

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO
AUTOMATIZADO PARA EL PROCESO DE CONCHADO
DE CHOCOLATE EN LA EMPRESA INDUSTRIAS SOL
NORTEÑO – JAÉN – PERÚ**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECÁNICO ELECTRICISTA**

**Autores : Bach. Luis Miguel Horna Martínez
Bach. Cristian Kenth Diaz Cercado**

Asesores : Ing. Herless Henyer Alberca Vásquez

JAÉN – PERÚ, SEPTIEMBRE, 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2019-SUNEDU/CD

ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día **04 de octubre del año 2019** siendo las 11:30 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: **Mario Félix Olivera Aldana**

Secretario: **Oscar Núñez Mori**

Vocal: **Lenin Franchescoleth Núñez Pintado**

para evaluar la Sustentación de:

- () Trabajo de Investigación
(**X**) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulada:

“Diseño e Implementación de un Prototipo Automatizado para el Proceso de Conchado de Chocolate en la Empresa Industrias Sol Norteño – Jaén – Perú”,


presentado por los egresados: **Bach. Cristian Kenth Diaz Cercado** y **Bach. Luis Miguel Horna Martinez** de la **Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica** de la Universidad Nacional de Jaén. Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

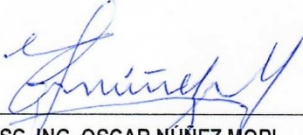
(**X**) Aprobar () Desaprobar (**X**) Unanimidad () Mayoría


Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---------------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | (18) |
| b) Muy bueno | 16, 17 | () |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 12:45 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.


M.SC. ING. MARIO FÉLIX OLIVERA ALDANA
Presidente Jurado Evaluador


M.SC. ING. OSCAR NÚÑEZ MORI
Secretario Jurado Evaluador


M.SC. ING. LENIN FRANCHESCOLETH. NÚÑEZ PINTADO
Vocal Jurado Evaluador

ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE ANEXOS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X
I. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Realidad problemática.....	12
1.2. Antecedentes.....	13
1.3. Justificación.....	14
1.4. Alcances.....	14
1.5. Bases teóricas.....	15
1.5.1. Materia prima.....	15
1.5.2. Manufactura del chocolate.....	16
1.5.3. Proceso de conchado.....	16
1.5.4. Fases del conchado.....	17
II. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo general.....	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
3.1. Modalidad de la investigación.....	19
3.2. Población y muestra.....	20
3.2.1. Población.....	20
3.2.2. Muestra.....	20

3.3.	Variables y operacionalización	20
3.3.1.	Variables del proyecto.....	20
3.3.2.	Operacionalización de variables.....	21
3.3.3.	Matriz de Consistencia.....	22
3.4.	Diseño de la investigación	23
3.5.	Técnicas para la recolección de información.....	23
3.6.	Procesamiento y análisis de información.....	23
3.7.	Materiales y equipos	24
3.7.1.	Materiales.....	24
3.7.2.	Equipos.....	24
3.7.3.	Software.....	24
3.8.	Flujograma metodológico para desarrollo de la tesis	26
3.9.	Metodología.....	27
3.9.1.1.	Temperatura en el proceso de conchado.....	27
3.9.2.	Reconocimiento de máquina conchadora de estudio.....	33
3.9.3.	Diseño conceptual del prototipo.....	35
3.9.4.	Selección y dimensionamiento de materiales electrónicos y eléctricos.....	39
3.9.5.	Diseño de estructura mecánica.....	50
3.9.6.	Presupuesto.....	52
3.9.7.	Conversión de resistencia a temperatura entre pt-100 y MAX31865.....	54
3.9.8.	Conversión de PWM en control PID a potencia de salida en CA.....	63
3.9.9.	Función de transferencia y sintonización del controlador.....	72
3.9.10.	Diseño del sistema de control y monitorización.....	75
3.9.11.	Desarrollo de pantalla HMI.....	77
3.9.12.	Construcción mecánica del prototipo.....	85
3.9.13.	Análisis económico del prototipo.....	90
IV.	RESULTADOS	92

4.1.	Temperatura de conchado con el sistema anterior	92
4.2.	Temperatura de configuración para él control PID.....	92
4.3.	Estructura y etapas del prototipo.....	93
4.4.	Constantes para conversión ADC en MAX31865	94
4.5.	Modo de comunicación SPI para el MAX31865 y Arduino Uno.....	94
4.6.	Datos de conversión y constantes de proporcionalidad para el actuador.....	95
4.7.	Interfaz gráfica.....	96
4.8.	Construcción mecánica y ensamble final de componentes finales	97
4.9.	Puesta en funcionamiento y prueba final	99
4.10.	Comparación de temperaturas	100
V.	DISCUSIÓN.....	102
5.1.	Temperatura de conchado con el sistema anterior.....	102
5.2.	Temperatura de configuración para él control PID.....	102
5.3.	Estructura y etapas del prototipo.....	102
5.4.	Constantes para conversión ADC en MAX31865	103
5.5.	Modo de comunicación SPI para el MAX31865 y Arduino Uno.....	103
5.6.	Datos de conversión y constantes de proporcional para el actuador	103
5.7.	Comparación de temperaturas.....	103
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
6.1.	Conclusiones.....	104
6.2.	Recomendaciones	106
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	AGRACEDIMIENTOS.....	111
	DEDICATORIA.....	112
	ANEXOS.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Variables y descripción.	20
Tabla 2	Operacionalización de la variable independiente.	21
Tabla 3	Operacionalización de variable dependiente	21
Tabla 4	Softwares aplicados en el desarrollo del prototipo.....	24
Tabla 5	Temperatura de conchado de chocolate semi amargo para taza.....	28
Tabla 6	Composición para chocolate de acuerdo a formulación F-1 55%.....	29
Tabla 7	Temperatura inicial de ingredientes en las pruebas M3 y M4.....	32
Tabla 8	Requerimientos solicitados por la empresa.	35
Tabla 9	Requerimientos básicos propuestos por los tesistas.	36
Tabla 10	Selección del sensor.	40
Tabla 11	Seleccionador del ordenador Raspberry Pi.....	41
Tabla 12	Selección de placas de desarrollo con microcontrolador embebido.....	43
Tabla 13	Selección de pantalla para el desarrollo de la HMI.	44
Tabla 14	Selección del transmisor para el sensor RTD - PT100 de 3 hilos.	45
Tabla 15	Tabla característica del SSR seleccionado.	46
Tabla 16	Fuente ATX de 530 W.	47
Tabla 17	Valores máximos y mínimos de corriente según UNE - 20 -160 -5- 523.2004.	49
Tabla 18	Materiales utilizados para la construcción del prototipo.....	51
Tabla 19	Presupuesto en materiales para construcción del prototipo.....	52
Tabla 20	Comportamiento del circuito de potencia respecto del PWM del Arduino.....	65
Tabla 21	Valores a ingresar en programación para prueba experimental de PID.	68
Tabla 22	Constantes de proporcionalidad encontradas en la sintonización.	75
Tabla 23	Costos aproximados de dispositivos análogos en automatización y control.	91
Tabla 24	Temperatura medidas manualmente para las muestras M1, M2, M3 Y M4.	92
Tabla 25	Estructura del prototipo desarrollado.	93
Tabla 26	Constantes de configuraciones para el MAX31865.	94
Tabla 27	Constantes sintonizadas para el controlador PID.	95
Tabla 28	Temperaturas e índices de error entre sistema anterior y prototipo PID.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diseño de la investigación en la tesis.....	23
Figura 2	Flujograma metodológico del desarrollo de la tesis.....	26
Figura 3	Sistema de control y monitoreo de temperatura a mejorar.	27
Figura 4	Comportamiento de la temperatura para M1.	30
Figura 5	Temperatura medida manualmente para M2.....	31
Figura 6	Temperatura medida manualmente para M3.....	32
Figura 7	Temperatura medida manualmente para M4.....	33
Figura 8	Etapas necesarias para cumplir los requerimientos establecidos.	38
Figura 9	Entradas y salidas del prototipo.	39
Figura 10	Sensor de temperatura RTD - PT100 de 3 hilos.	40
Figura 11	Ordenador de desarrollo Raspberry Pi 3B+	42
Figura 12	Paquete pantalla táctil de 7pulgadas para Raspberry Pi.....	44
Figura 13	Diseño 3D de chapa metálica para ensamblar pantalla HMI.	51
Figura 14	Diagrama de bloques del proceso de conversión dentro del MAX31865.....	55
Figura 15	Valores leídos en el monitor serial a 115200 baudios de transmisión.	59
Figura 16	Modificación de librería Adafruit_Max31865.cpp.	60
Figura 17	Temperatura final de calibración con un margen de error de 0.1 °C.....	60
Figura 18	Lectura de un byte transmitido en comunicación SPI.....	61
Figura 19	Polaridad del SCLK establecido en el registro del microcontrolador.....	62
Figura 20	Curva amarilla bytes de dirección enviados por el SDI.....	62
Figura 21	Curva amarilla bytes de temperatura recibidos por el SDO.....	62
Figura 22	Frecuencia de salida de los pines 3, 9, 10 y 11 del Arduino Uno.	63
Figura 23	Frecuencia de PWM de los pines salidas 6 y 5 del Arduino Uno.	63
Figura 24	Generación de ciclos irregulares y distorsiones en CA producido por PWM de control.....	66
Figura 25	Diagrama de bloque control PID.....	66
Figura 26	PID calcula su acción de control basándose en el pasado, presente y futuro....	67
Figura 27	Algoritmo de control PID que debe resolver el controlador en 1 segundo.	68
Figura 28	Control PID acciona la salida como una señal PWM de baja frecuencia.	71
Figura 29	Conmutación de SSR en cruce por cero a un ciclo de trabajo equivalente en DC.	71

Figura 30	Método de control de SSR disparo en cruce por cero.	71
Figura 31	Temperatura sensada línea azul versus contundencia del actuador línea azul. .	72
Figura 32	Diagrama de bloques de la función de transferencia del controlador PID.....	73
Figura 33	Registro de temperatura en funcionamiento del control PID a sintonizar.	74
Figura 34	Sintonizado de función de transferencia para el control PID.....	74
Figura 35	Diagrama de bloques funcional del prototipo.	75
Figura 36	Diagrama de conexión eléctrica en software Fritzing.....	76
Figura 37	Diagrama de circuito e alimentación eléctrica.	76
Figura 38	Diagrama de funcionamiento general de HMI.....	77
Figura 39	Instalación del sistema operativo.	78
Figura 40	Diseño del panel principal.....	79
Figura 41	Diseño de panel para el control PID.	80
Figura 42	Diseño de panel historial y monitoreo.	80
Figura 43	Diseño de panel de ayuda.....	81
Figura 44	Programación de panel principal.....	82
Figura 45	Programación de panel para el control PID.	82
Figura 46	Programación del panel para el control PID con alarma y generador de gráficos.	83
Figura 47	Programación del panel frontal de historial y registros.	84
Figura 48	Botones para encendido y apagado de audio de ayuda.	85
Figura 49	Trazado, cortado y limado de chapa metálica a plegar.	85
Figura 50	Plegado de la chapa metálica.	86
Figura 51	Perforado de tablero.	86
Figura 52	Cortado de tablero para el anclaje de los dispositivos.	87
Figura 53	Pintado y acabados del tablero para el prototipo.	87
Figura 54	Doblado de tubo galvanizado para construir brazo de soporte para tablero HMI.	88
Figura 55	Soldado y perforado para anclaje de tablero y brazo.	88
Figura 56	Tratamiento de masillado y pintado de brazo de soporte.....	89
Figura 57	Adaptación mecánica de tablero de acuerdo con la fuente y llave térmica de protección.	89
Figura 58	Ensamble de tapa en tablero de alimentación y protección.	90
Figura 59	SCLK establecido por Arduino mientras CS se mantiene en 0.	94

Figura 60	El dato enviado del conversor es leído en el flanco de bajada del CSLK.....	95
Figura 61	Menú HMI en funcionamiento durante un proceso real.	96
Figura 62	Funcionamiento del panel de historial y monitoreo.	96
Figura 63	Montaje, conexión y configuración de dispositivos eléctricos y electrónicos. .	97
Figura 64	Montaje mecánico del prototipo y tablero de control eléctrico.....	97
Figura 65	Montaje del prototipo para realizar pruebas de funcionamiento.....	98
Figura 66	Montaje final del prototipo.....	98
Figura 67	Comportamiento de la temperatura con el control PID implementado.....	99
Figura 68	Diferencia de temperatura de un lote de conchado antes y después de la implementación del prototipo.	101

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Matriz de consistencia de tes	113
Anexo 2	Panel fotográfico.....	114
Anexo 3	Inactivación térmica de la Salmonella ssp. en el proceso de conchado.....	126
Anexo 4	Temperatura en °C durante medición manual M1.....	127
Anexo 5	Temperatura en °C durante medición manual M2.....	128
Anexo 6	Temperatura en °C durante medición manual M3.....	129
Anexo 7	Temperatura en °C durante medición manual M4.....	130
Anexo 8	Tabla para calibración de sensor RTD – PT100 de 3 hilos.....	131
Anexo 9	Hoja de características y esquema de conexión de relé SSR.....	132
Anexo 10	Planos de estructura mecánica del prototipo (cotas en metros).....	133
Anexo 11	Conexión de sensor RTD – PT100 de 3 hilos a transmisor MAX31865.....	136
Anexo 12	Código para registrar datos para la sintonización de controlador PID.....	137
Anexo 13	Sintonizado de controlador PID en MATLAB.....	139
Anexo 14	Tiempos de establecimiento de temperatura en la máquina conchadora.....	140
Anexo 15	Certificado de calibración de Osciloscopio	141
Anexo 16	Hoja de característica de la Raspberry Pi 3B+.....	142
Anexo 17	Pantalla táctil Raspberry Pi de 7 pulgadas.....	143
Anexo 18	Comunicación ethernet y wifi desde la Raspberry a dispositivos con sistema operativo externos.....	144

RESUMEN

Esta investigación muestra el diseño e implementación de un prototipo automatizado para el control proporcional, integral y derivativo (PID) con una interfaz humano máquina (HMI), basado en software y hardware libre de bajo costo, que permite el eficiente y oportuno monitoreo y control de temperatura en el proceso de conchado de chocolate de la empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L., en la ciudad de Jaén, Perú, para hacer frente a la problemática que genera un sistema de control obsoleto y registro de temperatura manual dependiente de la observación y criterio humano. Para ello, primeramente, se evaluó la temperatura con el sistema manual y se determinó los factores que influyen en el comportamiento de esta variable, luego se realizó un diseño conceptual para definir los requerimientos y etapas necesarios para la construcción del prototipo, seguidamente se desarrolló el diseño electromecánico y dimensionamiento de los componentes necesarios teniendo como dispositivo principal un ordenador Raspberry, después se realizaron pruebas experimentales que ayudaron a calcular las constantes de funcionamiento para los componentes de transmisión y conversión, lo siguiente fue desarrollar la programación, interfaz gráfica y montaje electromecánico, para finalmente hacer las pruebas de funcionamiento, dando como resultado un error en el control PID menor a ± 2 °C.

Palabras clave: Prototipo, Raspberry Pi, HMI, PID, temperatura, chocolate, conchado

ABSTRACT

This research shows the design and implementation of an automated prototype for proportional, integral and derivative control (PID) with a human machine interface (HMI), based on low-cost free software and hardware, which allows efficient and timely monitoring and control. of temperature in the chocolate shell process of the Industrias Sol Norteño EIRL company, in the city of Jaén, Perú, to address the problem generated by an obsolete control system and manual temperature recording dependent on human observation and criteria. For this, firstly, the temperature was evaluated with the manual system and the factors that influence the behavior of this variable were determined, then a conceptual design was made to define the requirements and stages necessary for the construction of the prototype, then the Electromechanical design and dimensioning of the necessary components having as a main device a Raspberry computer, then experimental tests were carried out that helped to calculate the operating constants for the transmission and conversion components, the following was to develop the programming, graphic interface and electromechanical assembly, to finally perform the functional tests, resulting in an error in the PID control less than $\pm 2^{\circ} \text{C}$.

Keywords: Prototype, Raspberry Pi, HMI, PID, temperature, chocolate, shell.

I. INTRODUCCIÓN

Según el INEI (2018), la producción de cacao en el Perú ha ido incrementándose escalonadamente, hasta llegar al apogeo máximo de 121 800 toneladas métricas en el 2017; gracias a ello, la provincia de Jaén – Cajamarca también se ha convertido en un importante centro de acopio de la producción cacaotera de la cuenca del río Marañón y alrededores. Esta realidad ha permitido que unas cuantas medianas y pequeñas empresas (PyMES) vean en esta situación una oportunidad aprovechable, para empezar a dar un valor agregado a las habas de cacao transformándolas generalmente en chocolate; tal es el caso de la empresa Industrias Sol Norteño, que produce chocolate para taza desde el año 2014; iniciando su proceso desde la recepción y selección de materia prima, hasta el sellado y empaquetado final de las barras de chocolate.

Para realizar el proceso esta empresa y la mayoría de PyMES que inician este emprendimiento, generalmente cuentan con toda la maquinaria tradicional de la producción chocolatera nacional; es decir, máquinas en su mayoría con un nivel de control manual, ya que el operario es el que realiza todas las tareas de supervisión, control y decisión, a base de automatismos cableados, sistema de control on-off, monitorización analógica y registro de parámetros de forma manual (Kaber y Endsley, 2004).

Sin embargo, es sabido que en procesos industrializados como el anterior, la temperatura es una de las variables que más se mide, quiere decir que es una de las más importantes; eso, porque casi todos los fenómenos físicos se ven afectados por ésta. Para ello tecnológicamente se han desarrollado numerosos dispositivos para medirla y controlarla (Corripio y Smith, 1991).

En ese contexto, la automatización e inclusión de nuevas tecnologías digitales en los procesos industriales constituye uno de los objetivos y alternativas más importantes de las empresas, que buscan siempre competitividad en un entorno cambiante y agresivo. Pero la dificultad está en que hoy en día, los sistemas modulares sofisticados que permiten el control

de un proceso industrial o de tan solo una variable como la temperatura, en su mayoría representan un costo demasiado elevado, que obligan a empresas como Industrias Sol Norteño, a renunciar a un sistema que le permita progresar.

Bajo estas deficiencias se planteó una realidad problemática que enfoque una etapa del proceso específico, con la finalidad de proponer y desarrollar una alternativa de solución, con miras a que sea replicable, en otras etapas o incluso en el contexto de otras variables.

1.1. Realidad problemática

Dentro del proceso de elaboración de chocolate para taza en la Empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L., Jaén, Cajamarca, Perú, específicamente en el subproceso de conchado, existe una deficiente adaptación de automatismos eléctricos para fines de monitoreo y control de temperatura, dificultando el cumplimiento de estándares de calidad que se requieren para el producto final; esto debido a la inexistencia de un sistema automatizado que sea configurable de acuerdo con las necesidades de procesamiento, por lo que el personal de planta recurre a procedimientos de accionamiento y registros manuales, tanto para las medidas, usando un termómetro convencional y tomando apuntes durante periodos establecidos, como para el control, actuando sobre el potenciómetro de un termostato que funciona como interruptor cuando la temperatura a controlar llega a su valor establecido. Esta forma de operar el sistema ocasiona un aumento en el índice de error, ya que todo se reduce al nivel de percepción del operario, que en muchas oportunidades olvida monitorear en los periodos establecidos o ajusta inadecuadamente el potenciómetro, lo que representa un potencial peligro, porque el proceso no cuenta con un adecuado sistema de protección y aviso, dejando abierta la posibilidad a la ocurrencia de accidentes. Finalmente, esta problemática tiene serias consecuencias en el producto, tales como la disminución de calidad y dificultad para que la empresa participe en diferentes mercados nacionales e internacionales, que exigen productos con requerimientos específicos.

Por lo tanto, resulta relevante diseñar e implementar un sistema (prototipo acoplable) automatizado con pantallas HMI basado en Raspberry pi de plataforma libre, que garanticen: el control y supervisión de la temperatura en el proceso de conchado de la mencionada empresa, que sea configurable, de fácil manipulación y que su implementación sea menos costosa que los típicos sistemas de automatización industrial.

1.2. Antecedentes

En ese contexto Žáková y Rábek (2018), desarrollaron un sistema de control remoto de un prototipo denominado Planta Thermo-Opto-Mechanical en Slovak University of Technology, donde la atención estuvo en disminuir el costo de implementación del sistema que controlaba temperatura, intensidad luminosa y las revoluciones por minuto (RPM) de un ventilador; por eso, se tuvo que sustituir las computadoras ordinarias por una tarjeta de computadora desarrolladora Raspberry Pi, integrándolo con un microcontrolador esclavo para el desarrollo del control de realimentación PID. El proyecto demostró que a pesar que las computadoras de una sola placa tienen sus limitantes en cuanto al rendimiento, para la aplicación en procesos donde no intervienen muchas variables se pueden considerar como una sustitución suficiente y conveniente para la tecnología industrial normalmente usada.

Raspberry pi en los últimos años se ha convertido en uno de los sistemas embebidos basado en hardware libre más grande de todo el mundo. Se han desarrollado proyectos en campos como: la electrónica, la automatización, robótica, impresión 3D, teniendo como elemento principal una tarjeta Raspberry Pi (BBVAOPEN4U, 2015). Por lo que las referencias sobre aplicaciones en base a Raspberry pi es extensa y adaptable a todos los procesos donde se requiera automatizar, generando así facilidades para mejorar la transferencia tecnológica en la industria local.

En otro aspecto, Acevedo, Mejía, Acosta, Valencia y Penagos (2017), evidenciaron que el conchado de chocolate es uno de los procesos más extensos y se divide en tres fases: seca, plástica y líquida. Allí se dan cambios en la concentración de los compuestos antioxidantes, debido a las reacciones que ocurren por efecto de la temperatura del proceso; además que la regulación de dicha variable influye directamente en la capacidad antioxidante de la cobertura de chocolate semi amargo, considerando que a 45 °C durante 8 horas es más eficiente que el mismo proceso a 60 °C.

En el contexto peruano también se han presentado proyectos relacionados con la optimización en el control de temperatura, utilizando dispositivos embebidos de plataforma libre:

Como en el caso de Lima Cervera (2015) que implementó un control PID en un microcontrolador PIC para un esterilizador seco. El sistema se diseñó para regular la temperatura mediante el control PID digital y control de potencia PWM con una resistencia

de 700 W como actuador. Si bien está diseñado para fines de esterilización de materiales quirúrgicos, se relaciona en gran medida a la implementación que se quiere lograr, ya que el principio de control sobre el actuador (resistencia eléctrica) es una de las características más importantes de la presente propuesta.

1.3. Justificación

La implementación de un prototipo automatizado para dar solución a un problema crítico en el creciente sector industrial de la provincia de Jaén, demuestra la necesidad del mejoramiento desde el nivel de transferencia tecnológica, que permita obtener productos finales con estándares y buena calidad. Todo esto exige poner en práctica las competencias adquiridas en las áreas de automatización y control, propios de la carrera profesional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Nacional de Jaén, dando soluciones profesionales pertinentes en el proceso de conchado de chocolate, con ideas innovadoras y el desarrollo de aplicaciones especializadas.

El resultado de la implementación de este proyecto será de aporte social y busca el mejoramiento continuo de un proceso que tiene como materia prima el cacao, un producto de importante y reconocida producción en la provincia de Jaén y de toda la macro región norte del Perú, que necesita ser apalancado desde el mejoramiento del proceso productivo, con el fin de hacerlo más competitivo, aplicando nuevas tecnologías de automatización y control, que no generen gastos excesivos en mantenimiento y permita que las pequeñas industrias ingresen a mercados cada vez más exigentes.

1.4. Alcances

En la presente tesis se diseñó e implementó un prototipo automatizado para el control y monitoreo de temperatura en una máquina conchadora de chocolate, desde el área temática de automatización y control y la aplicación de dispositivos electrónicos de software y hardware libre. Por lo tanto, el prototipo es una extensión acoplable para mejorar el control y monitoreo de la temperatura de conchado, sin analizar o modificar aspectos del diseño misma de la máquina, o estudiar matemáticamente la transferencia de calor en la misma.

1.5. Bases teóricas

La etapa de conchado es un punto crítico en el proceso de elaboración de chocolate para taza, ya que aquí puede verse afectada la capacidad antioxidante del cacao, la que contribuye a la obtención de las características organolépticas de la masa de chocolate (Acevedo et al., 2017). A continuación, se incluirá información relativa a la automatización y control de la etapa de conchado.

1.5.1. Materia prima.

El cacao es la materia prima fundamental del chocolate, de él se obtiene el cacao en sólido, la manteca de cacao y licor de cacao, que se combinan con azúcar, edulcorantes, leche (dependiendo del chocolate) y otros aditivos para distintos tipos de producto (Afoakwa, 2010).

La diversidad porcentual en las cantidades de los componentes en el producto final de acuerdo con las recetas que tenga cada fabricante, hace que el chocolate sea un producto con composiciones cambiantes dentro del mercado, pero que sin duda deben ajustarse a la NTP-CODEX STAN 87:2013 (Bastidas, 2017).

Según, Codex Stan 87 – 1981 (citado en Díaz, 2017) la denominación de chocolate a la taza, debe tener los siguientes rangos en composición: al extracto seco, no menos del 35% de extracto seco total de cacao, del cual 18%, debe ser manteca de cacao y 14 % por lo menos, extracto seco magro de cacao; también debe contener un mínimo porcentaje de harina o almidón de trigo, maíz o arroz.

También, Codex Stan 87 – 1981 (citado en Díaz, 2017) define:

El chocolate como el producto homogéneo, obtenido de la pasta de cacao o polvo de cacao, con azúcar y con mantequilla de cacao, y con la adición o no de sustancias aromatizantes permitidas, de productos lácteos, de agentes emulsionantes, antioxidantes, y conservadores permitidos. (p27)

En la Empresa Industrias Sol Norteño, se elabora chocolate par taza en base a tres formulaciones, cuyos ingredientes se encuentran en los siguientes rangos porcentuales: licor de cacao (42%- 58%), manteca de cacao (13% - 10%), azúcar rubia (45% - 30 %), cocoa (2%), lecitina (0.3 %) (Díaz, 2017).

1.5.2. Manufactura del chocolate.

Las características fundamentales que se deberían cuidar en el chocolate son: su sabor, aroma y textura. Por ello, para lograr mejoras en estas propiedades organolépticas y evitar sabores desagradables se sigue varios pasos de procesamiento que le influyen directamente; de los cuales, los más importantes son: la fermentación, el secado de las semillas de cacao, el tostado del cacao crudo y el proceso de conchado del chocolate (Beckett, 2009).

Los procesos de manufactura de chocolate generalmente comparten características comunes, como: mezclado, refinado, conchado, temperado, moldeado y desmoldeado (Afoakwa, 2010). Si bien este se inicia luego de haber procesado su materia prima, en este caso convertido en pasta de cacao y licor de cacao. La mayoría de industrias chocolateras implementan sus procesos desde la recepción de las habas de cacao con el fin de darle un tratamiento más personalizado.

1.5.3. Proceso de conchado.

El buen sabor del chocolate depende de varios procesos realizados correctamente. Y es en el conchado donde se tiene la última oportunidad para lograr mejorarlo de acuerdo a los requerimientos del producto (Beckett, 2009).

Este es uno de los procesos más extensos, se divide en tres fases: seca, plástica y líquida. Allí se dan cambios en la concentración de los compuestos antioxidantes, debido a las reacciones que ocurren por efecto de la temperatura (Acevedo et al., 2017).

De acuerdo a su propósito se divide en dos etapas, que tiene lugar en una misma máquina. El primero es el desarrollo del sabor, eliminando indeseados ácidos volátiles, lo segundo es convertir el chocolate de una pasta seca, espesa o en polvo en un líquido de flujo libre que puede ser usado para obtener el producto final (Beckett, 2019).

Con respecto a la temperatura de conchado según (Acevedo et al., 2017), a 45°C no se presenta un efecto significativo sobre la capacidad antioxidante del producto y de acuerdo con la evaluación sensorial obtenida, a pesar de la reducción encontrada en la capacidad antioxidante a 60 °C, en ninguno de los tratamientos evaluados (60°C y 45°C) se presentan diferencias sensorialmente perceptibles.

Generalmente la agitación de la masa se da a una temperatura de 50 °C, por lo que se reduce el contenido aproximadamente 0,7 %, adicionalmente, se eliminan compuestos indeseados como: ácidos, aldehídos y cetonas. Todo esto sucede en la fase seca. Sin embargo, en la etapa plástica, se desarrolla el aroma y la plasticidad de la masa. Finalmente en la fase líquida, se agrega la grasa faltante, según receta y se emulsiona para obtener la viscosidad deseada, según el tipo de chocolate (Tobergte y Curtis citado en Acevedo et al., 2017)

1.5.4. Fases del conchado.

Existen tres fases en el conchado y tienen marcadas diferencias en la condición físicas del producto mezclado, condiciones de temperatura, esfuerzo o gasto energético y cambios químicos de la mezcla.

En la fase seca se alimenta los ingredientes hacia la máquina conchadora en forma de polvo, granulado y en grasa. Esta última junto a la acción de mezclado convertirán a la masa en desmenuzable y permitirá una disminución en el contenido de humedad, llevando consigo muchos sabores no deseados. Para ello; también, la temperatura debe aumentarse lentamente para permitir que la humedad se escape pero sin arriesgarse a provocar aglomeraciones (Beckett, 2009).

En la fase plástica, la energía aplicada hacia la mezcla por la acción mecánica del equipo en el final de la fase seca e inicio de la fase pastosa es muy alta, esto provoca un aumento acelerado de la temperatura. Por lo que el agua de la chaqueta de la conchadora debería mantenerse uno pocos grados centígrados por debajo de la temperatura de la masa, con el fin de acercarse a la constante de temperatura requerida para el proceso. Este aumento repentino de la temperatura, tiene un efecto considerable en el sabor final del chocolate; quiere decir, que es particularmente crítico, por lo que el termostato de la chaqueta de agua debe ser capaz de reaccionar ante estos cambios bruscos (Beckett, 2009).

Por último, la fase líquida es la de menor duración, en él se mezclan los últimos ingredientes de la receta final como el emulsificante, como la lecitina. Beckett (2009), señala que: cuando el conchado llega con alta temperatura a esta fase, puede requerir un tiempo adicional para permitir que el chocolate se enfríe para poder agregar el emulsificante ya que la leticiana es menos eficiente cuanto la temperatura está alrededor de los 60 °C.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo automatizado para el monitoreo y control de temperatura en el proceso de conchado de chocolate, usando Raspberry Pi como dispositivo programable, en la empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L., Jaén, Perú.

2.2. Objetivos específicos

- 1) Estudiar el comportamiento de la temperatura en el proceso de conchado dentro del contexto de la empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L.
- 2) Diseñar un prototipo automatizado para el control de temperatura basado en lógica PID.
- 3) Implementar los sensores y actuadores al sistema de control de temperatura.
- 4) Desarrollar un sistema de monitoreo HMI que permita gestionar la información de los sensores para la visualización de datos, generar tendencias de comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo y la visualización de alarmas que se presentan durante el proceso de conchado de chocolate.
- 5) Validar la correcta operación del prototipo desarrollado mediante pruebas de funcionamiento.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Modalidad de la investigación

Se realizó una investigación aplicada, ya que el proyecto estuvo orientado a solucionar un problema específico que corresponde a las necesidades del monitoreo y control de temperatura en la planta procesadora de chocolate de la empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L. en la ciudad de Jaén.

La investigación de gabinete permitió ampliar conocimientos en: proceso de conchado del chocolate, el tipo de control aplicado PID, conceptos sobre aplicación de nuevas tecnologías, hardware, software, conversor analógico y digital, relé de estado sólido (SSR); que son vitales para el diseño e implementación del prototipo. Las fuentes fueron libros, tesis, hojas de características, revistas, artículos e información facilitada por la empresa.

Se realizó una investigación de carácter experimental, debido a que los dispositivos de medición, actuación y conversión son sometidos a condiciones de pruebas en entornos controlados, para validar la calibración de los mismos y determinar el desarrollo óptimo de la investigación.

Se realizó una investigación de campo en la empresa, con el fin de obtener información sobre el proceso de conchado, equipo de conchado, arquitectura de control de temperatura instalada y rangos de temperatura aplicando distintos dispositivos de medición.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población.

La población está constituida por el área de proceso de conchado de chocolate en la empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L.

3.2.2. Muestra.

La muestra está constituida por una máquina conchadora rotativa vertical en él que se quiere implementar el prototipo automatizado.

3.3. Variables y operacionalización

3.3.1. Variables del proyecto.

Tabla 1

Variables y descripción.

Tipos	Variabes	Descripción
Variable independiente	Proceso de conchado de chocolate	Proceso extenso donde se dan cambios en la concentración de los compuestos antioxidantes del chocolate, debido a las reacciones que ocurren por efecto de la temperatura
Variable dependiente	Prototipo automatizado basado en control PID	Prototipo automatizado que permite controlar y monitorear la temperatura de proceso, utilizando para ello un control del tipo PID y para la monitorización un ordenador con HMI de visualización.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Operacionalización de variables.

Tabla 2

Operacionalización de la variable independiente.

Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumentos
Proceso de conchado de chocolate	Características de temperatura para el procesamiento en la máquina de conchado de la Empresa	Constantes de temperatura referenciados en el proceso de conchado	Libros, revistas, tesis y formulaciones de la Empresa.
		Taza de procesamiento del chocolate en la Empresa	Registro manual de batch/día
	Industrias Sol Norteño	Temperatura del proceso Empresa	Termómetro láser, digital y analógico
		Capacidad de carga del chocolate en la Empresa	Balanza electrónica

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Operacionalización de variable dependiente.

Variabes	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Prototipo automatizado basado	Diseño del prototipo	Temperatura del proceso con el sistema de control on/off	Plantillas de registros, entrevista y termómetros
		Parámetros electromecánicos del diseño	Cuadros comparativos, data sheets, bases teóricas y documentos.

en control PID Desarrollo del HMI y construcción del prototipo	Programación	Software IDE de Arduino y MyOpenLab
	Visualización	Pantalla táctil LCD, laptop y software de programación
	Alcances de comunicación	Red Ethernet de área local y red Wlan de router
	Tiempo de muestreo	Pantalla HMI del prototipo.
	Tiempo de establecimiento	Pantalla HMI del prototipo.
	Capacidad de almacenamiento de datos	Pantalla HMI del prototipo

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Matriz de Consistencia.

En el Anexo 1 se muestra la matriz de consistencia de la investigación.

3.4. Diseño de la investigación

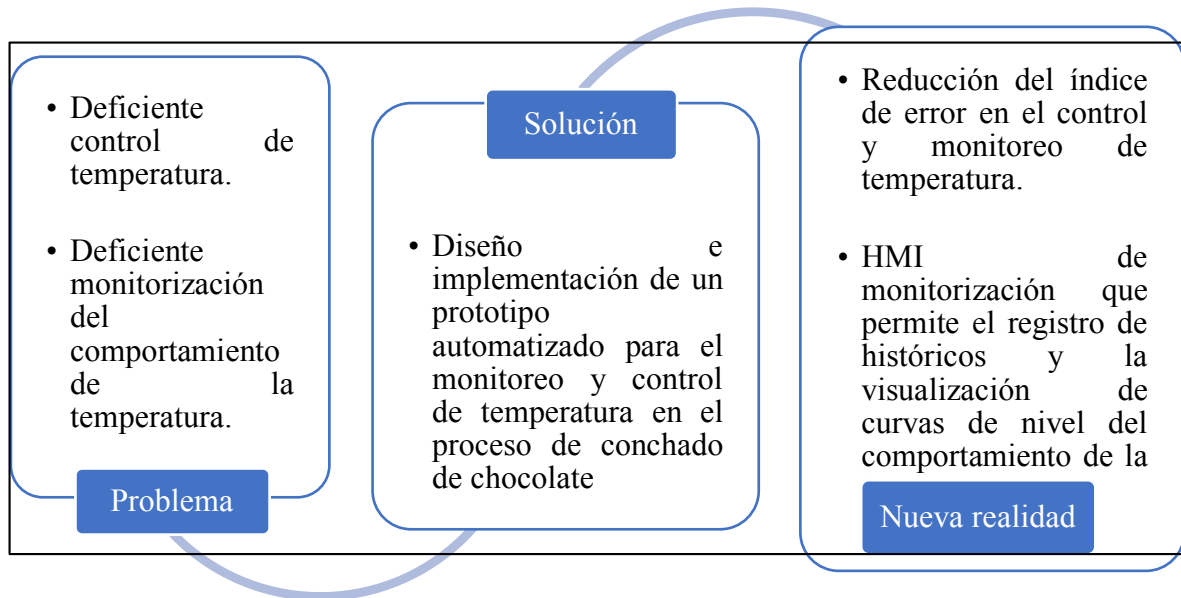


Figura 1 Diseño de la investigación en la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Técnicas para la recolección de información

- 1) Se solicitó toda la información de registro de temperatura del proceso de conchado a la empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L.
- 2) Se hizo la visita de campo para observar y realizar las mediciones de temperatura durante el proceso de conchado de chocolate.
- 3) Se recurrió a la revisión de documentos, libros, revistas, artículos, tesis de grado, normativas y luego se procedió a seleccionar la información requerida por la investigación.
- 4) Se recopiló información de pruebas de funcionamiento de dispositivos del prototipo leídas por un osciloscopio.

3.6. Procesamiento y análisis de información

Para todas las formas de recopilación de datos e información se siguió los siguientes pasos para su procesamiento:

- 1) Organización de la información.
- 2) Revisión de la información.

- 3) Análisis de la información y su aplicación en la solución del problema.
- 4) Interpretación de los resultados.

3.7. Materiales y equipos

3.7.1. Materiales.

Los materiales, son los dispositivos y programas de computadora necesarios para la implementación del prototipo incluyen: sistemas embebidos, pantalla de visualización, sensor de temperatura, microcontrolador para el control PID y otros dispositivos electrónicos que se detallan más adelante en los subtítulos: selección y dimensionamiento de materiales y en presupuestos.

3.7.2. Equipos.

- Osciloscopio.
- Termómetro sumergible para alimentos, termómetro láser, termómetro de mercurio.
- Multímetro.
- Laptop.
- Herramientas de taller mecánico.

3.7.3. Software.

Tabla 4

Softwares aplicados en el desarrollo del prototipo.

Nombre del software	Formato	Aplicación
Word Office	.docx	Redactar el proyecto de investigación
TeraTerm	.exe	Leer el puerto serial del Arduino y lo convierte a registros del tipo Excel para generar un historial de temperatura
Excel	.xlsx	Graficar las curvas con los datos registrados del historial

Fritzing	.fzz	Diseñar el esquemático de conexión de los dispositivos electrónicos
Arduino	.ino	Diseñar el código de programación en lenguaje C++ para leer los datos del sensor PT100
MyOpenLab	.jar	Diseñar el programa control y visualización PID a través de bloques lógicos.
Matlab	.mat	Sintonizar la curva de temperatura a través del método de Ziegler y Nichols para hallar las constantes PID
AutoCAD	.dwg	Diseño mecánico en 2D del tablero y el brazo de soporte del prototipo para la máquina de conchado de chocolate
SolidWorks	.	Diseño mecánico en 3D del tablero
	SLDPRT	

Fuente: Elaboración propia.

3.8. Flujograma metodológico para desarrollo de la tesis

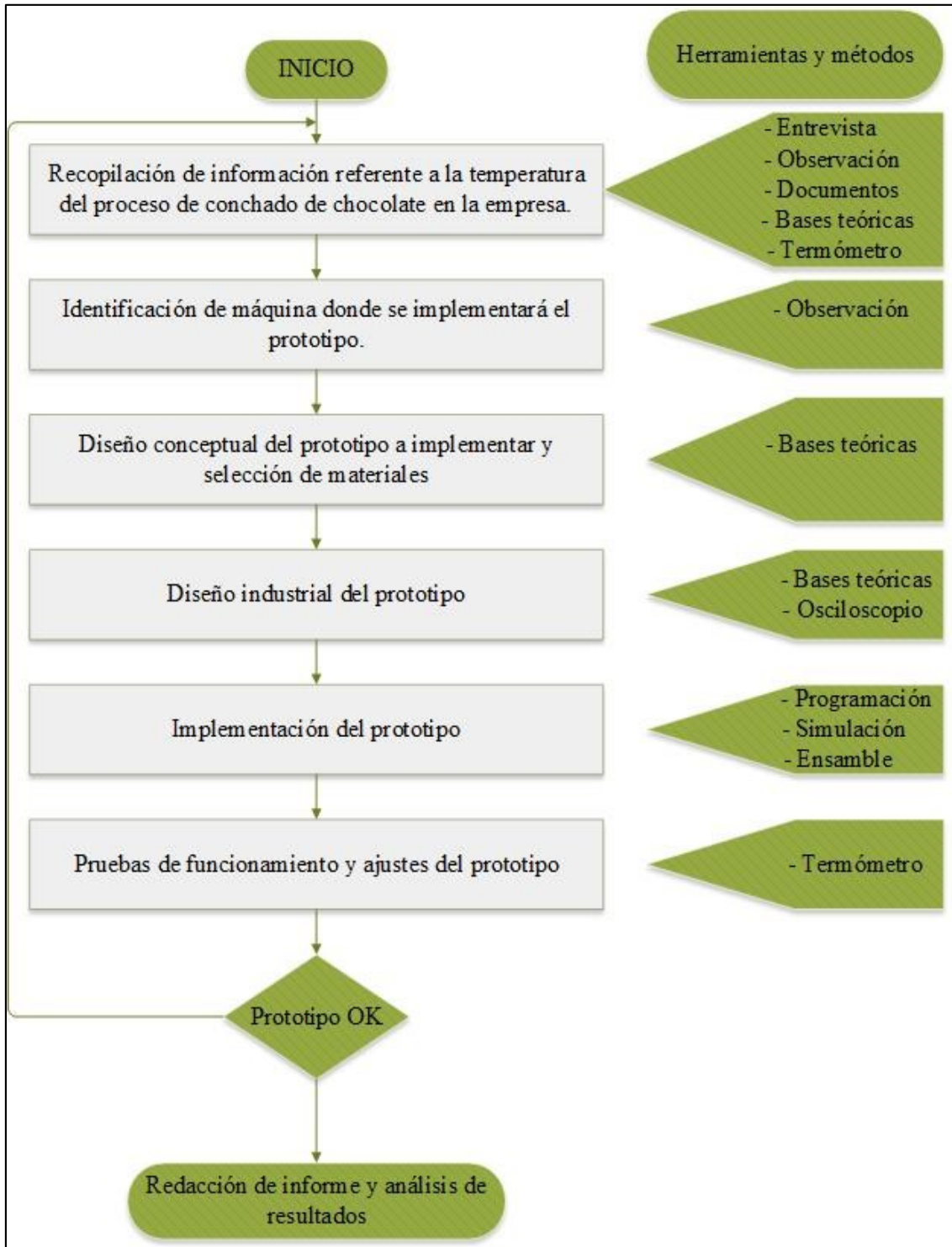


Figura 2 Flujograma metodológico del desarrollo de la tesis.

Fuente: Elaboración propia.

3.9. Metodología

3.9.1.1. Temperatura en el proceso de conchado.

La temperatura en el proceso de conchado es crítica porque en condiciones controladas en valores constantes no tan altos (40 °C – 55 °C) permite la eliminación de humedad, ácidos volátiles indeseados y el desarrollo de propiedades organolépticas del chocolate; pero si se eleva demasiado (de 60 °C a más), también se puede evacuar elementos que le dan al chocolate sus propiedades antioxidantes que son muy requeridas por los consumidores ya que ayuda en mantener la buena salud (Acevedo et al., 2017).

La Empresa Industrias Sol Norteño E.I.R.L., Jaén, Perú, realiza el proceso de conchado con dos máquinas, las mismas que trabajan con temperaturas de 45 – 60 °C. Prolongando el proceso por un tiempo de 5 a 6 horas por lote de 50 kg cada uno, para obtener tabletas de chocolate para taza que mantengan características organolépticas y microbiológicas conforme a las establecidas en las fichas técnicas de las formulaciones (Díaz, 2017).

3.9.1.2. Temperatura medida y controlada con el sistema modificado.

El sistema de control a cambiar consta de:

- Termostato (ver fotografía 1 en anexo 2).
- Resistencia eléctrica para calentar como actuador (ver fotografía 2).
- Termómetro digital sumergible y laser para alimentos (ver fotografía 3).
- Termómetro analógico de máquina conchadora (ver fotografía 4)

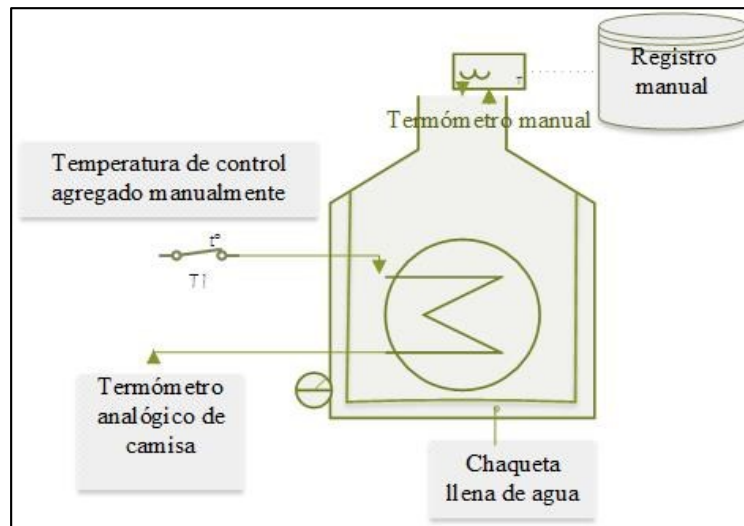


Figura 3 Sistema de control y monitoreo de temperatura a mejorar.

Fuente : Elaboración propia.

Según Krapf y Gantenbein-Demarchi (2010), las habas de cacao a menudo están expuestas a microorganismos durante los primeros procesos (fermentado y secado) y quizá puede que se contamine con algunos patógenos como *Salmonella ssp.* La producción de chocolate incluye subprocesos donde intervienen altas temperaturas (tostado, conchado), donde podríamos reducir la cantidad de estos microorganismos patógenos. Algunas curvas de reducción de *Salmonella ssp.* para el chocolate oscuro muestran una reducción significativa para temperaturas de 50 °C a partir de las 7.5 horas de proceso, que puede ser suficiente en el proceso en cuestión al considerar que estos patógenos en su mayoría son eliminados en el proceso de tostado a 120 °C (ver anexo 3).

De acuerdo con las bases teóricas y el proceso existente en la planta Industrias Sol Norteño, un aproximado a la temperatura ideal para el conchado de chocolate oscuro semi amargo (chocolate para taza), sería de acuerdo con la tabla 5.

Tabla 5

Temperatura de conchado de chocolate semi amargo para taza.

Temperatura teórica según (Acevedo et al, 2017)		Temperatura medida y registrada en planta Sol Norteño		Temperatura recomendada de acuerdo con (Acevedo et al, 2017) y (Krapf y Gantenbein-Demarchi, 2010).	
Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Temperatura (°C)
8	45	6	40	7	55

Fuente : Elaboración propia.

En la actualidad se están registrando medidas erróneas ya que el operario encargado del proceso de conchado, toma notas del termómetro analógico de la máquina, el mismo que censa la temperatura del agua contenida en la chaqueta (aproximado a 40 °C), más no la del chocolate, que siempre está a mayor temperatura, porque suma a ella la energía brindada a la masa por la acción de mezclado y fricción con las billas de refinado.

Por otro lado, los termómetros con lectura analógica tipo reloj tienen la dificultad de que su lectura es perturbada por la vibración de la máquina, por ello siempre se registran valores

aproximados de la temperatura del agua, generalmente es tomado como constante a 40 °C (ver fotografía 5 en anexo 2).

3.9.1.3. *Temperatura con medición manual.*

Se realizó la medición de la temperatura de conchado en planta, de acuerdo con condiciones normales de trabajo (lote de conchado habitual para obtener chocolate oscuro para taza), de acuerdo con la siguiente formulación:

Tabla 6

Composición para chocolate de acuerdo a formulación F-1 55%.

Ingrediente	Cantidad	Unidad
Manteca de cacao	7	kg
Pasta o licor de cacao	24	kg
Azúcar	30	kg
Cocoa	420	g
Otros edulcorantes	410	g

Fuente: Díaz (2017)

Se tomaron 4 muestras, de un proceso de conchado completo en cada una, tomando medidas en intervalos de 10 minutos. En las dos primeras muestras (M1 y M2), no se intervino durante el control de temperatura, simplemente se limitó al registro y observación de las acciones de control por parte del operario (encargado del proceso). Sin embargo, en las dos últimas muestras se decidió intervenir en la regulación del termostato ya que los niveles de temperatura de M1 y M2 eran demasiado altas y ponían en riesgo la seguridad del proceso y la calidad del producto.

Se consideró que: la temperatura inicial del equipo de conchado, se toma luego de que haya terminado de descargar el lote anterior, por lo que mantiene la temperatura aproximadamente a 40 ° C.

Para las muestras de M1 a M4 se realizó mediciones manuales con 3 tipos de instrumentos:

- Termómetro laser.
- Termómetro digital sumergible (calibrado).
- Termómetro analógico (de la máquina).

3.9.1.3.1. Muestras M1 y M2.

En la muestra M1 del sensado de chocolate el operario de la máquina graduó el potenciómetro del termostato a una temperatura de 40 C°. Al monitorizar los datos leídos por los termómetros y comparar las curvas de temperatura con respecto a la temperatura graduada se observó una gran variación ya que la temperatura medida rondaba los 80 C° duplicando así los rangos requeridos (ver figura 4 y anexo 4).

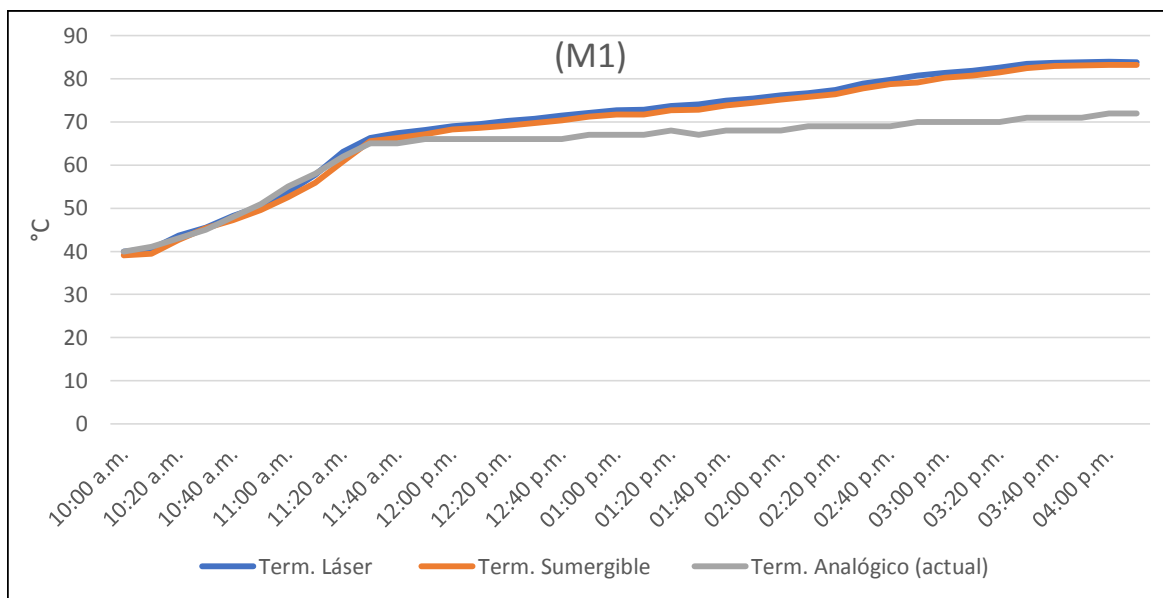


Figura 4 Comportamiento de la temperatura para M1.

Fuente: Elaboración propia.

En la muestra M2 al igual que M1 el operario de la máquina graduó el potenciómetro del termostato a una temperatura de 40 C°, pero al monitorizar los datos leídos por los termómetros y comparar las curvas de temperatura con respecto a la temperatura graduada se observó una gran variación ya que la temperatura medida rondaba los 80 C° (figura 5 y anexo 5).

Se observó que el termostato de la maquina no cuenta con regulación precisa, ya que el potenciómetro indica un valor diferente al de temperatura medida en el termómetro analógico (ver fotografía 1 en el anexo 2).

Las mediciones de temperatura del agua de la chaqueta son erróneas, ya que la temperatura que se quiere controlar es la del chocolate.

Al no existir un sistema que emita una alarma sobre las temperaturas elevadas como a las que se llegó en estas muestras (75 °C a más), hace que el sistema sea considerado como peligroso para la integridad de las personas y de la empresa.

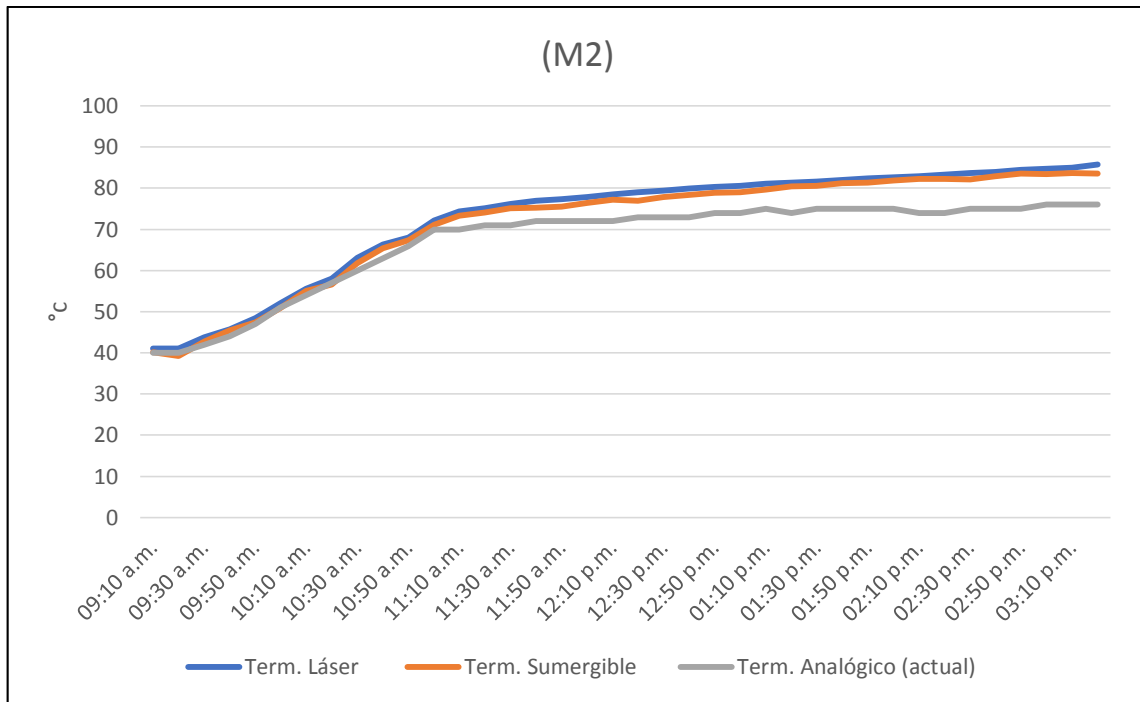


Figura 5 Temperatura medida manualmente para M2.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.1.3.2. Muestras M3 y M4.

Para las muestras M3 y M4 se intervino en la regulación del termostato. Al observar que no había disminución en la temperatura en M1 y M2, se procedió a retirar el potenciómetro del termostato (ver fotografía 8 en anexo 2).

Se consideró la temperatura inicial de la conchadora a 40 °C, debido a que en el intervalo de parada de la máquina no logra enfriar en su totalidad.

La regulación permitió estabilizar la temperatura del proceso de conchado, dentro del rango establecido (45 – 60 °C) (ver figura y anexo 6 y 7 para M3 y M4 respectivamente).

Se ingresaron los ingredientes previamente calentados en una estufa eléctrica con el fin de alcanzar una aproximación a la temperatura de conchado. Las temperaturas iniciales de cada ingrediente que se ingresó a la máquina fueron las siguientes:

Tabla 7

Temperatura inicial de ingredientes en las pruebas M3 y M4.

Ingredientes	Termómetro láser (°C)	Termómetro sumergible digital (°C)
Manteca de cacao (previamente calentada)	56	53.4
Pasta de cacao recién molida	50	49
Azúcar	28	27

Fuente : Elaboración propia.

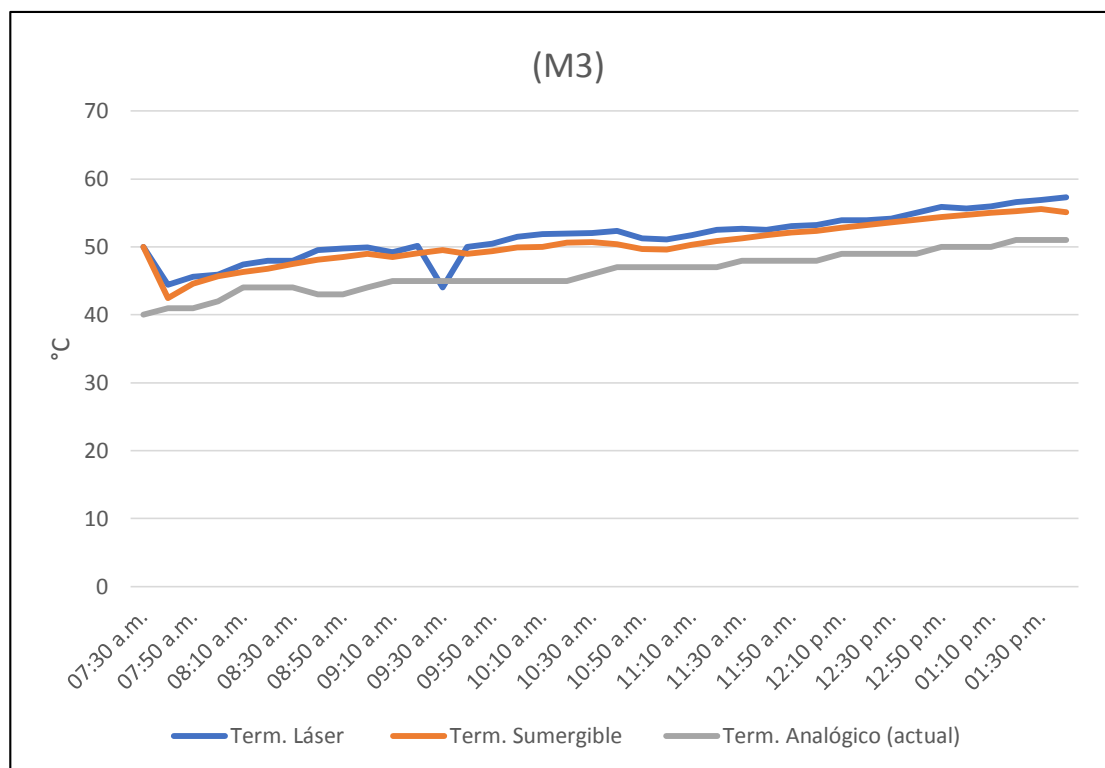


Figura 6 Temperatura medida manualmente para M3.

Fuente : Elaboración propia.

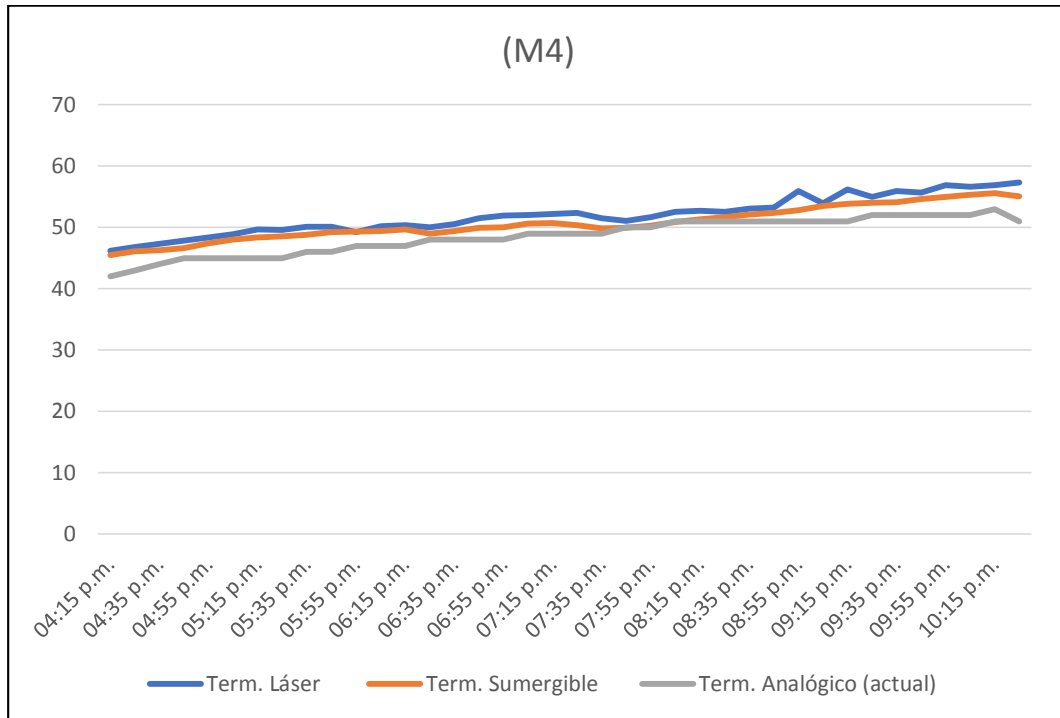


Figura 7 Temperatura medida manualmente para M4.
Fuente : Elaboración propia.

3.9.2. Reconocimiento de máquina conchadora de estudio.

La máquina de conchada rotativa de 50 kg de la Empresa Sol Norteño E.I.R.L. en la que se implementó el prototipo automatizado para el control y monitoreo de la temperatura, se encuentra dentro de la clasificación de las máquinas multifuncionales para el refinado y conchado de chocolate de eje vertical con billas (ver fotografía 9 en el anexo 2).

El nivel de automatización para esta máquina es considerado como nivel uno o control manual ya que el operario es el que realiza todas las tareas de supervisión, control y decisión sobre la configuración y parametrización de la misma (Kaber y Endsley, 2004).

La máquina no tiene una condición fija en el área de conchado; es decir que, cualquier diseño adicional con respecto a está, debe considerar que puede cambiar de ubicación dentro del área.

3.9.2.1. Sistema mecánico.

- La olla receptora de chocolate cuenta con una chaqueta de agua para mantener la temperatura del proceso de conchado, está cuenta con un sistema de escape y alivio de sobrepresiones de vapor de agua, pero no existe un sistema de

recirculación de agua, para dar la capacidad de enfriamiento para cuando sea necesario.

- La máquina tiene un grado de libertad de movimiento, el producto luego de ser procesado se vierte haciendo voltear la olla con un ángulo menor a 120° .
- El agitado del chocolate lo realiza un motor reductor de $\omega_M = 1735 \text{ RPM}$ con una relación de transmisión $R=1/20$. La velocidad de batido de $\omega_B = 86.75 \text{ RPM}$ constante ya que el sistema no cuenta con un sistema variador de revoluciones.
- La máquina cuenta con esferas o billas de acero inoxidable AISI 304, con una dureza superficial de 25-39 HRC para el refinar partículas del chocolate con una dimensión de 4mm a 120mm.

3.9.2.2. Sistema eléctrico.

- Circuito de mando: Es alimentado con una fuente de tensión de 220v monofásico, cuenta con arranque directo para el motor de 2HP y también el control de la resistencia calefactora de 2000W.
- Circuito de fuerza: Es alimentado con una fuente de tensión de 380v trifásico, con amperaje de 5.1 amperios y conexión doble estrella. Cuenta con un relé térmico de 4-6 amperios, con protección contra sobre cargas y pérdida de fase.

3.9.2.3. Sistema de control automático de temperatura.

- El control de temperatura lo realiza un termostato modelo THERMO – DISC (ver fotografías 8, 9 y 10 en el anexo 2) consiste en dos láminas de metal unidas, con diferente coeficiente de dilatación térmico cuando la temperatura cambia también la forma de la lámina automáticamente sobre unos contactos de cierre y apertura, el sistema se basa en el control on-off para alimentar la resistencia calefactora que está en contacto con el agua de la chaqueta y este a su vez transfiere el calor al chocolate a través de un baño maría.

3.9.2.4. Sistema de visualización.

- El sistema de visualización se realiza al tomar la lectura de termómetro analógico con un rango de medición de $0-200 \text{ C}^\circ$, sumergido en aceite para reducir las oscilaciones de la aguja por vibración (ver fotografía 4 en anexo 2)

3.9.3. Diseño conceptual del prototipo.

El diseño conceptual nos permitió establecer un modelo idealizado para la definición de las características básicas que se quiere del prototipo, ya que en esta parte se generan las opciones ingenieriles, funcionales y de trabajo que se deben tomar en cuenta para el diseño final (Guerrero, Hernandis y Agudo, 2014).

Al igual que Rodríguez, Chagolla y López (2014) se utilizó la metodología S.O.P (Situación-Objetivo – Propuesta) perteneciente al TQE (Total Quality Excellence). Con el cuál se pretende ver al prototipo de control y monitorio como parte esencial de la máquina conchadora sin afectar en el normal desarrollo del proceso.

En base al problema que representa la no monitorización y control de temperatura para la Empresa Industrias Sol Norteño y con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos, se dio una solución al diseño del sistema de control y monitoreo. Este contará con los siguientes requerimientos:

3.9.3.1. *Requerimientos de la empresa.*

Tabla 8

Requerimientos solicitados por la empresa.

Requerimiento	Descripción
Prototipo de fácil configuración y con plataforma expandible	El prototipo tiene que ser de fácil manipulación por el operario del proceso, contar con un modo de control manual del actuador. Además, debe ofrecer entradas y salidas adicionales para expandir el control a otras variables o controlar temperatura en otra máquina conchadora.
Prototipo de bajo costo	Debe garantizarse que el hardware es de menor costo que los sistemas de automatización industrial típicos que cuentan con controlador y pantalla HMI; además, el software debe ser de plataforma libre y no represente ningún costo en su obtención y uso.
Selección adecuada de sensor de temperatura	Debe garantizarse que el sensor está ofreciendo una lectura correcta, para ello debe validarse comprobando valores con un

	instrumento calibrado; además, no debe representar un peligro para la inocuidad del chocolate.
Diseño mecánico para que el prototipo no sea invasivo en el proceso	No debe generar obstáculos dentro del normal desarrollo del proceso.
Conectividad	Debe haber comunicación remota hacia la computadora de la oficina del gerente general.

Fuente: Elaboración propia.

3.9.3.2. *Requerimientos básicos.*

De acuerdo con los requerimientos de la empresa y el análisis de los mismos de acuerdo al mercado nacional de dispositivos para el desarrollo tecnológico, se propone los siguientes requerimientos básico.

Tabla 9

Requerimientos básicos propuestos por los tesisistas.

Requerimiento	Descripción
Prototipo de fácil configuración y con plataforma expandible	- El prototipo debe ser capaz de controlar y monitorear la temperatura sin interrupciones durante todo el proceso de conchado.
	- El control PID debe mantener la temperatura lo más cerca posible al valor de referencia.
	- El prototipo debe ser de fácil manipulación para el operario de planta.
	- Debe registrar datos históricos del comportamiento de la temperatura.
	- Debe brindar la facilidad de expansiones futuras, en cuanto a señales de entradas y salidas, hardware, programación, etc.
	- Debe soportar conectividad inalámbrica o cableada a computadoras o dispositivos externos.
	- El dispositivo embebido maestro del prototipo es la computadora de desarrollo Raspberry Pi (dispositivo base del proyecto).
- El prototipo debe contar con alarma visual y auditiva cuando los datos obtenidos se encuentren fuera de los parámetros establecidos.	
	- No debe representar un costo excesivo respecto a otras tecnologías para automatización industrial.

Prototipo de bajo costo	<ul style="list-style-type: none"> - El software de programación y HMI será gratuito basado en software libre. - Los dispositivos (sensores y acondicionadores de señal) para el desarrollo serán validados mediante instrumentos calibrados y equipos de laboratorio (no representarán costo adicional en calibración de sensor). - La construcción mecánica será desarrollada con técnicas e instrumentos de metalmecánica local (no requerirá gastos en manufactura especializada).
Selección adecuada de sensor de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - Se debe seleccionar el sensor de tal manera que, al tener algún tipo de contacto con la masa de chocolate, este no la contamine. - Debe soportar un rango considerable de temperatura para situaciones extremas de trabajo. - Debe ser sumergible para alimentos.
Selección adecuada de HMI táctil	<ul style="list-style-type: none"> - Debe tener un tamaño mayor a 5". - Debe tener una resolución mayor a 50 fps. - Debe ser compatible y de fácil adaptación con la Raspberry Pi 3B+. - Táctil del tipo capacitivo.
Diseño mecánico para que el prototipo no sea invasivo en el proceso	<ul style="list-style-type: none"> - No debe generar obstáculos dentro del normal desarrollo del proceso. - El prototipo debe ser robusto; es decir, debe operar de manera óptima en el tiempo, bajo ambientes industriales y debe ser ensamblado estratégicamente en la máquina.
Conectividad	<p>La tecnología de comunicación a emplear por la conectividad con la computadora de la oficina del gerente general será vía Ethernet, aprovechando la red local. Para ello, tanto la unidad de control como la computadora de la oficina de comunicarse a través de Ethernet.</p>

Fuente : Elaboración propia.

3.9.3.3. *Requerimientos técnicos.*

- Para el desarrollo de la HMI el comité ISA101, establece una serie de convenciones y normas para el diseño de interfaces gráficas en procesos industriales (International Society of Automation, 2015).
- NEMA establece un conjunto de estándares, que vela por la protección de los dispositivos embebidos integrados, que son utilizados en ambientes industriales con condiciones severas (NEMA, 2005).
- Para selección del controlador se tendrá en cuenta, la velocidad de procesamiento, la comunicación con el ordenador, comunicación SPI, el respaldo de proyectos desarrollados, librerías y compatibilidad para el transmisor ADC de temperatura.

3.9.3.4. *Etapas y dispositivos necesarios para implementar el prototipo.*

- Etapa de despliegue y procesamiento de datos: ordenador (Raspberry Pi 3B+).
- Etapa de visualización: HMI.
- Etapa de control: microcontrolador, sensor.
- Etapa de potencia: relé, resistencia.
- Etapa de sensado: sensor de temperatura.
- Etapa de acondicionamiento de señal: convertidor analógico digital.

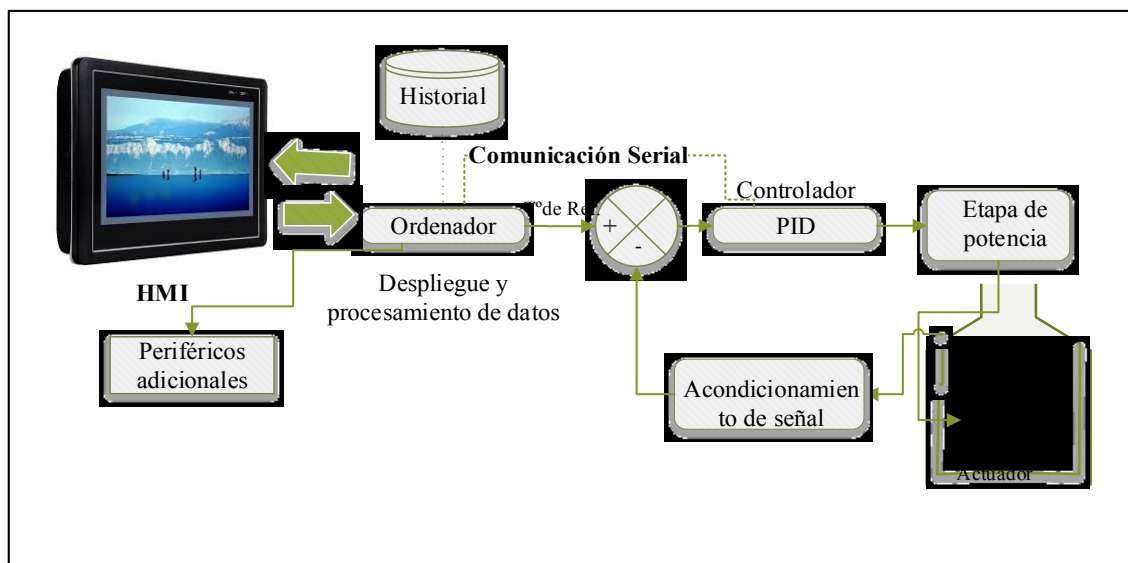


Figura 8 Etapas necesarias para cumplir los requerimientos establecidos.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.3.5. Generación de concepto.

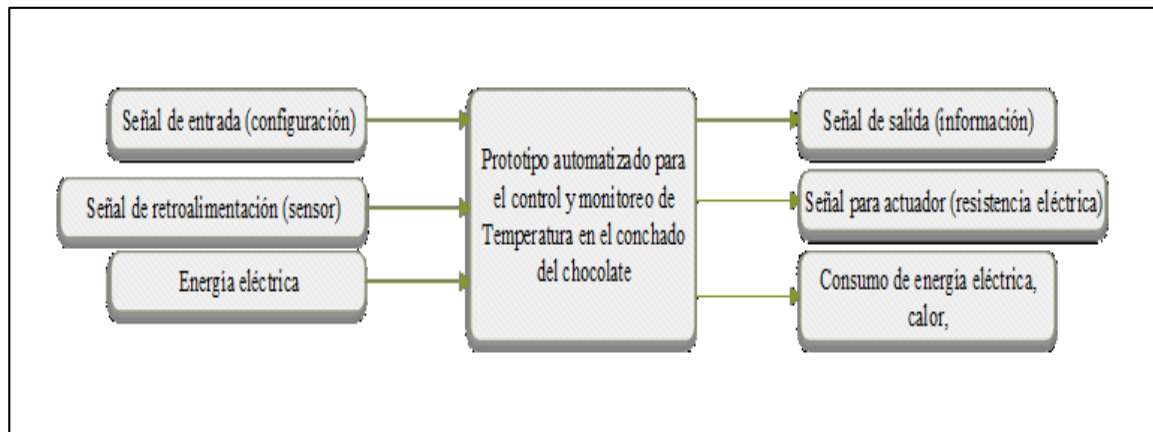


Figura 9 Entradas y salidas del prototipo.

Fuente : Elaboración propia.

El prototipo automatizado se conceptualizó como un sistema flexible que garantiza la disminución en los errores de medición y control de la temperatura; que además registra adecuadamente los datos para usarse como respaldo de la empresa o para futuras investigaciones relacionadas con los efectos que sufre el chocolate con respecto a la variación de la temperatura. La flexibilidad del sistema debe permitir; además, adicionar otros periféricos y brindar la posibilidad de manipular el sistema remotamente desde una red ethernet local de la empresa.

3.9.4. Selección y dimensionamiento de materiales electrónicos y eléctricos.

El análisis de requerimientos y propuestas desarrollado en el diseño conceptual, permitieron la elección de los componentes adecuados de acuerdo a las características que poseen y los requerimientos establecidos por la empresa. Para la realización del diseño del prototipo se seleccionó un sensor para la detección de la temperatura del chocolate, para ello el sensor debe ser sumergible.

3.9.4.1. Selección del sensor de temperatura.

Para la selección del sensor de temperatura se realizó un cuadro comparativo con las principales características de los mismos, tomando en cuenta los requerimientos técnicos como se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

Selección del sensor.

Características	Sensor de Temperatura Digital	Termocupla de 2 hilos	RTD – PT100 de 3 hilos	RTD – PT100 de 2 hilos
Modelo o tipo	SEN-DS18B20	K	SEN-PT100-3	SEN-PT100-2
Señal de salida	Digital	Analógico	Analógico	Analógico
Entorno de funcionamiento	-55°C hasta +125°C	0°C hasta +400°C	-100°C hasta +400°C	0 - 400 °C
Precisión	de -10°C hasta +85°C: ±0.5°C fuera de eso ±3°C	±0.5°C	±0.1°C Clase A	± 0,3°C Clase B
Número de cables	3	2	3	2
Dimensiones de sonda en mm	50x5	200x5	100x5	30x4
Longitud de Sonda	2	2	1	1
Material de sonda	Acero AISI 304	Acero AISI 304	Acero AISI 304	Acero AISI 304
Protección de cable	Vulcanizado	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio	Fibra de vidrio
cumple con Nema 4X	No	Si	Si	Si
Precio (S/.)	S/11.00	S/52.00	S/40.00	S/15.00

Fuente : Elaboración propia, los precios de referencia se tomaron de acuerdo con el mercado nacional de dispositivos electrónicos.

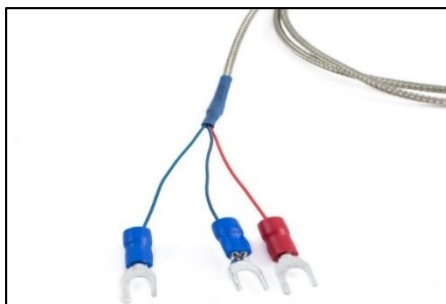


Figura 10 Sensor de temperatura RTD - PT100 de 3 hilos.

Fuente: Naylamp Mechatronics, 2019.

En base a los requerimientos anteriores se realizó la comparación de cuatro sensores de temperatura utilizados y comerciables en el mercado nacional, en la que se eligió al sensor RTD-PT100 de 3 hilos, debido a que posee el rango de temperatura necesario, una precisión de ± 0.1 °C y dispone de una protección que está dentro de los estándares NEMA 4X, que garantiza una resistencia a la corrosión debido a que está diseñado para ambientes industriales. Además, la Pt100 puede ser colocada a cierta distancia del medidor sin mayor problema (hasta unos 30 metros) utilizando cable de cobre convencional para hacer la extensión (ARIAN, 2019).

En el anexo 8, se encuentran datos para calibración de acuerdo con estándares DIN 43760 - IEC 751 – EN60 751 para sensor PT-100.

3.9.4.2. Selección de la tarjeta Raspberry Pi.

Para la selección de la Raspberry Pi (RPI) más adecuada se tomó en cuenta parámetros como la velocidad del CPU (que indica la rapidez del procesamiento de la placa) y la memoria RAM que permite el almacenamiento de programas de manera momentánea para su ejecución.

Tabla 11

Seleccionador del ordenador Raspberry Pi.

Carácte - rísticas	Model A+	Model 2 B	Model 3 B	Model 3 B+	Zero W
SoC	Broadcom	Broadcom	Broadcom	Broadcom	Broadcom
	BCM2835	BCM2836	BCM2837	BCM2837	BCM2835
CPU	1.4 GHz	900 MHz	1.2 GHz	1.4 GHz	1 GHz
	ARM1176J ZF-S	QUAD ARM Cortex-A7	QUAD ARM Cortex - A53	QUAD ARM Cortex - A53	ARM1176J ZF-S
GPU	Video Core IV	Video Core IV	Video Core IV	Video Core IV	Video Core IV
	512MB	1GB	1GB	1GB	512MB
Memoria RAM					
USB	1	2	4	4	1

Video y Audio	RCA Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, HDMI	Jack, 2 micro HDMI
Almacenamiento	SD	uSd	uSd	uSd	uSd
Red	Dual-band WIFI, BT	ETH 10/100 (10 y 100 Mbps)	1 x RJ45 10/100 Ethernet,	Doble banda de 2.4GHz	Wi-Fi 802.11b / g / n
GPIO	26	40	40	40	40
Alimentación	400mA 1.5 W / Micro	800 mA, 4W/ Micro	2.5 A, 12.5 W / 5v Micro	2.5 A, 12.5 W / 5v Micro	160mA 1.5 W / Micro
Tamaño	65x65 mm	85x56 mm	85x56 mm	85x56 mm	65x30 mm
Precio	S/155.00	S/160.00	S/220.00	S/220.00	S/105.00

Fuente : Elaboración propia, los precios de referencia se tomaron de acuerdo con el mercado nacional de dispositivos electrónicos.

Para el desarrollo de este prototipo se ha seleccionado el modelo Raspberry Pi 3B+ como el ordenador principal, dado que cumple todos los requerimientos de hardware y software, además dispone de conexión a red ethernet vía cable o wifi, para el almacenamiento del sistema operativo posee una entrada MicroSD y posee 4 puertos USB para la conexión de periféricos extra y la comunicación serial con algunos controladores.

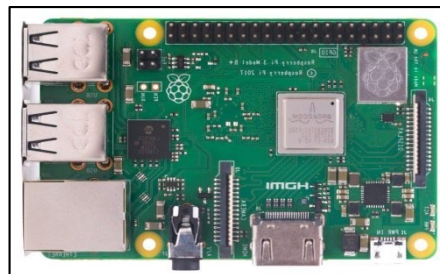


Figura 11 Ordenador de desarrollo Raspberry Pi 3B+

Fuente : <https://www.raspberrypi.org/>

3.9.4.3. Selección de los controladores.

De acuerdo con los requerimientos necesarios para desarrollar el prototipo, en la siguiente tabla se comparan los parámetros relevantes de los distintos embebidos basados en plataforma libre.

Tabla 12

Selección de placas de desarrollo con microcontrolador embebido.

Características	Arduino Uno	Arduino Mega 2560	Tarjeta de Desarrollo Alteri	NodeMCU ESP32
Controlador	Atmega 328	Atmega 2560	PIC18F4550	Tensilica Xtensa 32-bit LX6
Frecuencia de reloj	16Mhz	16Mhz	48 MHz	240Mhz
Pines digitales	14 (6PWM)	54 (15 salidas PWM)	35	24
Pines analógicos	6	16	13	2 (convertidores ADC)
Memoria de datos	32Kb	256 Kb	32 Kb	4 M
Memoria de programa	2 Kb	8 Kb	2 Kb	520 Kb
Software programador	IDE Arduino	IDE Arduino	Software Alteri (Soporta varios compiladores)	Esp-idf (Framework para IDE Arduino)
Wifi	No	No	No	802.11n a 2.4 GHz hasta 150 Mbit/s
Parámetros eléctricos	40 mA	40mA - 5Vdc	40mA - 5Vdc	30 a 68 mA - 3.3 Vdc
Precio	S/45.00	S/70.00	S/1,901.73	S/60.00

Fuente : Elaboración propia, los precios de referencia se tomaron de acuerdo con el mercado nacional de dispositivos electrónicos; excepto Alteri que se tomó de (DIIGNAL, 2019).

Se eligió Arduino Uno porque además de cumplir con todos los requerimientos y protocolos de comunicación, tiene la plataforma de desarrollo de proyectos en electrónica y robótica más utilizada a nivel mundial, esto debido a su facilidad de aprendizaje y uso, abundante documentación y múltiples aplicaciones. Eso quiere decir, que cualquier dificultad que se presente en la programación, existirá bastante información para darle solución.

Además, para la lectura de temperatura conectado al convertidor ADC se consideró un Arduino nano el cual ofrece las mismas características que el Arduino uno.

3.9.4.4. Selección de la pantalla para la HMI.

Se eligió la pantalla LCD de 7" táctil Raspberry Pi, porque fue diseñada y desarrollada por la Raspberry Pi Fundación; por lo que tiene mejores prestaciones con respecto a las demás opciones de pantallas adaptables para ordenadores de desarrollo. Además, por su resolución, dimensiones, profundidad de color y adaptabilidad, facilitaron la decisión de selección ya que sobrepasa los requerimientos esperados (ver tabla 13 y figura 12).

Tabla 13

Selección de pantalla para el desarrollo de la HMI.

Características	LCD 7" táctil Raspberry Pi	Display LCD 3.5" táctil HAT	Pantalla táctil 5" HDMI
Tipo de táctil	Multitouch tipo capacitivo	Resistivo	Resistivo
Resolución	800 x 480 pixeles a 60fps	480x320	800x480
Compatibilidad con Raspberry Pi	Raspberry Pi A+, B+, 2B, 3B y 3B+	Raspberry Pi A+, B+, 2B, 3B y 3B+	Raspberry Pi A+, B+, 2B, 3B y 3B+
Pluma de tacto	Tacto humano	lapiz para tft	lapiz para tft
Costo	S/470.00	S/100.00	S/199.00

Fuente : Elaboración propia, los precios de referencia se tomaron de acuerdo con el mercado nacional de dispositivos electrónicos.

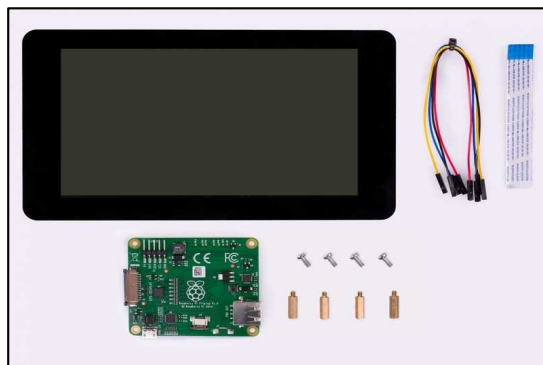


Figura 12 Paquete pantalla táctil de 7 pulgadas para Raspberry Pi.

Fuente : <https://www.raspberrypi.org/>

3.9.4.5. Selección del transmisor para la PT100.

Tabla 14

Selección del transmisor para el sensor RTD - PT100 de 3 hilos.

Selección del transmisor		
Características	Max31865	Transmisor de 4 - 20mA para sensor PT100
Precisión	0.5 ° C (0.05% de la escala completa) como máximo	+/-0.2% F.S.
Rango de °T	rango de PT100	0 - 200 °C
Compatibilidad	Adaptación del embebido	Diseñado para pt100 de 3 hilos
Comunicación con embebido controlador	Protocolo SPI	Pin Análogo
Factor de conversión	Resistencia Pt100 a señal digital	Resistencia a señal analógico
Librería	Adafruit_MAX31865	No necesita
Precio	S/45.00	S/35.00

Para la selección del transmisor se consideró: el rango de precisión, el rango de temperatura de funcionamiento y las características del sensor a utilizar (ver tabla 14).

Al considerar que en el transmisor de 4 - 20mA para sensor PT100, mantiene una comunicación del tipo analógica con el controlador y al no existir mucha información en cuanto a la utilización de este dispositivo en plataformas libres como Arduino, facilita la selección del embebido transmisor A/D para pt100 y pt1000 MAX31865 el cual cuenta con una librería para desarrollo gratuita en Arduino IDE. Además, limitando la temperatura medida dentro de la escala de 0 a 100 °C, el transmisor Max31865 tiene una precisión de lectura más alta que el transmisor analógico.

3.9.4.6. Selección del actuador.

De acuerdo con la potencia de la resistencia calefactora (2000 W) se tiene un consumo de corriente máxima de $2000/220 \times 1 = 9.1$ A (el factor de potencia=1 se considera 1 porque se trata de una carga netamente resistiva). Entonces se buscó relés SSR con los siguientes parámetros de funcionamiento: señal de entrada las PWM del controlador de 3V a 5V con corrientes mayores a los 4mA en CD, en la salida conexión a la resistencia a una tensión de 220 V AC.

En la tabla 15 y anexo 9 se muestra el SSR seleccionado, considerando que en el mercado existen relés de estado sólido de una elevada corriente de carga, se eligió el más cercano a los parámetros requeridos. En cuanto al precio en el mercado local podemos encontrar SSR con un precio menor a S/. 50.00 que cumplan las características detalladas en la tabla 15.

Tabla 15

Tabla característica del SSR seleccionado.

MODELO	SSR-40 DA
Corriente de carga clasificada	40 A
DATOS DE ENTRADA	
Voltaje de operación	4-32 V DC
Min. Voltaje ON/OFF	ON > 2.4 V, OFF < 1 V
Corriente de disparo	7.5mA/12VDC Max
DATOS DE SALIDA	
Voltaje de operación	24-380 V
Caída de voltaje	1.6V / 25 C°
Tiempo de respuesta	ON >10 ms, FF >10 ms
DATOS GENERALES	
Resistencia dieléctrica	2.5 KV / 1 min
Fuerza de aislamiento	500 MΩ / 500V DC
Temperatura de operación	-20_ ±80 C°
Material usado	ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) intensivo
Tipo de control	Conmutación en el punto voltaje cero
Costo aproximado mercado nacional	S/. 50

Fuente : Elaboración propia, los precios de referencia se tomaron de acuerdo con el mercado nacional de dispositivos electrónicos.

3.9.4.7. Selección y dimensionamiento de materiales eléctricos.

3.9.4.7.1. Fuente ATX.

Para la selección de la fuente, se consideró los niveles de voltaje de los dispositivos electrónicos, en cuanto a la corriente no representa un problema debido a que la corriente que entregan las fuentes ATX estándar es mucho mayor a las requeridas (3A).

Tabla 16

Fuente ATX de 530 W.

	VOLTAJE		CORRIENTE		FRECUENCIA	
AC Entrada	110V 220V		4A		50-60HZ	
	Naranja	Rojo	Amarillo	Blanco	Azul	Púrpura
DC Salida	+3.3V	+5V	+12V	-5V	-12V	+5Vsb
	30A	50A	20A	0.6A	0.6A	2A
Tolerancia	±5% (±0.165 V)	±5% (±0.25 V)	±5% (±0.60 V)	±10% (±0.50 V)	±10% (±1.20 V)	±5% (±0.25 V)
Rango máximo y mínimo	+3.135 V a +3.465	+4.75 V a +5.25	+11.40 V a +12.60	-4.50 V a -5.50	-10.80 V a -13.20	+4.75 V a +5.25
Potencia total	530W					
Precio	S/ 50					

Fuente : Elaboración propia, los precios de referencia se tomaron de acuerdo con el mercado nacional de dispositivos electrónicos.

3.9.4.7.2. Altavoz.

Parlante con alimentación USB y recepción de señal de Raspberry a través del puerto Jack. Precio aproximado en el mercado local es de S/30.00.

3.9.4.7.3. Ventilador disipador.

Para la selección del ventilador disipador se consideró el área de los dispositivos electrónicos que en este caso no sobrepasan los 85mm, por lo que se eligió un ventilador de 80x80 mm de 12 voltios que mantenga una recirculación de aire en el prototipo. El precio aproximado dentro del mercado nacional de dispositivos electrónicos es de S/. 20.00.

3.9.4.7.4. Placa PCB perforada.

Para la circuitería y acople de los componentes electrónicos se eligió su montaje en una placa PCB perforada, la misma que permite que cada contacto eléctrico sea seguro y sin interferencias. El precio aproximado dentro del mercado nacional de dispositivos electrónicos es de S/. 20.00.

3.9.4.7.5. Llave termomagnética de protección.

Se utilizará dos llaves de control para: el circuito de potencia y circuito de control. Para el circuito de control debido a que no representa corrientes mayores a los 3 A se utilizó la llave térmica de 10 Amperios, que es la de menor amperaje existente en el mercado nacional(S/30.00). En cuanto al circuito de potencia que alimenta a la resistencia calefactora cuya corriente a plena carga es de 10 A se considera una llave térmica de 15 A, cuyo precio esta alrededor de los S/. 35.00 con marcas reconocidas en el mercado nacional.

3.9.4.7.6. Conductores para el circuito de control.

Para calcular la cantidad y dimensionamiento de los conductores se tuvo en cuenta: que los dispositivos tienen alimentación individual desde la fuente ATX, con el fin de no sobrecargar las salidas y entradas de los embebidos ya que los mismos soportan como máximo 40 mA.

Cálculo de caída de tensión para cables (ecuación 1):

$$S = \frac{2xLxI}{\Delta Vxk} \quad (1)$$

Donde:

S = Sección del cable.

L = Longitud del cable.

I = Intensidad máxima de corriente en el cable.

ΔV =Caída de tensión permitida en el tramo.

k = Conductividad eléctrica del cable.

Al tratarse de una longitud corta desde el punto de alimentación máximo de 4 metros. Los conductores para corriente continua se seleccionaron del dispositivo de mayor consumo, para los demás se usará el mismo conductor. Ese dispositivo es el de la Raspberry pi que funciona con una tensión alrededor de 5V con una corriente máxima de hasta 2.5 A.

El material de los cables es de cobre, cuya conductividad depende de la temperatura, por su parte la tensión de acuerdo con la tolerancia mínima del Raspberry pi hasta - 0.5 V menor al voltaje de funcionamiento (5V), para que funcione de manera correcta -0.25V en porcentaje sería 5%.

El ambiente generalmente en condiciones extremas aproximadamente a 1 metro de la máquina puede llegar a temperaturas de 30 °C, según Alvarido (2007), el coeficiente de conductividad del cobre a esa temperatura es $54 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$.

Tabla 17

Valores máximos y mínimos de corriente según UNE - 20 -160 -5- 523.2004.

Sección cobre (mm ²)	Menor valor de corriente	Mayor valor de corriente
	(A)	(A)
1,5	11	24
2,5	15	33
4	20	45
6	25	57
10	34	76
16	45	105
25	59	140
35	77	174
50	94	210

Fuente : Alvarido (2007)

A continuación, se determinó la sección, mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{2 \times L \times I}{\Delta V \times k} = \frac{2 \times 4m \times 2.5 A}{0.25V \times 54 \frac{m}{\Omega \times mm^2}} = 1.482 mm^2$$

Un estándar comercial para cables que cumple los requerimientos es el cable bipolar de calibre 16 AWG – 1.5 mm² de sección con aislante PVC vulcanizado para instalación

industrial, el mismo que se utilizará independiente para la Raspberry pi, controlador embebido y transmisor A/D. Entonces el total requerido es de 12 metros y el precio total aproximado en el mercado local es de S/. 45.00.

3.9.4.7.7. Conductor para extensión de sonda PT100.

Se requirió cable para extensión para RTD – PT100, como máximo 4 metros de cable para instrumentación apantallado Lshz 3x18awg, que cumple las normas Cumple con norma IEC 603321, IEC 60754-1, IEC 60754-2, IEC 601034-2. El precio aproximado por 4 metros es S/. 15.78x4 igual S/. 63.2.

3.9.4.7.8. Conductor para actuador.

La corriente que consume la resistencia calefactora (ver fotografía 11 en anexo 2) es de 9.1 A - 220 V monofásica, la longitud máxima de cable es 3 metros, además al estar en contacto con una resistencia calefactora, tiende a elevar su temperatura. Por lo tanto, se consideró utilizar un cable con aislamiento termoestable de polietileno reticulado siliconado (XLPE) con alambre de cobre estañado, que soporte una temperatura en operación normal de 70 °C. Por su parte Alvarido F. (2007) agrega que: el cobre a 70 °C tiene una conductividad térmica de $48 \frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$, entonces la sección del conductor es: considerando una máxima caída de voltaje admitida de 0.5 V, por tratarse de una longitud corta :

$$S = \frac{2 \times L \times I}{\Delta V \times k} = \frac{2 \times 3m \times 10 A}{0.5 V \times 48 \frac{m}{\Omega \times mm^2}} = 2.5 mm^2$$

Permitiendo así seleccionar el conductor cable siliconado estañado 1x2.5mm², en una cantidad de 6 metros a un precio en el mercado local de S/. 10.00 el metro.

3.9.5. Diseño de estructura mecánica.

La estructura mecánica del prototipo está conformada por el brazo de soporte y el panel HMI (ver plano en anexo 10); los mismos que serán ensamblados estratégicamente en la máquina, con el fin de cumplir los requerimiento básicos y solicitados por la empresa.

También para las dimensiones del prototipo se consideró los siguientes aspectos:

- La temperatura aumenta cuanto menor sea la distancia a la máquina en funcionamiento; por ende, los dispositivos pueden sufrir sobrecalentamientos y la

masa de chocolate podría estar expuesta a alguna contaminación. Debido a esto se decidió que el panel estará separado 30 cm de la máquina conchadora.

- Se limitaron los estudios de esfuerzos mecánicos ya que el prototipo no estará sujeto a esfuerzos mayores al peso del panel (15 kg).
- Según el Ministerio de Salud (2015), la talla promedio de los peruanos es de 1.57 metros; esa estadística obliga a que se considere, una altura máxima del prototipo de 1.5 metros, que será ensamblado a la máquina desde una altura de 4 cm sobre el nivel del piso, permitiendo que la pantalla HMI se ubique entre 1.45 y 1.5 metros de altura.

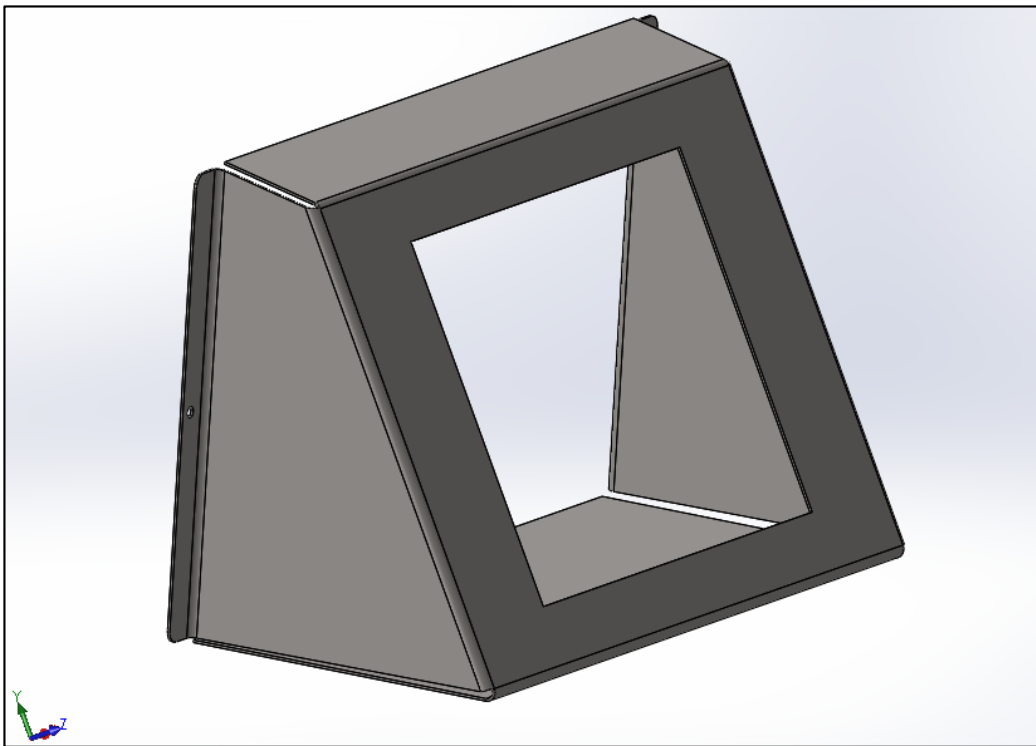


Figura 13 Diseño 3D de chapa metálica para ensamblar pantalla HMI.

Fuente : Elaboración propia en software SolidWorks

3.9.5.1. Materiales para construcción de estructura metálica.

Tabla 18

Materiales utilizados para la construcción del prototipo.

Plancha galvanizada de 1.22 x 2.4 x 0.01m

Tubo galvanizado de 2" de diámetro y 3 metros de largo

Pernos con tuercas de D=8mm, L=20mm

Abrazaderas tipo anillo de 4" con regulación por perno.

Pernos milimétricos de D=8 mm, L=10 cm, con doble arandela, anillo de presión y tuerca

Soldadura punto azul
 Pintura anticorrosiva base
 Pintura color plateado
 Lija
 Thinner

Fuente : Elaboración propia.

3.9.6. Presupuesto.

Tabla 19

Presupuesto en materiales para construcción del prototipo.

ITEM	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor Total
1	Dispositivos electrónicos				
1.1.	Raspberry Pi 3B+	Und.	1	S/220.00	S/220.00
1.2.	Arduino Uno	Und.	1	S/40.00	S/40.00
1.3.	Arduino Nano	Und	1	S/40.00	S/ 40.00
1.4.	LCD 7" táctil Raspberry Pi	Und.	1	S/470.00	S/470.00
1.5.	Transmisor Max31865	Und.	1	S/45.00	S/45.00
1.6.	RTD - PT100 de 3 hilos	Und.	1	S/40.00	S/40.00
1.7.	Relé SSR	Und.	1	S/50.00	S/50.00
1.8.	Fuente ATX	Und.	1	S/50.00	S/50.00
1.9.	Altavoz	Und.	1	S/30.00	S/30.00
1.10.	Ventilador disipador	Und.	1	S/20.00	S/20.00
1.11.	Placa PCB perforada	Und.	1	S/20.00	S/20.00
1.12.	SDcard 16 gb	Und.	1	S/35.00	S/35.00
1.13.	Carrete de estaño	Und.	1	S/10.00	S/10.00
2	Materiales eléctricos				
2.1.	Llaves térmicas de protección				

2.1.1.	10 amperios	Und.	1	S/30.00	S/30.00
2.1.2.	15 amperios	Und.	1	S/35.00	S/35.00
2.2.	Conductores				
2.2.1.	Cable Vulcanizado 2x16 AWG	m	12	S/3.75	S/45.00
2.2.2.	Lshz 3x18awg	m	4	S/15.70	S/62.80
2.2.3.	Cable silic. Estañado 1x2.5 mm ² , 180 °C	m	3	S/10.00	S/30.00
2.3.	Cintillo 200x4.8mm Negro	Paqx100 Und	1	S/9.50	S/9.50
2.4.	Cinta Aislante 1700 Negra 3/4"	Und.	1	S/6.50	S/6.50
3	Materiales estructura mecánica				
3.1.	Plancha galvanizada de 1.22x2.4x0.001 m	Und.	0.5	S/30.00	S/15.00
3.2.	Tablero de 12 polos 33x20x16 cm	Und	50	S/50.00	S/50.00
3.2.	Tubo galvanizado de 1 3/4" x 3m	Und.	1	S/35.00	S/35.00
3.3.	Pernos con tuercas de D=8mm, L=20mm	Und.	10	S/0.50	S/5.00
3.4.	Abrazadera de 4"	Und.	2	S/1.50	S/3.00
3.5.	Pernos con tuercas de D=8mm, L=10cm, con doble arandela, anillo de presión y tuerca	Und.	4	S/1.50	S/6.00
3.6.	Riel para llaves térmicas	cm	10	S/5.00	S/5.00
3.7.	Soldadura punto azul	kg	0.5	S/13.00	S/6.50
3.8.	Macilla para acabados en metal	Und.	1	S/8.00	S/8.00
3.9.	Pintura anticorrosiva base	L	0.5	S/30.00	S/15.00
3.10.	Pintura acrílica color aluminio	L	1	S/40.00	S/40.00
3.11.	Lija	Und.	1	S/2.00	S/2.00
3.12.	Thinner	L	2	S/3.00	S/6.00
3.13.	Disco de desgaste metal	Und.	1	S/10.00	S/10.00
3.14.	Discos de corte metal	Und.	2	10	S/20.00
PRESUPUESTO DE MATERIALES					S/1,515.30

Fuente : Elaboración propia.

3.9.7. Conversión de resistencia a temperatura entre pt-100 y MAX31865.

Se realizaron pruebas experimentales con el sensor pt100, transmisor MAX31865 y Arduino para garantizar que la conversión de resistencia de la pt100 y su valor en temperatura está dentro de los parámetros establecidos en las librerías para Arduino: Adafruit_MAX31865 y arduino-max31865-master.

Hay diferentes maneras para determinar la temperatura en función de la resistencia del sensor PT100, pero la técnica de método matemático directo basado en la ecuación de Callendar-Van Dusen es la que utilizan ambas librerías, la función de transferencia de las RTD's es descrita por dos ecuaciones polinomiales, una para temperaturas menores que 0 y otra para temperaturas mayor o igual a cero. En este caso, dado que la temperatura de trabajo nunca va a estar por debajo de cero, no se utilizará la primera ecuación, sino la ecuación 2 (Analog Devices Inc., 2004).

$$R_{RTD}(t) = R_0[1 + At + Bt^2] \quad (\text{para } t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

Donde:

t : RTD temperatura [$^\circ\text{C}$]

$R_{RTD}(t)$: RTD resistencia como una función de la temperatura del sensor.

R_0 : Resistencia RTD a $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (a menudo es $100 \text{ } \Omega$ puede variar de acuerdo a la concentración de impurezas en el platino de la RTD).

A, B, C : Coeficientes que cambian de acuerdo a normas estándares internacionales.

En las librerías desarrolladas para el conversor MAX31865 estos coeficientes están basados en la norma: EN 60751: 2008, estos son:

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \\ C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Para determinar la temperatura en función de la resistencia de la RTD ($T_{RTD}(r)$) para valores de temperatura de 0 a más, conforme a la ecuación 2 tenemos:

$$T_{RTD}(r) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{r}{R_0}\right)}}{2B} \quad (3)$$

Donde:

r : Es la resistencia del sensor RTD – PT100

Debido a que esta función se resolverá en tiempo real en el microcontrolador es necesario convertirle en una donde las constantes ya se hayan multiplicado previamente y finalmente hayan menos cálculo por hacer (Analog Devices Inc., 2004).

$$T_{RTD}(r) = \frac{Z_1 + \sqrt{Z_2 + Z_3 \times (R_0 - r)}}{Z_4} \quad (4)$$

Donde:

$$Z_1 = -A = -3.9083 \times 10^{-3} \quad Z_2 = A^2 - 4 \times B = 17.58480880 \times 10^{-6}$$

$$Z_3 = \frac{4 \times B}{R_0} = -23.10 \times 10^{-9} \quad Z_4 = 2 \times B = -1.155 \times 10^{-6}$$

El MAX31865 es un convertidor de resistencia a digital, optimizado para RTD's PT100 y PT1000, con una resistencia externa se establece la sensibilidad para la RTD que se está utilizando y un ADC de precisión convierte el ratio de resistencia del RTD a la resistencia de referencia en forma digital con una resolución de ADC de 15 bits, o a una resolución en temperatura de 0.03125 °C (Maxim Integrated, 2015).

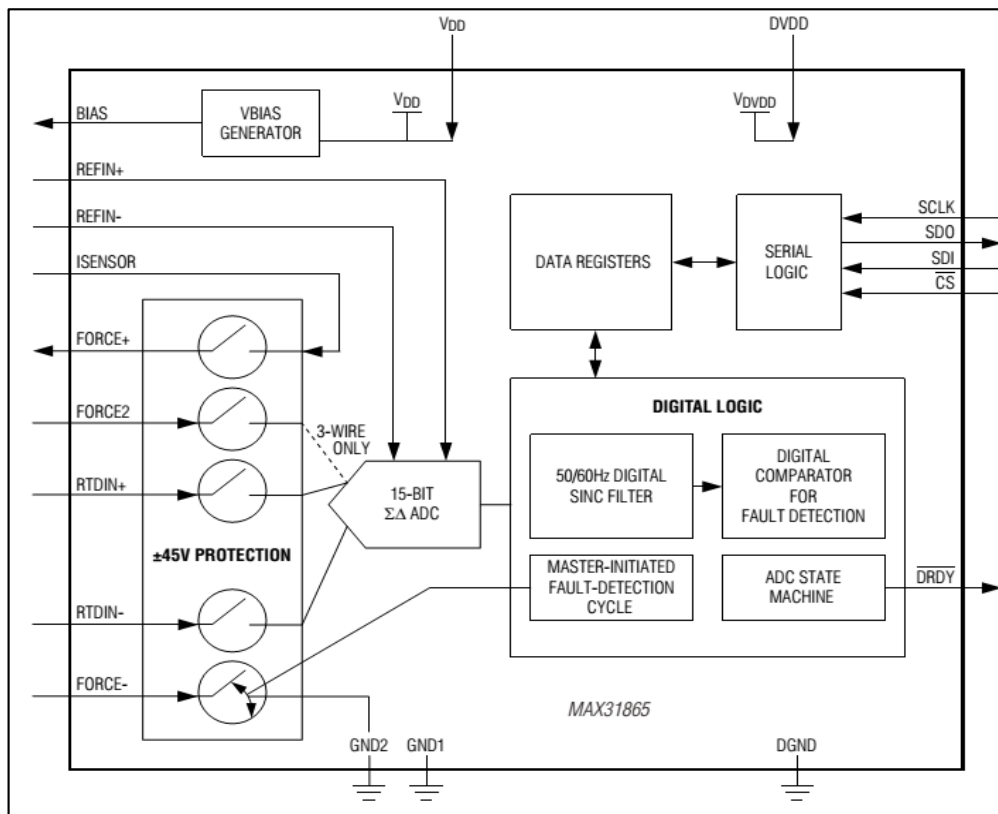


Figura 14 Diagrama de bloques del proceso de conversión dentro del MAX31865.

Fuente : Datasheet MAX31865

3.9.7.1. Materiales para pruebas experimentales.

Los materiales, equipos y herramientas necesarios para realizar las pruebas experimentales fueron:

- Arduino Uno.
- Max31865.
- RTD PT100 de 3 hilos.
- Placa de pruebas (protoboard).
- Computadora con software Arduino.
- Osciloscopio.
- Cables de pruebas (cables dupont macho - macho).
- Termómetro analógico de mercurio.
- Destornillador perillero.
- Alicata de corte diagonal.
- Cautín, pasta para soldar y estaño.
- Soporte con lupa para circuitos.

3.9.7.2. Procedimiento de pruebas experimentales.

Todos los procedimientos de esta etapa tendrán por objetivo calibrar toda la etapa de lectura de temperatura, incluye el sensor, el transmisor y la comunicación con el Arduino.

3.9.7.2.1. Paso 1: configuración de hardware.

Se configuró Hardware Max31865 para conectar RTD – PT100 de 3 hilos de acuerdo con las especificaciones de la hoja de datos del conversor (ver anexo 11 y fotografías 12 y 13 en anexo 2).

3.9.7.2.2. Paso 2: configuración de software.

Se descargó e instaló la librería Adafruit_MAX31865 en la IDE de Arduino desarrollado por Limor Fried Ladyada para Industrias Adafruit de libre redistribución y modificación.

3.9.7.2.3. Paso 3: montaje de circuitos.

Conexión de la placa Arduino con el conversor ADC usando pines dupont macho – macho. Además, conexión del sensor RTD – PT100 de 3 hilos al conversor (ver fotografía 16 y 17 en anexo 2).

3.9.7.2.4. Paso 4: programación.

```
//Se llama a la librería

#include <Adafruit_MAX31865.h>

//Identificamos pines de conexión con el Arduino

Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);

// Valor de la resistencia de referencia externa que da la sensibilidad en la lectura.

#define RREF 430

//Valor de la resistencia cuando la temperatura es 0 °C

#define RNOMINAL 100

//Función de configuración

void setup() {

    Serial.begin(115200); // Inicia la comunicación serial con el Arduino

    Serial.println("Adafruit MAX31865 PT100 Sensor Test!");

    //Se determina el número de cables de la sonda

    max.begin(MAX31865_3WIRE);}

void loop() {

    uint16_t rtd = max.readRTD();// Lectura de la resistencia y su conversión

    Serial.print("RTD value: "); Serial.println(rtd);

    float ratio = rtd;

    ratio /= 32768;

    Serial.print("Ratio = ");

    Serial.println(ratio,8);

    Serial.print("Resistance = ");

    Serial.println(RREF*ratio,8);
```

```

Serial.print("Temperature="); Serial.println(max.temperature(RNOMINAL, REF));

//Verificación de errores

uint8_t fault = max.readFault();

if (fault) {

    Serial.print("Fault 0x"); Serial.println(fault, HEX);

    if (fault & MAX31865_FAULT_HIGHTHRESH) {

        Serial.println("RTD High Threshold");    }

    if (fault & MAX31865_FAULT_LOWTHRESH) {

        Serial.println("RTD Low Threshold");

    if (fault & MAX31865_FAULT_REFINLOW) {

        Serial.println("REFIN- > 0.85 x Bias");}

    if (fault & MAX31865_FAULT_REFINHIGH) {

        Serial.println("REFIN- < 0.85 x Bias - FORCE- open"); }

    if (fault & MAX31865_FAULT_RTDINLOW) {

        Serial.println("RTDIN- < 0.85 x Bias - FORCE- open");}

    if (fault & MAX31865_FAULT_OVUV) {

        Serial.println("Under/Over voltage"); }

}

//Fuente: Limor Fried/Ladyada , Adafruit Industries

```

3.9.7.2.5. Paso 5: lectura de datos en monitor serial.

Los resultados del comportamiento y relación del: valor de la RTD leído, el rango de 15 bits que admite $2^{15} = 32768$ combinaciones entre el valor de la RTD, resistencia de RTD y su valor en temperatura de acuerdo con tabla de calibración (ver anexo 8).

```
RTD value: 8613
Ratio = 0.26284790
Resistance = 113.02459716
Temperature = 33.39

RTD value: 8610
Ratio = 0.26275634
Resistance = 112.98522949
Temperature = 33.39

RTD value: 8610
Ratio = 0.26275634
Resistance = 112.98522949
Temperature = 33.35

RTD value: 8610
Ratio = 0.26275634
Resistance = 112.98522949
Temperature = 33.39
```

Figura 15 Valores leídos en el monitor serial a 115200 baudios de transmisión.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.7.2.6. **Paso 6: adaptación de las librerías.**

Al no coincidir los valores de temperatura ofrecidos por la lectura de la RTD y el termómetro de mercurio, ofreciendo una diferencia de:

$$\Delta_{temp} = T_{RTD} - T_{HG} = 33.39^{\circ}\text{C} - 27^{\circ}\text{C} = 6.39^{\circ}\text{C}$$

Se procedió a revisar la librería con la finalidad de ajustar las constantes de resistencia en la temperatura a cero grados Celsius y la resistencia de referencia Rref, que de acuerdo a la hoja de datos del MAX31865 debería ser 400 ohmios, pero midiendo en el hardware este valor es de 430 ohmios (ver fotografía 15). Por su parte la $R_0=100\ \Omega$ a 0°C depende del nivel de concentración de impurezas en el platino de la RTD; es decir, puede tener una ligera variación por ello.

Se realizó la modificación en la librería, conforme a la ecuación 4, ver figura 14.

```
float Z1, Z2, Z3, Z4, Rt, temp;

Rt = readRTD();
Rt /= 32768;
Rt *= refResistor;

// Serial.print("\nResistance: "); Serial.println(Rt, 8);

Z1 = -RTD_A;
Z2 = RTD_A * RTD_A - (4 * RTD_B);
Z3 = (4 * RTD_B) / RTDnominal;
Z4 = 2 * RTD_B;

temp = Z2 + (Z3 * (RTDnominal - Rt));
temp = (sqrt(temp) + Z1) / Z4;

if (temp >= 0) return temp;

// ugh.
Rt /= RTDnominal;
Rt *= 100; // normalize to 100 ohm
```

Figura 16 Modificación de librería Adafruit_Max31865.cpp.

Fuente : Librería Adafruit_MAX31865.

En el código de Arduino también se modificó:

$$R_{ref} = 430\Omega \text{ y } R_{nominal} = 102.36\Omega$$

3.9.7.2.7. Paso 7: prueba final de calibración.

Una vez realizados las modificaciones se compiló el programa dentro del Arduino y el resultado fue que el margen de error disminuyó a 0.1 °C para el rango de 0 – 100 °C, que incluye el rango de temperaturas en las que trabaja el proceso de conchado.

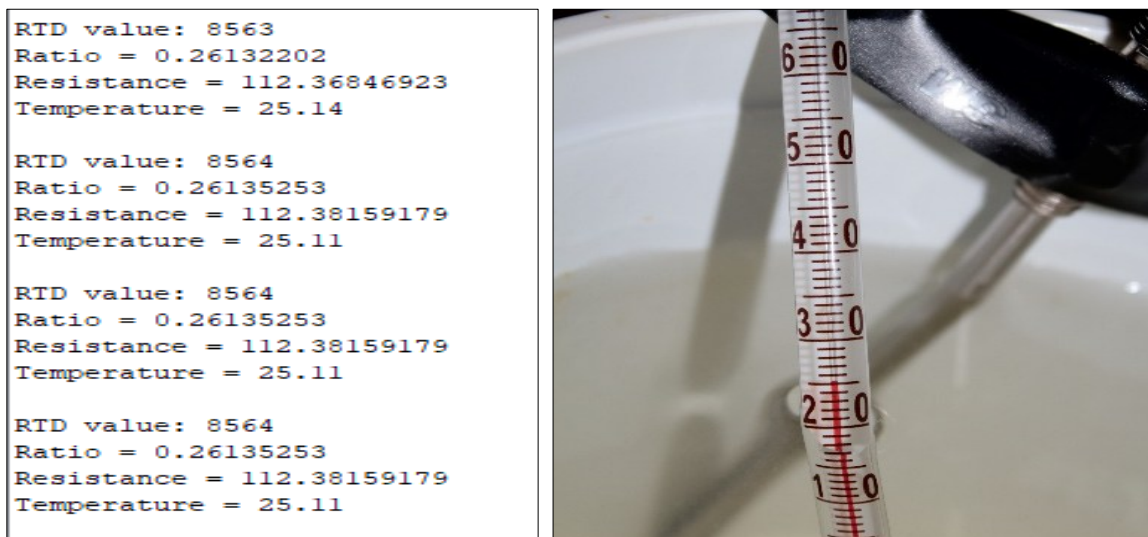


Figura 17 Temperatura final de calibración con un margen de error de 0.1 °C.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.7.3. Comunicación SPI de conversor ADC con el Controlador.

La comunicación Arduino y Max31865 se hace mediante el bus SPI (Serial Peripheral Interface), se trata de una arquitectura de comunicación maestro – esclavo, en el bus SPI la comunicación de datos entre maestros y esclavo se hace en dos líneas independientes, SDI o MOSI (master-out, slave-in) y SDO o MISO (master-in, slave-out). El MAX31865 soporta modos SPI del 1 al 3, SDI y SDO son los pines seriales de entrada y salida para los dispositivos respectivamente. El pin CS inicializa y termina la transmisión de datos y el SCLK (serial clock) sincroniza el movimiento de datos entre el master (microcontrolador) y el esclavo (Maxim Integrated, 2015).

El protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), es un bus de comunicación de tres líneas, sobre el que se transmiten 8 bits de información. Cada una de las líneas aporta información entre los dispositivos, puede recibir y enviar información al mismo tiempo, lo que se conoce como comunicación Seria Full dúplex, dos líneas envían y reciben bits y la tercera es el reloj que da el sincronismo de comunicación (Perez, 2008).

El MAX31865 acomoda automáticamente cualquier polaridad de reloj al muestrear SCLK cuando CS se activa para determinar la polaridad del reloj (Maxim Integrated, 2015).

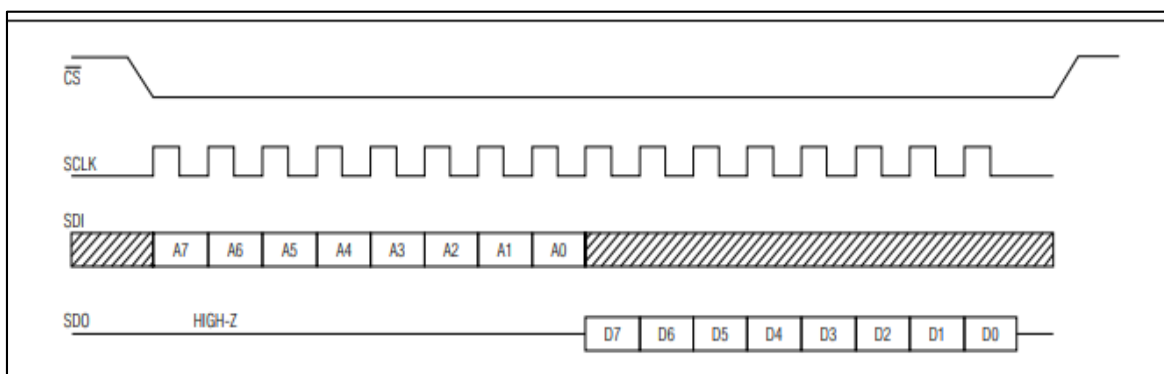


Figura 18 Lectura de un byte transmitido en comunicación SPI.

Fuente : Maxim Integrated

De acuerdo a las pruebas que se realizaron en el osciloscopio (ver fotografía 16), para el MAX31865 y Arduino Uno utilizados en el proyecto tenemos una polaridad de sincronismo de CPOL=0 y CHPA =1. Esta configuración hace que todos los bytes sean leídos en el filo de bajada del reloj de sincronización SCLK (ver figura 19, 20, 21).

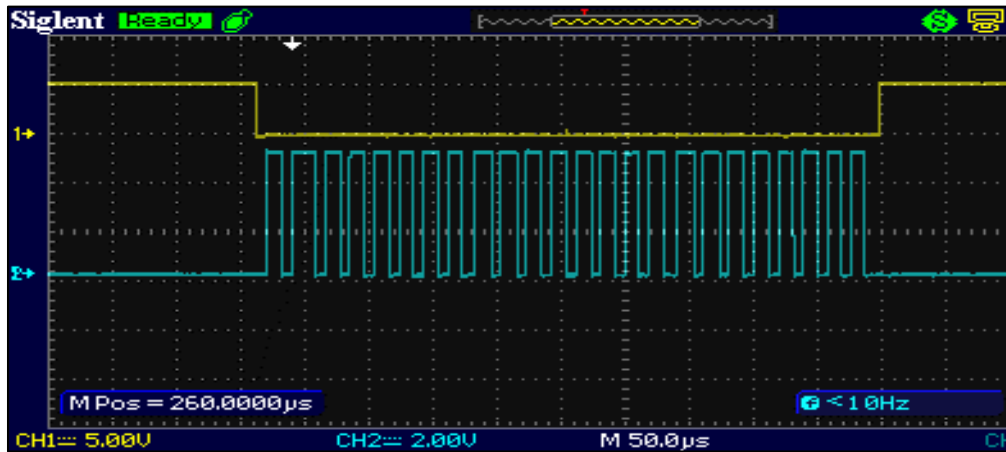


Figura 19 Polaridad del SCLK establecido en el registro del microcontrolador.

Fuente : Elaboración propia

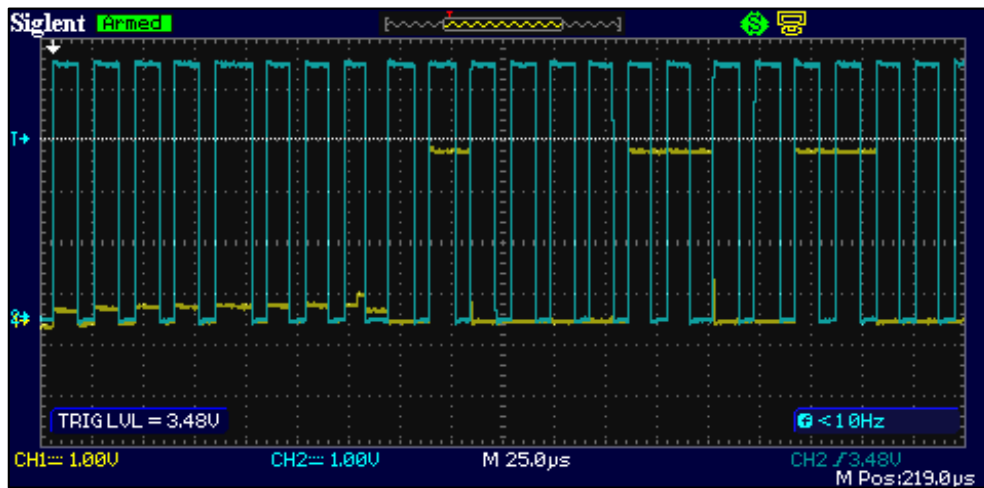


Figura 20 Curva amarilla bytes de dirección enviados por el SDI

Fuente : Elaboración propia

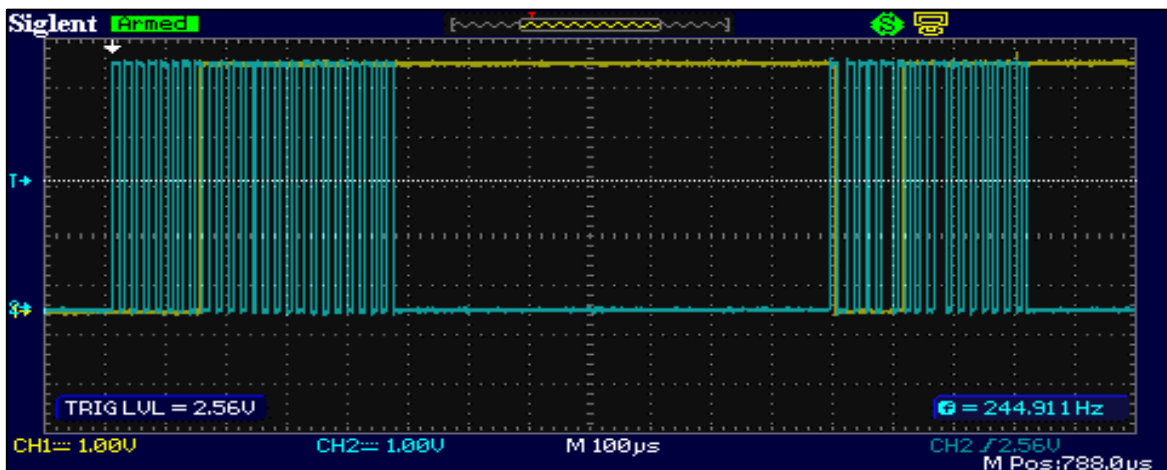


Figura 21 Curva amarilla bytes de temperatura recibidos por el SDO.

Fuente : Elaboración propia

3.9.8. Conversión de PWM en control PID a potencia de salida en CA.

Una señal de modulación de ancho de pulso (PWM) es un método que genera una señal analógica utilizando una fuente digital, esta consta de un ciclo de trabajo y una frecuencia. El primero determina el tiempo que la señal en estado lógico uno como un porcentaje del tiempo total que se tarda en completar el ciclo, por su parte la frecuencia determina que tan rápido el PWM completa un ciclo. La frecuencia con la que se debe establecer la señal PWM dependerá de la aplicación y del tiempo de respuesta del sistema al que se está alimentando, por ejemplo, para elementos de calefacción la frecuencia de ciclo necesario es de 10 a 100 Hz como valores típicos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

Para el caso del Arduino Uno tenemos frecuencias por defecto de salidas PWM de 490.2 Hz (ver figura 22) y 976.5 Hz (ver figura 23).

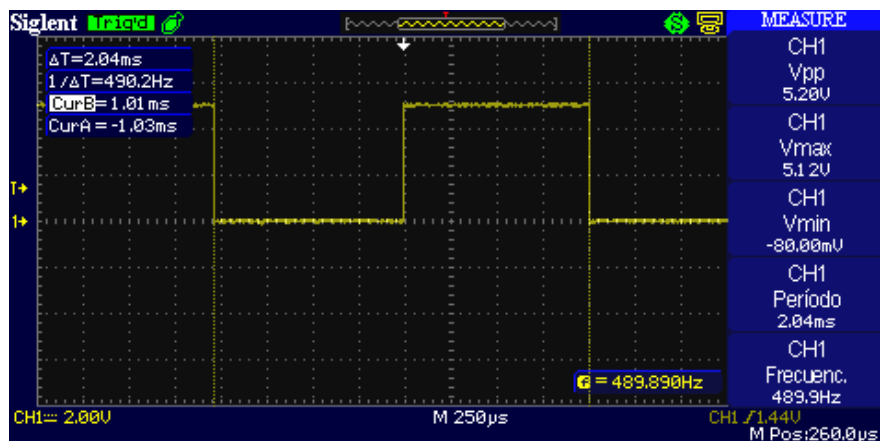


Figura 22 Frecuencia de salida de los pines 3, 9, 10 y 11 del Arduino Uno.

Fuente : Elaboración propia

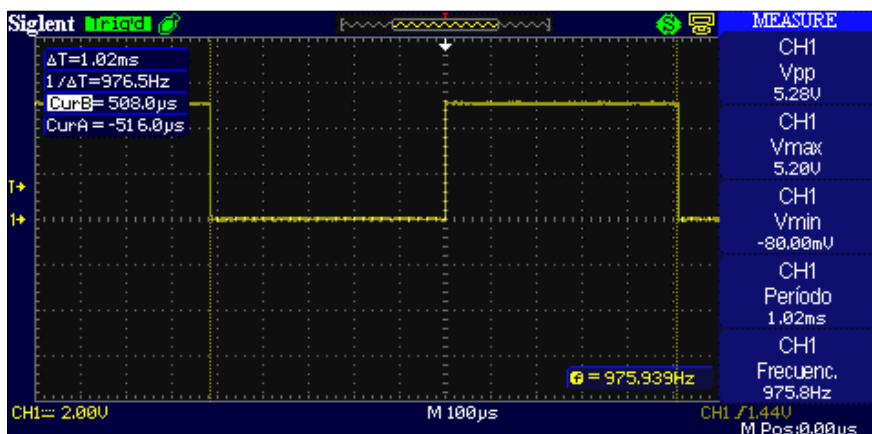


Figura 23 Frecuencia de PWM de los pines salidas 6 y 5 del Arduino Uno.

Fuente : Elaboración propia

Se realizaron pruebas experimentales con el Arduino Uno y el relé de estado sólido (SSR) con la finalidad de garantizar que en la salida que actuará sobre un voltaje AC no genere perturbaciones eléctricas o problemas en el actuador.

Las pruebas se dividieron en dos partes la primera prueba experimental se desarrolló un programa para el Arduino utilizando el SSR como salida PWM directa, en la segunda se desarrolló un código PID en lenguaje C++ que soporta la IDE de Arduino en el cual se aumentó el tiempo de ciclo PWM, con el fin de que estos sean más largos y actúen directamente sobre una corriente alterna de 220V a 60 Hz y aprovechando que el hardware SSR contiene en el circuito de salida un detector de cruce por cero para el disparo on-off, que alimenta una lámpara incandescente (para el caso de pruebas experimentales).

3.9.8.1. Materiales para pruebas experimentales.

- Arduino uno
- Relé de estado sólido (SSR).
- Placa de pruebas (protoboard).
- Cables para pruebas (cables dupont macho - macho).
- Lámpara incandescente.
- Cables para lámpara incandescente (2m de largo de calibre 14 AWG).
- Osciloscopio.
- Destornillador.
- Multímetro.
- Alicata de corte diagonal.
- Max31865
- Pulsador
- RTD PT100 de 3 hilos.
- Software (Simulink de Matlab, Excel, Tera term).

3.9.8.2. Procedimiento de pruebas experimentales.

3.9.8.2.1. Paso 1: montaje de circuitos.

Conexión del circuito y sondas de osciloscopio para obtener datos del comportamiento del circuito actuado 220 VAC con respecto al circuito de control digital, con distintos valores del valor PWM desde 255 hasta 0 (ver fotografía 17 en el anexo 2).

3.9.8.2.2. Paso 2: programación para enviar valores PWM en Arduino.

Se desarrolló un programa para el Arduino Uno utilizando la señal PWM del pin 6 conectado a la entrada de Corriente Directa (CD) del SSR, el mismo que a su salida alimenta a una lámpara incandescente en CA.

```
int PWM1=6;
```

```
int ValorC = 255; // Se modifica manualmente el valor de salida PWM de 8 bits de resolución
```

```
// es decir puede tener hasta 2^8 combinaciones 256 que van desde 0 hasta 255
```

```
void setup () { pinMode(pwm1,OUTPUT); }
```

```
void loop () { analogWrite(pwm1,ValorC); }
```

el valor de PWM o ciclo de trabajo fue ajustándose para cada 10 % empezando desde el 100 %, que en el Arduino es 255.

3.9.8.2.3. Paso 3: lectura de datos en osciloscopio.

Tabla 20

Comportamiento del circuito de potencia respecto del PWM del Arduino.

Ciclo de trabajo	Rango PWM Arduino	Frecuencia a entrada (Hz)	Voltaje Promedio DC (V)	Frecuencia a Salida AC (Hz)	Voltaje de salida (V)	Estado de la lámpara incandescente
100%	255	976.5	4.8	60	218	Encendido
90%	229	976.5	4.31	53.2	218	Encendido
80%	204	976.5	3.84	52.8	218	Parpadeo ligero
70%	178.5	976.5	3.35	48.8	218	Parpadeo ligero
60%	153	976.5	2.88	40.06	218	Parpadeo medio
50%	127.5	976.5	2.4	33.34	218	Parpadeo medio
40%	102	976.5	1.93	29.94	218	Parpadeo alto
30%	76.5	976.5	1.45	25.69	218	Parpadeo alto
20%	51	976.5	0.918	15.13	218	Parpadeo muy alto
10%	25.5	976.5	0.492	8.52	218	Parpadeo muy alto
0%	0	976.5	0	--	0	apagado

Fuente : Elaboración propia

El tiempo de ciclo o periodo de la señal PWM del Arduino es de 1.024 milisegundos, por su parte el SSR el tiempo que se toma en cambiar de estado encendido o apagado es menor a 10 milisegundos (ver Anexo 9), pero en el caso de la corriente alterna tiene un periodo de 16 milisegundos; quiere decir, que se da 15.624 ciclos de conmutación en el SSR por periodo en corriente alterna, por ello se genera parpadeos, producto de los recortes en la onda sinusoidal del voltaje en alterna sin seguir un patrón de sincronismo (ver figura 24).

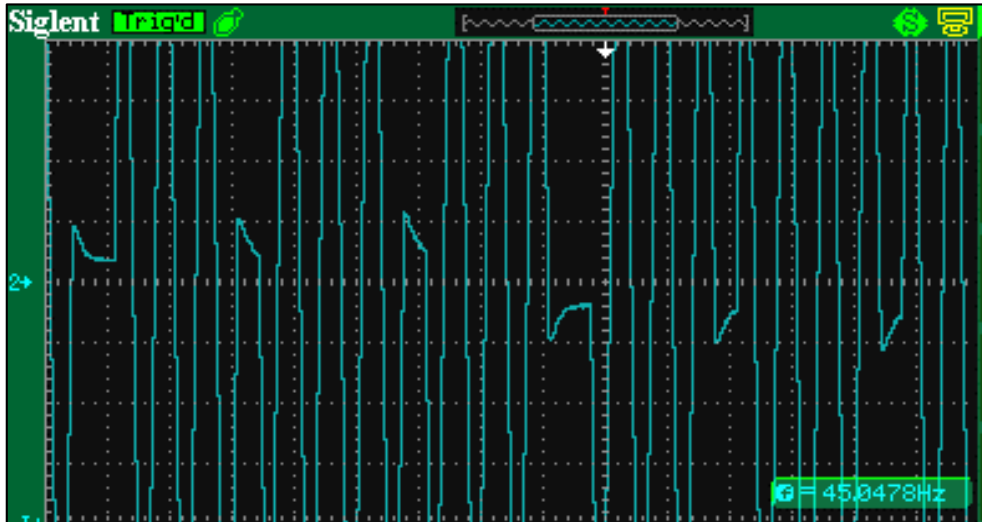


Figura 24 Generación de ciclos irregulares y distorsiones en CA producido por PWM de control.
Fuente : Elaboración propia.

Al generarse estas interferencias eléctricas que podrían ocasionar problemas en el actuador a pesar de que se trate de una carga resistiva, se decidió aumentar el periodo de la señal PWM optimizado con el control PID, con la finalidad de que este gestione los tiempos de encendido y apagado con respecto a un valor de temperatura referente.

3.9.8.2.4. Paso 4: adaptación de un controlador PID con una frecuencia de 1 Hz.

Análisis y aplicación de la librería PID_v1.h para Arduino.

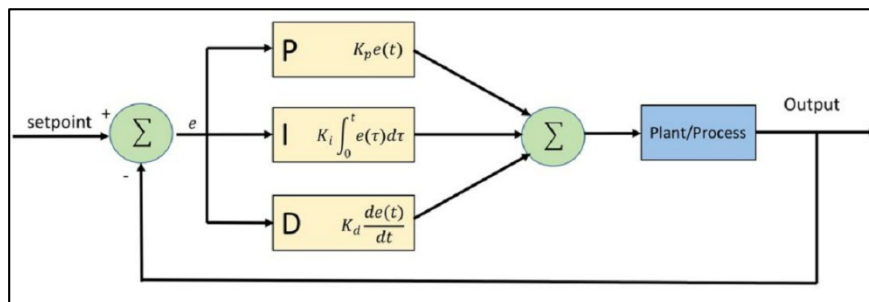


Figura 25 Diagrama de bloque control PID.
Fuente : Elaboración propia.


```

bool PID::Compute()
{
  if(!inAuto) return false;
  unsigned long now = millis();
  unsigned long timeChange = (now - lastTime);
  if(timeChange>=SampleTime)
  {
    /*Compute all the working error variables*/
    double input = *myInput;
    double error = *mySetpoint - input;
    double dInput = (input - lastInput);
    outputSum += (ki * error);

    /*Add Proportional on Measurement, if P_ON_M is specified*/
    if(!pOnE) outputSum -= kp * dInput;

    if(outputSum > outMax) outputSum = outMax;
    else if(outputSum < outMin) outputSum = outMin;

    /*Add Proportional on Error, if P_ON_E is specified*/
    double output;
    if(pOnE) output = kp * error;
    else output = 0;

    /*Compute Rest of PID Output*/
    output += outputSum - kd * dInput;

    if(output > outMax) output = outMax;
    else if(output < outMin) output = outMin;
    *myOutput = output;

    /*Remember some variables for next time*/
    lastInput = input;
    lastTime = now;
    return true;
  }
}

```

Figura 27 Algoritmo de control PID que debe resolver el controlador en 1 segundo.

Fuente : librería PID_v1 para Arduino.

3.9.8.2.5. Paso 5: programación de control PID para temperatura.

Se desarrolló el código de programación, incluyendo: librería PID_v1, librería Adafruit_Max31865 para leer temperatura (incluyendo las resistencias constantes encontradas en el acápite 3.9.7.2.), de acuerdo con los siguientes parámetros iniciales para el algoritmo PID.

Tabla 21

Valores a ingresar en programación para prueba experimental de PID.

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo de ciclo	milisegundos	1000
Setpoint	°C	40
Input	Lectura de sensor (°C)	--
kp	Adimensional	10
ki	Adimensional	3
kd	Adimensional	400
Pin de salida SSR	Pin del Arduino Uno	6

Fuente : Elaboración propia.

```

//Librerías:
#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include <PID_v1.h>
//.....
//Comunicación SPI: CS, SDI(MOSI), SDO (MISO), SCLK
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(10,11,12,13);
//El valor de RREF es Rref=430 homnimos
#define RREF 430
#define RNOMINAL 102.36
#define tiempoCiclo 1000
//Definir pines
#define SSR 6
//Variables
double Setpoint, Input, Output;
double kp=10,ki=3,kd=400;
float temperatura=0;
unsigned long respuestaUltimaTemperatura=0;
unsigned long lastPIDCalculation=0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, kp, ki, kd, DIRECT);

void setup() {
  Setpoint=40.0;
  myPID.SetOutputLimits(0,tiempoCiclo);
  myPID.SetSampleTime(tiempoCiclo);
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  Serial.begin(115200);
  max.begin(MAX31865_3WIRE);
  pinMode(SSR,OUTPUT);
  digitalWrite(SSR,LOW);}

void loop() {
  uint16_t rtd=max.readRTD();
  float ratio=rtd;

```

```

ratio/= 32768;
if(millis()-respuestaUltimaTemperatura>=tiempoCiclo){
temperatura=max.temperature(RNOMINAL,RREF);
Input=(double)temperatura;
myPID.Compute();
lastPIDCalculation=millis();
Serial.print(temperatura);
Serial.print(" , ");
Serial.println(Output/50);
respuestaUltimaTemperatura=millis();}
control();}

void control()
{ if((millis() <=(lastPIDCalculation+Output))||(Output==tiempoCiclo))
  { //Encender
    digitalWrite(SSR,HIGH);
  }else { //apagar
    digitalWrite(SSR,LOW);
  }
}
//Encender

```

Fuente : Elaboración propia basado en las librerías Adafruit_MAX31865 y PID_v1.

3.9.8.2.6. Paso 6: lectura de datos en osciloscopio para prueba de control PID.

Se recopiló las gráficas de osciloscopio que muestran el comportamiento del actuador frente una señal PWM a 1 Hz de frecuencia enviada desde el Arduino, también se visualiza el ciclo de trabajo dado por el controlado y el algoritmo PID alojado en él (ver figura 28).

El periodo de cálculo del controlador es de 1 segundo y, ese es el tiempo de referencia para la activación y desactivación del SSR, que de acuerdo a su hardware tiene una etapa de detector de cruce por cero (ver anexo 13), disparando siempre en cero sin importar si la señal de entrada se activa antes (ver figura 29 y 30).

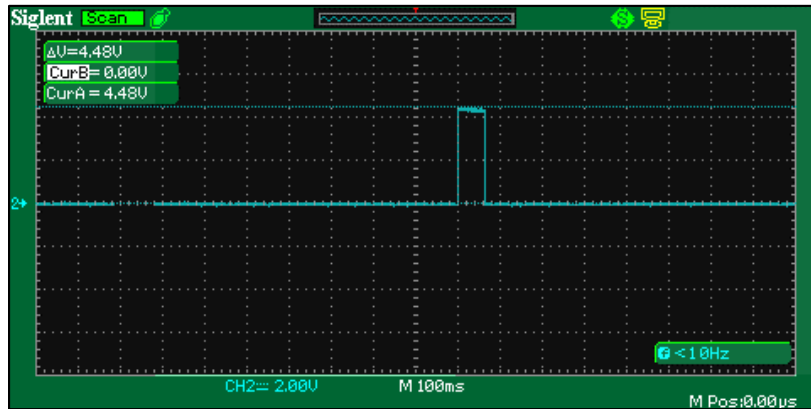


Figura 28 Control PID acciona la salida como una señal PWM de baja frecuencia.
Fuente : Elaboración propia.

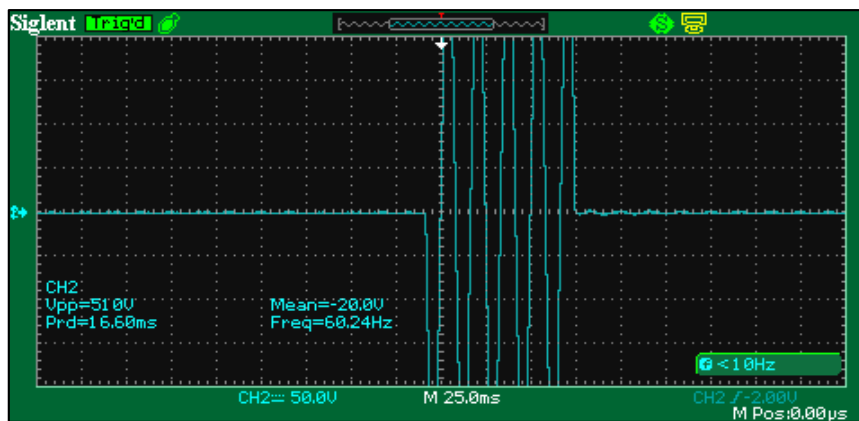


Figura 29 Conmutación de SSR en el cruce por cero a un ciclo de trabajo equivalente en DC.
Fuente : Elaboración propia.

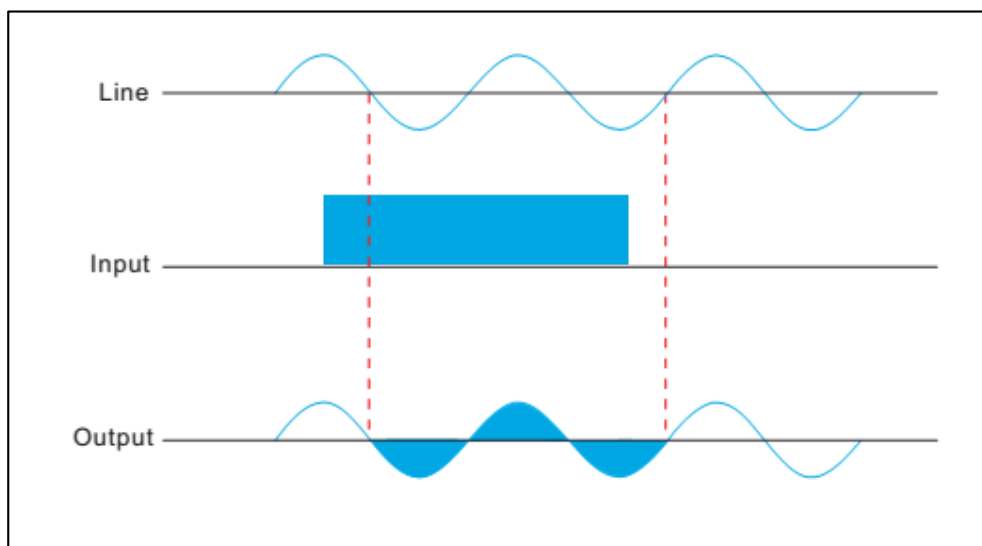


Figura 30 Método de control de SSR disparo en cruce por cero.
Fuente : ANV, 2019.

3.9.8.2.1. Paso 6: lectura del comportamiento de la temperatura.

Al estar en contacto el sensor de temperatura con la lámpara incandescente, permitió simular una función de transferencia equivalente al proceso real lo cual mostró la gráfica del comportamiento de la temperatura y del valor en porcentaje de ciclo de trabajo.

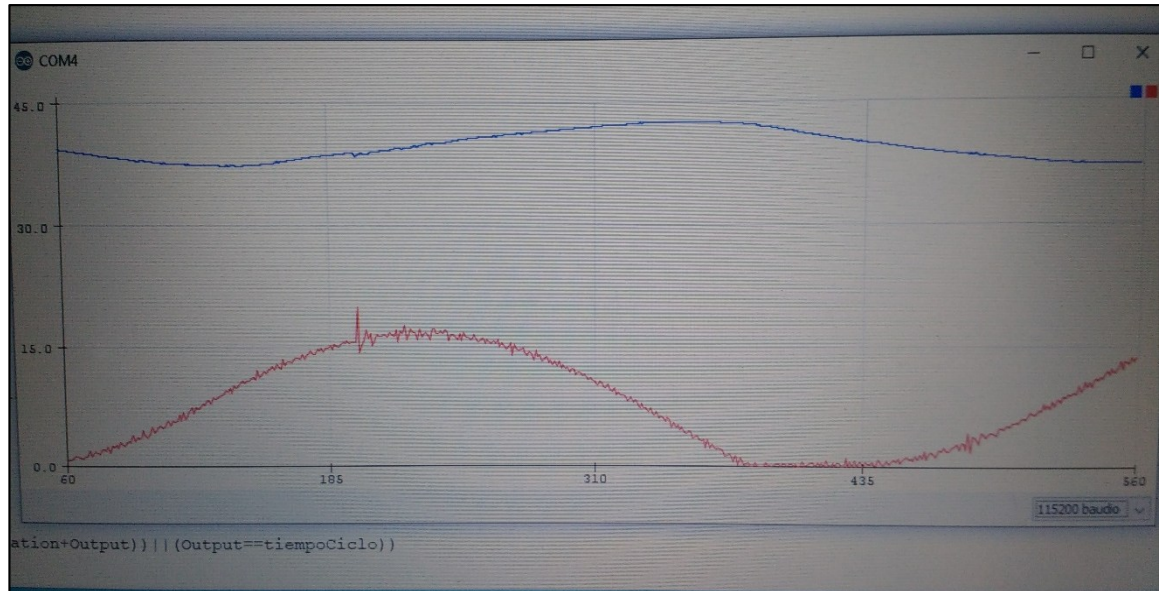


Figura 31 Temperatura sensada línea azul versus contundencia del actuador línea azul.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.9. Función de transferencia y sintonización del controlador.

El controlador PID se encuentra dentro de los modelos dinámicos de control, antes de un modelamiento de un sistema con frecuencia, es importante tener una caracterización de su conducta con respecto al tiempo. La dinámica puede expresarse mediante una tabla de señales de entrada y sus correspondientes señales de salida y es la forma más intuitiva para caracterizar dinámicas de procesos (como el control de temperatura), la señal de entrada en particular se escoge a menudo para que sea fácil de generar experimentalmente, ejemplo, escalones, pulsos e impulsos (Aström y Hägglund, 2009).

La función de transferencia, se obtiene por la razón entre señales, en un controlador PID estado dado por:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (5)$$
$$C(s) = K + \frac{K}{sT_i} + sT_d$$

Donde:

K : Constante proporcional, T_i : Tiempo integral, T_d : Tiempo derivativo

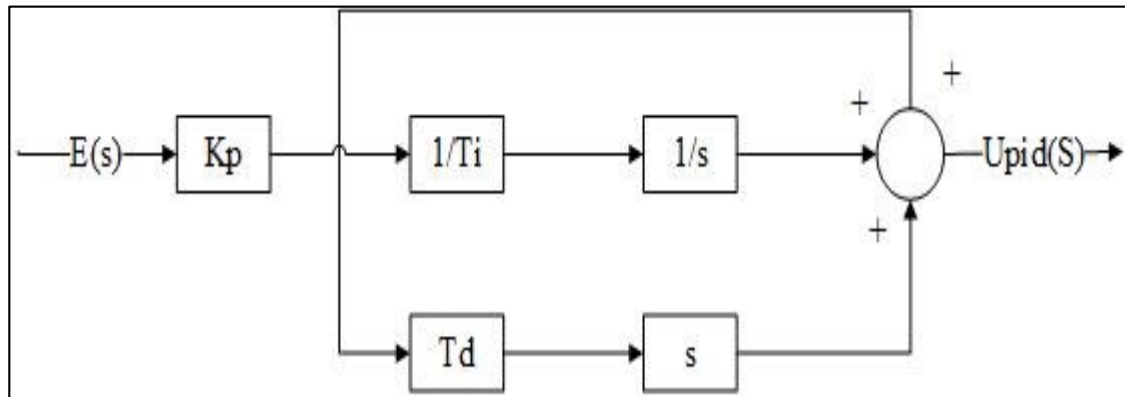


Figura 32 Diagrama de bloques de la función de transferencia del controlador PID.

Fuente : Elaboración propia basado en Ramírez Lazo, 2013.

De donde se deduce que:

$$K_i = \frac{K}{T_i} \qquad K_d = K t_d$$

Siendo:

K_i : Constante integral K_d : Constante derivativa

Para que haya una disminución en el error durante el proceso, se sintonizó el controlador, modificando las constantes (K , K_i , K_d), buscando obtener un valor en específico que permita una actuación armónica entre las variables de entrada y salida, visualizando una curva sin oscilaciones pronunciadas con respecto al punto de consigna.

El método utilizado es el diseñado por Ziegler y Nichols que se basa en obtener la información del proceso en la forma de respuesta a un escalón de lazo abierto. Para ello se usó el software Matlab Simulink que facilita el ajuste de los parámetros del controlador PID partiendo de la captura de datos de entrada y salida del controlador, dichos datos de temperatura y ciclo de trabajo del actuador con respecto al tiempo son aproximados a una función de transferencia que sirvió para calcular los parámetros del PID, para ello eso utilizó el comando pidtool.

Se modificó el código del acápite 3.9.8.2.5., para agregar un botón con el cuál inicialice al programa cuando las configuraciones para registro ya fueran establecidas (ver anexo 12).

Para el registro de temperatura en una plantilla de Excel, se utilizó el emulador serial terminal Tera Term, que entabla una comunicación serial con el Arduino y permite el registró la temperatura en Excel, en muestras de 1 segundo.

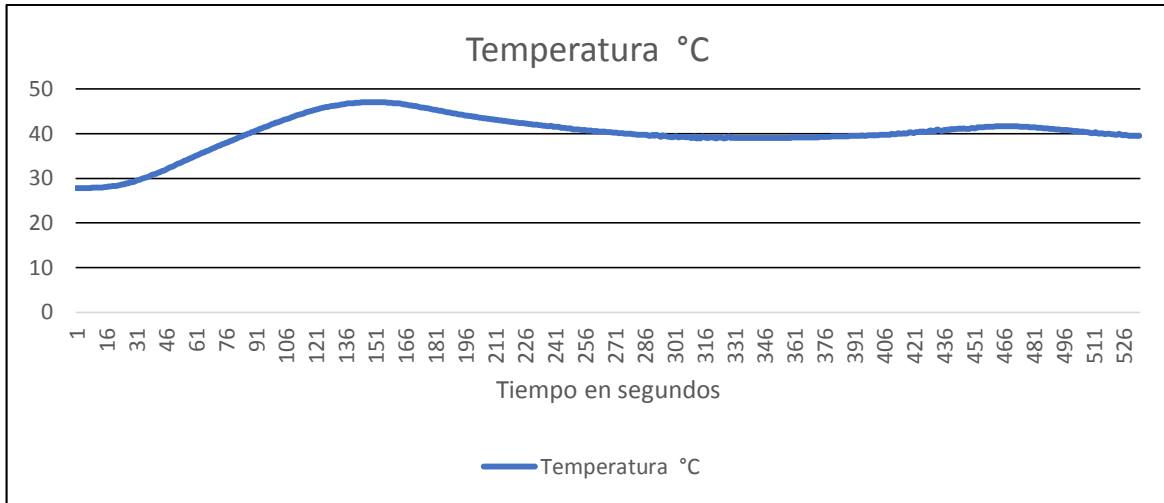


Figura 33 Registro de temperatura en funcionamiento del control PID a sintonizar.

Fuente : Elaboración propia

Luego se identificó en Matlab la curva descrita por la temperatura y la salida del actuador que el software aproximó a una función de transferencia con un 95.44 % de compatibilidad. Una vez obtenida se sintonizo el controlador PID (ver Anexo 13).

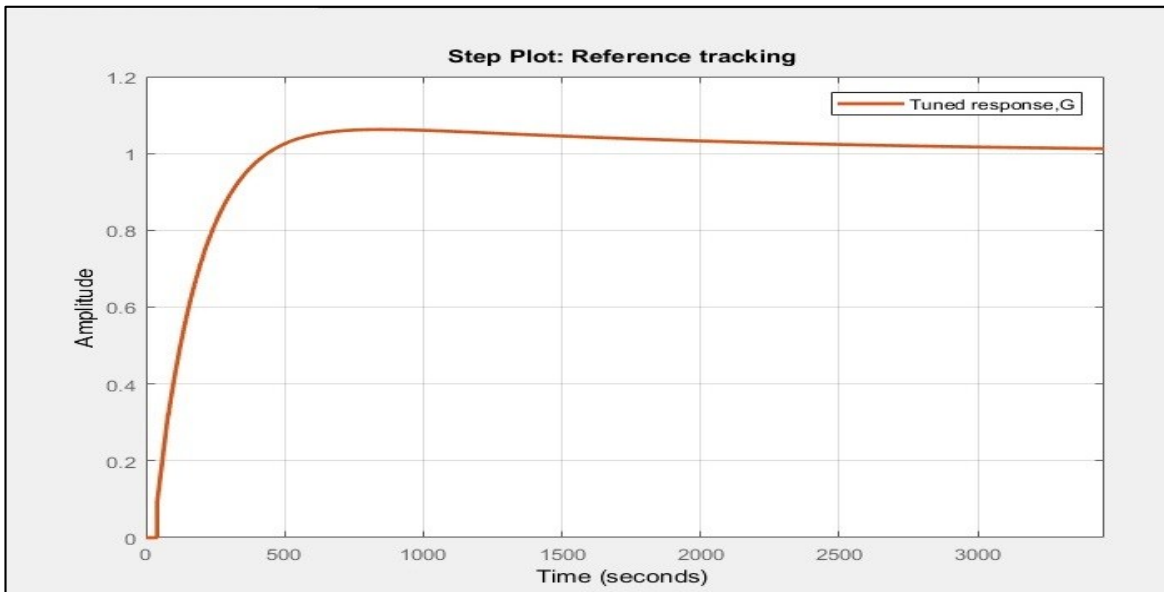


Figura 34 Sintonizado de función de transferencia para el control PID.

Fuente : Elaboración propia en software Matlab.

Tabla 22

Constantes de proporcionalidad encontradas en la sintonización.

Constantes	Formula	Valor
Constante proporcional	K	59.3153
Tiempo integral	T_i	1679.130927
Tiempo derivativo	T_d	15.58838276
Constante integral	$K_i = \frac{K}{T_i}$	0.035325
Constante derivativa	$K_d = K t_d$	924.6296

Fuente : Elaboración propia en software Matlab.

3.9.10. Diseño del sistema de control y monitorización.

3.9.10.1. Diagrama de bloques funcional.

Este diagrama muestra la función y ubicación de cada componente en un proceso de conchado dentro de la máquina de estudio, incluyendo el prototipo como una parte funcional de la misma, se consideró un operador interactuando con el prototipo (ver figura 35).

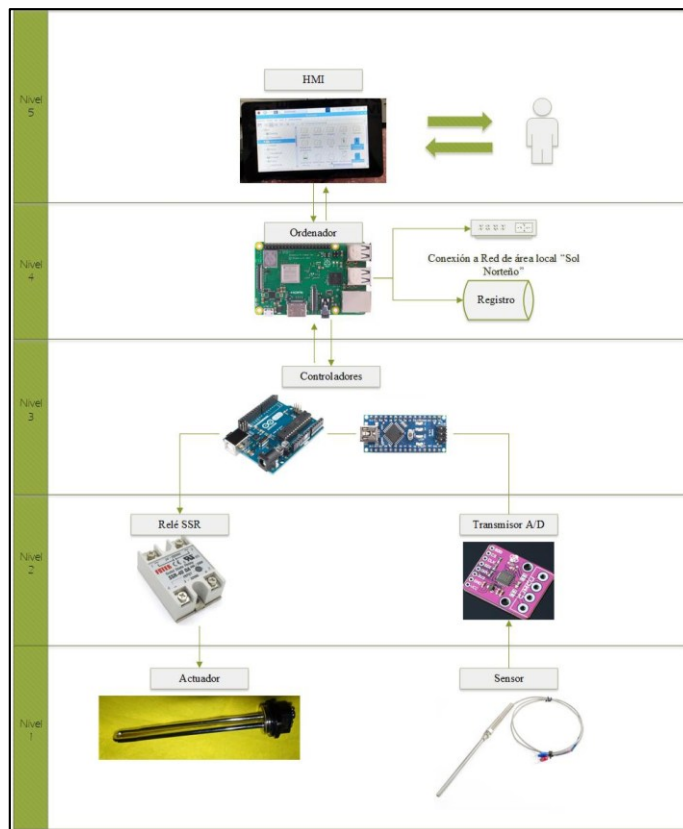


Figura 35 Diagrama de bloques funcional del prototipo.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.10.1. Topología de circuitos del prototipo.

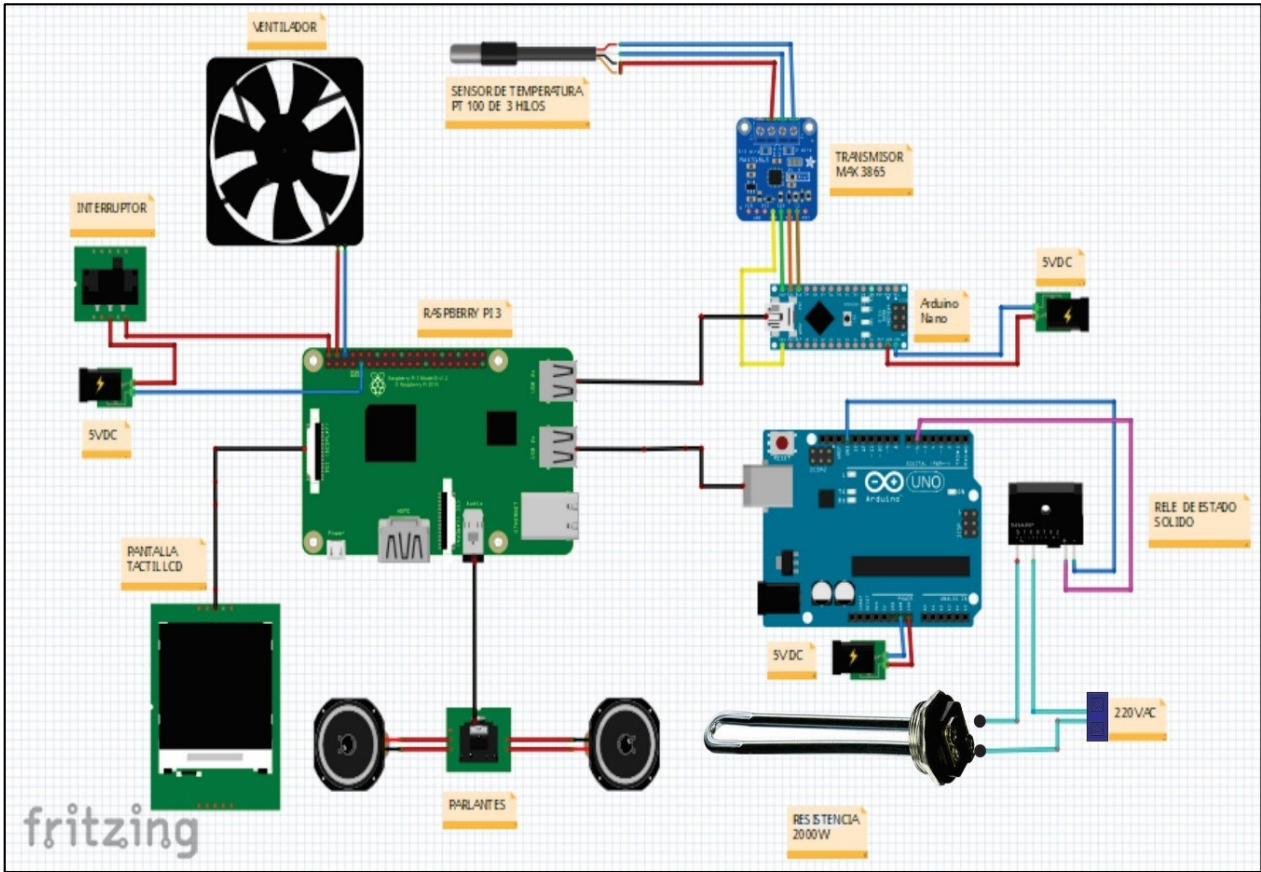


Figura 36 Diagrama de conexión eléctrica en software Fritzing.

Fuente : Elaboración propia en software Fritzing.

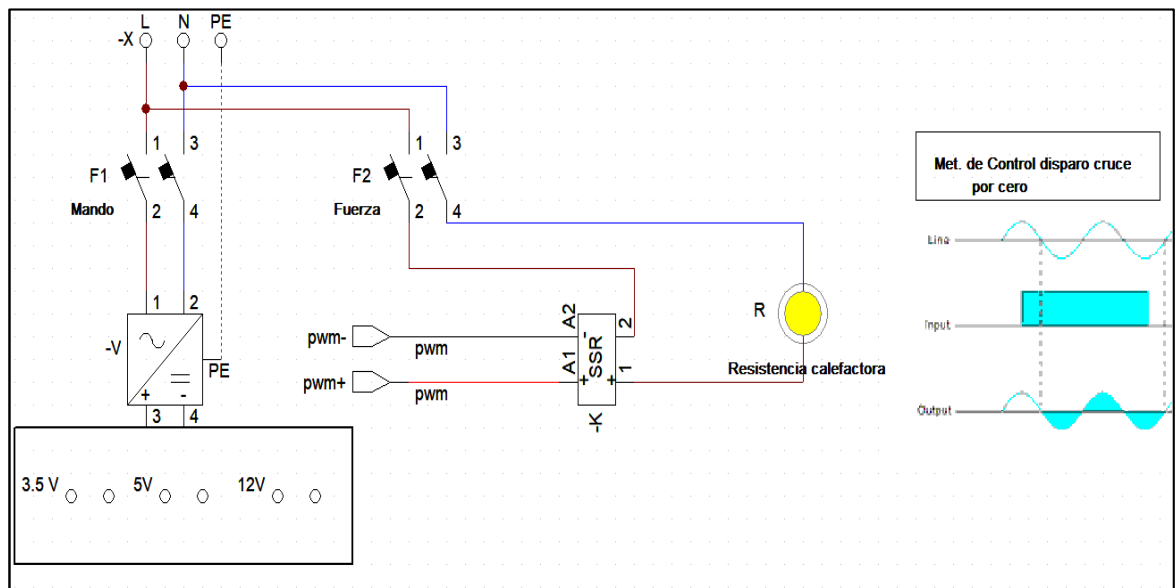


Figura 37 Diagrama de circuito e alimentación eléctrica.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.10.1. Control y monitoreo implementado.

El siguiente diagrama (figura 38) comprende al tipo de control implementado para el proceso de conchado, considerando las etapas de control PID y Registro de temperatura como las más importantes.

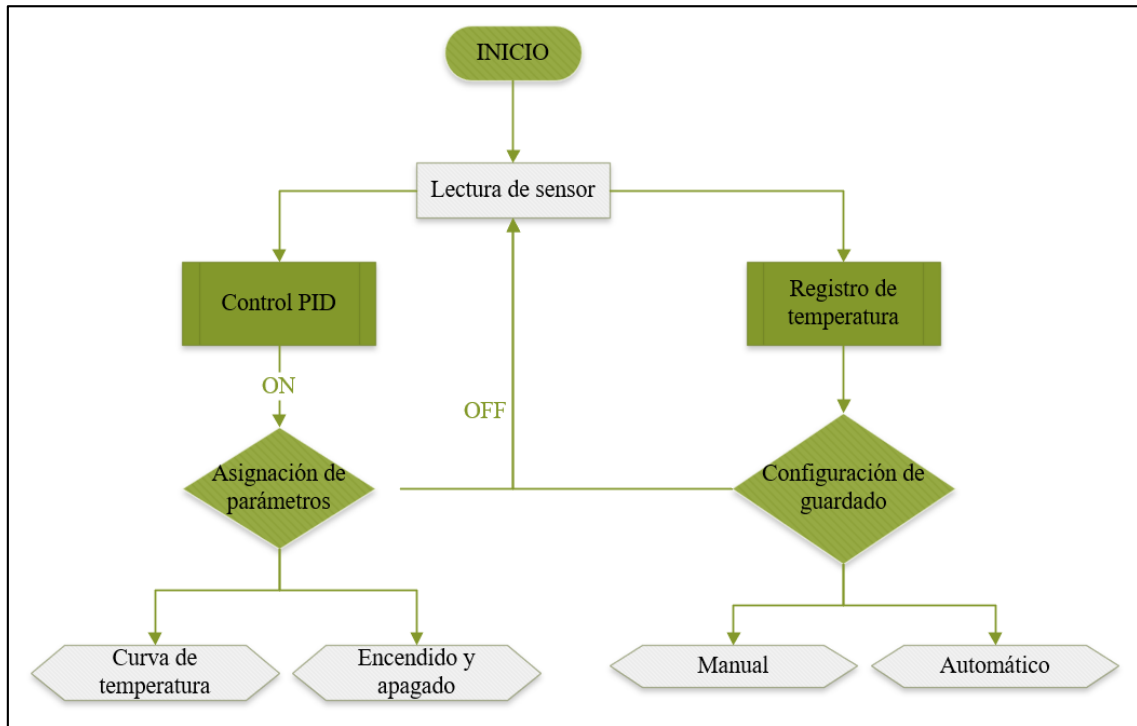


Figura 38 Diagrama de funcionamiento general de HMI.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11. Desarrollo de pantalla HMI.

3.9.11.1. Sistema operativo.

Se realizó la instalación del sistema operativo Raspbian en la placa Raspberry Pi 3B+. El modo de instalación fue utilizando el gestor de instalación NOOBS, el mismo que se puede guardar en la SDcard de la Raspberry Pi desde una computadora externa. Luego de haber conectado a la fuente de alimentación por primera vez, se siguió el normal proceso de instalación del Sistema operativo.

En la figura 39 se muestra el diagrama de todo el procedimiento que se hizo para la instalación del sistema operativo, desde la adquisición de componentes hasta la configuración y actualización final

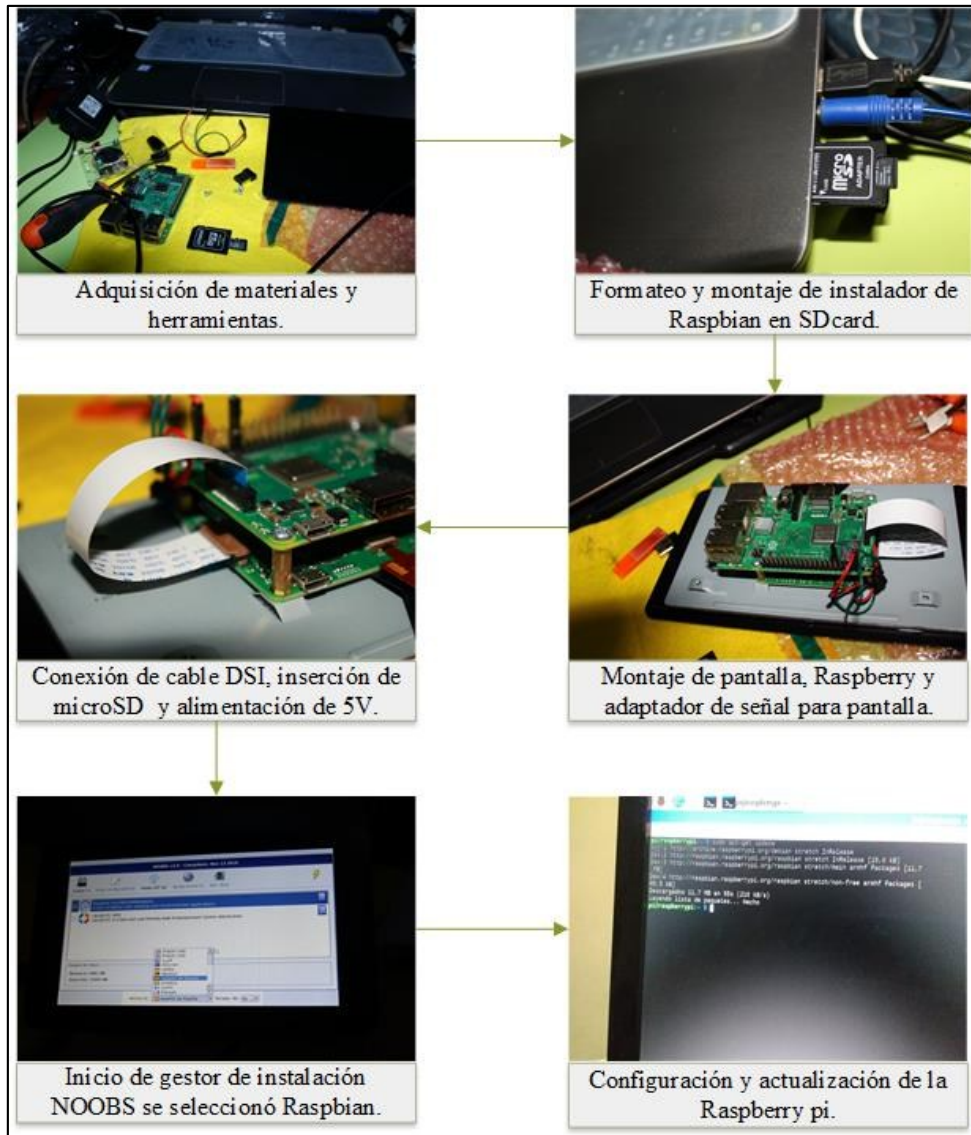


Figura 39 Instalación del sistema operativo.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.2. Interfaz gráfica.

Ames-Zegarra (2015) recomienda que, las pruebas de usabilidad de una HMI se deben realizar con prototipos funcionales y dispositivos flexibles que te permitan una rápida reconfiguración, para poder generar, al final del proceso, una cantidad considerable de versiones y opiniones de los usuarios.

Para ello MyOpenLab es un software de desarrollo basado en software libre Java, la programación es sencilla e intuitiva porque se hace desde elementos gráficos y lógicos, los cuales cumplen funciones específicas con propiedades configurables por el usuario, que pueden permitir desarrollar una HMI, desde una computadora para uso específico como la

Raspberry, aprovechando las interfaces de comunicación Rs232 v2, y la librería Firmata estándar para el Arduino (Salafia y Velásquez, 2016).

3.9.11.2.1. Diseño del panel principal.

En el panel de portada principal se tuvo en cuenta el diseño de un menú, que tenga la facilidad de generar otros sub paneles “sub VM”. Se generó también una distribución para aplicar un ejecutable en la Raspberry y evitar estar abriendo el programa cada vez que se enciende la máquina. En él se aprecia la lectura de temperatura en grados Celsius correspondiente a la salida numérica y el menú de opciones que son cuatro sub paneles control PID, historial y ayuda (ver figura 40).



Figura 40 Diseño del panel principal.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.2.2. Diseño del panel para el control PID.

El panel fue diseñado para ingresar las constantes para el control PID de forma manual, también cuenta con un selector on – off para encendido y apagado del control, en estado encendido se cuenta con la función de visualización de variables de entrada y salida respectivamente (ver figura 41).

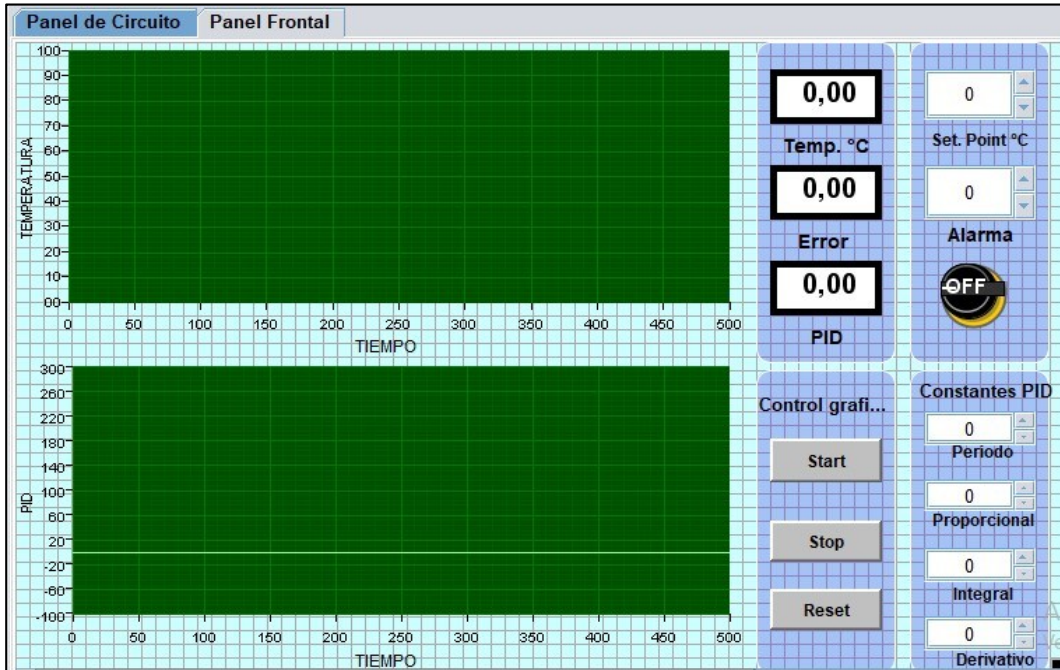


Figura 41 Diseño de panel para el control PID.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.2.3. Diseño del panel de historia y monitoreo de Temperatura.

El diseño consideró el registro de temperatura en forma manual y automática en un archivo .txt o .csv, para ello existe una ruta configurable donde se guardará, el nombre y la extensión de preferencia (ver figura 42).

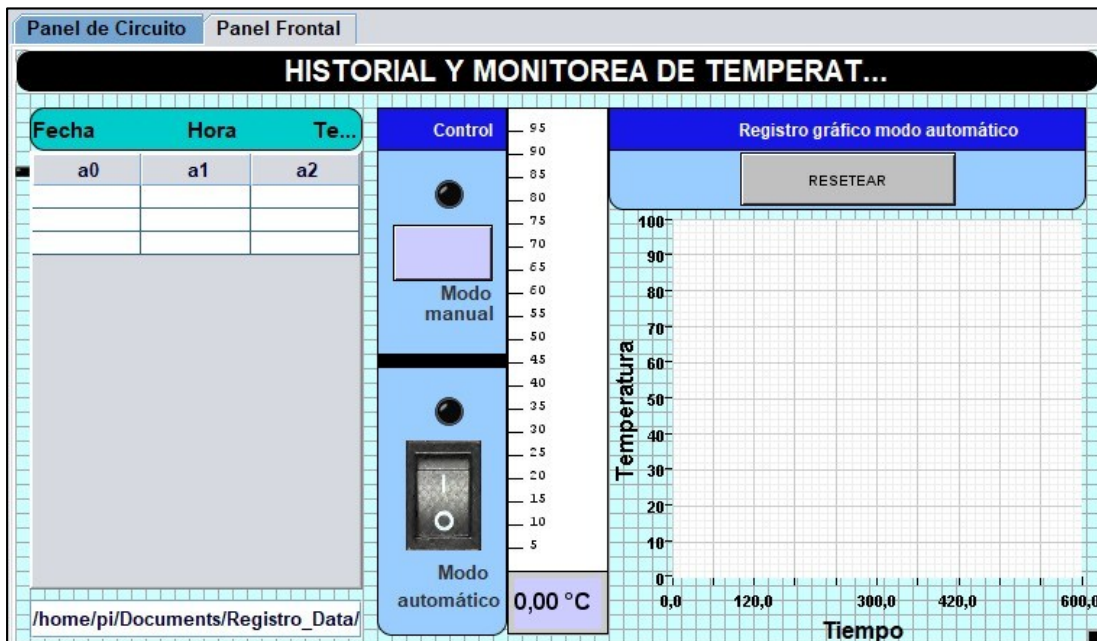


Figura 42 Diseño de panel historial y monitoreo.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.2.4. Diseño del panel de ayuda.

En el panel de ayuda se guardaron los pasos de inicialización y manipulación del HMI, cuenta con una versión auditiva que puede usarse cuando necesitas ayuda estando en otro submenú.

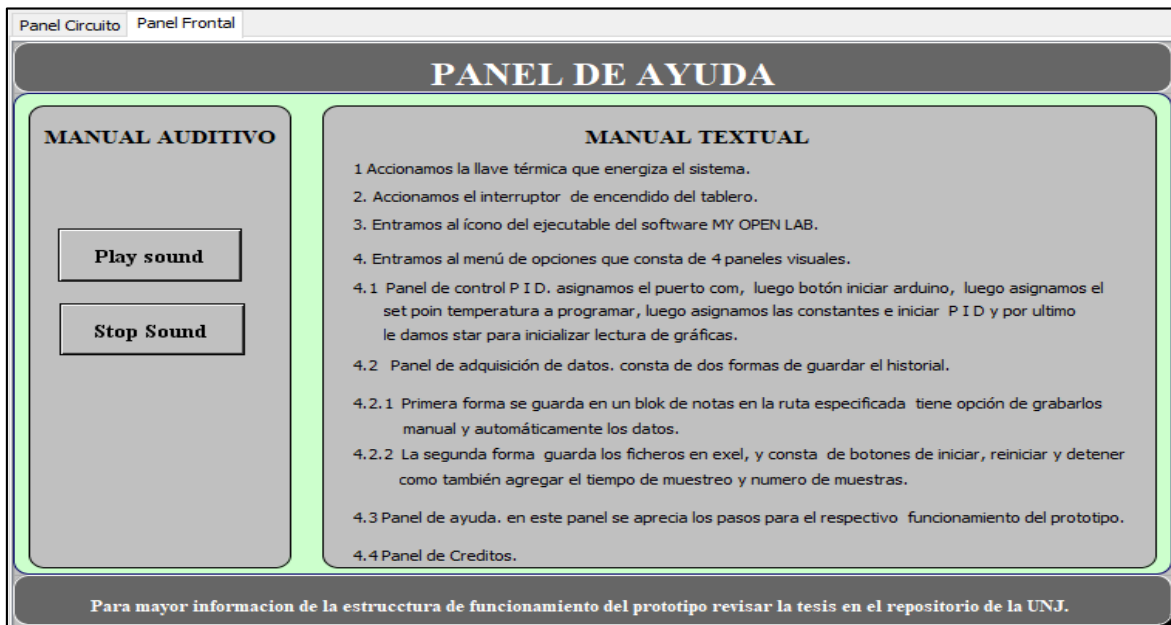


Figura 43 Diseño de panel de ayuda.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.3. *Programación.*

3.9.11.3.1. Programación de panel principal.

En el panel principal se enlazan los bloques sub VM que direccionan a los distintos sub paneles diseñados, también se envía la variable temperatura que será utilizada para el control PID y en el de registros e históricos.

Para realizar la comunicación serial se carga al Arduino el código de programación del sensor PT100 y transmisor MAX 31865 luego el dato es leído por el componente de comunicación estándar recomendado RS232, que se encarga de recibir y distribuir la información del Arduino a la placa Raspberry Pi. teniendo en cuenta colocar el puerto COM y la velocidad de transmisión en baudios. El dato leído del puerto serial se convierte de bytes a string, posteriormente convierte el dato de string a double para ser leído por una salida numérica.

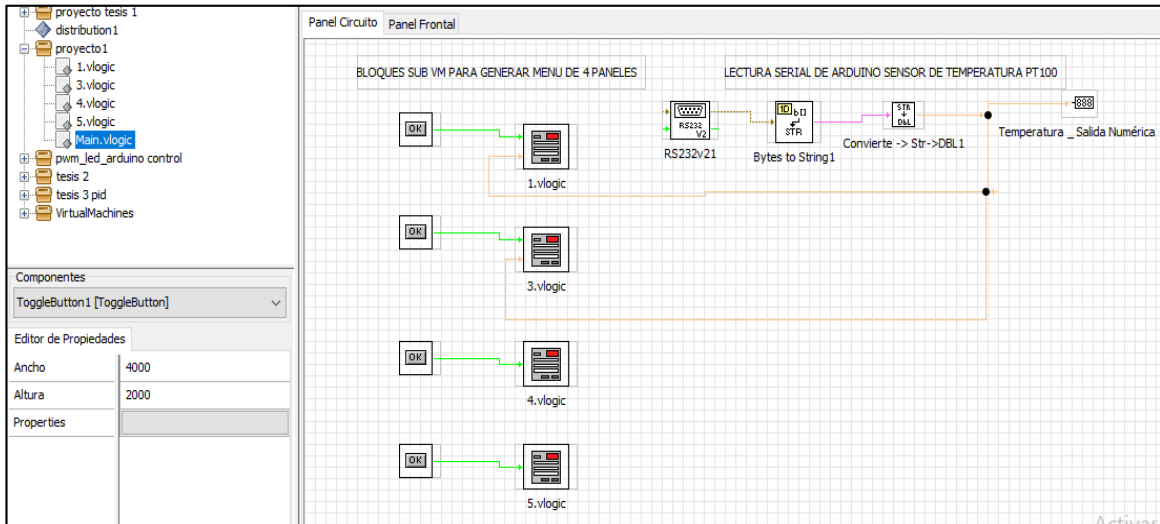


Figura 44 Programación de panel principal.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.3.2. Programación de panel para el control PID.

En el panel para control PID se inicia con la lectura del pin-entrada 1 que es recibida de la lectura de temperatura en el menú principal, ese dato es del tipo double y será la entrada para la aplicación del algoritmo de control (ver figura 45).

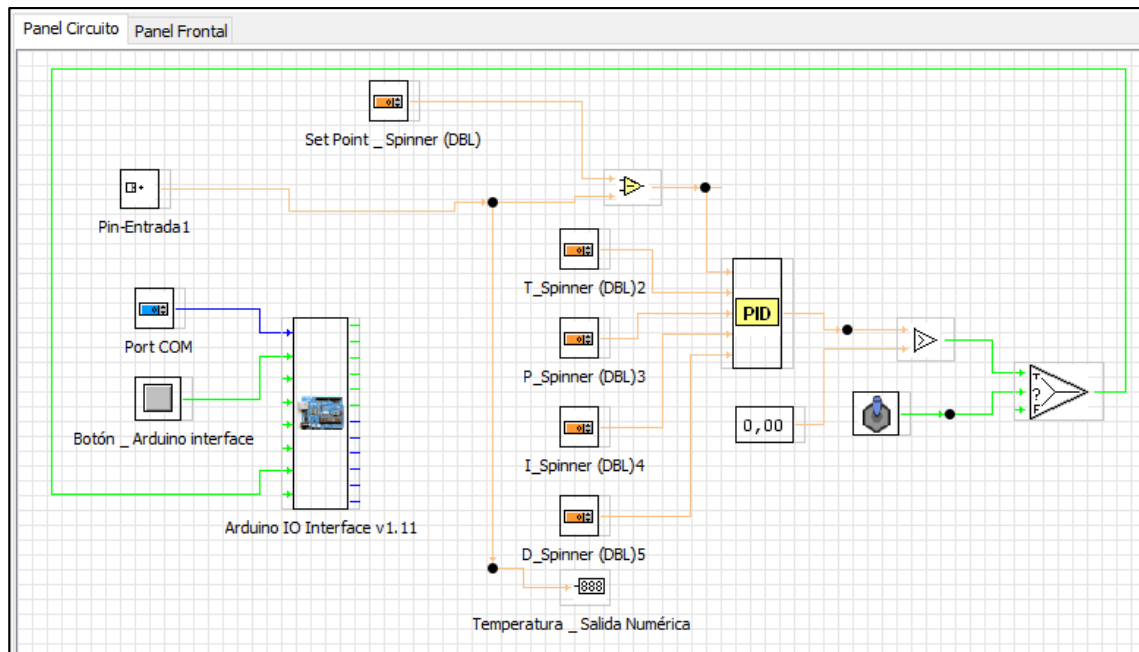


Figura 45 Programación de panel para el control PID.

Fuente : Elaboración propia.

El bloque PID consta de pines virtuales cinco de entrada y uno de salida, El pin-entrada1 envía el dato de temperatura y es restado con el set point esa diferencia entra al pin 1 del

PID, los 4 pines siguientes son constantes de tiempo, proporcional, integral y derivativa (Ver Tabla 22) de las constantes de proporcionalidad sintonizadas.

La salida del PID va a un comparador si el dato de salida es mayor que cero envía los datos caso contrario no, logrando tener valores positivos de accionamiento, luego pasa por el control verdadero falso al accionar un pulsador que permitirá tener un control de la salida PID, finalmente el dato es leído por el Arduino standard Firmata interface para accionar una salida de relé de estado sólido (ver figura 46).

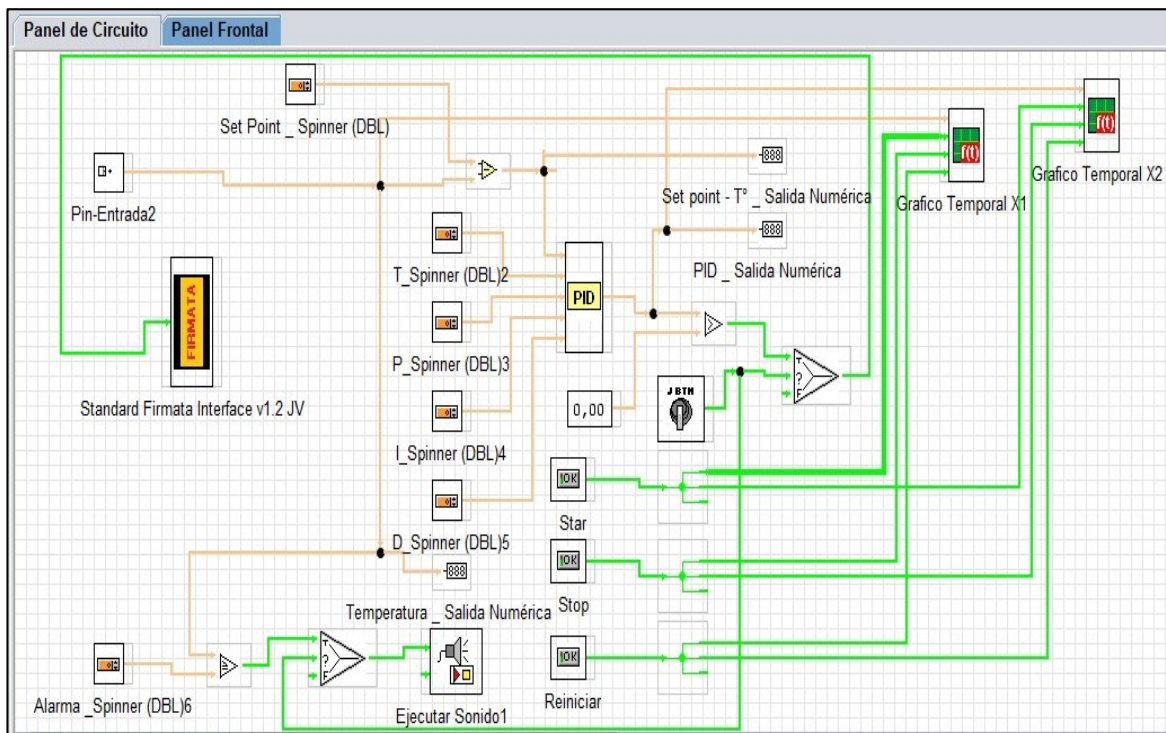


Figura 46 Programación del panel para el control PID con alarmas y generador de gráficos.

Fuente : Elaboración propia.

Las gráficas temporales x1 y x2 se generan tomando el dato del pin –entrada2 con respecto al tiempo. La grafica temporal x1 es lectura de temperatura – tiempo, la gráfica temporal x2 es salida PID – tiempo. Ademas consta de botones de control iniciar, stop y reiniciar gráfica.

El pin–entrada2 envía los datos de temperatura al sistema y son leídas por 3 salidas numéricas como temperatura, diferencia set point- temperatura y salida PID.

El sistema de alarma depende de la temperatura a la que queremos que suene la alarma, se compara con el dato de temperatura del bloque pin- entrada2 si la temperatura es mayor igual a la temperatura programada y si se acciona el botón de iniciar PID sonara la alarma caso contrario no.

3.9.11.3.2.1. Programación de panel historial y monitoreo de temperatura.

La programación comprende el registro de temperatura en dos modos, el primero un modo manual el cuál es el operario que decide el tiempo en tomar la muestra y otro que guardara un registro de temperatura en cada segundo de lectura luego de encendido el interruptor, la ventaja de este registro temporal, es la inclusión junto a la data de temperatura, los valores de fecha y hora.

Los datos son enviados por el pin – entrada 1 son guardados en la ruta del fichero, para la lectura del registro se generan un tren de pulsos temporizados y se compara con interruptor si se activa está en modo lectura automática caso contrario se activa manualmente el pulsador de lectura manual (ver figura 47).

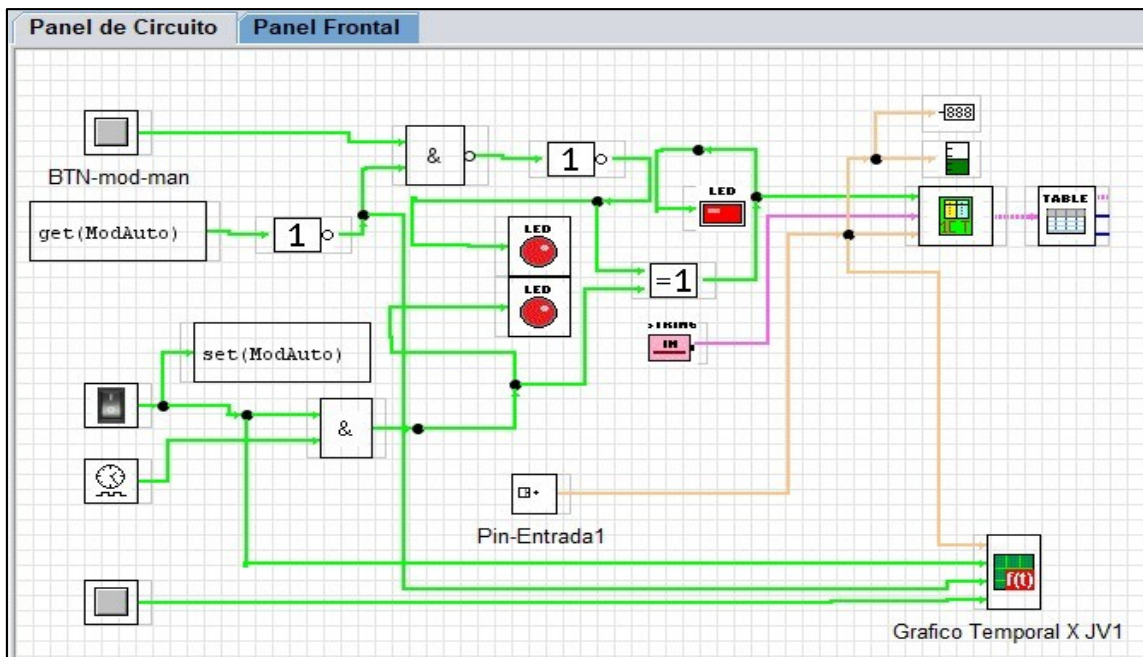


Figura 47 Programación del panel frontal de historial y registros.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.11.3.2.2. Programación del panel de ayuda.

En el diseño del panel de circuito se carga un audio en formato (.wav) que contiene el manual de usuario, además cuenta con botón de iniciar audio y detener.

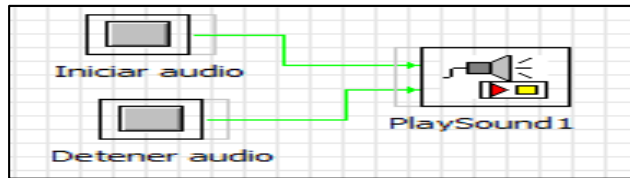


Figura 48 Botones para encendido y apagado de audio de ayuda.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.12. Construcción mecánica del prototipo.

3.9.12.1. Construcción de tablero en chapa metálica.

Primero se trazó la chapa metálica según las dimensiones diseñadas en auto CAD en el plano vista chapa extendida (ver A.13 en anexos). luego se corta con una amoladora utilizando un disco de metal de 4 ½” de diámetro, posteriormente se eliminan todos los filos con una lima.

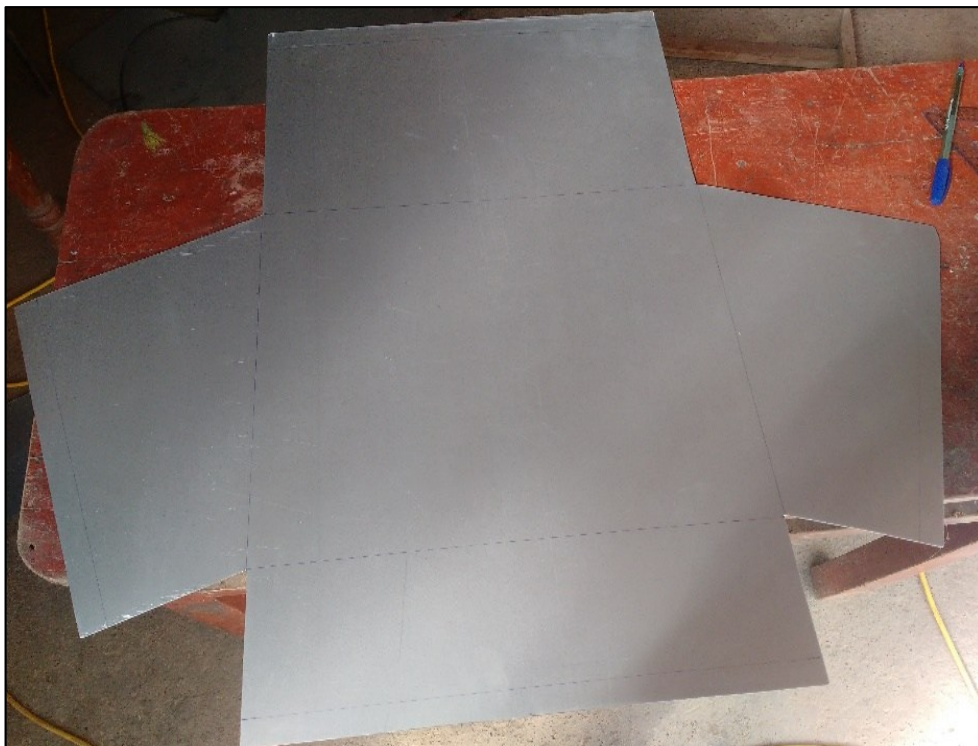


Figura 49 Trazado, cortado y limado de chapa metálica a plegar.

Fuente : Elaboración propia.

Lo segundo fue doblar la chapa metálica según el trazado en un maquina plegadora respetando los ángulos de inclinación de la chapa de acuerdo al plano auto CAD. Al finalizar el doblado se procedió a empernar con un ángulo de soporte en las esquinas

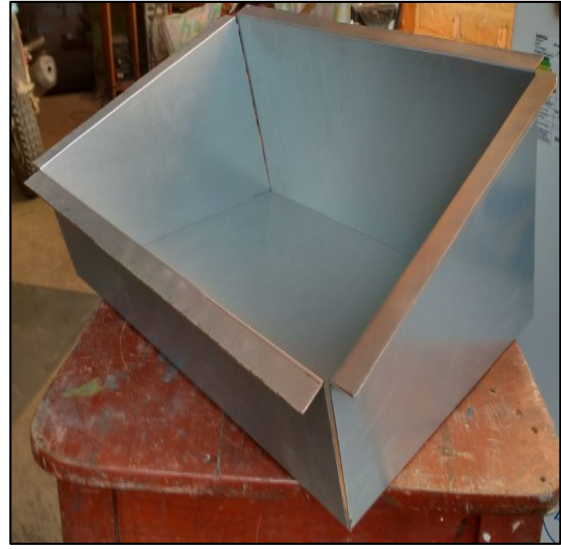


Figura 50 Plegado de la chapa metálica.
Fuente : Elaboración propia.

Luego se perforó el tablero según el trazo del plano con una broca de 6 mm de diámetro para el escape del aire caliente del interior del tablero. También, se perforó el tablero con una broca de 4 mm para la salida de audio.



Figura 51 Perforado de tablero.
Fuente : Elaboración propia.

Lo siguiente fue cortar el tablero para el anclaje de los dispositivos electrónicos como la pantalla LCD de 17x10 cm, también el ventilador de 8x8 cm, conexión USB, conexión internet e interruptor de encendido.



Figura 52 Cortado de tablero para el anclaje de los dispositivos.
Fuente : Elaboración propia.

Finalmente se procedió a pintar el tablero con pintura acrílica utilizando una compresora.

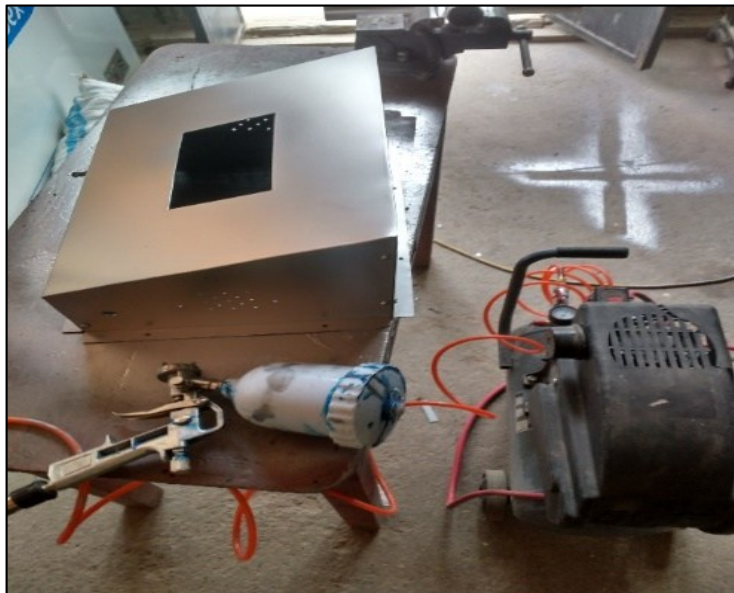


Figura 53 Pintado y acabados del tablero para el prototipo.
Fuente : Elaboración propia.

3.9.12.2. Construcción de brazo mecánico para soporte de tablero HMI.

Primero se cortó el tubo de 1 3/4" de acuerdo a las dimensiones del plano, con ayuda de una dobladora de tubos de 12 toneladas se le dio una curvatura de 90 ° a 85 cm de un extremo.

La gata hidráulica aumenta la presión en el tubo que con ayuda de moldes va tomando su curvatura de forma gradual hasta llegar a los 90° grados



Figura 54 Doblado de tubo galvanizado para construir brazo de soporte para tablero HMI.
Fuente : Elaboración propia.

Seguidamente se soldó un tubo de anclaje y se perforó para sujetar con los pernos el tablero HMI (ver figura 55).



Figura 55 Soldado y perforado para anclaje de tablero y brazo.
Fuente : Elaboración propia.

Finalmente se trabajó en el pintado y en otros detalles de estética del prototipo.



Figura 56 Tratamiento de masillado y pintado de brazo de soporte.
Fuente : Elaboración propia.

3.9.12.3. Construcción de tablero en chapa metálica.

Primero se adaptó un tablero de 12 polos de 33x20x16 cm de largo, ancho y altura respectivamente para hacer el montaje de la fuente ATX y las llaves de protección.

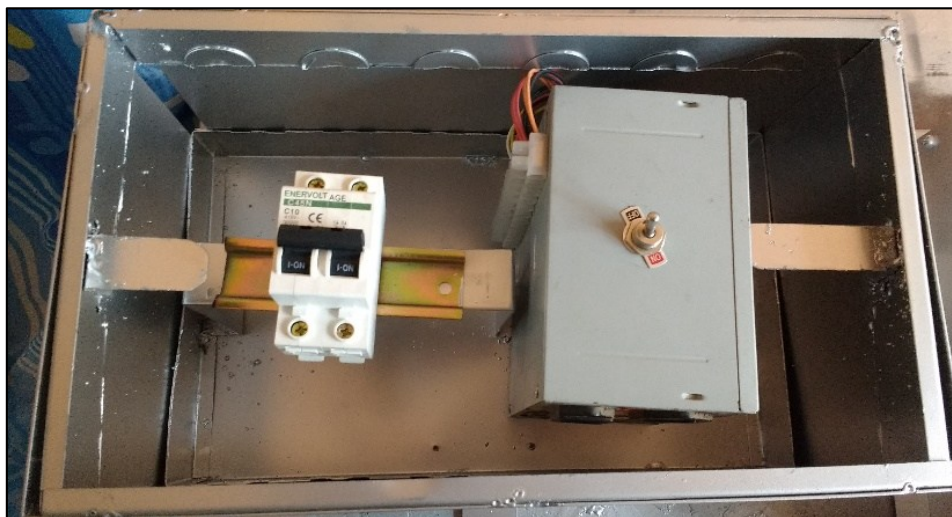


Figura 57 Adaptación mecánica de tablero de acuerdo con la fuente y llave térmica de protección.
Fuente : Elaboración propia.

Luego se soldó orejeras para fijación en la pared y se ensambló la tapa del tablero.



Figura 58 Ensamble de tapa en tablero de alimentación y protección.

Fuente : Elaboración propia.

3.9.13. Análisis económico del prototipo.

La empresa procesadora de chocolate Industrias Sol Norteño, inicia su producción en el año 2014, con 5 años de producción se puede considerar una empresa joven en proceso de implementación, que no está en capacidad de solventar costosos sistemas de Automatización Industrial, por lo que el desarrollo de un prototipo que tenga las mismas funciones a un costo menor y sin pagos adicionales por software es una alternativa asequible económicamente.

El presupuesto total para construcción del prototipo es 1 515.30 soles, incluyendo los gastos en tablero de protección y alimentación sin incluir la mano de obra e IGV.

En la tabla 23 se compara los costos según el mercado nacional de dispositivos electrónicos y dispositivos para la automatización industrial, se consideró para fines de cálculo el costo de los dispositivos más característicos de un sistema de control y monitoreo de manera análoga entre software y hardware libre y sistemas modulares no libres obteniendo una diferencia total 3590 soles, lo cuál es el monto que ahorraría si la empresa tiene la obligación de implementar el sistema.

Tabla 23

Costos aproximados de dispositivos análogos en automatización y control.

Etapa	Prototipo Implementado	Precio	Análogo en típicos sistemas de Automatización industrial	Precio
Despliegue y procesamiento de datos	Rasperry Pi 3b	S/ 220.00	PLC SIMATIC S7-1200	S/ 1,000.00
Visualización	LCD 7" táctil Raspberry Pi	S/ 470.00	SIMATIC KTP700 Basic, teclas/táctil, pantalla TFT 7"	S/ 3,080.00
Etapa de control para PID	Arduino uno	S/ 40.00	Controlador para temperatura Autonics	S/ 250.00
Etapa de conversión ADC	MAX31865	S/ 45.00	Transmisor de temperatura de 4 a 20 mA	S/ 35.00
Etapa de potencia	Relé SSR	S/ 50.00	Relé SSR	S/ 50.00
Total		S/ 825.00		S/ 4,415.00

Fuente : Elaboración propia de datos obtenidos de tiendas en línea (Naylamp Mechatronics, Electro Pro, Autotec Perú Corporation S.A.C.)

IV. RESULTADOS

4.1. Temperatura de conchado con el sistema anterior

Tabla 24

Temperatura medidas manualmente para las muestras M1, M2, M3 y M4.

Muestras	Condición	Temperatura de riesgo	Temperatura deseada por la empresa	Temperatura recomendada (Acevedo Alzate et al., 2017)
M1	Con resistencia	79.8 - 84 °C	40 – 60 °C	45
M2	Con resistencia	79.9 – 86 °C	40 – 60 °C	45
M3	Sin resistencia	57.5 °C	40 – 60 °C	45
M4	Sin resistencia	57.3 ° C	40 – 60 °C	45

Fuente : Elaboración propia, algunos datos rescatados de Díaz (2017) y Acevedo et al. (2017).

4.2. Temperatura de configuración para el control PID

De acuerdo con Acevedo Alzate et al. (2017), la temperatura punto fijo (set point) para el controlador PID, utilizado para las pruebas del prototipo es de 45 °C, este valor puede modificarse de acuerdo a las necesidades de la empresa.

4.3. Estructura y etapas del prototipo

Tabla 25

Estructura del prototipo desarrollado.

Etapa	Dispositivo	Función
Despliegue y procesamiento de datos	Raspberry 3B+	Eje central del prototipo, donde se aloja el programa, para la interface hombre máquina (HMI) y la gestión de datos.
Visualización	LCD 7" táctil	Interfaz HMI táctil que interactúa con el operario.
	Raspberry Pi	
Etapa de Control	Arduino uno	En él se aloja el algoritmo de control PID y es el responsable de interactuar con el sensor y el actuador.
Etapa de potencia	Relé de estado sólido SSR	Permite la regulación de potencia de una carga en corriente alterna, conforme a una señal en corriente directa de entrada.
Etapa de acondicionamiento de señal	Convertor ADC MAX31865	Permite convertir un valor de resistencia a Temperatura, convirtiendo una señal analógica a digital utilizando una interfaz de comunicación SDI
Dispositivo sensor	RTD PT100 DE 3 hilos	Mide la temperatura directamente del chocolate.
Carga controlada	Resistencia calefactora de 2500 W	Calienta el agua contenida en la chaqueta de la máquina.

Fuente : Elaboración propia.

4.4. Constantes para conversión ADC en MAX31865

Tabla 26

Constantes de configuraciones para el MAX31865.

Constante	Valor	Referencia
A	$3.9083 \times 10^{-3} \text{°C}^{-1}$	EN 60751: 2008
B	$-5.775 \times 10^{-7} \text{°C}^{-2}$	EN 60751: 2008
C	$-4.183 \times 10^{-12} \text{°C}^{-4}$	EN 60751: 2008
Rreff	430 Ω	(Maxim Integrated, 2015)
RTDnominal	102.36 Ω	Ver capítulo 3.9.7.

Fuente : Elaboración propia.

4.5. Modo de comunicación SPI para el MAX31865 y Arduino Uno

La comunicación está dada por registros de 8 bit que contienen datos de configuración, conversión y estado. La comunicación establecida con el Arduino está configurada para CPOL=1, Los datos son leídos cuando SCLK desciende por lo que CPHA=1 (ver figura 59).

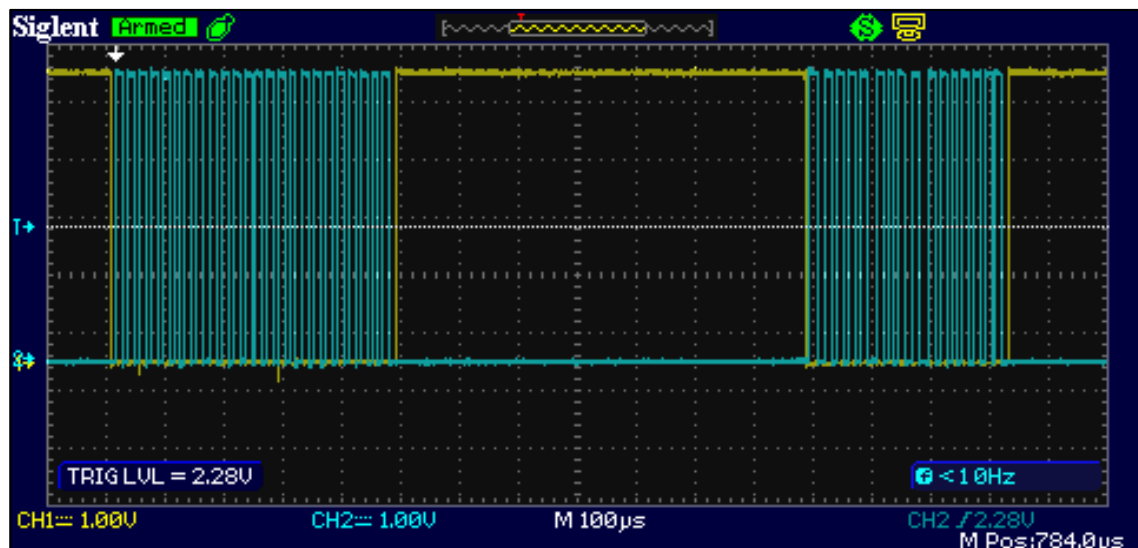


Figura 59 SCLK establecido por Arduino mientras CS se mantiene en 0.

Fuente : Elaboración propia.

Se envían datos del MAX3186 en 2 registros de 8 bits conteniendo el valor de la resistencia estableciendo una comunicación SPI para el Arduino, denominado: modo B o 1, con los valores de polaridad del reloj CPOL igual a 0, mientras que la fase CPHA es 1 (figura 60).

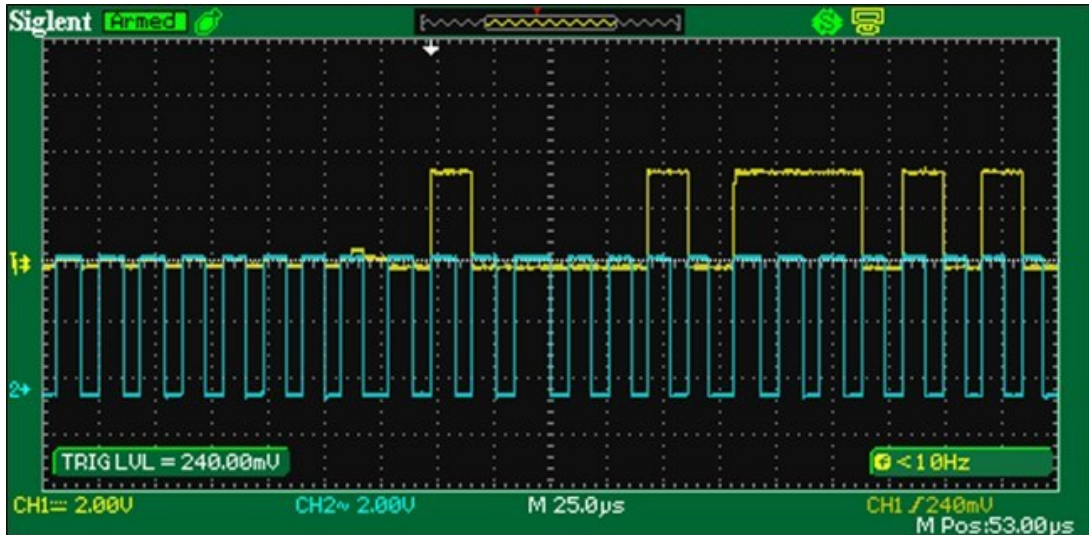


Figura 60 El dato enviado del conversor es leído en el flanco de bajada del CSLK.
Fuente : Elaboración propia.

4.6. Datos de conversión y constantes de proporcionalidad para el actuador

Los valores presentados en la siguiente tabla (tabla 27) reflejan los niveles de funcionamiento apropiado del prototipo diseñado.

Tabla 27

Constantes sintonizadas para el controlador PID.

Constantes	Formula o unidad	Valor
CONSTANTES DE CONFIGURACIÓN		
Tiempo de ciclo	milisegundos	1000
Set Point	°C	45
Pin de salida SSR	Pin Arduino Uno	6
CONSTANTES PID		
Constante proporcional	K	59.3153
Tiempo integral	T_i	1679.130927
Tiempo derivativo	T_d	15.58838276
Constante integral	$K_i = \frac{K}{T_i}$	0.035325
Constante derivativa	$K_d = K t_d$	924.6296

Fuente : Elaboración propia.

4.7. Interfaz gráfica

Se desarrolló una interfaz gráfica en el software MyOpenLab, el cual cuenta con un menú de opciones, las mismas que son independientes en cuanto a su funcionamiento, pero todas pueden ser llamadas desde el menú principal (figuras 61 y 62).



Figura 61 Menú HMI en funcionamiento durante un proceso real.

Fuente : Elaboración propia.

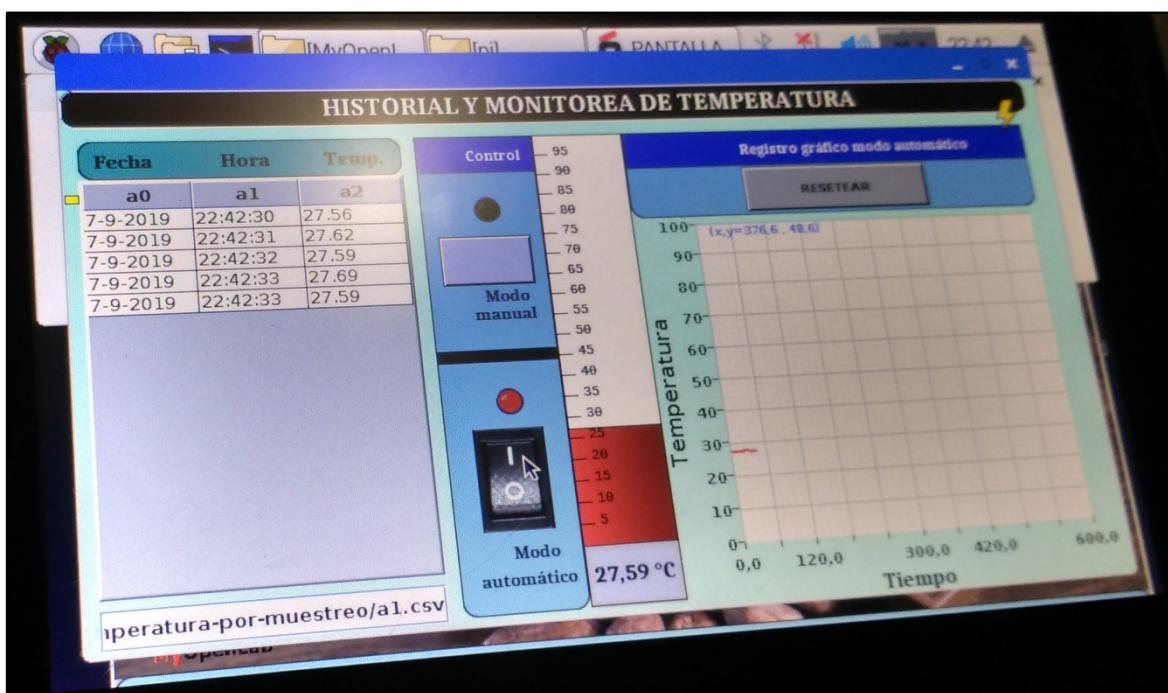


Figura 62 Funcionamiento del panel de historial y monitoreo.

Fuente : Elaboración propia.

4.8. Construcción mecánica y ensamble final de componentes finales

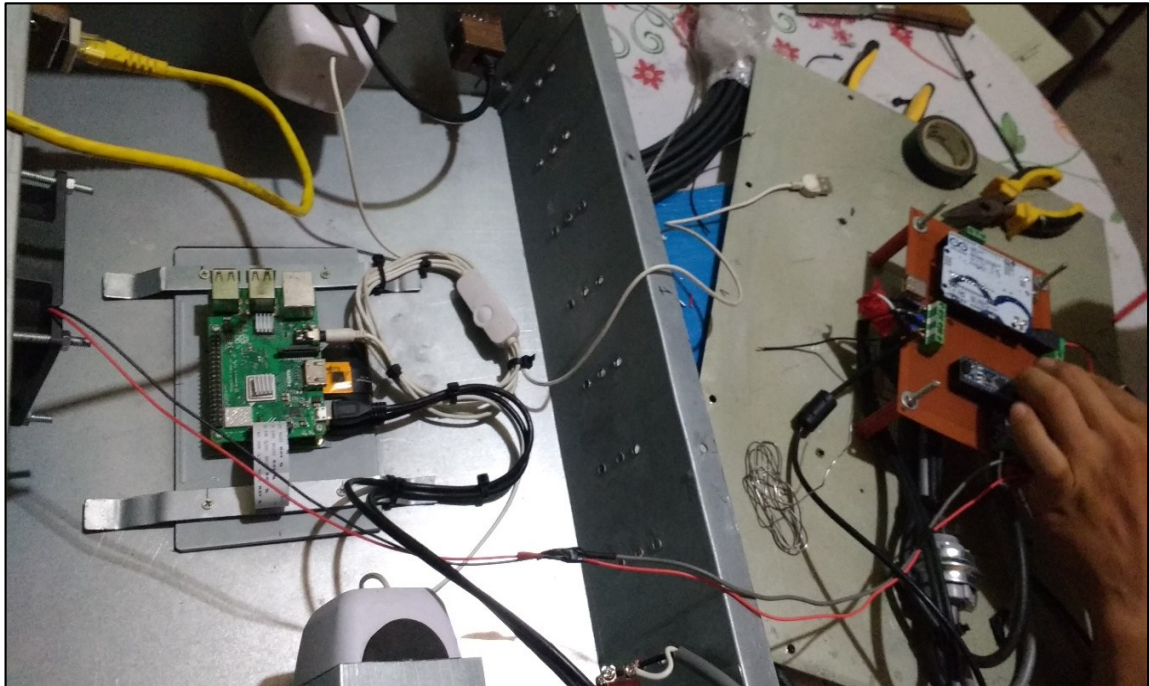


Figura 63 Montaje, conexión y configuración de dispositivos eléctricos y electrónicos.
Fuente : Elaboración propia.



Figura 64 Montaje mecánico del prototipo y tablero de control eléctrico.
Fuente : Elaboración propia.



Figura 65 Montaje del prototipo para realizar pruebas de funcionamiento.
Fuente : Elaboración propia.



Figura 66 Montaje final del prototipo.
Fuente : Elaboración propia.

4.9. Puesta en funcionamiento y prueba final

Esta prueba se realizó bajo condiciones existentes en el proceso de conchado, con el fin de garantizar de que el prototipo funciona el funcionamiento a la perfección del prototipo, antes de su instalación en planta. Se consideraron todas las constantes que se expusieron en los resultados anteriores.

- Temperatura ambiente en prueba: 24 °C.
- Voltaje de la red: Vred: 220 V a 60 Hz.
- Tiempo de prueba: 15 minutos
- Comunicación remota: vía Vnc Viewer.
- Tipo de control: PID automatizado.

El comportamiento de la temperatura en función del tiempo, durante la prueba de final se representa en la figura 65, los datos en esta gráfica pertenecen a los 15 primeros minutos de proceso, tiempo en que demora en estabilizarse la temperatura en un error ± 2 °C tendiendo a cero. En el anexo 14 se analizan los tiempos que toma el controlador para establecer la temperatura lo más cerca posible a la temperatura de configuración.

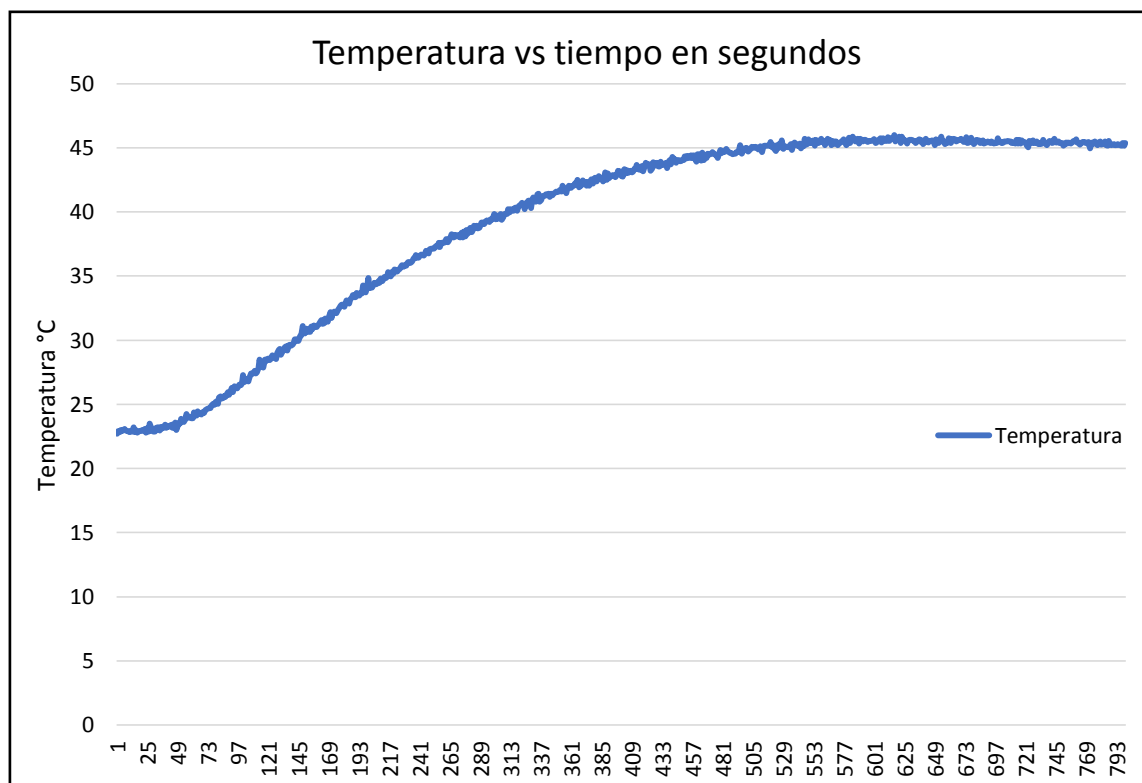


Figura 67 Comportamiento de la temperatura con el control PID implementado.

Fuente : Elaboración propia.

4.10. Comparación de temperaturas

Se comparó la temperatura del sistema cambiado control on – off del termostato con el prototipo PID de control de temperatura. Se consideró la muestra M1 del acápite 3.9.1. y la temperatura de prueba con el prototipo PID (tabla 28). En la figura 66 se presenta el comportamiento de la temperatura, antes y después de haber

Tabla 28

Temperaturas e índices de error entre sistema anterior y prototipo PID.

Muestras cada 10 minutos	M1(Sumergible) Punto de configuración = 40 °C	Error en °C	Temperatura con el prototipo PID	
			Punto de configuración = 45 °C	Error en °C
1	39.1	0.9	34.46	10.54
2	39.5	0.5	45.25	-0.25
3	42.7	-2.7	45.15	-0.15
4	45.4	-5.4	45.1	-0.1
5	47.2	-7.2	45.13	-0.13
6	49.6	-9.6	45.12	-0.12
7	52.6	-12.6	45.11	-0.11
8	55.9	-15.9	45.09	-0.09
9	60.8	-20.8	45.08	-0.08
10	65.5	-25.5	45.04	-0.04
11	66.3	-26.3	44.99	0.01
12	67.2	-27.2	45.01	-0.01
13	68.3	-28.3	45.05	-0.05
14	68.6	-28.6	45.08	-0.08
15	69.2	-29.2	45.12	-0.12
16	69.8	-29.8	45.13	-0.13
17	70.4	-30.4	45.11	-0.11
18	71.3	-31.3	45.1	-0.1
19	71.7	-31.7	45.13	-0.13
20	71.8	-31.8	45.16	-0.16
21	72.7	-32.7	45.21	-0.21
22	72.9	-32.9	45.24	-0.24
23	73.8	-33.8	45.31	-0.31
24	74.4	-34.4	45.38	-0.38
25	75.2	-35.2	45.45	-0.45
26	75.8	-35.8	45.52	-0.52

27	76.4	-36.4	45.59	-0.59
28	77.8	-37.8	45.66	-0.66
29	78.8	-38.8	45.73	-0.73
30	79.2	-39.2	45.8	-0.8
31	80.3	-40.3	45.87	-0.87
32	80.8	-40.8	45.94	-0.94
33	81.5	-41.5	46.01	-1.01
34	82.5	-42.5	46.08	-1.08
35	83	-43	46.15	-1.15
36	83.1	-43.1	46.22	-1.22
37	83.3	-43.3	46.29	-1.29
38	83.2	-43.2	46.36	-1.36

Fuente : Elaboración propia.

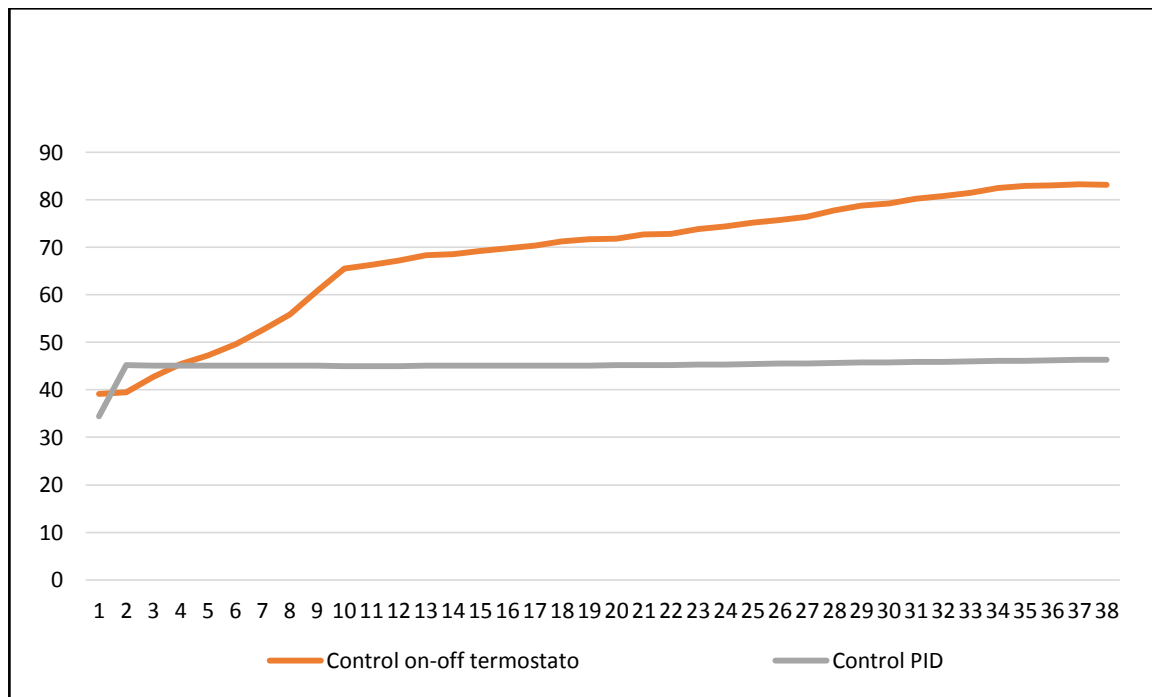


Figura 68 Diferencia de temperatura de un lote de conchado antes y después de la implementación del prototipo.

Fuente : Elaboración propia.

V. DISCUSIÓN

5.1. Temperatura de conchado con el sistema anterior

Con base al estudio de Acevedo Alzate et al. (2017), quienes evidenciaron que la temperatura del proceso de conchado incide directamente en la capacidad antioxidante de la cobertura de chocolate semi amargo, considerando que a 45 °C durante 8 horas es más eficiente que el mismo proceso a 60 °C. Por ello las temperaturas que se detallan en la tabla 23, específicamente para las muestras M1 y M2 son consideradas peligrosas, ya que sobrepasan los 60 °C, lo cual elimina las propiedades antioxidantes del chocolate; poniendo en riesgo la calidad del producto.

5.2. Temperatura de configuración para el control PID

Con base en Acevedo Alzate et al. (2017) el punto de consigna o punto fijo temperatura (set point) se eligió a 45 °C; en la configuración del prototipo esta opción será modificada de acuerdo a la necesidad del proceso; el sistema estará dotado de una alarma de advertencia, la cual emitirá un sonido si es que estas temperaturas sobrepasan los 60 °C.

5.3. Estructura y etapas del prototipo

Coincidiendo con Hurtado (2017), quien señala que en sistemas industriales de control, lo ideal para una factoría completamente automatizada, es el ordenamiento de acuerdo a niveles jerárquicos propuesto por *Computer Integrated Manufacturing (CIM)*, que consta de una pirámide de mayor a menor organizada por niveles de gestión, control, campo y finalmente entradas y salidas. Haciendo una analogía con dispositivos de software y hardware libre, en el acápite de resultado de estructuras y etapas del prototipo, se detallan el algoritmo de diseño, con los componentes ordenados estratégicamente, con el fin de que cumplen funciones similares y se comunican conforme al modelo CIM.

5.4. Constantes para conversión ADC en MAX31865

Según Maxim Integrated (2015), en su hoja de datos del embebido MAX31865, establece que los valores de la resistencia del platino con respecto a la temperatura de 0 °C depende del nivel de concentración o impurezas en la sonda de platino; por lo tanto no siempre pudiendo ser 100 ohmios. Si bien el sensor de temperatura adquirido tenía la sensibilidad y resistencia a temperatura ambiente de acuerdo a lo especificado en la tabla de calibración (ver anexo A.8), en los códigos de programación y la Librería para Arduino Adafruit_Max31865, la transformación de acuerdo a la ecuación de Calender Van Dusen, se tenía que declarar que la resistencia a 0 °C para la PT100 tenía un valor de 102.36 ohmios. En consecuencia, los 2.36 ohmios con respecto a la temperatura cargada en la librería por defecto, siempre representa un cálculo de valores alterados. Se debe considerar que el valor de esta resistencia también puede variar con la longitud del cable de la sonda PT100.

5.5. Modo de comunicación SPI para el MAX31865 y Arduino Uno

A pesar de contar con la tecnología de un Osciloscopio para demostrar el comportamiento de la comunicación SPI, es necesario para entender cada configuración de impulsos enviados y recibidos de acuerdo a los registros de comunicación, una herramienta de decodificación para osciloscopio, que puede ser un software o un equipo que cuente con esa tecnología y que no posee el Osciloscopio SIGLENT modelo SDS 1202CNL+, utilizado en el desarrollo de esta tesis.

5.6. Datos de conversión y constantes de proporcional para el actuador

Todas las constantes de proporcionalidad pueden ser modificadas de acuerdo a las condiciones del proceso, pero conforme con Ramírez Lazo (2013), el uso de una herramienta computacional como Matlab, hace que el diseño del controlador propuesto por el computador se ajuste a los resultados reales y que además demande menos tiempo la sintonización.

5.7. Comparación de temperaturas

En la tabla 28, se muestra las temperaturas para un proceso de conchado de chocolate antes y después de la implementación del prototipo automatizado para el control y monitoreo de temperatura. En la misma se puede notar que el índice de error con el control PID es menor que ± 2 °C

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Al diseñar, e implementar el prototipo y al hacer las pruebas de funcionamiento, se concluye que el prototipo cumple con todos los objetivos y requerimientos planteados, ya que anteriormente no se garantizaban un control adecuado y la monitorización de la temperatura de trabajo, actividades que sólo se podría realizar manualmente, sin embargo, con el prototipo el error en el control es de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el registro de temperatura se hace automáticamente en cada segundo de trabajo.
- El conchado de chocolate puede variar entre 40 y 60 $^{\circ}\text{C}$ según la bibliografía revisada y según el criterio de la empresa Sol Norteño, por ello en el submenú de control PID el Set Point es configurable y otras constantes se pueden agregar manualmente de acuerdo con las necesidades.
- Las etapas y configuración del prototipo, están hechas de tal manera que el prototipo mantenga comunicación activa entre sus componentes y periféricos; además, se consideró la temperatura de los dispositivos electrónicos como un factor importante en el procesamiento de datos, por ello se adicionó en el prototipo un sistema de enfriamiento por convección forzada a través de un ventilador con alimentación independiente, el cual permite que los dispositivos trabajen a una temperatura entre 35 $^{\circ}\text{C}$ a 45 $^{\circ}\text{C}$.
- Las constantes de acuerdo a la norma IEC 751 aplicando la ecuación de Callender-Van Dussen para temperatura mayores a 0 $^{\circ}\text{C}$, es la manera más fácil y la forma más efectiva de encontrar valores de temperatura con base a la resistencia de una sonda PT100.
- La comunicación SPI entre el Arduino y MAX31865 de acuerdo con las librerías Adafruit_Max31865 se consideran a 115200 baudios, lo que ayudó a obtener lecturas más precisas.

- Simulink de Matlab se convierte en una herramienta indispensable e intuitiva para calcular constantes de sintonización para el controlador PID, dando valores que se ajustan a las gráficas arrojadas al modelo matemático de la función de transferencia calculada por el mismo software, a partir de datos de entrada y salida tomadas en cada segundo de muestra de un proceso real.
- MyOpenLab es un software libre en desarrollo, que ha demostrado estar a la altura de cualquier otro para desarrollo de interfaces programables, permitiendo desarrollar un controlador PID con una tarjeta Raspberry Pi, para poder controlar una variable de un proceso industrial.

6.2. Recomendaciones

- Para desarrollo de sistemas embebidos se recomienda el uso de la Raspberry ya que es una mini computadora que cuenta con los dispositivos de hardware como salida de audio para conexión parlante, puerto internet, SD card para guardar datos, 4 puertos USB y puerto HDMI para visualización. Por lo cual es una computadora indispensable para proyectos más completos en área de automatización.
- Se recomienda usar la pantalla HMI ya que es táctil, posee una alta sensibilidad y resolución gráfica bien definida llegando a obtener una apreciable visualización del proyecto.
- Para el desarrollo del control PID se recomienda primeramente usar el método de Ziegler y Nichols para hallar las constantes de proporcionalidad ya que cada aplicación tiene una función de transferencia distinto. Por lo tanto, el actuador tiene que sintonizarse con las constantes halladas para que desempeñe un trabajo de acuerdo al medio en que se encuentra.
- Se recomienda implementar la máquina de conchado con un sistema de enfriamiento para que el PID controle la temperatura cuando sobre pase la temperatura fijada y lo mantenga el error próximo a cero.
- Se recomienda usar el sensor de temperatura PT 100 con su respectiva librería, ya que su código de programación es editable, además viene con sus respectivas propiedades, métodos y funciones de trabajo que garantiza un buen margen de precisión.
- Para el uso correcto del prototipo entrar al panel de ayuda para leer y escuchar el manual de usuario.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo Alzate, L. K., Mejía Díaz, D. P., Acosta Otálvaro, E. V., Valencia Gallego, W. G., & Penagos Vélez, L. (2017). Efecto De La Temperatura Del Conchado Sobre Los Polifenoles En Un Chocolate Semi-Amargo. *Alimentos Hoy*, 25(41), 31–50. Recuperado de: <http://www.alimentoshoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/447/365>
- Afoakwa, E. (2010). Chocolate Science and Technology. In *Science and Technology of Enrobed and Filled Chocolate, Confectionery and Bakery Products* (First Edit). <https://doi.org/10.1533/9781845696436>
- Alvarido F., J. M. (2007). *Cálculo para líneas de conducción eléctricas*. Retrieved from <https://www.slideshare.net/JaimeFelipeAlvaridoM/calculo-de-conductores-electricos-jam>
- Ames-Zegarra, C. (2015). *Normativa Para El Diseño De Interfaces Gráficas De Sistemas De Automatización Industrial*. Recuperado de: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2423/ING-L_007.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Analog Devices Inc. (2004). *RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC8xx MicroConverter*. 1–12. Recuperado de: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN709_0.pdf
- ANV. (2019). *SSR Series* (pp. 1–12). pp. 1–12. Recuperado de: <http://www.datasheet.es/PDF/789343/SSR-40DA-pdf.html>
- ARIAN. (2019). *Tablas de termocuplas y Pt100*. 18. Recuperado de: <http://www.arian.cl>
- Aström, K. J., & Hägglund, T. (2009). *Control PID avanzado* (PEARSON EDUCACIÓN, Ed.). Madrid, España.
- Bastidas Valenzuela, S. C. (2017). *Control de variables en la producción de chocolate fino enriquecido*. Recuperado de: <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/6574>

- BBVAOPEN4U. (2015). Arduino y Raspberry Pi dominan el hardware abierto. Recuperado de: BBVA_API Market website: <https://bbvaopen4u.com/es/actualidad/arduino-y-raspberry-pi-dominan-el-hardware-abierto-pero-cada-vez-hay-mejores-alternativas>
- Beckett, S. T. (2009). Industrial Chocolate Manufacture and Uses. In *International Journal of Food Science & Technology*. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02041.x>
- Beckett, S. T. (2019). *The science of chocolate* (Tercer Edi). Recuperado de: <https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=8sl6DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=The+Science+of+Chocolate&ots=rdh2BW7dAm&sig=BbK5OMS6QL3N14dKA70WdtIeZsg#v=onepage&q=The Science of Chocolate&f=false>
- Carrillo Paz, A. J. (2011). *Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado* (2da. Edici). Recuperado de: http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA DE CONTROL 1.pdf
- Corripio, A. B., & Smith, C. A. (1991). *Control Automático de Procesos, Teoría Práctica* (EDITORIAL LIMUSA, Ed.). México.
- Díaz Correa, M. Y. (2017). *Sistema de peligros y puntos críticos de control (HACCP), en tres formulaciones en la elaboración de chocolate para taza, en la Empresa Industrias Sol Norteño-Jaén-Cajamarca-Perú*. Recuperado de: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNTR_12bf8294f52d1e2ca35157ea7f8c64dd/Description#tabnav
- DIIGNAL. (2019). Tarjetas de desarrollo Alteri. Recuperado de: <http://dignal.com/producto/tarjeta-de-desarrollo-alteri/>
- García Martínez, E. (2015). Desarrollo de un controlador PID industrial de bajo coste mediante Raspberry Pi para control de temperatura. *RiuNet - UPV*. Recuperado de: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/67637/53977195J_TFG_14673564858047225340669691726604.pdf?sequence=3
- Guerrero Valenzuela, M., Hernandis Ortuño, B., & Agudo Vicente, B. (2014). Estudio comparativo de las acciones a considerar en el proceso de diseño conceptual desde la ingeniería y el diseño de productos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 22(3), 398–411. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052014000300010>

- Hurtado Torres, J. M. (2017). *Introducción a las Redes de Comunicación Industrial*. 19. Recuperado de: http://www.infoplcn.net/files/documentacion/comunicaciones/infoPLC_net_introduccion-a-las-redes-de-comunicacion-industrial.pdf
- INEI. (2018). Compendio Estadístico Perú 2018. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 951–1037. Recuperado de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1635/cap13/cap13.pdf
- International Society of Automation. (2015). *ISA101, Human-Machine Interfaces - ISA*. Recuperado de: <https://www.isa.org/isa101/>
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. In *Theoretical Issues in Ergonomics Science* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1080/1463922021000054335>
- Krapf, T., & Gantenbein-Demarchi, C. (2010). Thermal inactivation of *Salmonella* spp. during conching. *LWT - Food Science and Technology*, 43(4), 720–723. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.10.009>
- Lima Cervera, B. R. (2015). *Implementación de control PID para un esterilizador a calor seco con microcontrolador PIC*. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/UTP/162>
- Maxim Integrated. (2015). MAX31865 Datasheet. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.Pdf>, 1–26. Recuperado de: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>
- Ministerio de Salud. (2015). *Informe técnico: Estado nutricional de la población por etapas de vida; 2013-2014*. 1–224. Recuperado de: https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/cenan/van/vigilancia_poblacion/VIN_ENAHO_etapas_de_vida_2013-2014.pdf
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2019). ¿Qué es una señal de modulación de ancho de pulso (PWM) y para qué se utiliza? Recuperado de: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z00000190kFSAU&l=>

es-PE

- NEMA. (2005). *NEMA Enclosure Types from NEMA 250-2003*. 1–9. Recuperado de: <https://www.nema.org/Products/Documents/nema-enclosure-types.pdf%5Cn>
- Perez, E. L. (2008). INGENIERIA EN MICROCONTROLADORES Protocolo SPI(Serial Peripheral Interface). *Technology*, 1–10. Recuperado de: <http://www.i-micro.com/pdf/articulos/spi.pdf>
- Ramírez Lazo, M. Á. (2013). *Diseño e implementación de un controlador PID de temperatura controlado a distancia para un prototipo de incubadora*. Recuperado de: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_9a6b554cfed172c38d0264d427f4b1d3/Details
- Rodríguez, M., Chagolla, H., & López, M. (2014). Diseño Conceptual de Sistema para la Automatización del Invernadero uno de la Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato. *Ecofran*, 299-307,316-318. Recuperado de: https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias de la Ingenieria y Tecnologia T-IV/Articulo_28.pdf
- Salafia, C., & Velásquez, J. (2016). Desarrolladores MyOpenLab. Recuperado de: <https://myopenlab.org/desarrolladores/>
- Žáková, K., & Rábek, M. (2018). Remote Control of Thermo-opto-mechanical Plant via Raspberry Pi. *IFAC-PapersOnLine*, 51(6), 479–483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.188>

AGRACEDIMIENTOS

A nuestras familias por el apoyo incondicional en el desarrollo de la tesis.

A nuestro asesor Ingeniero Herless Henyer Alberca Vásquez y al Magister Walter Linder Cabrera Torres por su constante y valiosa orientación en el proceso.

A la Empresa Industrias Sol Norteño por la oportunidad, paciencia y facilidades prestadas, para el desarrollo del presente proyecto

A la Empresa Delta Electrón por el apoyo con equipos de laboratorio y herramientas para la construcción del prototipo.

Al ingeniero Danger Becerra Montalvo por facilitarnos herramienta para la construcción mecánica del prototipo.

A la Universidad Nacional de Jaén, autoridades, docentes de Ingeniería Mecánica y Eléctrica que nos ayudaron a construir las bases para adentrarnos en el grandioso mundo de la automatización y control.

A Carmelo Daniel Salafia y al ingeniero Robinson Javier Velásquez los desarrolladores del software MyOpenLab por contribuir a la ciencia y tecnología con la aplicación de software libre orientado a la automatización y control de procesos industrializados en vías de desarrollo. También agradecemos al profesor José Manuel Ruiz Gutiérrez por las guías de documentación acerca de la programación grafica en MyOpenLab.

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis lo dedico a Dios por afirmar mi futuro, como también a mis padres Esaú Díaz y Teresa Cercado.

Que en todo tiempo estuvieron dispuesto a ayudarme económicamente y moralmente para lograr obtener el título profesional.

De: Cristian Kenth Diaz Cercado

A Dios por darme la fuerza interior para luchar contra las adversidades.

También con mucho cariño y aprecio para:

Elita Martinez, Wilber Horna, Maximiliano Horna, Lucy Collantes y Patricia Horna.

Porque fueron el motivo y apoyo de este laborioso trabajo.

De: Luis Miguel Horna Martinez

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia de tesis.

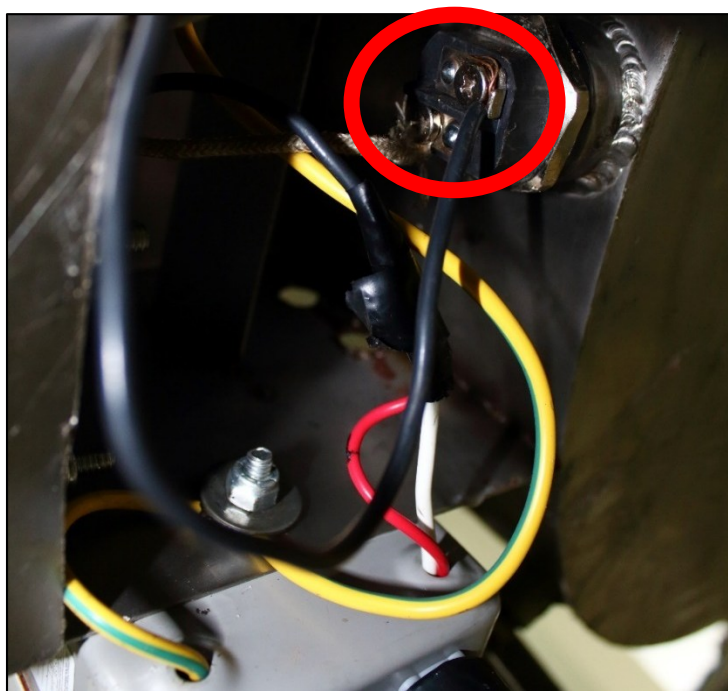
Objetivo	Definición conceptual	Definición operacional	Variables	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
Diseñar e implementar un prototipo automatizado para el monitoreo y control de temperatura en el proceso de conchado de chocolate, usando Raspberry Pi como dispositivo programable, en la empresa Industrias Sol Norteño – Jaén - Perú.	Prototipo capaz de establecer un valor de temperatura lo más cerca posible a la temperatura configurada o requerida, para el cuál se ayuda de: sensor, conversor, interfaz, ordenador, relé, amplificador y actuador (Carrillo Paz, 2011).	El prototipo será implementado en el proceso de conchado de chocolate en la Empresa Industrias Sol Norteño, por lo que debe ser adecuado para trabajar en las condiciones de planta y cuidar la inocuidad del producto.	Variable dependiente	Diseño del prototipo	Temperatura del proceso con el control on-off	- Investigación de campo, observación, plantillas de registros y entrevista - Termómetros sumergible para alimentos
					Parámetros electromecánicos del diseño	- Investigación de gabinete, - Cuadros comparativos, hojas de características, bases teóricas y documentos
			Prototipo automatizado basado en control PID	Desarrollo del HMI y construcción del prototipo	Programación	-Investigación de campo, programación -Software IDE de Arduino y MyOpenLab
					Visualización	- Investigación de campo, programación - Pantalla táctil LCD y Software de programación
					Alcances de comunicación	- Investigación de campo - Red Ethernet de área local y red Wlan router
					Tiempo de muestreo	- Investigación de campo y experimental - Pantalla HMI del prototipo.
					Tiempo establecimiento	- Investigación de campo y experimental - Pantalla HMI del prototipo.
				Capacidad de almacenamiento de datos	- Investigación de campo y experimental - Pantalla HMI del prototipo.	
			Variable independiente	Características de temperatura para el procesamiento en la máquina de conchado de la Empresa Industrias Sol Norteño	Constantes de temperatura referenciados en el proceso de conchado	-Investigación de gabinete. -Libros, revistas, tesis y formulaciones de la Empresa.
			Proceso de conchado de chocolate		Taza de procesamiento del chocolate	- Investigación de campo, observación. - Plantillas de registro manual
					Temperatura del proceso	- Investigación de campo, observación - Termómetro láser. Digital y analógico.
				Capacidad de carga del chocolate	- Investigación de campo, observación -Balanza electrónica.	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2 Panel fotográfico.



Fotografía 1 Termostato de regulación analógica y control on – off.
Fuente : Elaboración propia.

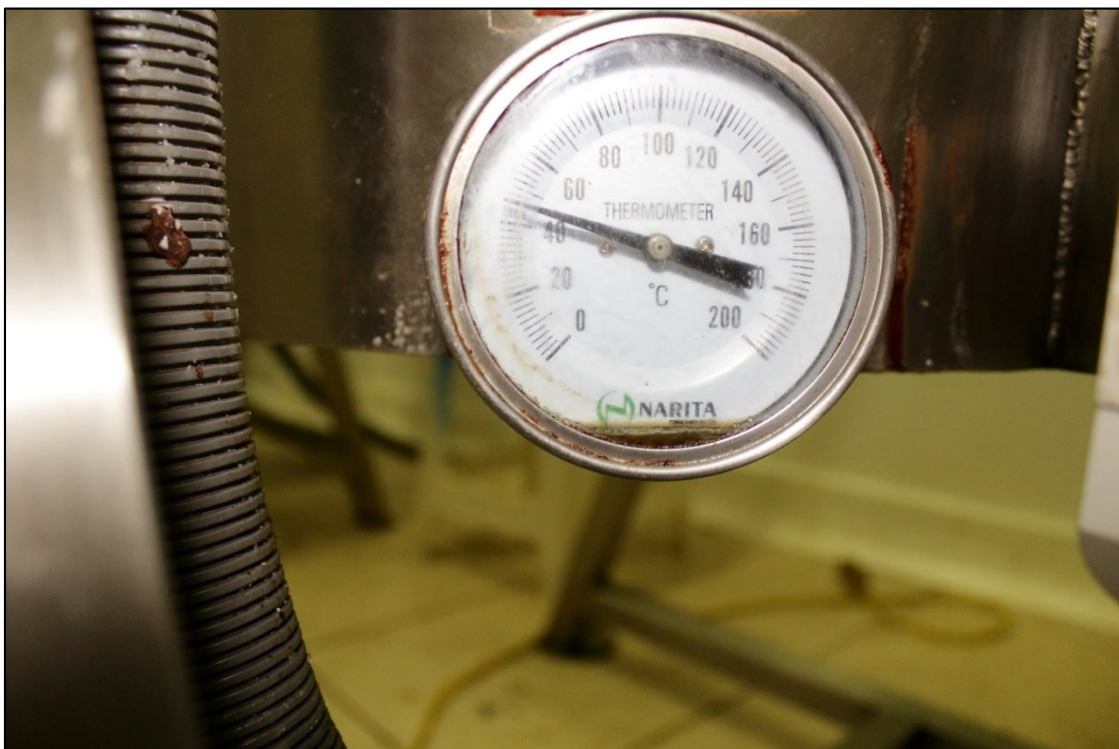


Fotografía 2 Resistencia calefactora de 2000W a 220 V CA monofásico.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 3 Instrumentos para la medición manual de la temperatura.

Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 4 Termómetro analógico tipo reloj de máquina conchadora.

Fuente : Elaboración propia.

HOMOGENIZADO - REFINADO - CONCHADO

Frecuencia: Cada Batch que ingresa a la máquina

Refractor: 20KG
 Refractor: 50KG

Fecha	Turno	N° BATCH	Homogenizado - refinado - conchado			ACCION CORRECTIVA
			Hora	Hora I	T°C	
13-06-18		01	10:20		40°C	
14-06-18		01	6:22		40°C	
24-06-19		01	10:00		40°C	
27-06-19		02	5:10		40°C	
24-06-19		01	12:10		40°C	
25-06-19	Mañana	07	7:5		40°C	
26-06-19	Noche	01	12:20		40°C	
26-06-19	Mañana	07	7:45		40°C	
26-06-19	Tarde	02	9:00		40°C	
26-06-19	Noche	03	11:40		40°C	
27-06-19	Mañana	04	9:40		40°C	
27-06-19	Tarde	01	4:15		40°C	
28-06-19	Noche	01	12:00		40°C	
28-06-19	Mañana	02	9:00		40°C	
28-06-19	Tarde	03	4:00		40°C	
28-06-19	Noche	04	11:40		40°C	
29-06-19	Mañana	05	9:00		40°C	
30-06-19	Tarde	01	3:30		40°C	
30-06-19	Noche	02	10:00		40°C	
1-07-19	Mañana	03	10:00		40°C	
01-07-19	Tarde	04	4:20	10:00	40°C	
01-07-19	Noche	01	11:11	4:50	40°C	
02-07-19	Mañana	01	9:40		40°C	
02-07-19	Tarde	02	5:00	10:46	40°C	
02-07-19	Noche	01	11:15		40°C	
03-07-19	Mañana	01	9:10		40°C	

Técnico de Aseguramiento de Calidad

Fotografía 5 Plantilla de registro de temperaturas en el proceso de conchado en la Empresa.

Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 6 Mediciones de temperatura en el proceso de conchado.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 7 Medición de temperatura con termómetro láser.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 8 Termostato sin potenciómetro de regulación funciona como un interruptor abierto.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 9 Conchadora rotativa vertical donde se implementó el prototipo.
Fuente : Elaboración propia.



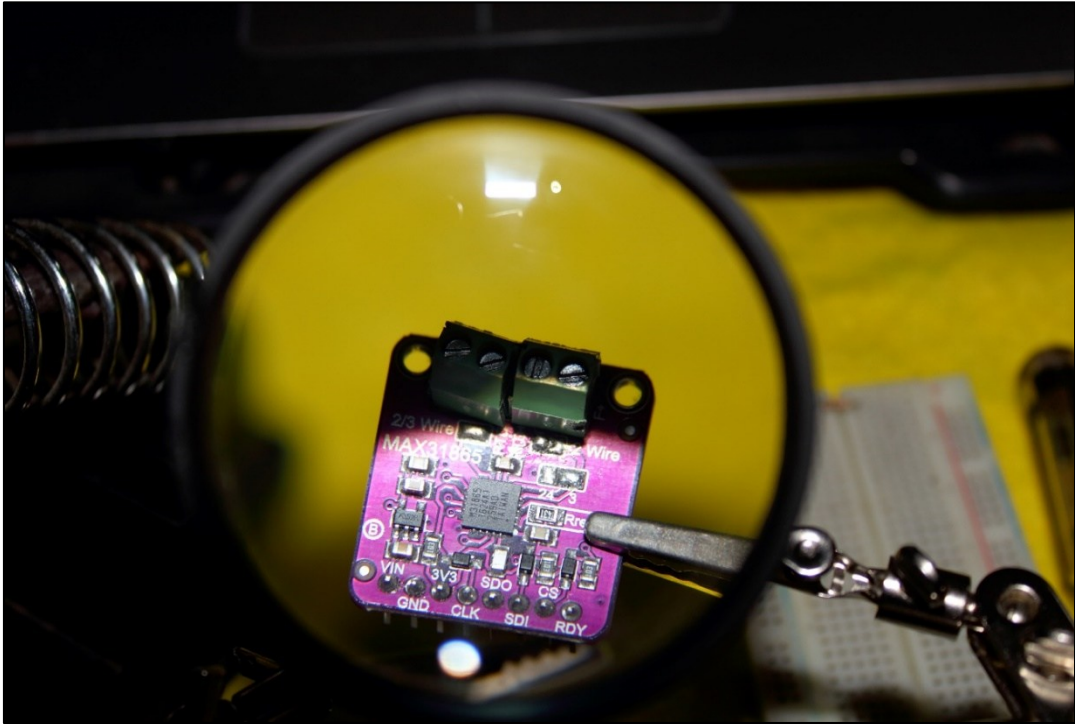
Fotografía 10 Termostato THERMO – DISC en mal estado.

Fuente : Elaboración propia.

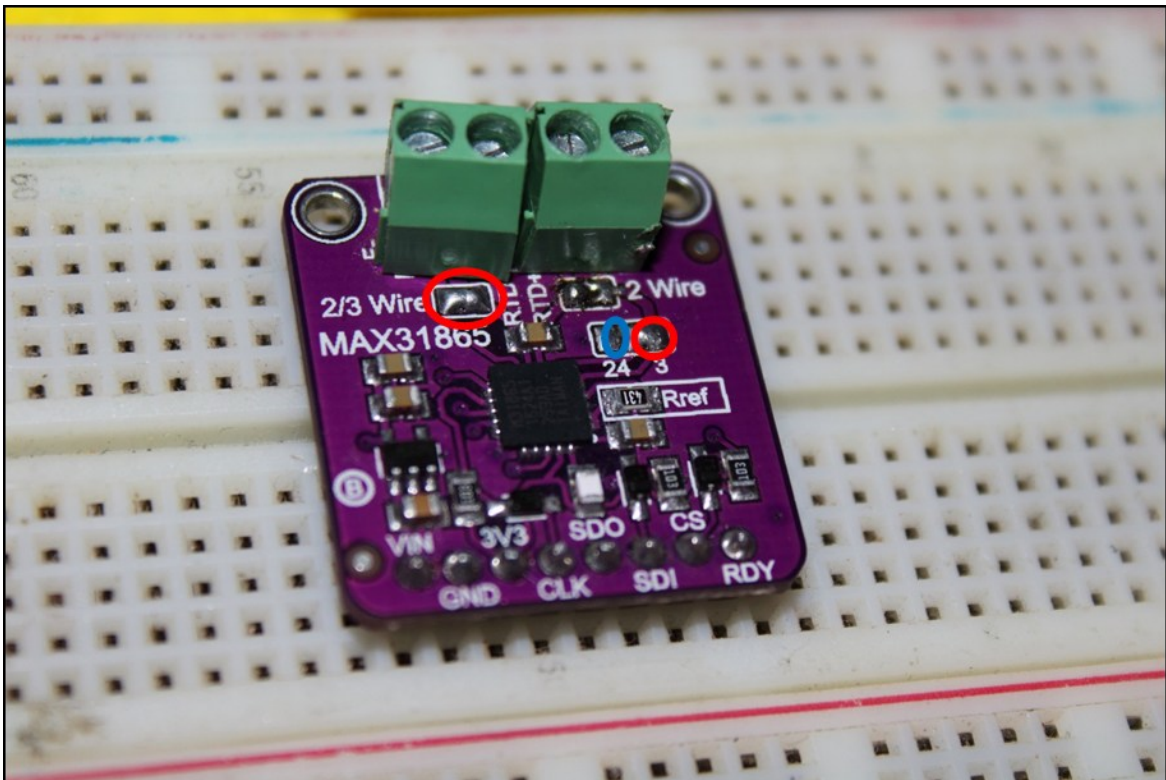


Fotografía 11 Resistencia calefactora de la máquina conchadora estudiada.

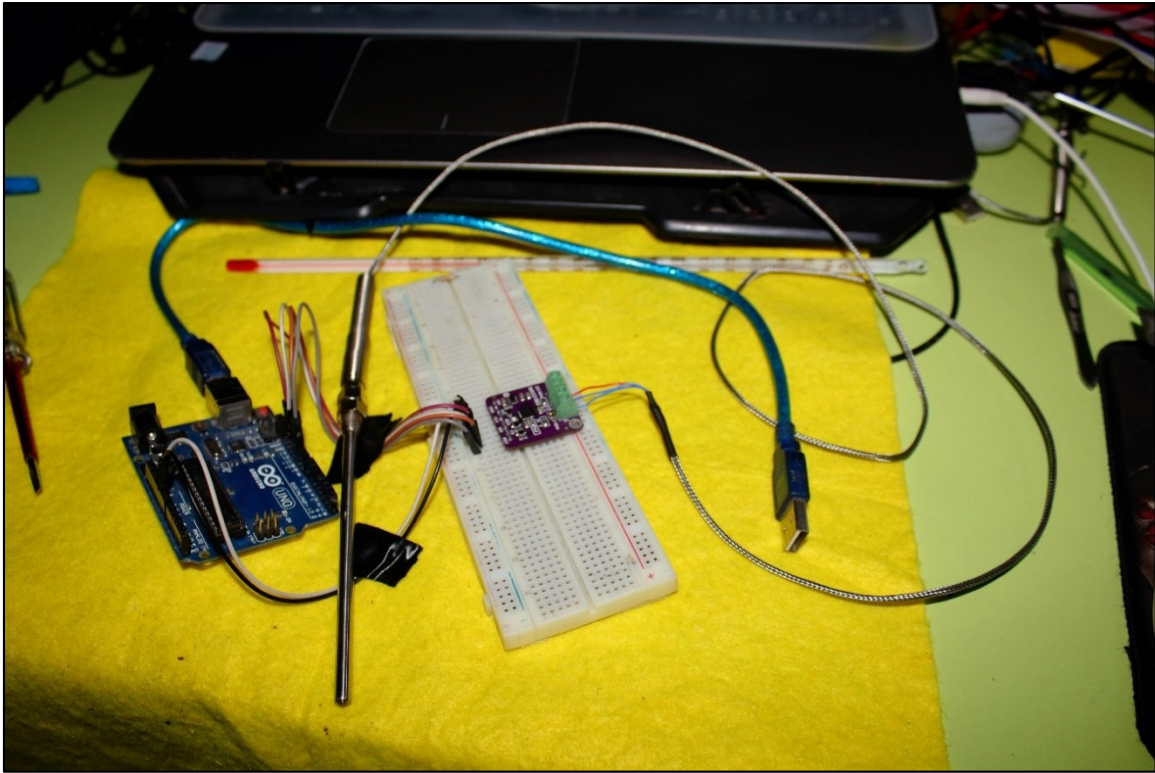
Fuente : Elaboración propia.



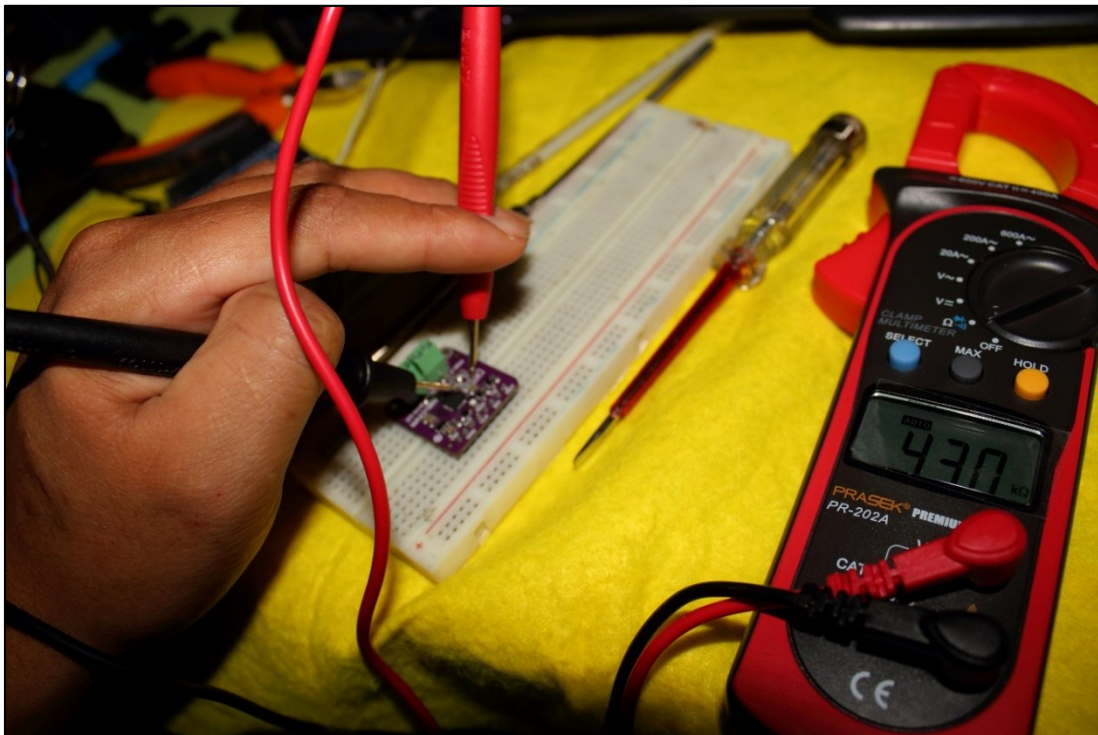
Fotografía 12 Configuración de hardware MAX31865 para conectar PT100 de 3 hilos.
Fuente : Elaboración propia.



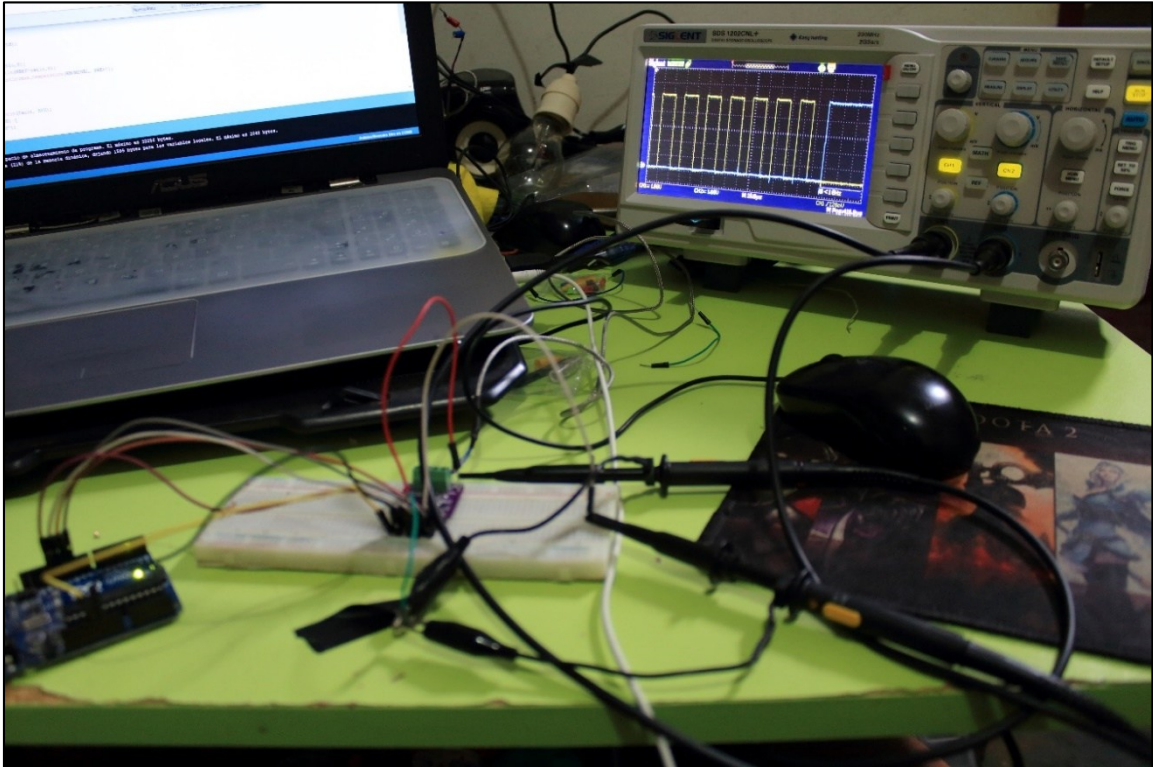
Fotografía 13 Soldado y desoldado para conectar pt100 de 3 hilos.
Fuente : Elaboración propia.



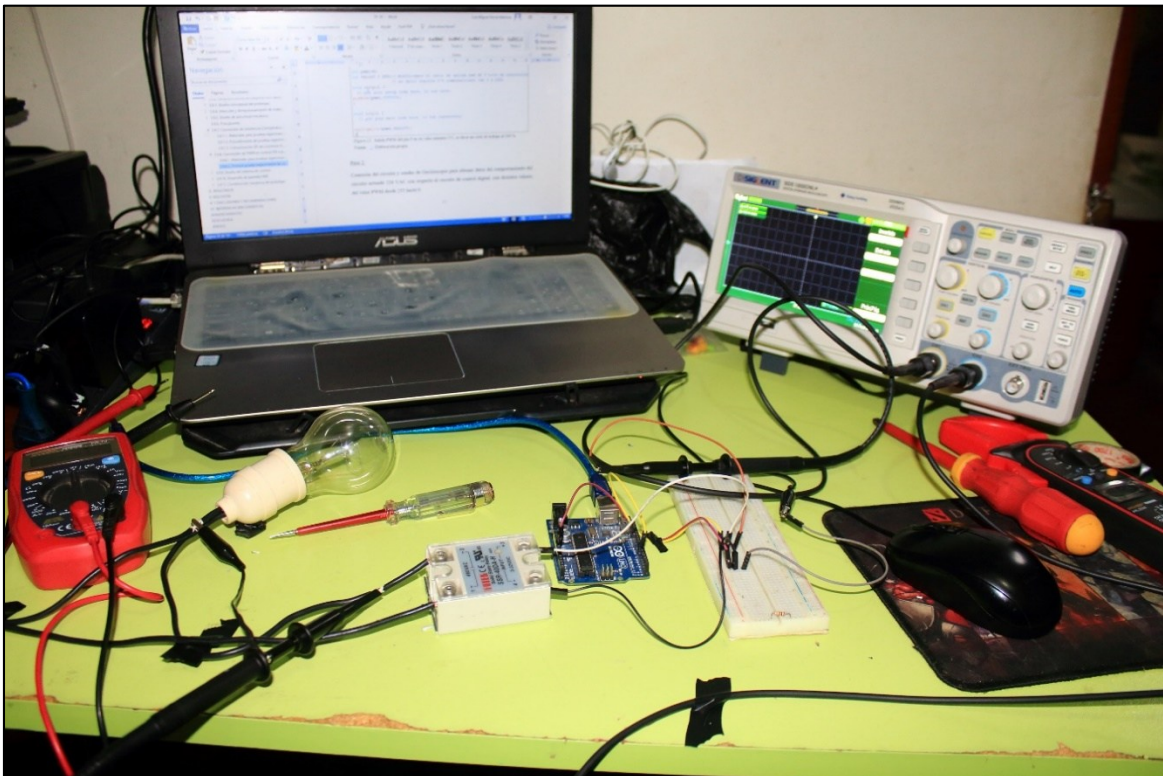
Fotografía 14 Prueba experimental para determinar temperatura en función de la resistencia en pt100.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 15 Resistencia Rref = 0.430 Khomnios en conversor ADC MAX31865.
Fuente : Elaboración propia.



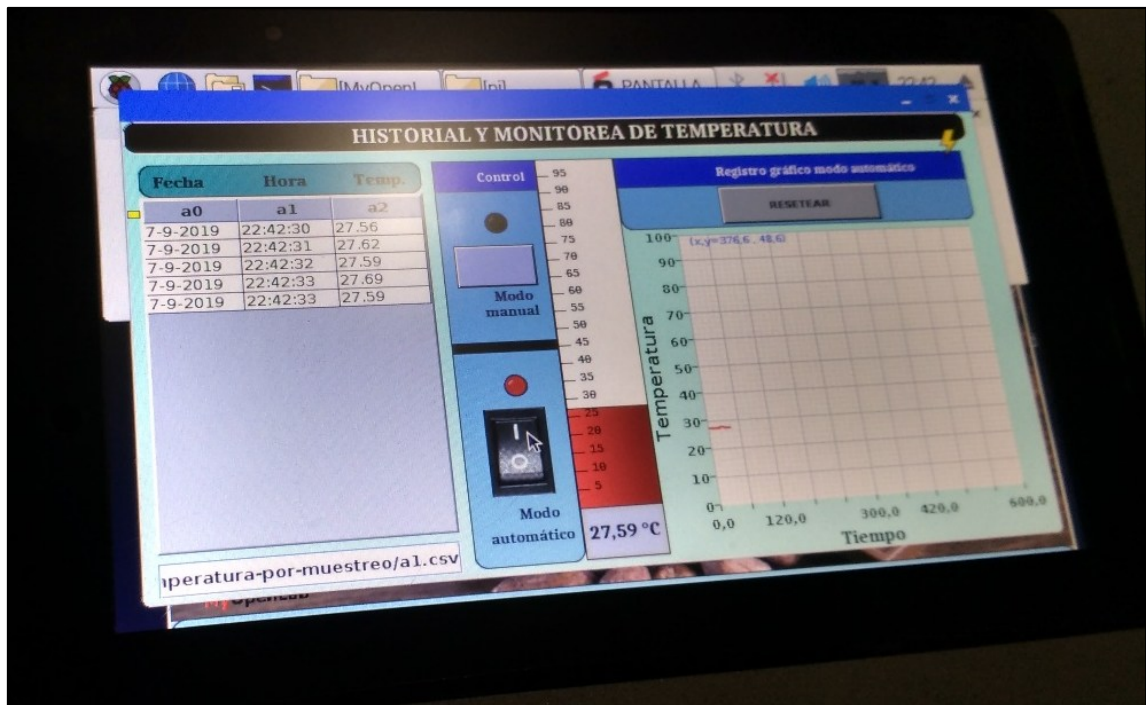
Fotografía 16 Medición y visualización de comunicación y transmisión de datos SPI en Osciloscopio.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 17 Medición y visualización de control PWM del Arduino a una carga resistiva en CA.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 18 Diseño y programación de interfaz gráfica HMI.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 19 Registro de temperatura de conchado durante procesos de prueba.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 20 Pruebas de funcionamiento finales del prototipo.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 21 Guardando historial de temperatura utilizando HMI táctil.
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 22 Pruebas finales de prototipo automatizado para el control y monitoreo de temperatura.

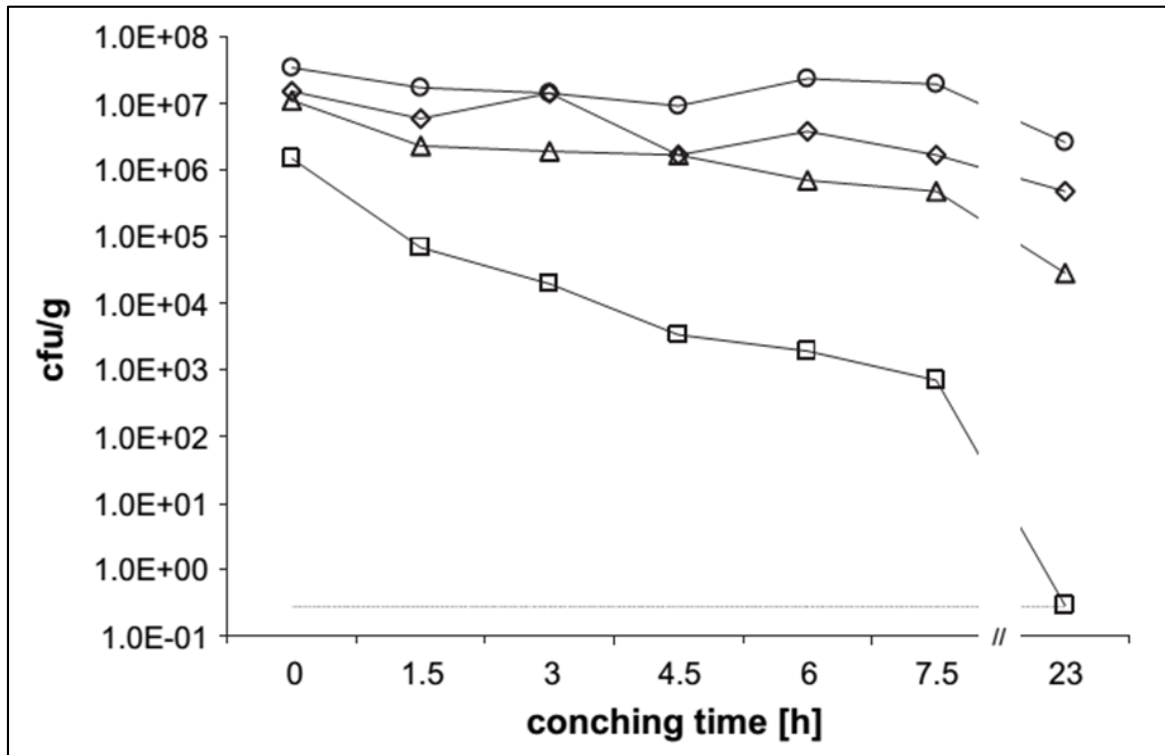
Fuente : Elaboración propia.



Fotografía 23 Pruebas finales del prototipo automatizado.

Fuente : Elaboración propia.

Anexo 3 Inactivación térmica de la Salmonella ssp. en el proceso de conchado.



(○) 50 °C, (◇) 60 °C, (△) 70 °C, (□) 80 °C, (---)

Fuente : Krapf y Gantenbein-Demarchi (2010)

Anexo 4 Temperatura en °C durante medición manual M1.

Muestra 01 (Fecha: lunes 01 de julio 2019/ Turno mañana)			
Tiempo	Term. Láser	Term. Sumergible	Term. Analógico (actual)
10:00 a. m.	40	39.1	40
10:10 a. m.	40.6	39.5	41
10:20 a. m.	43.7	42.7	43
10:30 a. m.	45.5	45.4	45
10:40 a. m.	48.2	47.2	48
10:50 a. m.	50.5	49.6	51
11:00 a. m.	53.7	52.6	55
11:10 a. m.	57.8	55.9	58
11:20 a. m.	63.1	60.8	62
11:30 a. m.	66.3	65.5	65
11:40 a. m.	67.4	66.3	65
11:50 a. m.	68.2	67.2	66
12:00 p. m.	69	68.3	66
12:10 p. m.	69.5	68.6	66
12:20 p. m.	70.2	69.2	66
12:30 p. m.	70.8	69.8	66
12:40 p. m.	71.5	70.4	66
12:50 p. m.	72.1	71.3	67
1:00 p. m.	72.7	71.7	67
1:10 p. m.	72.8	71.8	67
1:20 p. m.	73.7	72.7	68
1:30 p. m.	74.1	72.9	67
1:40 p. m.	74.9	73.8	68
1:50 p. m.	75.5	74.4	68
2:00 p. m.	76.2	75.2	68
2:10 p. m.	76.7	75.8	69
2:20 p. m.	77.4	76.4	69
2:30 p. m.	78.9	77.8	69
2:40 p. m.	79.8	78.8	69
2:50 p. m.	80.8	79.2	70
3:00 p. m.	81.4	80.3	70
3:10 p. m.	81.9	80.8	70
3:20 p. m.	82.6	81.5	70
3:30 p. m.	83.5	82.5	71
3:40 p. m.	83.8	83	71
3:50 p. m.	83.9	83.1	71
4:00 p. m.	84	83.3	72
4:10 p. m.	83.9	83.2	72

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5 Temperatura en °C durante medición manual M2.

Muestra 02 (Fecha: miércoles 03 de junio 2019/ Turno mañana)			
Tiempo	Term. Láser	Term. Sumergible	Term. Analógico (actual)
9:10 a. m.	41	40.1	40
9:20 a. m.	41.1	39.2	40
9:30 a. m.	43.8	42.8	42
9:40 a. m.	45.7	45.5	44
9:50 a. m.	48.5	47.4	47
10:00 a. m.	52.1	50.9	51
10:10 a. m.	55.6	55.1	54
10:20 a. m.	58	56.6	57
10:30 a. m.	63.1	61.8	60
10:40 a. m.	66.3	65.4	63
10:50 a. m.	68	67.3	66
11:00 a. m.	72.2	71.1	70
11:10 a. m.	74.3	73.3	70
11:20 a. m.	75.1	74.1	71
11:30 a. m.	76.2	75.1	71
11:40 a. m.	76.9	75.3	72
11:50 a. m.	77.4	75.5	72
12:00 p. m.	77.9	76.5	72
12:10 p. m.	78.5	77.18	72
12:20 p. m.	79	77	73
12:30 p. m.	79.4	77.8	73
12:40 p. m.	79.9	78.4	73
12:50 p. m.	80.3	78.9	74
1:00 p. m.	80.6	79	74
1:10 p. m.	81.1	79.7	75
1:20 p. m.	81.3	80.5	74
1:30 p. m.	81.6	80.6	75
1:40 p. m.	82	81.2	75
1:50 p. m.	82.4	81.3	75
2:00 p. m.	82.6	81.9	75
2:10 p. m.	82.9	82.3	74
2:20 p. m.	83.3	82.3	74
2:30 p. m.	83.7	82.2	75
2:40 p. m.	83.9	82.9	75
2:50 p. m.	84.5	83.5	75
3:00 p. m.	84.7	83.4	76
3:10 p. m.	85	83.7	76
3:20 p. m.	85.8	83.6	76

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6 Temperatura en °C durante medición manual M3.

Muestra 03 (Fecha: lunes 08 de Julio 2019/ Turno mañana)			
Tiempo	Term. Láser	Term. Sumergible	Term. Analógico (actual)
7:30 a. m.	50	50	40
7:40 a. m.	44.4	42.5	41
7:50 a. m.	45.6	44.6	41
8:00 a. m.	45.9	45.7	42
8:10 a. m.	47.4	46.3	44
8:20 a. m.	48	46.8	44
8:30 a. m.	48	47.5	44
8:40 a. m.	49.5	48.1	43
8:50 a. m.	49.8	48.5	43
9:00 a. m.	49.9	49	44
9:10 a. m.	49.2	48.5	45
9:20 a. m.	50.2	49.1	45
9:30 a. m.	44	49.5	45
9:40 a. m.	50	49	45
9:50 a. m.	50.5	49.4	45
10:00 a. m.	51.5	49.9	45
10:10 a. m.	51.9	50	45
10:20 a. m.	52	50.6	45
10:30 a. m.	52.02	50.7	46
10:40 a. m.	52.4	50.4	47
10:50 a. m.	51.3	49.7	47
11:00 a. m.	51.1	49.6	47
11:10 a. m.	51.7	50.3	47
11:20 a. m.	52.5	50.9	47
11:30 a. m.	52.7	51.3	48
11:40 a. m.	52.5	51.7	48
11:50 a. m.	53.1	52.1	48
12:00 p. m.	53.2	52.4	48
12:10 p. m.	53.9	52.8	49
12:20 p. m.	53.9	53.2	49
12:30 p. m.	54.2	53.6	49
12:40 p. m.	55	54	49
12:50 p. m.	55.9	54.4	50
1:00 p. m.	55.7	54.7	50
1:10 p. m.	56	55	50
1:20 p. m.	56.6	55.3	51
1:30 p. m.	56.9	55.6	51
1:40 p. m.	57.5	55.1	51

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7 Temperatura en °C durante medición manual M4.

Muestra 04 (Fecha: lunes 08 de Julio 2019/ Turno tarde)			
Tiempo	Term. Láser	Term. Sumergible	Term. Analógico (actual)
4:15 p. m.	46.2	45.5	42
4:25 p. m.	46.8	46.1	43
4:35 p. m.	47.3	46.3	44
4:45 p. m.	47.8	46.6	45
4:55 p. m.	48.4	47.4	45
5:05 p. m.	48.9	48	45
5:15 p. m.	49.7	48.4	45
5:25 p. m.	49.6	48.5	45
5:35 p. m.	50.1	48.8	46
5:45 p. m.	50.1	49.2	46
5:55 p. m.	49.2	49.3	47
6:05 p. m.	50.2	49.4	47
6:15 p. m.	50.4	49.7	47
6:25 p. m.	50	49	48
6:35 p. m.	50.5	49.4	48
6:45 p. m.	51.5	49.9	48
6:55 p. m.	51.9	50	48
7:05 p. m.	52	50.6	49
7:15 p. m.	52.2	50.7	49
7:25 p. m.	52.4	50.4	49
7:35 p. m.	51.5	49.8	49
7:45 p. m.	51.1	49.9	50
7:55 p. m.	51.7	50.3	50
8:05 p. m.	52.5	50.9	51
8:15 p. m.	52.7	51.3	51
8:25 p. m.	52.5	51.7	51
8:35 p. m.	53.1	52.1	51
8:45 p. m.	53.2	52.4	51
8:55 p. m.	55.9	52.8	51
9:05 p. m.	53.9	53.5	51
9:15 p. m.	56.2	53.8	51
9:25 p. m.	55	54	52
9:35 p. m.	55.9	54.1	52
9:45 p. m.	55.7	54.6	52
9:55 p. m.	56.9	55	52
10:05 p. m.	56.6	55.3	52
10:15 p. m.	56.9	55.6	53
10:25 p. m.	57.3	55.1	51

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8 Tabla para calibración de sensor RTD – PT100 de 3 hilos.

Pt 100 ohms	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-190	22.78	22.35	21.93	21.50	21.08	20.66	20.23	19.81	19.38	18.96
-180	27.01	26.59	26.17	25.74	25.32	24.90	24.47	24.05	23.63	23.20
-170	31.24	30.81	30.39	29.97	29.55	29.13	28.70	28.28	27.86	27.44
-160	35.45	35.03	34.61	34.19	33.77	33.34	32.92	32.50	32.08	31.66
-150	39.65	39.23	38.81	38.39	37.97	37.55	37.13	36.71	36.29	35.87
-140	43.78	43.37	42.96	42.54	42.13	41.72	41.30	40.89	40.48	40.06
-130	47.90	47.49	47.08	46.67	46.26	45.85	45.43	45.02	44.61	44.20
-120	52.01	51.60	51.19	50.78	50.37	49.96	49.55	49.14	48.73	48.32
-110	56.11	55.70	55.29	54.88	54.48	54.07	53.66	53.25	52.84	52.43
-100	60.20	59.79	59.38	58.98	58.57	58.16	57.75	57.34	56.93	56.52
-90	64.23	63.83	63.43	63.02	62.62	62.22	61.81	61.41	61.01	60.60
-80	68.25	67.85	67.45	67.05	66.65	66.25	65.84	65.44	65.04	64.64
-70	72.26	71.86	71.46	71.06	70.66	70.26	69.86	69.46	69.06	68.66
-60	76.26	75.86	75.46	75.06	74.67	74.27	73.87	73.47	73.07	72.67
-50	80.25	79.85	79.45	79.06	78.66	78.26	77.86	77.46	77.06	76.66
-40	84.22	83.83	83.43	83.03	82.64	82.24	81.84	81.44	81.05	80.65
-30	88.18	87.79	87.39	87.00	86.60	86.21	85.81	85.41	85.02	84.62
-20	92.13	91.74	91.35	90.95	90.56	90.16	89.77	89.37	88.98	88.58
-10	96.07	95.68	95.29	94.89	94.50	94.11	93.71	93.32	92.92	92.53
0	100.00	99.61	99.22	98.82	98.43	98.04	97.65	97.25	96.86	96.47
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100	138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91
110	142.29	142.67	143.04	143.42	143.80	144.18	144.55	144.93	145.31	145.69
120	146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.95	148.32	148.70	149.07	149.45
130	149.83	150.20	150.58	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20
140	153.58	153.95	154.33	154.70	155.08	155.45	155.83	156.20	156.57	156.95
150	157.32	157.69	158.07	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.68
160	161.05	161.42	161.79	162.16	162.53	162.91	163.28	163.65	164.02	164.39
170	164.76	165.13	165.50	165.88	166.25	166.62	166.99	167.36	167.73	168.10
180	168.47	168.84	169.21	169.58	169.95	170.31	170.68	171.05	171.42	171.79
190	172.16	172.53	172.90	173.26	173.63	174.00	174.37	174.74	175.10	175.47
200	175.84	176.21	176.58	176.94	177.31	177.68	178.04	178.41	178.78	179.14
210	179.51	179.88	180.24	180.61	180.98	181.34	181.71	182.07	182.44	182.81
220	183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.45
230	186.82	187.18	187.55	187.91	188.27	188.64	189.00	189.37	189.73	190.09
240	190.46	190.82	191.18	191.54	191.91	192.27	192.63	192.99	193.36	193.72
250	194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33
260	197.69	198.05	198.41	198.77	199.14	199.50	199.86	200.22	200.58	200.94
270	201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53
280	204.88	205.24	205.60	205.96	206.32	206.68	207.03	207.39	207.75	208.11
290	208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67

Fuente: ARIAN Instrumentación y control, 2019.

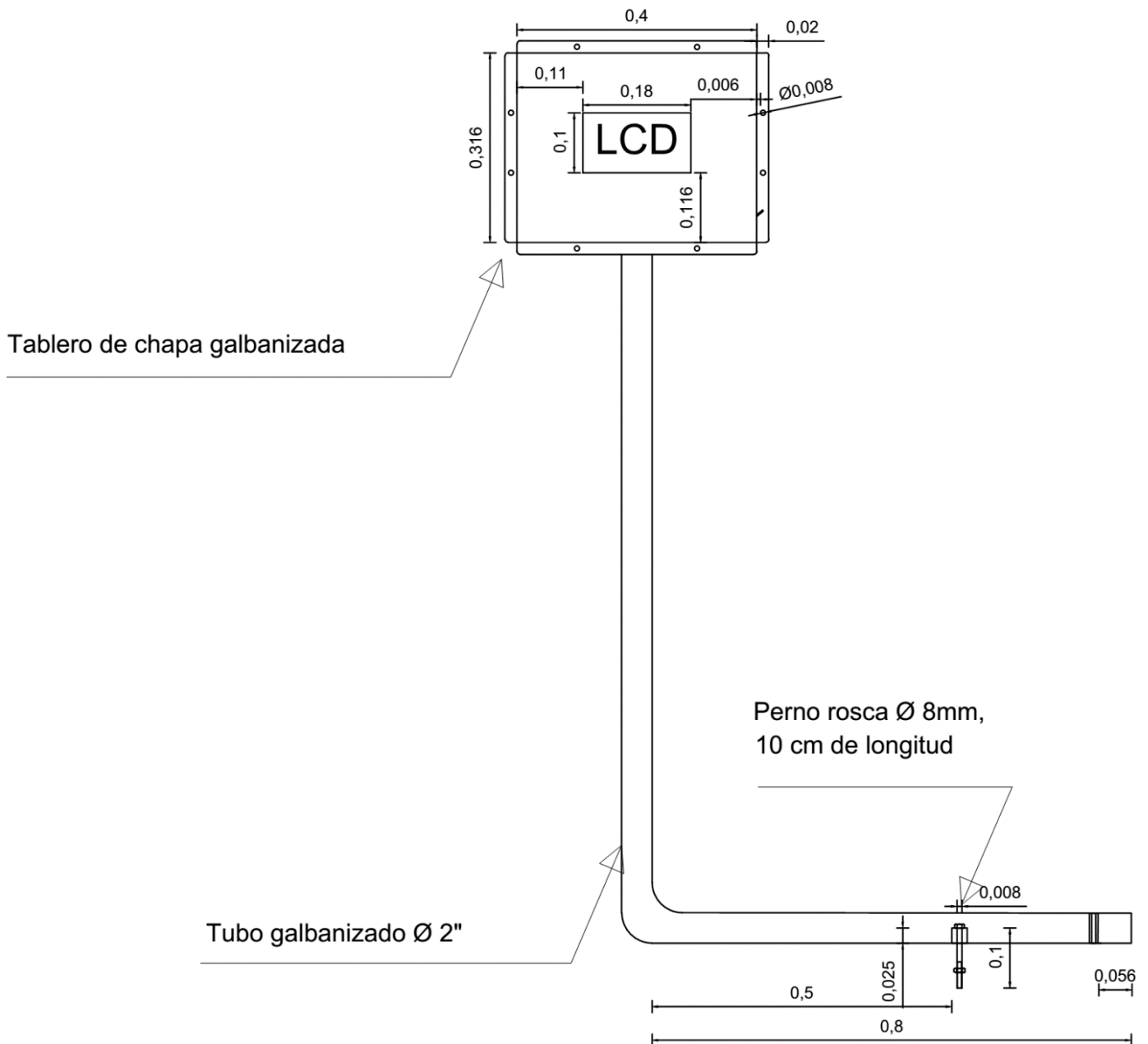
Anexo 9 Hoja de características y esquema de conexión de relé SSR.

MODEL	SSR-10DA-H	SSR-15DA-H	SSR-25DA-H	SSR-40DA-H	SSR-50DA-H	SSR-80DA-H	SSR-100DA-H	SSR-120DA-H
LOAD CURRENT	10A	15A	25A	40A	50A	80A	100A	120A
INPUT DATA								
OPERATING VOLTAGE	4~32VDC							
TRIGGER CURRENT	7.5mA/12VDC max							
CONTROL METHOD	Zero Cross Trigger							
OUTPUT DATA								
OPERATING VOLTAGE	75~480VAC							
VOLTAGE DROP	1.6V							
LEAKAGE CURRENT	< 5.0mA							
RESPONSE TIME	ON<10ms, OFF<10ms							
GENERAL DATA								
INSULATION RESISTANCE	Min. 50M Ω (500VDC)							
DIELECTRIC STRENGTH	2500VAC 50/60 Hz for 1 min							
AMBIENT TEMPERATURE	-20 $^{\circ}$ C ~+80 $^{\circ}$ C							
AMBIENT HUMIDITY	45%~85%RH							
WEIGHT	Appr. 105g							
CONNECTION DIAGRAM								

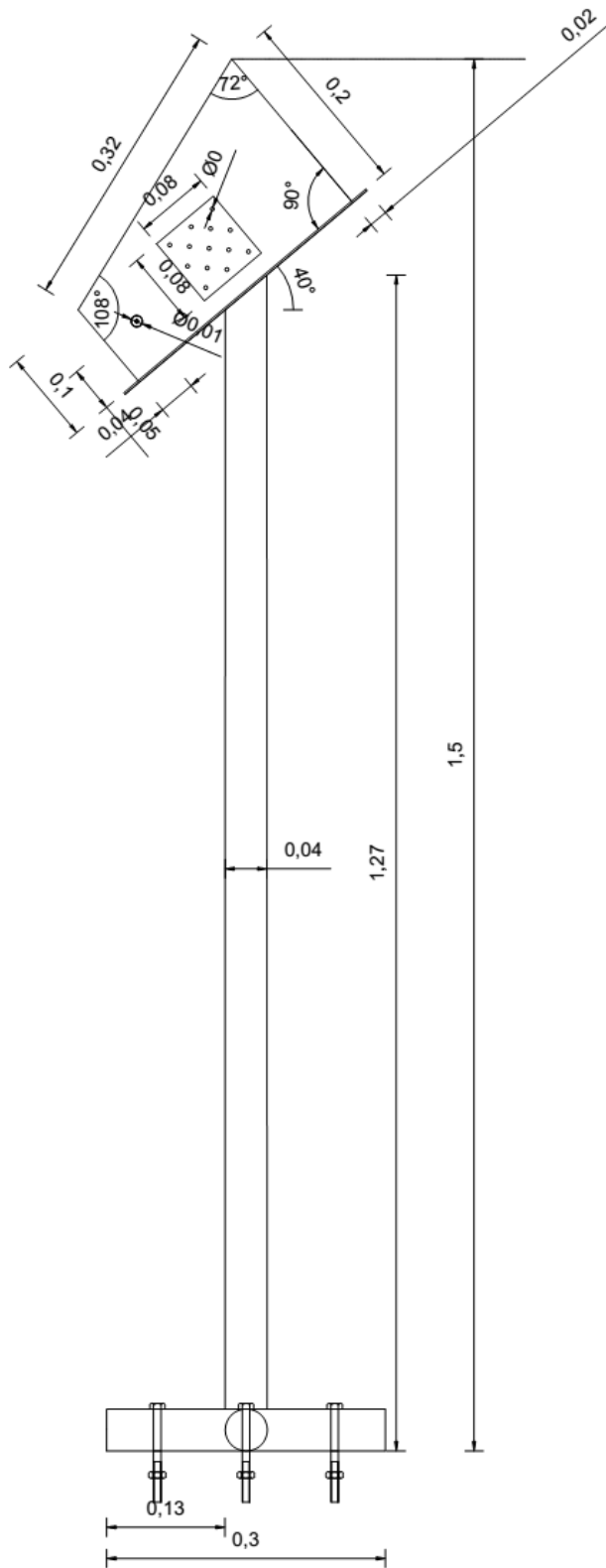
Fuente: ANV, 2019.

Anexo 10 Planos de estructura mecánica del prototipo (cotas en metros).

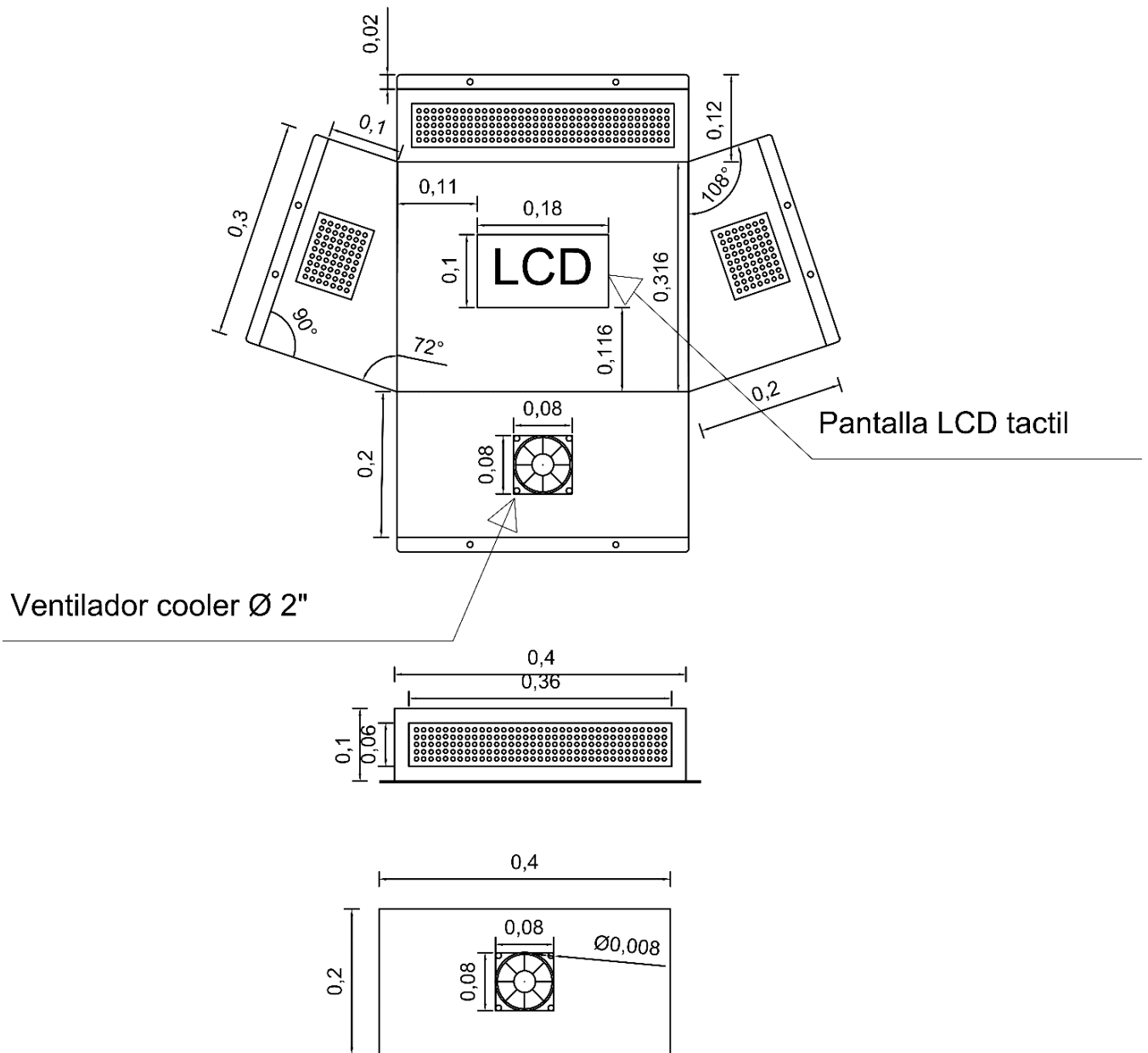
Vista frontal



Vista lateral

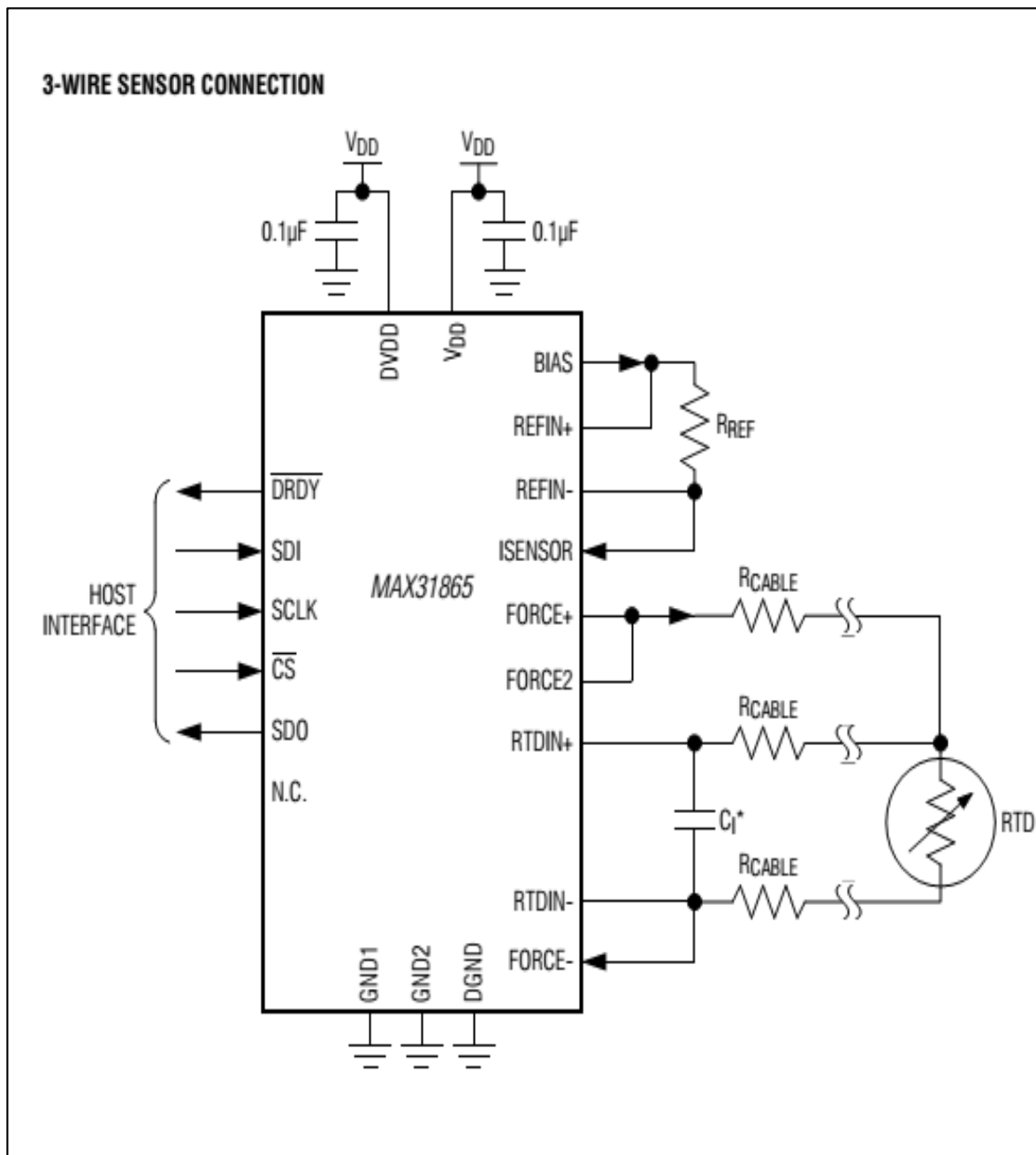


Vista chapa extendida



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11 Conexión de sensor RTD – PT100 de 3 hilos a transmisor MAX31865.



Fuente: Datasheet Max31865.

Anexo 12 Código para registrar datos para la sintonización de controlador PID.

```
//Adaptado por:
//Luis Miguel Horna Martinez
//Cristian Kent Diaz Cercado

#include <Adafruit_MAX31865.h>
#include <PID_v1.h>
//.....
//Comunicación SPI: CS, SDI(MOSI), SDO (MISO), SCLK
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(53,51,50,52);
//El valor de RREF es Rref=430 homnimos
#define RREF 430
#define RNOMINAL 102.375
#define tiempoCiclo 1000
//Definir pines
#define SSR 6
#define boton 7
//Variables
double Setpoint, Input, Output;
double kp=10,ki=3,kd=400;
float temperatura=0;
unsigned long respuestaUltimaTemperatura=0;
unsigned long lastPIDCalculation=0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, kp, ki, kd, DIRECT);
bool LectBot=0;
bool Salida=0;
bool LectBotAnterior=0;

void setup() {
  Setpoint=40.0;
  myPID.SetOutputLimits(0,tiempoCiclo);
  myPID.SetSampleTime(tiempoCiclo);
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  Serial.begin(115200);
  max.begin(MAX31865_3WIRE);
  pinMode(SSR,OUTPUT);
  pinMode(boton,INPUT);
  digitalWrite(SSR,LOW);
}
void loop() {
  lecturadeboton();
  if(Salida==HIGH){
    aplicacionPID();
    control();
  }
}
```

```

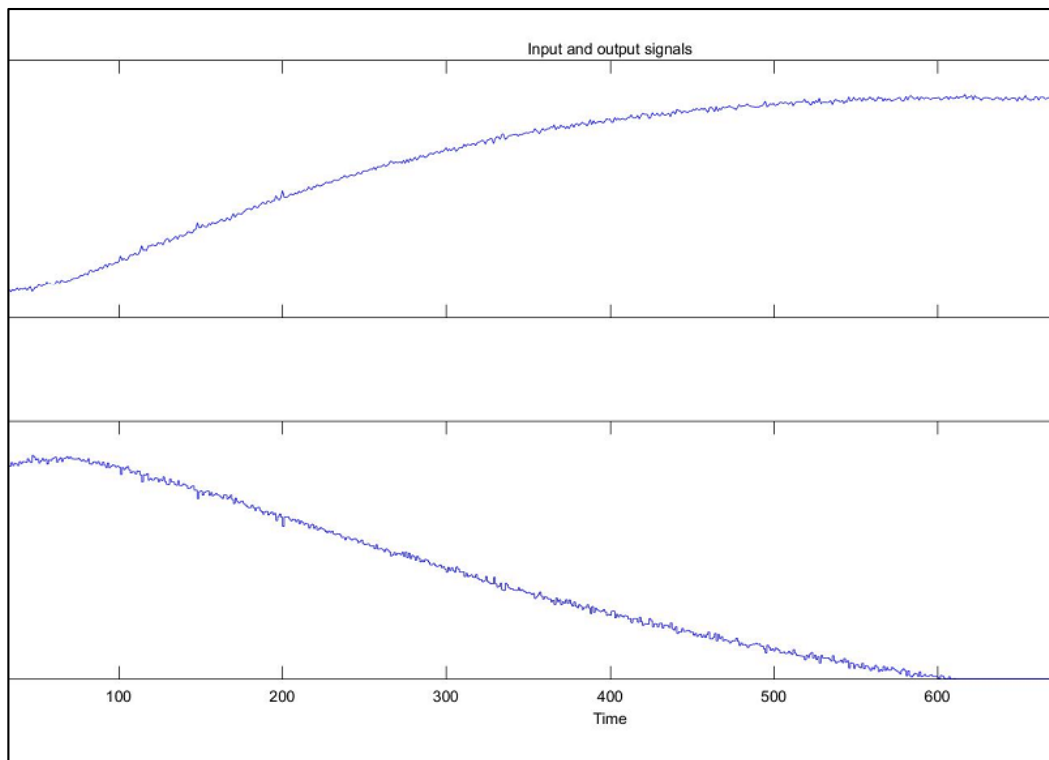
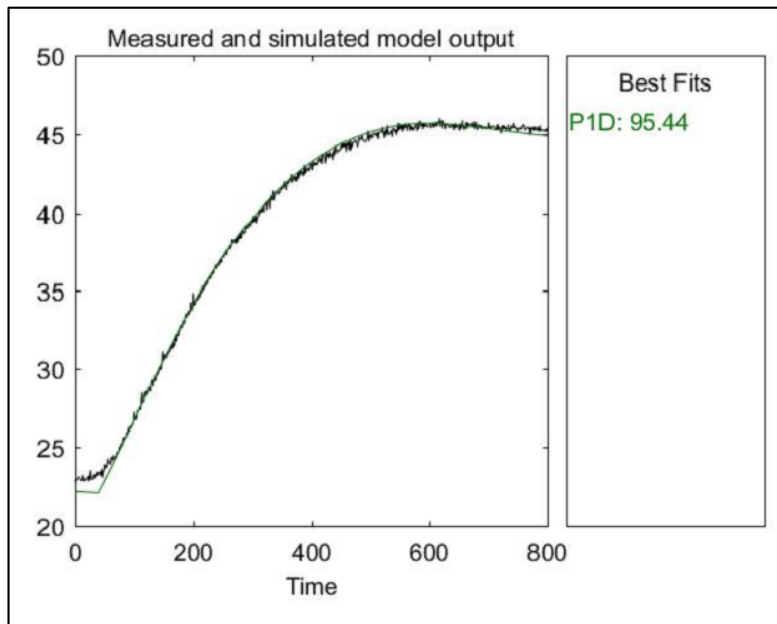
}
//.....
void control()
{
  if((millis() <=(lastPIDCalculation+Output)) || (Output==tiempoCiclo))
  {
    //Encender
    digitalWrite(SSR,HIGH);
  }else{
    //apagar
    digitalWrite(SSR,LOW);
  }
}
//.....
void aplicacionPID()
{if(millis()-respuestaUltimaTemperatura>=tiempoCiclo){
temperatura=max.temperature(RNOMINAL,RREF);
Input=(double)temperatura;
myPID.Compute();
lastPIDCalculation=millis();
Serial.print(temperatura);
Serial.print(" , ");
Serial.println(Output);
respuestaUltimaTemperatura=millis();
}
}
control();
}
//.....

void lecturadeboton() {
  LectBot=digitalRead(boton);
  if(LectBot==HIGH && LectBotAnterior==LOW)
  {
    Salida=1-Salida;
    delay(200);
  }
  LectBotAnterior=LectBot;
  return Salida;
}

```

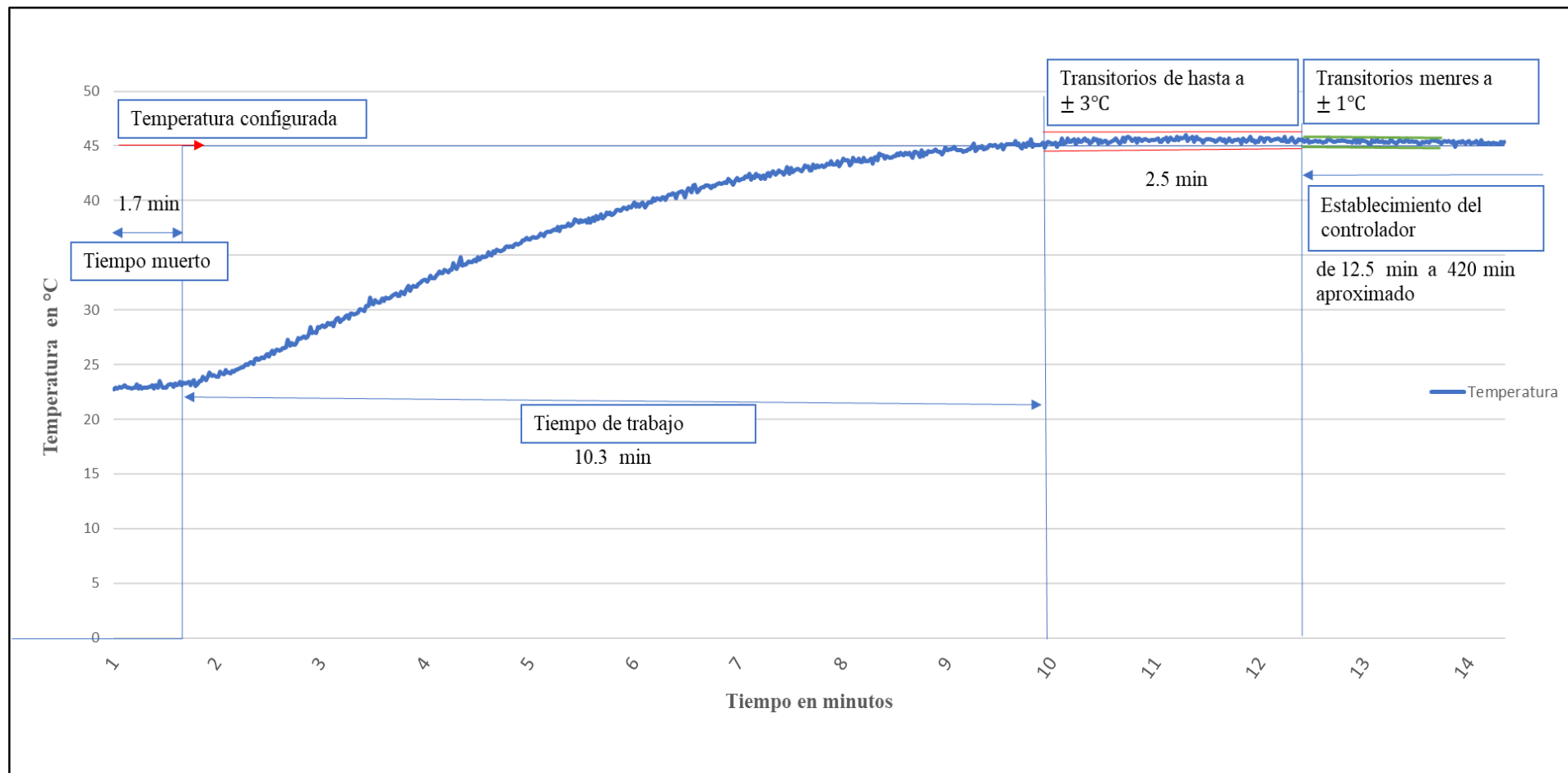
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13 Sintonizado de controlador PID en MATLAB.



Fuente: Elaboración propia en software Matlab.

Anexo 14 Tiempos de establecimiento de temperatura en la máquina conchadora.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 15 Certificado de calibración de Osciloscopio



Certificate of Calibration

Certificate No: 20151224001
Manufacturer: SIGLENT TECHNOLOGIES CO., LTD
Product Type: Digital Storage Oscilloscope
Model: SDS1202CNL+ **Serial NO.:** SDS10GA4150127

Calibrated /Test Item: Appearance Test, Function Test, Performance Test and Safety Test

Temperature: 23±5°C **Humidity:** < 70% RH

Calibrated Date: Dec-24-2015

Calibration Equipments:

Model	Description	Serial NO.
FLUKE 9500B	High Performance Oscilloscope Calibrator	261467730
Agilent E4421B	ESG Series Signal Generator	US40051020

Calibration Technician:

Checked by:

A handwritten signature in black ink, which appears to be "Renaultchen", is written over a blue circular stamp that contains the words "QA PASS" in white capital letters.

Note: The certificate applies only to this Oscilloscope.
Without permission, may not be part of the copy of the certificate.

Anexo 16 Hoja de característica de la Raspberry Pi 3B+

Raspberry Pi 3 Model B+

1

Overview



The Raspberry Pi 3 Model B+ is the latest product in the Raspberry Pi 3 range, boasting a 64-bit quad core processor running at 1.4GHz, dual-band 2.4GHz and 5GHz wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE, faster Ethernet, and PoE capability via a separate PoE HAT

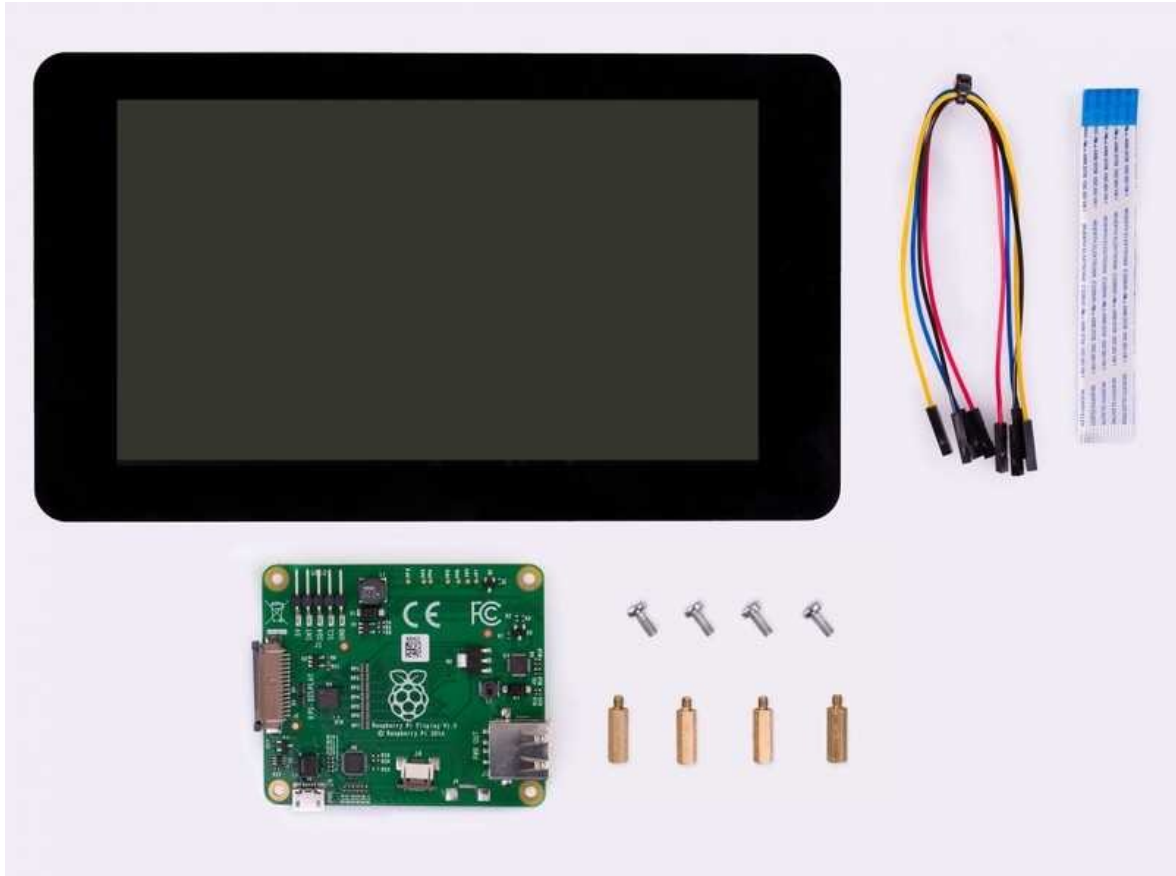
The dual-band wireless LAN comes with modular compliance certification, allowing the board to be designed into end products with significantly reduced wireless LAN compliance testing, improving both cost and time to market.

The Raspberry Pi 3 Model B+ maintains the same mechanical footprint as both the Raspberry Pi 2 Model B and the Raspberry Pi 3 Model B.



Fuente: Raspberry, 2019

Anexo 17 Pantalla táctil Raspberry Pi de 7 pulgadas.



Technical Specification

- 7" Touch screen Display.
- Screen Dimensions: 194mm x 110mm x 20mm (including standoffs)
- Viewable screen size: 155mm x 86mm
- Screen Resolution 800 x 480 pixels
- 10 finger capacitive touch.
- Connects to the Raspberry Pi board using a ribbon cable connected to the DSI port.
- Adapter board is used to power the display and convert the parallel signals from the display to the serial (DSI) port on the Raspberry Pi.
- Will require the latest version of Raspbian OS to operate correctly.

Fuente: Raspberry, 2019

Anexo 18 Comunicación ethernet y wifi desde la Raspberry a dispositivos con sistema operativo externos.

Con la finalidad de obtener data y maniobrar remotamente en el proceso del presente estudio se consideró a VNC Viewer como la mejor herramienta basado en software libre, ya que permite enlazar la Raspberry pi con una ip fija desde cualquier dispositivo sin importar el sistema operativo que este tenga. Es decir, que se puede obtener datos y controlar la Raspberry con sistema operativo Linux desde un ordenador de oficina con sistema operativo Windows sin ningún problema tan solo enlazando la ip del dispositivo, que contiene una contraseña de seguridad para prevenir intrusión.

- Página principal VNC



- Enlazando Raspberry Pi desde Windows 10.

