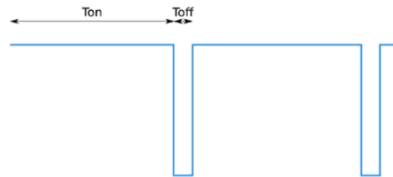


Figura 2. Forma de onda de una señal PWM.[2]

El ciclo de trabajo no es otra cosa que la relación entre el tiempo de encendido y el periodo o tiempo total del PWM:

$$DC = \frac{T_{ON}}{t} \times 100\% \quad (1)$$

Detector de cruce por cero

Un detector de cruce por cero indica básicamente cuando una señal cambia de polaridad. Utiliza principalmente optoacopladores, diodos y resistencias como se observa en la figura donde la función del puente de diodos además de rectificar la señal ac de entrada es la de proteger la entrada del optoacoplador. [1]

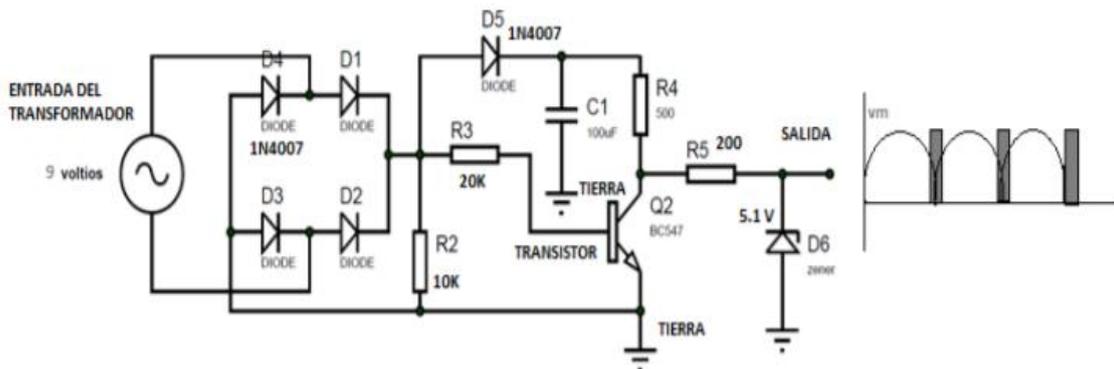


Figura 3. Detector de cruce por cero. [3]

Circuito de control

El circuito de control es el que recibe los pulsos de cruce por cero para tener una señal de referencia y controlar el ángulo de disparo del triac, por medio de retardos calculados de acuerdo a la señal pwm también recibidos desde un dispositivo maestro. Se utiliza un microcontrolador donde se programa el algoritmo donde se calcula el retardo del ángulo de disparo del triac en función de la señal de entrada pwm.

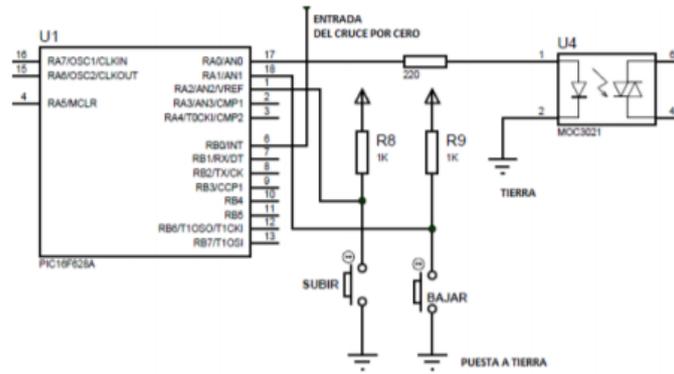


Figura 3. Esquema de un circuito de control. [1]

Circuito de potencia

El circuito de potencia es donde se genera el disparo del triac para controlar la carga. Ejecuta las ordenes realizadas por el circuito de control y opera con corrientes y tensiones altas. Está constituido por un triac, resistencias y la carga.

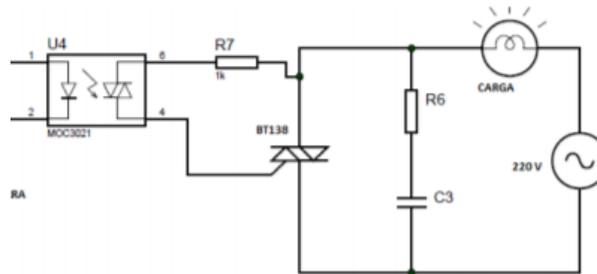


Figura 4. Esquema de un circuito de potencia [1]

5. Características del dispositivo de control de potencia

5.1. Especificaciones

PWM 16A AC Leading Edge Dimmer es un dispositivo de alto rendimiento para líneas de corriente alterna de 50Hz y 60Hz, controlado a través de la señal de entrada PWM para una fácil conexión con un dispositivo maestro. Diseñado para controlar la alta potencia de cargas resistivas e inductivas[4], en la tabla 1 se puede observar las características de este dispositivo:

Tabla 1. Especificaciones de dimmer Leading Edge[4]

Especificaciones	Valor
Fuente de alimentación externa	No
Frecuencia de PWM	Hasta 10 Khz
Rango de voltaje de entrada	100 – 240 VAC
Frecuencia de voltaje de línea de entrada	50 Hz-60 Hz
Nivel de entrada PWM	3.3 VDC / 5 VDC
Corriente máxima	16 A
Dimensiones	80 mm x 130 mm
Protección contra sobrecalentamiento	Si

En la figura 1, se observa una ilustración del dispositivo dimmer Leading Edge.

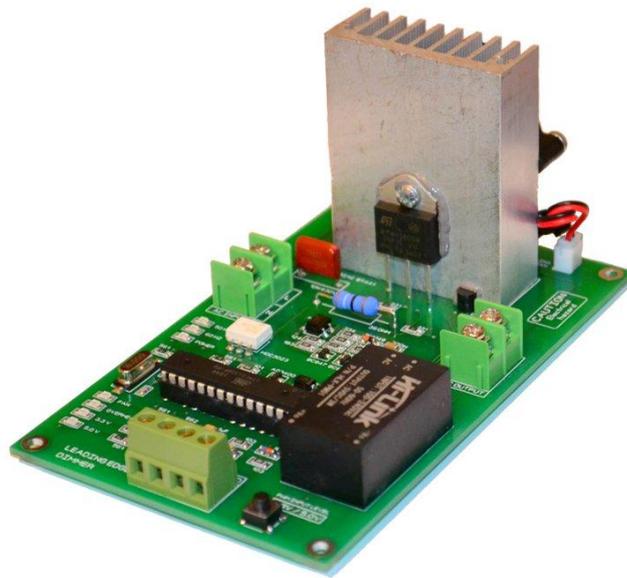


Figura 5. Dispositivo Leading Edge Dimmer

5.2. Diagrama del dispositivo

A continuación, en la figura 6 se tiene un diagrama de bloques que muestra el esquema del dispositivo de control de potencia el cual está dividido en circuito detector de cruce por cero, circuito de control y circuito de potencia.

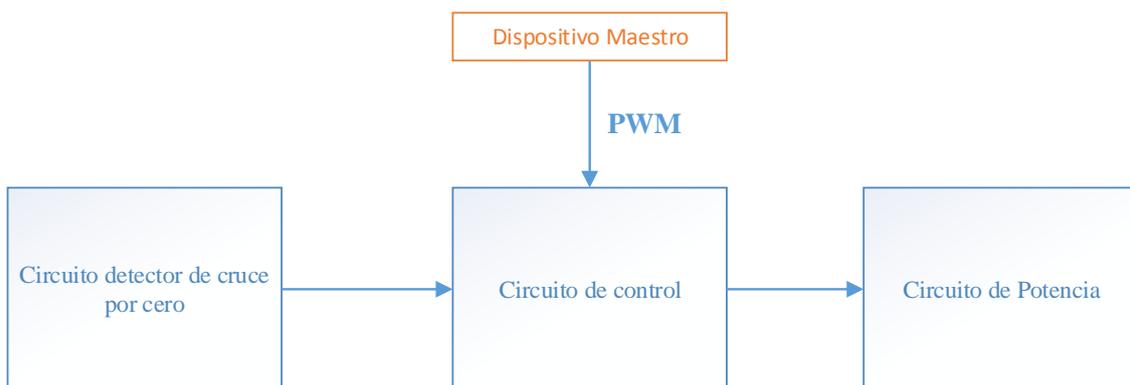


Figura 6. Diagrama de bloques del dispositivo de control de potencia

5.3. Identificación de circuitos en la placa del dispositivo

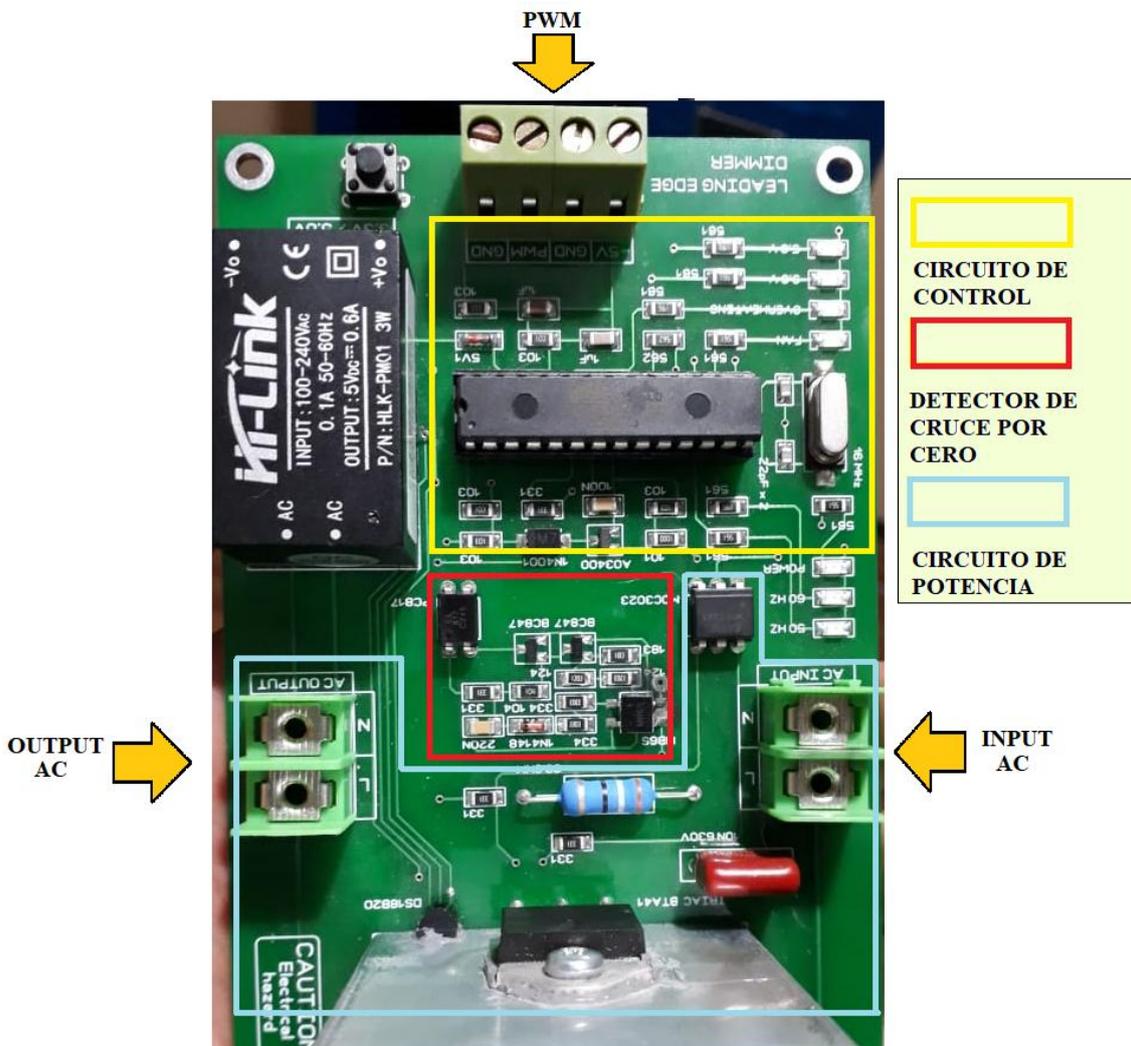


Figura 8. Placa de dispositivo de control de potencia

6. Cálculos

6.1. Cálculo del período de un ciclo

La frecuencia de la línea de corriente alterna es 60Hz, entonces para determinar el periodo de ciclo de la onda reemplazamos en la siguiente ecuación:

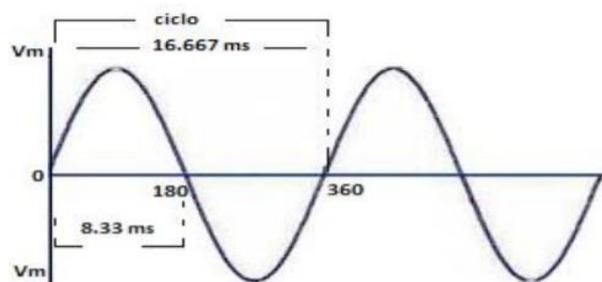


Figura 9. Forma de onda de CA en 60 =Hz

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60\text{Hz}} = 16.667 \text{ ms}$$

Y la mitad del ciclo es:

$$\frac{T}{2} = \frac{16.667 \text{ ms}}{2} = 8.33 \text{ ms}$$

6.2. Calculo del valor RMS de la onda senoidal de corriente alterna

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{120}{\sqrt{2}} = 84.85$$

6.3. Calculo del valor RMS para una onda de ca cortada con un ángulo alfa

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \left(180^\circ - \alpha + \frac{\sin(2 * \alpha)}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Si $\alpha = 0$

$$V_{rms} = \frac{120}{\sqrt{2}} \left(180^\circ - 0 + \frac{\sin(2 * 0)}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$V_{rms} = 84.85$$

Si $\alpha = 45$

$$V_{rms} = \frac{120}{\sqrt{2}} \left(180^\circ - 45 + \frac{\sin(2 * 45)}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$V_{rms} = 73.60$$

Si $\alpha = 90$

$$V_{rms} = \frac{120}{\sqrt{2}} \left(180^\circ - 90 + \frac{\sin(2 * 90)}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$V_{rms} = 60$$

Si $\alpha = 135$

$$V_{rms} = \frac{120}{\sqrt{2}} \left(180^\circ - 135 + \frac{\sin(2 * 135)}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$V_{rms} = 42.38$$

Si $\alpha = 180$

$$V_{rms} = \frac{120}{\sqrt{2}} \left(180^\circ - 180 + \frac{\sin(2 * 180)}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{rms} = 0$$

7. Resultados

A continuación, se determina la forma de onda de salida del dispositivo para los valores de señal PWM generado desde el ordenador raspberry pi 3:

e) PWM = 0%

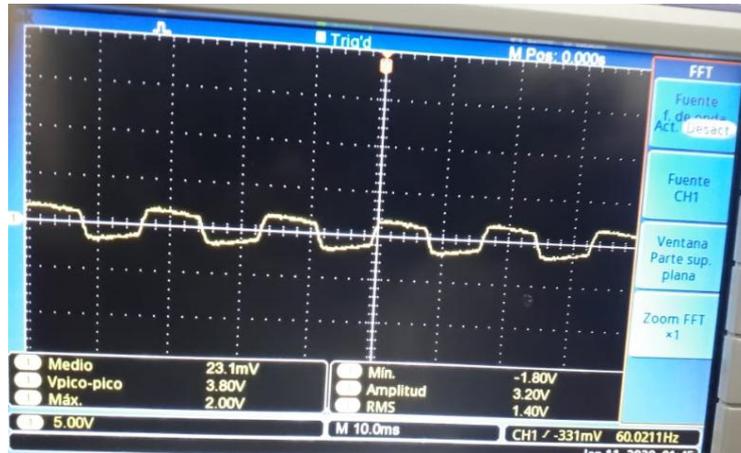


Figura 9. Forma de onda de salida de dispositivo cuando PWM=0%

Voltaje RMS = 9.89 V

$$\text{Escalando: } x = 1.40 * \frac{84.85}{12} = 9.89 \text{ V}$$

f) PWM = 25%



Figura 10. Forma de onda de salida de dispositivo cuando PWM=25%

Voltaje RMS = 44.62 V

$$\text{Escalando: } x = 6.31 * \frac{84.85}{12} = 44.62 \text{ V}$$

g) PWM = 50%

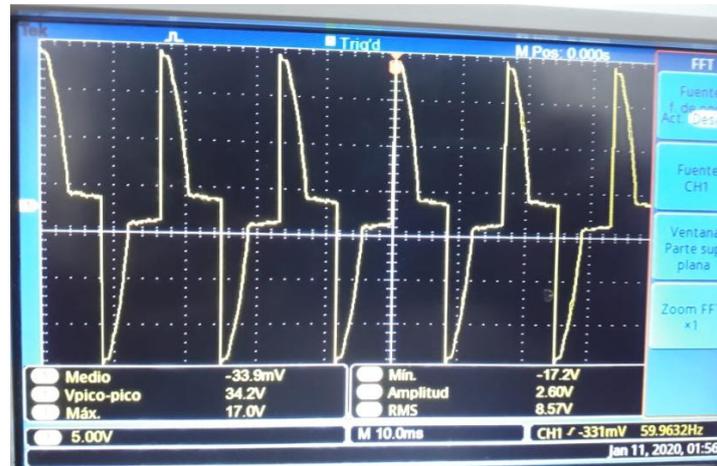


Figura 11. Forma de onda de salida de dispositivo cuando PWM=50%

Voltaje RMS = 60.59 V

$$\text{Escalando: } x = 8.57 * \frac{84.85}{12} = 60.59 \text{ V}$$

h) PWM = 75%



Figura 12. Forma de onda de salida de dispositivo cuando PWM=75%

Voltaje RMS = 71.41 V

$$\text{Escalando: } x = 10.1 * \frac{84.85}{12} = 71.41 \text{ V}$$

f) PWM = 100%

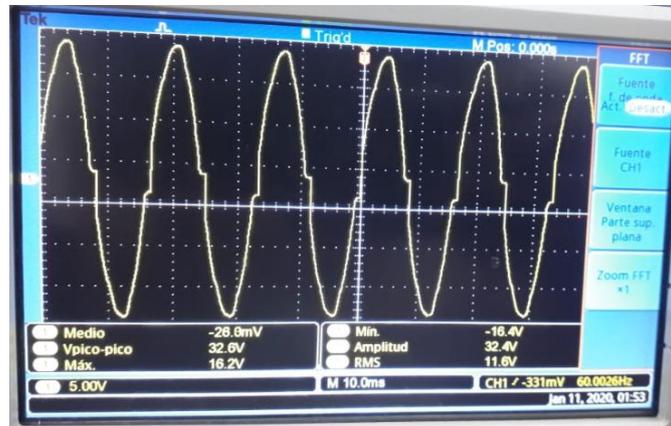


Figura 13. Forma de onda de salida de dispositivo cuando PWM=100%

Voltaje RMS = 82.04 V

$$\text{Escalando: } x = 11.6 * \frac{84.85}{12} = 82.84 \text{ V}$$

g) ONDA COMPLETA

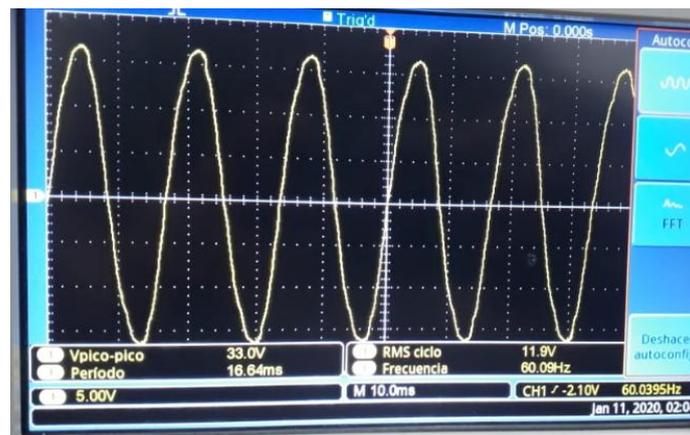


Figura 14. Forma de onda completa de CA

8. Conclusiones:

- Se comprendió el funcionamiento del dispositivo de control. Pues, este controla la potencia a partir de una señal PWM sincronizado con la red eléctrica excitando un triac mediante pulsos de ancho variable sincronizados por línea.
- Se calculó los valores del voltaje rms teóricos para los distintos ciclos de trabajo pwm: 0%, 25%, 50%, 75% y 100%.

- De acuerdo a las formas de ondas determinadas por el osciloscopio, el valor RMS cuando el ciclo de trabajo del pwm es igual 100% llega al 96% del valor del voltaje rms de la onda completa, y cuando el pwm es 0% el valor rms llega al 11% del valor rms de la onda completa.

Bibliografía:

- [1] Paredes Henry, “Electrónica de Potencia.” Jiliaca, p. 24, 2014.
- [2] “Que es PWM y para que sirve - Rincón Ingenieril.” [Online]. Available: <https://www.rinconingenieril.es/que-es-pwm-y-para-que-sirve/>. [Accessed: 11-Jan-2020].
- [3] “Detector de cruce por cero con optoacoplador.” [Online]. Available: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2018/04/detector-de-cruce-por-cero-con-optoacoplador-optoelectronica.html>. [Accessed: 12-Jan-2020].
- [4] “PWM 16A 3500W Triac Leading EDGE Dimmer 50HZ 60HZ de KRIDA Electronics en Tindie.” [Online]. Available: https://www.tindie.com/products/bugrovs2012/pwm-16a-3500w-triac-leading-edge-dimmer-50hz-60hz/?fbclid=IwAR2dlP6FVfptGn0aPD3LOjkx_cngZc_ptHEohv5-SeLocVrnsx7xTfAqZjY. [Accessed: 09-Oct-2019].

ANEXO 15

Análisis de Protección de Radiación Infrarroja

En este análisis se trata acerca de la incidencia de la radiación infrarroja sobre el cuerpo humano y las medidas que se tomaron para utilizarla en un horno reactivador industrial.

1. Espectro electromagnético

Es el rango total de toda la radiación electromagnética. Se extiende desde la menor longitud de onda rayos gamma hasta la mayor longitud de onda [1], como las ondas de radio como las ondas de radio, esto se puede observar en la figura 1.

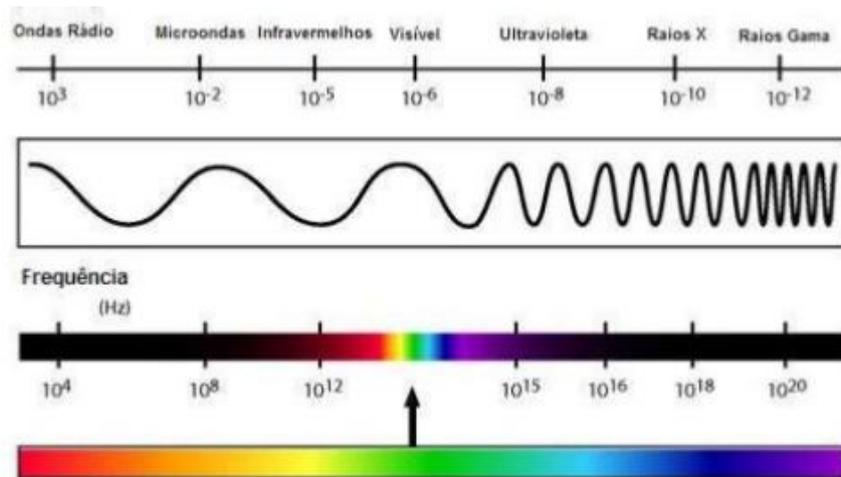


Figura 1. Espectro electrtomagnetic. [1]

2. Radiaciones Ionizantes y No ionizantes

Las radiaciones, atendiendo a su energía, se clasifican en radiaciones ionizantes y no ionizantes.[2]

- **Radiaciones ionizantes.** Corresponden a las radiaciones de mayor energía (menor longitud de onda) dentro del espectro electromagnético. Tienen energía suficiente como para arrancar electrones de los átomos con los que interaccionan, es decir, para producir ionizaciones.
- **Radiaciones no ionizantes.** Son aquellas que no poseen suficiente energía para arrancar un electrón del átomo, es decir, no son capaces de producir ionizaciones.

A continuación, en la tabla 1, se observa la clasificación de los tipos de radiación:

Tabla 1. Ondas Ionizantes y No Ionizantes

Radiaciones Ionizantes	Radiaciones No Ionizantes
<ul style="list-style-type: none">- C3smicos- Gamma- Rayos X	<ul style="list-style-type: none">- Ultravioleta- Luz visible- Infrarrojo- Microondas- Radio

Elaborado por: Investigador

3. Radiaci3n infrarroja

La radiaci3n infrarroja al igual que la radiaci3n visible y ultravioleta forman parte de la radiaci3n t3rmica que es generada como resultado de las transiciones energ3ticas de las mol3culas, los 3tomos y los electrones de una sustancia y se define como la parte del espectro electromagn3tico que se extiende desde alrededor desde 0.1 hasta 100 μ m. La radiaci3n emitida por los cuerpos a temperatura ambiente est3 dentro del rango del espectro de radiaci3n infrarroja, la cual se encuentra establecida desde 0.76 hasta 100 μ m. Los cuerpos empiezan a emitir radiaci3n visible cuando alcanzan temperaturas de 800°K. [3].

Cabe se1alar que la radiaci3n infrarroja es parte de la gama de ondas de radiaci3n no ionizante

3.1.El efecto de la irradiaci3n en el cuerpo humano

La epidermis tiene una superficie aproximada de 2 m², es efectivamente una cubierta que actúa como una barrera f3sica contra el exterior y al mismo tiempo contiene el sistema termorregulador (c3lulas receptoras sensibles a la temperatura), los vasos sangu3neos y las gl3ndulas sudor3paras. Cuando damos radiaciones a la epidermis tendr3 reacciones diferentes seg3n el tama1o y la longitud de la onda. Al contrario de la luz, las ondas cortas de los rayos x traspasan el cuerpo y son perjudiciales en grandes dosis.[4]

Con el aumento de la longitud de onda se disminuye la profundidad de penetraci3n, si irradiamos la epidermis con infrarrojoC (como se observa en la figura 2), este es absorbido completamente por la capa externa, donde est3n ubicados los receptores t3rmicos que reaccionan enviando al sistema nervioso central el impulso que permite el aumento de la circulaci3n sangu3nea y de la sudoraci3n.[4]

5μm		1μm 0,78μm		0,38μm 0,5μm		(x) metros ondas de radio
< INFRARROJO			LUICE VISIBLE		ULTRAVIOLETA >	
C	B	A		A	B	C

Figura 2. Espectro de la luz infrarrojo, luz visible y ultravioleta

4. Lámparas halógenas infrarrojas

El rango de longitudes de onda IR que se pueden replicar a través de las lámparas infrarrojas de cuarzo está entre 3.5 μm (ondas medias) y 0.9 μm (ondas cortas). Dependiendo del tipo de material a calentar, es posible utilizar diferentes tipos de longitudes de onda IR para lograr la máxima propagación de energía y obtener el proceso de calentamiento de manera más rápida y efectiva.

Las lámparas IR, en comparación con las formas tradicionales de calefacción, como el aire caliente, emiten una mayor cantidad de energía por unidad de superficie y esta energía puede enfocarse, concentrarse, dirigirse y reflejarse de manera similar a la luz. [5]

5. Protección de radiación infrarroja en hornos

Es muy importante para la salud del operador aislar las lámparas infrarrojas con un algún material de tal manera que este no recibe radiación infrarroja, pese a que estas emiten radiación no ionizante, lo más usado en la industria es la fibra de vidrio.

5.1.Fibra de vidrio

La fibra de vidrio se refiere a un grupo de productos hechos de hebras extremadamente finas de vidrio tejidas (entrelazadas) en varias configuraciones o formas diferentes para formar una tela o malla dando lugar a un material flexible, muy resistente al calor, ligero, resistente a muchos productos químicos, buen aislante eléctrico y barato. El vidrio es una mezcla de arena de cuarzo, sosa y cal. [6]



Figura 3. Fibra de vidrio

5.2. Escudo protector para la cámara de calentamiento

La cámara de calentamiento del horno reactivador está construida con fibra de vidrio, el cual es un aislante térmico y eléctrico que boquea el paso hacia el exterior de la radiación infrarroja emitidas por parte de las lámparas halógenas.

En la tabla 2 se pueden ver tres ilustraciones de la cámara de reactivado desde diferentes perspectivas.

Tabla 2. Cámara de reactivado con fibra de vidrio



Referencias

- [1] “Espectros electromagneticos 3.” [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/atridmolina19/espectros-electromagneticos-3>. [Accessed: 07-Jan-2020].
- [2] “Radiaciones ionizantes y no ionizantes.” [Online]. Available: http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/2radiaciones_ionizantes_y_no_ionizantes.html. [Accessed: 07-Jan-2020].
- [3] Y. Çengel and A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa*, Cuarta Edi. Mexico D.F: McGRAW-HILL, 2011.
- [4] “El efecto de la irradiación infrarroja en el cuerpo y su transmisión | Celsius Panel.” [Online]. Available: <http://www.celsiuspanel.it/es/efecto-irradiacion-infraroja-cuerpo-transmision/>. [Accessed: 07-Jan-2020].
- [5] “Tecnología IR | Lámparas infrarrojos - Helios Quartz.” [Online]. Available: <https://www.heliosquartz.com/prodotti/tecnologia-ir/?lang=es>. [Accessed: 25-Sep-2019].
- [6] “Fibra de Vidrio Que es, Usos, Fabricación, Telas, Mallas y Cables OPTicos.” [Online]. Available: <https://www.areatecnologia.com/materiales/fibra-de-vidrio.html>. [Accessed: 07-Jan-2020].

