



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES**

**“DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL ON-
OFF, PI Y PID SOBRE EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN
TÉRMICA DE TOMATE”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES**

AUTORA: JESSICA ALEXANDRA CUJI SECAIRA
DIRECTOR: ING. EDWIN VINICIO ALTAMIRANO SANTILLÁN

Riobamba – Ecuador

2022

©2021, Jessica Alexandra Cuji Secaira

Se autoriza la reproducción total y parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, **Jessica Alexandra Cuji Secaira**, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos de este documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.; En patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 25 de enero de 2022



Jessica Alexandra Cuji Secaira

060427634-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: proyecto técnico, “**DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL ON-OFF, PI Y PID SOBRE EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN TÉRMICA DE TOMATE**”, realizado por la señorita: **JESSICA ALEXANDRA CUJI SECAIRA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

| | FIRMA | FECHA |
|--|--|--------------|
| Ing. Sandra Gabriela Barrazueta Rojas PRESIDENTE DEL TRIBUNAL | SANDRA GABRIELA BARRAZUET A ROJAS <small>Firmado digitalmente por SANDRA GABRIELA BARRAZUETA ROJAS Fecha: 2022.01.28 10:21:28 -05'00'</small> | 2022-01-25 |
| Ing. Edwin Vinicio Altamirano Santillán DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION | EDWIN VINICIO ALTAMIRAN O SANTILLAN <small>Firmado digitalmente por EDWIN VINICIO ALTAMIRANO SANTILLAN Fecha: 2022.01.27 13:39:19 -05'00'</small> | 2022-01-25 |
| Ing. José Luis Tinajero León MIEMBRO DE TRIBUNAL | JOSE LUIS TINAJERO LEON <small>Firmado digitalmente por JOSE LUIS TINAJERO LEON Fecha: 2022.01.27 21:04:33 -05'00'</small> | 2022-01-25 |

DEDICATORIA

Ante todo, este trabajo va dedicado especialmente a mi hermano David, ese ángel que me está viendo desde el cielo y guía cada uno de mis pasos. A mi madre que con sus enseñanzas y correctivos ha logrado de mí una persona de bien. A mis hermanos Hugo, Omar y Morayma que siempre me han apoyado en el transcurso de mi carrera con sus consejos, enseñanzas y palabras de aliento.

Jess.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de una manera especial a mi madre Martha Secaira, la persona que me vio nacer y desde ese momento siempre ha velado por mí bienestar. Por ser una excelente madre y enseñarme el valor del trabajo y la responsabilidad, además por nunca dejarme desfallecer apoyándome en mi carrera, por siempre tener las palabras adecuadas que me han brindado confort y ánimos para continuar sin rendirme ante nada.

A mi hermano, que siempre ha estado pendiente de nuestra familia, brindándonos su apoyo incondicional sin esperar nada a cambio. Por optar por el rol de padre y enseñarnos que la familia es lo más importante, que a pesar de todas las circunstancias y conflictos siempre debemos estar juntos y apoyarnos entre sí.

A todas las personas que he conocido en el transcurso de mi carrera, a aquellos que han creído en mí y en mis capacidades, que a pesar de todos mis fracasos siempre me han acompañado, a todos quienes me han demostrado su cariño y han tenido fe en mí, y que sin su presencia no hubiera sido posible cumplir este sueño.

Jess.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|----------------------------|-------|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xi |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS..... | xiii |
| ÍNDICE DE ECUACIONES | xiv |
| ÍNDICE DE ANEXOS | xv |
| RESUMEN | xvii |
| ABSTRACT..... | xviii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |

CAPÍTULO I

| | |
|---|----|
| 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL..... | 3 |
| 1.1. Origen del tomate..... | 3 |
| 1.1.1. <i>Características del tomate</i> | 3 |
| 1.1.2. <i>Producción de tomate</i> | 3 |
| 1.1.3. <i>Variedades de tomate</i> | 4 |
| 1.1.4. <i>Composición nutricional del tomate</i> | 5 |
| 1.1.5. <i>Utilidades y beneficios del tomate</i> | 6 |
| 1.2. La deshidratación | 7 |
| 1.2.1. <i>Proceso de deshidratación</i> | 7 |
| 1.2.2. <i>Comercialización del tomate deshidratado</i> | 10 |
| 1.2.3. <i>Características físicas del tomate deshidratado</i> | 11 |
| 1.2.4. <i>Evaluación de producto final</i> | 12 |
| 1.3. Tipos de deshidratadores..... | 13 |
| 1.3.1. <i>Según el método de intercambio de calor</i> | 14 |
| 1.3.2. <i>Según fuentes energéticas</i> | 14 |
| 1.3.3. <i>Según el tipo de construcción</i> | 16 |
| 1.4. Sistemas de control | 17 |
| 1.4.1. <i>Elementos y señales de un sistema de control</i> | 17 |
| 1.4.2. <i>Estrategia de control</i> | 18 |
| 1.4.3. <i>Tipos de controladores</i> | 19 |
| 1.5. Sistemas térmicos | 24 |
| 1.5.1. <i>Resistencia térmica</i> | 24 |
| 1.5.2. <i>Capacitancia térmica</i> | 25 |
| 1.6. Sensores de temperatura | 25 |
| 1.6.1. <i>Sensores RTD</i> | 25 |
| 1.6.1.1. <i>Pt100</i> | 26 |
| 1.6.2. <i>Circuitos de acondicionamiento de señal</i> | 30 |

| | | |
|----------|---|----|
| 1.6.2.1. | <i>Acondicionamiento por divisor de tensión</i> | 31 |
| 1.6.2.2. | <i>Acondicionamiento por divisor de corriente</i> | 32 |
| 1.6.2.3. | <i>Acondicionamiento por puente de Wheatstone</i> | 33 |
| 1.6.3. | <i>Amplificador operacional</i> | 35 |
| 1.6.4. | <i>Convertidor analógico-digital</i> | 36 |
| 1.7. | Tarjeta de desarrollo | 37 |
| 1.7.1. | <i>Comparación entre las tarjetas de desarrollo</i> | 38 |
| 1.8. | Simuladores de circuitos eléctricos | 38 |
| 1.8.1. | <i>Comparación entre los simuladores</i> | 39 |

CAPÍTULO II

| | | |
|----------|--|----|
| 2. | MARCO METODOLÓGICO | 40 |
| 2.1. | Requerimientos del sistema térmico | 41 |
| 2.1.1. | <i>Funcionamiento del sistema térmico</i> | 41 |
| 2.1.2. | <i>Especificaciones técnicas del deshidratador</i> | 42 |
| 2.1.3. | <i>Elección de los elementos de hardware y software</i> | 44 |
| 2.1.3.1. | <i>Elección de la tarjeta de desarrollo</i> | 44 |
| 2.1.3.2. | <i>Convertidor ADS1115</i> | 45 |
| 2.1.3.3. | <i>Elección de software de simulación</i> | 46 |
| 2.1.4. | <i>Elección del elemento de medición</i> | 47 |
| 2.2. | Diseño e implementación de la etapa de potencia | 48 |
| 2.2.1. | <i>Circuito de acondicionamiento Pt100</i> | 52 |
| 2.2.1.1. | <i>Implementación del circuito de acondicionamiento de las Pt100 en protoboard.</i> | 53 |
| 2.2.2. | <i>Circuito detector de Cruce por Cero</i> | 55 |
| 2.2.2.1. | <i>Circuito de disparo del Triac</i> | 56 |
| 2.2.2.2. | <i>Implementación del cruce por cero y disparo del Triac</i> | 56 |
| 2.2.3. | <i>Circuito de pantalla LCD 16X2</i> | 57 |
| 2.3. | Diseño e implementación de los sistemas de control | 58 |
| 2.3.1. | <i>Modelo de la planta</i> | 59 |
| 2.3.2. | <i>Diseño de los controladores</i> | 61 |
| 2.3.2.1. | <i>Modelamiento del sistema de control On-Off</i> | 61 |
| 2.3.2.2. | <i>Modelamiento de los sistemas de control PI y PID</i> | 63 |
| 2.4. | Software de desarrollo para el sistema térmico | 66 |
| 2.4.1. | <i>Programación en el software de desarrollo IDE de Arduino</i> | 67 |

CAPITULO III

| | | |
|--------|---|----|
| 3. | VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO | 73 |
| 3.1. | Acoplamiento del circuito eléctrico al deshidratador | 73 |
| 3.1.1. | <i>Distribución de los sensores Pt100 en el deshidratador</i> | 74 |

| | | |
|---------------|--|-----------|
| 3.2. | Verificación de los controladores en el sistema térmico..... | 74 |
| 3.2.1. | <i>Consumo de potencia del sistema eléctrico.</i> | 74 |
| 3.2.2. | <i>Análisis de la curva de estabilidad de Temperatura vs Tiempo</i> | 76 |
| 3.2.3. | <i>Control de calidad del tomate deshidratado</i> | 78 |
| 3.2.4. | <i>Control de pérdida de peso del producto deshidratado.....</i> | 79 |

CAPITULO IV

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 4. | EVALUACIÓN ECONÓMICA..... | 82 |
| 4.1. | Comparación de costo con un dispositivo similar en el mercado | 83 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| CONCLUSIONES..... | 85 |
|--------------------------|-----------|

| | |
|-----------------------------|-----------|
| RECOMENDACIONES..... | 86 |
|-----------------------------|-----------|

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| Tabla 1-1: | Composición nutricional del tomate en 100g de porción comestible. | 5 |
| Tabla 2-1: | Utilidades y beneficios del tomate. | 6 |
| Tabla 3-1: | Temperatura y tiempo de deshidratación de varias frutas y verduras. | 8 |
| Tabla 4-1: | Características del tomate deshidratado. | 11 |
| Tabla 5-1: | Humedad en alimento fresco y humedad residual. | 12 |
| Tabla 6-1: | Señales de sistemas de control. | 18 |
| Tabla 7-1: | Ventajas y desventajas de sensores Pt100. | 26 |
| Tabla 8-1: | Especificaciones técnicas del sensor Pt100 de dos hilos. | 27 |
| Tabla 9-1: | Especificaciones técnicas del sensor Pt100 de tres hilos. | 28 |
| Tabla 10-1: | Especificaciones técnicas del sensor Pt100 de cuatro hilos. | 30 |
| Tabla 11-1: | Especificaciones técnicas de las tarjetas de desarrollo. | 38 |
| Tabla 12-1: | Funcionalidad de los simuladores. | 39 |
| Tabla 1-2: | Especificaciones técnicas de funcionamiento del deshidratador EZ-Store. | 44 |
| Tabla 2-2: | Características técnicas de Arduino con microcontrolador Atmega2560. | 45 |
| Tabla 3-2: | Características técnicas del convertidor A/D ADS1115. | 46 |
| Tabla 4-2: | Materiales para la implementación del circuito de acondicionamiento. | 54 |
| Tabla 5-2: | Materiales para la implementación del circuito eléctrico de potencia. | 56 |
| Tabla 6-2: | Sintonización del controlador por el método de Ziegler-Nichols. | 64 |
| Tabla 7-2: | Librerías de Arduino para la programación. | 67 |
| Tabla 1-3: | Consumo energético del sistema eléctrico. | 75 |
| Tabla 2-3: | Comportamiento dinámico de los controladores. | 77 |
| Tabla 3-3: | Evaluación de las características físicas del tomate entero deshidratado. | 79 |
| Tabla 4-3: | Control de pérdida de peso de tomate deshidratado. | 80 |
| Tabla 1-4: | Costos de los elementos adquiridos para el sistema eléctrico. | 82 |
| Tabla 2-4: | Especificaciones técnicas del deshidratador Colzer. | 83 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 1-2: | Etapas para el desarrollo del sistema térmico. | 40 |
| Figura 2-2: | Diagrama general del funcionamiento del sistema eléctrico. | 42 |
| Figura 3-2: | Deshidratador EZ-Store 5 bandejas marca Ranco. | 43 |
| Figura 4-2: | Sistema Térmico del deshidratador EZ-Store. | 43 |
| Figura 5-2: | Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560. | 44 |
| Figura 6-2: | Convertidor A/D ADS1115. | 45 |
| Figura 7-2: | Software de simulación Proteus 8.6. | 46 |
| Figura 8-2: | Software de simulación Eagle versión 7.6.0. | 47 |
| Figura 9-2: | Esquema del circuito eléctrico para la etapa de potencia. | 49 |
| Figura 10-2: | Señal senoidal con ángulo de disparo de 10° | 50 |
| Figura 11-2: | Señal senoidal con ángulo de disparo de 45° | 50 |
| Figura 12-2: | Señal senoidal con ángulo de disparo de 90° | 51 |
| Figura 13-2: | Señal senoidal con ángulo de disparo de 180° | 51 |
| Figura 14-2: | Circuito eléctrico de acondicionamiento de las Pt100. | 53 |
| Figura 15-2: | Implementación del circuito eléctrico de acondicionamiento. | 54 |
| Figura 16-2: | Adquisición de datos de la temperatura promedio en Arduino. | 55 |
| Figura 17-2: | Circuito Detector de Cruce por Cero | 55 |
| Figura 18-2: | Circuito de disparo del Triac. | 56 |
| Figura 19-2: | Implementación del circuito eléctrico de potencia. | 57 |
| Figura 20-2: | (a) Disparo de 10° , (b) Disparo de 45° , (c) Disparo de 150° | 57 |
| Figura 21-2: | Circuito de pantalla LDC. | 58 |
| Figura 22-2: | Etapas para el diseño de los sistemas de control. | 58 |
| Figura 23-2: | Datos graficados en Excel del sistema térmico. | 59 |
| Figura 24-2: | Obtención de la Función de Transferencia de la Planta. | 60 |
| Figura 25-2: | Diagrama de bloques en lazo cerrado del sistema. | 61 |
| Figura 26-2: | Modelamiento del sistema con controlador On-Off. | 62 |
| Figura 27-2: | Simulación del Controlador ON-OFF. | 62 |
| Figura 28-2: | Respuesta del sistema con controlador On-Off. | 63 |
| Figura 29-2: | Modelamiento de un sistema térmico con controlador PID | 63 |
| Figura 30-2: | Ecuación característica en el lugar geométrico de las raíces. | 65 |
| Figura 31-2: | Obtención de la Ecuación característica con aproximación de Padé. | 66 |
| Figura 32-2: | Menú de opciones en el monitor serial de Arduino. | 72 |
| Figura 1-3: | Acoplamiento del circuito eléctrico al deshidratador. | 73 |
| Figura 2-3: | Distribución de los sensores Pt100. | 74 |
| Figura 3-3: | Medición de la corriente máxima en el sistema térmico. | 75 |
| Figura 4-3: | Curva de respuesta exponencial en estado transitorio del sistema. | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 5-3: Respuesta de estabilización absoluta del controlador..... | 78 |
| Figura 1-4: Deshidratador Colzer..... | 83 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | | |
|---------------------|--|----|
| Gráfico 1-2: | Diagrama de bloques de adquisición de datos. | 48 |
| Gráfico 2-2: | Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema térmico..... | 68 |
| Gráfico 3-2: | Diagrama de flujo para inicialización del controlador On-Off. | 69 |
| Gráfico 4-2: | Diagrama de flujo para inicialización del controlador PI. | 70 |
| Gráfico 5-2: | Diagrama de flujo para inicialización del controlador PID..... | 71 |
| Gráfico 1-3: | Consumo de corriente y potencia del sistema eléctrico. | 76 |
| Gráfico 2-3: | Comportamiento dinámico de los controladores. | 77 |
| Gráfico 3-3: | Control de pérdida de peso del tomate deshidratado. | 81 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | | |
|------------------------|--|----|
| Ecuación: 1-1: | Cálculo del rendimiento teórico. | 12 |
| Ecuación: 2-1: | Cálculo del peso en seco. | 13 |
| Ecuación: 3-1: | Cálculo del error en control de dos posiciones. | 20 |
| Ecuación: 4-1: | Cálculo de la función de transferencia con controlador PI. | 22 |
| Ecuación: 5-1: | Cálculo de la función de transferencia con controlador PD..... | 23 |
| Ecuación: 6-1: | Cálculo de la función de transferencia con controlador PID..... | 24 |
| Ecuación: 7-1: | Cálculo de la velocidad de flujo calórico..... | 24 |
| Ecuación: 8-1: | Cálculo de la velocidad de flujo calórico..... | 25 |
| Ecuación: 9-1: | Cálculo de la capacitancia térmica. | 25 |
| Ecuación: 10-1: | Cálculo del voltaje de entrada. | 31 |
| Ecuación: 11-1: | Cálculo de la corriente..... | 31 |
| Ecuación: 12-1: | Cálculo del voltaje V1 y V2. | 31 |
| Ecuación: 13-1: | Cálculo aplicando la ley de ohm..... | 32 |
| Ecuación: 14-1: | Ecuación 14-1. Cálculo de las corrientes I1 e I2..... | 33 |
| Ecuación: 15-1: | Ecuación 15-1. Cálculo del voltaje de salida del divisor. | 34 |
| Ecuación: 16-1: | Cálculo de la resistencia fija. | 34 |
| Ecuación: 17-1: | Cálculo de la resistencia R1. | 34 |
| Ecuación: 18-1: | Cálculo del voltaje de salida del divisor. | 34 |
| Ecuación: 1-2: | Cálculo del voltaje por divisor de tensión. | 52 |
| Ecuación: 2-2: | Cálculo del voltaje de salida en mV. | 52 |
| Ecuación: 3-2: | Cálculo del voltaje de salida en V. | 53 |
| Ecuación: 4-2: | Función de transferencia de la planta. | 59 |
| Ecuación: 5-2: | Cálculo de la función de transferencia de la planta..... | 60 |
| Ecuación: 6-2: | Cálculo de las constantes de sintonización para el controlador PI: | 64 |
| Ecuación: 7-2: | Cálculo de las constantes de sintonización para el controlador PID: | 64 |
| Ecuación: 8-2: | Cálculo de la función de transferencia del controlador PI: | 64 |
| Ecuación: 9-2: | Cálculo de la función de transferencia del controlador PID: | 65 |
| Ecuación: 10-2: | Cálculo de la función de transferencia con Padé. | 66 |
| Ecuación: 11-2: | Cálculo de la función de transferencia con $K_c=0.01$ | 66 |
| Ecuación: 1-3: | Cálculo de la potencia máxima..... | 74 |
| Ecuación: 2-3: | Cálculo del rendimiento. | 79 |
| Ecuación: 3-3: | Cálculo del rendimiento del tomate. | 80 |
| Ecuación: 4-3: | Cálculo del peso en seco. | 80 |
| Ecuación: 5-3: | Cálculo del peso en seco del tomate. | 80 |

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Tabla de conversión de temperatura a resistencia de Pt100

Anexo B: Diseño del circuito de potencia en Eagle Design PCB

ABREVIATURAS

| | |
|---------------|--|
| ON-OFF | Control de encendido y apagado |
| PI | Control proporcional integral |
| PD | Control proporcional derivativo |
| PID | Control proporcional integral derivativo |
| IDE | Integrated development environment |
| AVR | Automatic voltage regulator |
| AC | Corriente alterna |
| RTD | Resistance temperatura detector |
| ADC | Analog-digital converter |
| I2C | Inter integrated circuits |
| PCB | Printed circuit board |
| LCD | Liquid cristal display |
| IDE | Integrated development environment |

RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como propósito diseñar y verificar los sistemas de control On-Off, PI y PID sobre el proceso de deshidratación térmica de tomate. En el proceso de deshidratación se pudo conocer que el tomate riñón se deshidrata a una temperatura de 60°C por un periodo de 10 horas. En los sistemas térmicos la ecuación característica de la planta hace referencia a un sistema tipo 1 con una respuesta de naturaleza exponencial; para el modelamiento de la planta se utilizó el método de identificación clásico aplicando una señal escalón como señal de prueba. En el diseño del controlador On-Off se consideró una acción de control con histéresis para evitar excesivas conmutaciones. Las constantes de sintonización del sistema con controlador PI y PID se obtuvieron aplicando el método experimental de Ziegler-Nichols, así como también el método del lugar geométrico de las raíces y la aproximación de Padé brindando una ecuación característica más precisa para ambos casos. Se planteó 4 parámetros para verificar el desempeño del sistema térmico con los diferentes tipos de controladores, de ello se obtuvo como resultado que el controlador PI: brinda un consumo de potencia del sistema eléctrico de 158,2W; es estable de acuerdo al análisis de la curva de estabilidad en estado estacionario, transitorio y absoluto; presenta el mejor aspecto conservando sus características físicas ideales de una correcta deshidratación y se obtuvo un peso en seco de 13g, por lo que se demostró que este controlador es el más idóneo para el proyecto propuesto además que es de bajo costo en comparación con deshidratadores que cumplen con similares características de funcionamiento. Se recomienda realizar una sintonización fina del controlador PI mediante el método de prueba y error, además de implementar un sistema híbrido con ayuda de energía renovable que genere un mayor ahorro energético.

Palabras clave: <SISTEMA TÉRMICO> <DESHIDRATACIÓN> <CONTROL DE TEMPERATURA> <SENSOR DE TEMPERATURA> <HISTÉRESIS>.



Firmado electrónicamente por:
**HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA**

2165-DBRA-UPT-2021

2021-11-26

ABSTRACT

The purpose of this degree work was to design and verify the control systems On-Off, PI and PID on the tomato thermal dehydration process. In the process of dehydration, it was known that tomato is dehydrated at a temperature of 60 ° C within a period of 10 hours. In thermal systems the characteristic equation of the plant makes reference to a type 1 system with a response of an exponential nature; for modeling of the plant, the classical identification method was used by applying a step signal as a signal test. In the design of the On-Off controller, a control action with hysteresis was considered to avoid excessive switching. System tuning constants with controller PI and PID were obtained by applying the Ziegler-Nichols experimental method, as well as the root locus method and Padé's approximation giving a more accurate equation characteristic for both cases. 4 parameters were raised to verify the performance of the thermal system with the different types of controllers, it was obtained as a result that the PI controller: provides a power consumption of the electrical system of 158.2W; is stable according to the analysis of the stability curve in steady, transitory and absolute state; presents the best appearance while preserving its ideal physical characteristics of a correct dehydration and a dry weight of 13g was obtained, so it was shown that this controller is the most suitable for the proposed project as well as being low cost compared to dehydrators that meet similar operating characteristics. It is recommended fine-tune the PI controller by trial and error method, in addition to implement a hybrid system with the help of renewable energy that generates greater energetic savings.

Keywords: <THERMAL SYSTEM> <DEHYDRATION> <CONTROL OF TEMPERATURE>
<TEMPERATURE SENSOR> <HYSTERESIS>.



Elaborado electrónicamente por:
**NELLY MARGARITA
PADILLA PADILLA**

INTRODUCCIÓN

Un deshidratador en la actualidad no es tan común adquirirlo y el consumo de productos deshidratados son frecuentes en los hogares ecuatorianos ya sea para tomarlos como infusión o como sazonadores en la gastronomía. Existen diversidad de productos a los cuales se les puede aplicar este proceso para conservarlos por mayor tiempo sin que pierdan sus nutrientes y consumirlos en cualquier época del año. Como objeto de estudio y comportamiento se ha escogido el tomate riñón para someterlo a este proceso, se sabe que en la mayoría de los hogares se consume esta verdura y es un ingrediente primordial que se lo usa para preparar diversos platos aprovechando así los beneficios que aportan a nuestro organismo.

El control automático se ha convertido en una parte importantes para los procesos modernos de fabricación en donde se requiera el control de variables ya sea de temperatura, humedad, flujo, etc. Con la finalidad de mejorar el proceso de deshidratación y generar un producto de mejor calidad que posteriormente puede ser implementado a gran escala, se ha decidido incorporar a los deshidratadores comunes un controlador que nos permita realizar este proceso con mayor eficiencia; motivo por el cual se ha propuesto diseñar y verificar los sistemas de control On-Off, PI y PID sobre el proceso de deshidratación térmica de tomate planteándose así los siguientes objetivos:

- Realizar el diseño e implementación del sistema térmico del deshidratador con los sistemas de control On-Off, PI y PID.
- Realizar la verificación y funcionamiento de los sistemas de control On-Off, PI y PID en el proceso de deshidratación del tomate.

Por lo general los sistemas térmicos hacen referencia a un sistema de tipo cero y de orden 1, esto significa que su respuesta es de naturaleza exponencial y por lo tanto la forma del sistema no permite aplicar algunos controladores como el controlador PD (proporcional derivativo) debido a que si se considera un sistema de tipo cero en lazo cerrado, este llegará a tener una ganancia finita y solo permite corregir hasta un 50% del valor deseado, mientras más se aumente la ganancia del sistema se obtendrá una respuesta transitoria indeseable, motivo por el cual se ha planteado diseñar solo el sistema térmico con controladores On-Off, PI y PID.

En base a las características del deshidratador adquirido, se ha determinado la temperatura estimada de 60 °C con la que se trabaja durante todo el proceso. Para desarrollar cada sistema de control se considera como un sistema en lazo cerrado donde como elemento de medición se tiene cuatro sensores Pt100 conectados en serie y añadidos al deshidratador.

El controlador ON-OFF actúa en dos posiciones encendido y apagado, como la temperatura se encuentra continuamente oscilando es necesario añadir una histéresis que evita vibraciones de salida siempre y cuando el ruido pico a pico sea menor que la histéresis, siendo esta la que determina la variación mínima de temperatura posible. En el proceso se trabaja con una histéresis igual a uno.

Para los controladores PI y PID se utiliza una regulación del controlador mediante el cruce por cero el mismo que depende de los parámetros de sintonización del controlador, logrando un control sobre la corriente que circula por el actuador (niquelina).

Para determinar las constantes de sintonización se ha aplicado el método experimenta de Ziegler-Nichols y para encontrar la ecuación característica del sistema se utilizó el método sencillo del lugar geométrico de las raíces con ayuda de la herramienta de simulación Matlab. Para analizar la respuesta transitoria, estacionaria y de estabilización absoluta del sistema se realizó la curva de estabilidad de la temperatura vs el tiempo donde se observa la respuesta del sistema con las diferentes acciones de control.

Para la verificación de los controladores en el sistema térmico se consideró los siguientes parámetros como: consumo de potencia en el sistema eléctrico, análisis de la respuesta transitoria y estacionaria del sistema, pérdida de humedad mediante la fórmula de control de pérdida de peso del producto fresco y seco y finalmente la comparación de las características físicas del producto deshidratado con los diferentes tipos de controladores.

Teniendo como resultado que el controlador PI es el más apropiado para este tipo de procesos, con una respuesta en estado estacionario y transitorio satisfactoria, obteniéndose un alto porcentaje de pérdida de humedad en el producto seco, conservando la mayor parte de sus características físicas ideales de un tomate deshidratado. El único inconveniente que presenta este tipo de controlador es el consumo de potencia que en estudios posteriores se los puede ir corrigiendo mediante el uso de una energía alternativa.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En el siguiente capítulo se estudia definiciones como: el origen, características generales, variedades y utilidades del tomate, seguido se expone la de deshidratación, el proceso de deshidratación y tipos de deshidratadores. También se presentan conceptos y requerimientos necesarios para la arquitectura del sistema térmico como: de sistemas de control, estrategias, tipos controladores. sistemas térmicos y circuitos de acondicionamiento para sensores RTD. Finalmente enumera las características deseables un microcontrolador y su fabricante.

1.1. Origen del tomate

El tomate es el fruto que se obtiene de la *Solanum Lycopersicum Esculentum* o popularmente conocida como planta tomatera perteneciente a la familia de las solanáceas, es originario del continente americano específicamente de las zonas geográficas concretamente de Perú, Ecuador y la zona norte de Chile (Reyes et al., 2018).

1.1.1. Características del tomate

Es una baya carnosa caracterizada por su pulpa con múltiples semillas y su jugo, posee un aspecto esférico de unos 8 cm diámetro, antes de su madurez su piel presenta el color verde y con el tiempo suelen varía entre tonos que van desde amarillento hasta rojizo debido a la presencia de pigmentos como los carotenos y el licopeno. Está compuesto en su mayor parte por agua por lo que es comestible en un 93% mientras que el 7 % equivale a piel, epicarpio y semillas que resultan no comestibles (Reyes et al., 2018).

1.1.2. Producción de tomate

De acuerdo con el Banco del Ecuador en el que se presenta los resultados obtenidos a través de plataformas tecnológicas en la investigación del sector agrícola N°93-III-20 informa que en los últimos años el volumen de producción de tomate riñón bajo invernadero ha tomado mucha fuerza en la en la Provincia de Chimborazo, esto debido a que en la serranía se ha optado por construir invernaderos desde los 300 M² ya sea a nivel de pequeños como grandes productores, proporcionando gran rentabilidad en comparación con los cultivos a campo abierto (Banco Central del Ecuador, 2020, p.33-35).

En el cantón Riobamba el volumen de producción se mantuvo en comparación al presentado en el año 2019, pero el alto costo de mano de obra, el precio bajo en las ventas y la poca asistencia técnica en las plantaciones han generado una caída del 5% en el volumen de producción provocando así que los agricultores no pretendan extender el área sembrada y por ende se mantenga la superficie de cosecha para el próximo periodo agrícola (Banco Central del Ecuador, 2020: p. 35).

1.1.3. Variedades de tomate

El tomate riñón es considerado una de las hortalizas de mayor consumo y comercialización en el país. De acuerdo con ciertas características como el color, forma, tamaño y sabor este es destinado para el consumo en fresco o para la industrialización (El Comercio, 2011). A continuación, se describe las 8 variedades de tomate riñón más comunes:

- **Fortaleza:** Esta variedad de tomate posee gran crecimiento, buen color y firmeza, crece principalmente en los valles de la sierra en zonas frías con baja luminosidad. Es ideal para invernadero y además el fruto es resistente a enfermedades y puede ser transportado a largas distancias.
- **Fortuna:** Se lo puede cultivar en invernadero o campo abierto ya que tiene una gran adaptación a las zonas climáticas, se caracteriza por poseer un color rojo intenso, buen brillo y puede llegar un peso promedio entre 200 - 220 g.
- **Sheila:** Este tomate es el preferido para la comercialización debido a que tiene un alto nivel de resistencia al bajo invierno. Es un fruto que posee un gran sabor, color y puede llegar a alcanzar un peso promedio de 260 g.
- **Charleston:** Esta variedad presenta buen comportamiento dentro o fuera de invernaderos, se caracteriza por ser un fruto firme, bien formado, excelente sabor, larga vida y buena presentación por su forma y color, además posee una alta concentración de producción ya que permite dos cosechas al año ya sea tanto para el mercado de frutos verdes como maduros.
- **Titán:** Este tomate ha ganado mayor popularidad entre los productores de hortalizas debido en parte a su resistencia y bajo requerimiento de agua. Se caracteriza por su gran sabor dulce sin acidez, color rojo, piel lisa, forma ligeramente aplanada y por su tamaño pequeño por lo que puede llegar a alcanzar un peso promedio de 100 hasta los 150 g como máximo. La desventaja de esta variedad es que crece mal a bajas temperatura.

- **Pietr:** Se caracteriza por su larga vida, gran adaptabilidad a campo abierto o invernadero y produce frutos grandes con un peso entre 230 a 250 g.
- **Cherry:** Los tomates Cherry crecen en lugares con clima tropical y necesitan la presencia de mucha luz, se los asemeja con las cerezas debido a su tamaño, color y sabor dulce que lo hace diferente de las otras variedades, pueden llegar a medir un diámetro de 1 a 3 cm y su peso varía entre los 10 a 15 g. Su producción es escasa y está dirigida para la comercialización para la cocina gourmet.
- **Chonto:** El tomate chonto es una variedad de tamaño mediano, forma ovalada, contextura dura y puede llegar a un peso promedio entre 120 hasta 180 g. Posee una gran resistencia y es ideal para transportar en viajes largos.

1.1.4. Composición nutricional del tomate

El tomate posee un alto valor nutricional por lo que es de gran importancia en la alimentación, sus características organolépticas como el sabor, olor y color lo hacen apetecido para ensaladas o cocidos, su peso está conformado en gran parte por agua con un 94%, grasa en un 0.1%, proteínas en un 1%, micronutrientes en un 0,5% y seguido por los hidratos de carbono. Es una excelente fuente de fibra, potasio, fósforo y vitamina C, además contiene azúcares simples que le aportan un ligero sabor dulce y ácido debido a la presencia de ácidos orgánicos. En la tabla 1-1 se presenta la composición nutricional del tomate en 100 g de porción comestible (Penelo, 2020).

Tabla 1-1: Composición nutricional del tomate en 100g de porción comestible.

| | | |
|--|-------------------------|-----|
| Agua, Energía Y Micronutrientes | Agua (g) | 94 |
| | Energía (kcal) | 22 |
| | Proteínas (g) | 1,0 |
| | Grasas (g) | 0,1 |
| | Hidratos de carbono (g) | 3,5 |
| | Almidón (g) | 0,1 |
| | Azúcares (g) | 3,4 |
| | Fibras (g) | 1,4 |
| Minerales | Calcio (mg) | 11 |
| | Hierro (mg) | 0,6 |
| | Yodo (µg) | 7 |
| | Magnesio (mg) | 10 |
| | Zinc (mg) | 0,2 |
| | Sodio (mg) | 3 |
| | Potasio (mg) | 290 |

| | | |
|------------------|---------------------------------|------|
| | Fosforo (mg) | 27 |
| | Selenio (µg) | 0,7 |
| Vitaminas | Tiamina (mg) | 0,06 |
| | Riboflavina (mg) | 0,04 |
| | Eq. de niacina (mg) | 0,8 |
| | Vitamina B6 (mg) | 0,11 |
| | Folato (µg) | 25 |
| | Vitamina B12 (µg) | 0 |
| | Vitamina C (mg) | 26 |
| | Vitamina A: Eq. de Retinol (µg) | 82 |
| | Retinol (µg) | 0 |
| | Carotenos provitamina A (µg) | 494 |
| | Vitamina D (µg) | 0 |
| | Vitamina E (mg) | 1,2 |

Fuente: (Arroyo et al., 2018, p. 36-48)

Realizado por: Cuji, J. 2021

1.1.5. Utilidades y beneficios del tomate

El tomate es un fruto muy versátil fácil utilizar en muchos platos por lo que es un buen acompañante en la cocina ya que aportan un sabor característico a nuestras comidas, también ofrece grandes beneficios para nuestro organismo proporcionando una dieta nutritiva. En la Tabla 2-1 se describe los principales utilidades y beneficios que proporciona el tomate.

Tabla 2-1: Utilidades y beneficios del tomate.

| | |
|---------------------|--|
| Culinarios | <ul style="list-style-type: none"> Consumo del fruto en su forma natural o pelado, crudo o cocido en diversos platos y bebidas. |
| Industriales | <ul style="list-style-type: none"> Mermeladas, cremas, tomate al natural pelado, jugos, pures, pastas y concentrado, salsas de tomate, tomate confitado, tomate en polvo, encurtidos y deshidratados. |
| Medicinales | <ul style="list-style-type: none"> Estimula el sistema inmune ayudando a detener las enfermedades degenerativas. Es muy recomendado para tratar enfermedades como reumatismo, gota, arteriosclerosis, parálisis, ulcera del estómago, tuberculosis, diabetes, estreñimiento, colitis, dolor de garganta y oído. También disminuye el riesgo de desarrollar cáncer de boca, páncreas, cuello uterino, próstata, pulmón, y estómago. Es un remineralizante y antioxidante que ayuda en el cuidado de nuestra piel, pelo y dientes. La presencia de vitamina A en el tomate ayuda a mejorar nuestra visión protegiéndola de enfermedades degenerativas y ceguera nocturna. |

| | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares por su alto contenido en hierro que mantiene un buen estado de la sangre y vitamina k que controla la coagulación de la sangre. • Además, tiene efectos diuréticos ayudando así a eliminar el ácido úrico y reducir el colesterol. |
|--|--|

Fuente: (Ballesteros et al., 2017, p. 23)

Realizado por: Cuji, J. 2021

1.2. La deshidratación

Es el proceso mediante el cual se extrae el agua de los alimentos frescos a través de métodos naturales o artificiales con el fin de conservarlos por más tiempo, aumentar su vida útil y evitar la presencia de levaduras, bacterias y moho que son los causantes de la descomposición. Se puede señalar que este proceso no altera la pérdida de nutrientes, vitaminas y minerales contenidos por lo contrario se puede concentrar su sabor, color y propiedades características de este fruto (Fito et al, 2016, p. 7).

Se la puede definir como “la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua de las sustancias que la contienen” (Fito et al., 2016, p. 7).

Al deshidratar se generan dos fenómenos:

1. La transmisión de calor del medio gaseoso externo al medio interno del alimento.
2. La transferencia de humedad interna del alimento al medio externo.

1.2.1. Proceso de deshidratación

En el proceso de deshidratación se debe considerar varios aspectos que influyen para obtener un producto de calidad los cuales se presentan a continuación:

Velocidad de deshidratación: Es importante tener en cuenta que durante el proceso de deshidratación puede existir la presencia de fenómenos como la transferencia de calor y materia, así como también las reacciones de degradación por ello es conveniente que la velocidad de secado en el proceso sea lo más rápido posible que depende de:

- Temperatura y velocidad del medio de secado.
- Resistencia del producto a la transferencia de calor.
- Velocidad de migración de agua y solutos en el interior del alimento.
- Velocidad de eliminación del vapor de agua de la superficie.

- Relación entre la calidad del alimento y el medio de calefacción.
- Temperatura máxima que admite el alimento a la tendencia a la formación de capas impermeables en la superficie del producto (costras).
- Las características del equipo deshidratador.
- Las características del producto, en particular el tamaño de sus partículas y su geometría.

Temperatura y tiempo de deshidratación: El tiempo que tardan los alimentos en deshidratarse depende del tipo de alimento, el tamaño del trozo o pieza a deshidratar, la temperatura del deshidratador y el nivel de humedad en el aire. Es importante destacar que los resultados del proceso de secado de cualquier alimento deben ser homogéneos por lo que se debe seleccionar un método que permita un adecuado manejo de temperatura y tiempo de secado.

Cada alimento debe secarse a una temperatura por debajo del valor máximo de deshidratación, se debe evitar que este sea superado y provoque la cocción del alimento o que el producto se endurezca e impida que la humedad sea extraída dando como resultado un alimento duro y gomoso. Esta temperatura se encuentra entre los 50 y 70 °C pero para cada caso se debe valorar la máxima temperatura que tolera cada alimento.

En la Tabla 3-1 se puede apreciar la temperatura óptima y el tiempo aproximado de secado en el cual se pueden deshidratar varios alimentos.

Tabla 3-1: Temperatura y tiempo de deshidratación de varias frutas y verduras.

| Alimento | Temperatura máxima (°C) | Tiempo (h) | Cortar |
|--------------------|-------------------------|------------|--|
| Melocotón | 55-65 | 8-16 | Saque la coronta y corte a su gusto |
| Manzana | 55-65 | 5-12 | Pele saque la coronta y corte a su gusto |
| Higo | 55-65 | 5-7 | Corte a su gusto |
| Albaricoque | 55-65 | 10-18 | Corte a su gusto |
| Banana | 55-65 | 8-12 | Corte en rebanadas de 3-4 ml |
| Uva | 55-65 | 12-21 | No es necesario cortarlas |
| Mango | 55-65 | 10-20 | Pele saque la coronta y corte a su gusto |
| Tomate | 55-65 | 8-12 | Corte en rebanadas de 3-4 ml |
| Zanahoria | 55-70 | 6-8 | Corte en rebanadas de 3-4 ml |
| Cebolla | 55-70 | 8-14 | Corte en redondelas |
| Apio | 55-70 | 6-10 | No es necesario cortarlas |
| Pimiento | 55-70 | 8-12 | Corte a su gusto |
| Hiervas aromáticas | 40 | 2-3 | No es necesario cortarlas |

Fuente: (Ballesteros et al., 2017)

Realizado por: Cují, J. 2021

Características del producto deshidratado: Cuando los alimentos son sometidos al proceso de deshidratación sufren cambios en sus características físicas significativas como la reducción de peso y volumen que pueden ayudar a disminuir el costo de transporte, distribución y almacenamiento. De igual manera puede provocar cambios considerables e irreversibles en forma y tamaño, motivo por el cual no vuelven a su estado original. En el proceso de deshidratación los alimentos pueden tener un cambio en su color debido a que se encuentran expuestos a altas o bajas temperaturas durante el secado, así como también en su textura llegando a obtener un estado gomoso o crujiente (Fito et al., 2016, p. 8-9).

Así mismo existen cambios en aroma y sabor esto debido a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso de deshidratación que aportan sabores y aromas comunes a la de los alimentos cocidos, estos cambios son mayores cuando se utilizan altas temperaturas o un mayor tiempo de secado causando decoloración, mientras que si se utiliza un método de secado en el que se emplee baja o moderada temperatura estos cambios pueden minimizarse. Cabe destacar que estos cambios limitan la capacidad para que los alimentos secos vuelvan a absorber el agua durante la rehidratación por lo que el proceso de secado es muy importante e influye de manera directa en los cambios y características que tomarán de los alimentos después de ser sometidos al proceso de deshidratación (Fito et al., 2016, p. 8-9).

Factores que influyen en la calidad de los alimentos deshidratados: Existen factores que pueden alterar la calidad de los alimentos deshidratados por lo que es conveniente enfocarse en que el proceso sea adecuado para obtener productos deshidratados de calidad y estos puedan rehidratarse adoptando las características estructurales y químicas de los alimentos frescos, así como también sus propiedades y nutrientes (Reyes et al., 2018). Por ello a continuación se presentan varios factores que pueden generar alteraciones en los productos deshidratados:

- **Desarrollo de hongos y levaduras.:** El incremento de hongos y levaduras en los alimentos deshidratados se debe a que el contenido de humedad es superior al necesario para su conservación, este acontecimiento se presenta cuando no se realiza una suficiente deshidratación y posteriormente no se realiza un correcto almacenamiento o existen defectos en el envase. La forma de evitar este suceso es reducir el contenido de humedad a un valor óptimo de acuerdo con el tipo de alimento que se desea deshidratar y conservar los productos en envases impermeables en los que no exista la presencia de aire y humedad.
- **Formación de corteza:** La formación de corteza se puede generar cuando los alimentos son expuestos a elevadas temperaturas durante la deshidratación lo que conlleva a la formación de cortezas o costras que provocan que la superficie de los alimentos se seque por completo y

evita que la humedad sea extraída de su interior. Para evitar este fenómeno es conveniente reducir la velocidad de secado; una de las formas más efectivas es controlar la humedad del aire de secado y de esta manera la humedad que es extraída de la superficie es expulsada por la humedad del interior.

- **Degradación de color:** El color original y característico de los productos se degrada debido a las altas temperaturas y tiempos prolongados de secado, para evitar este inconveniente se deben minimizar la exposición al calor y emplear tiempos de secado cortos.
- **Rehidratación reducida:** Este defecto que se genera de igual manera por exponer a los alimentos a temperaturas demasiado elevadas durante el proceso de deshidratación, para minimizar este defecto es conveniente determinar la temperatura correcta en la cual se debe deshidratar el producto deseado.

1.2.2. Comercialización del tomate deshidratado

Los productos deshidratados han generado un impacto tanto en el mercado local como en el exterior a pesar de que la producción se reduce a pequeños y medianos productores a escala nacional. Actualmente se han registrado 15 empresas dedicadas a la producción y exportación de frutas deshidratadas, dichas empresas abastecen al mercado nacional específicamente en supermercados, tiendas y autoservicios (El Comercio, 2016).

Según el Banco Central del Ecuador la exportación de este producto equivale al 80 y al 90% de la producción local. En el año 2016 en el periodo enero-julio el monto de exportación de frutas secas y frescas llegó a los USD 1.1 millones por 110.000 toneladas, mientras que en el año anterior el monto fue de USD 1.3 millones con un volumen de 117.000 toneladas en el mismo periodo (El Comercio, 2016).

De acuerdo con las importaciones del año 2016 tomando en cuenta el periodo de enero julio se tuvo un aporte aproximado de USD 618.000 por un volumen de 356.000 toneladas, sin embargo, en el 2015 se obtuvo un aproximado de USD 988.000 por 561.000 toneladas en el mismo lapso (El Comercio, 2016).

La desventaja de la comercialización de los productos deshidratados en el país es principalmente por que los clientes potenciales no conocen la importancia y el valor nutricional que generan este tipo de productos a la dieta diaria e ignoran que este producto es beneficioso para la salud, además de poseer un precio accesible entre USD 9 y 18 kilos dependiendo de la fruta a consumir (El Comercio, 2016).

1.2.3. Características físicas del tomate deshidratado

La versatilidad y diversidad del tomate hacen que este fruto ofrezca varias opciones y presentaciones de acuerdo con cada necesidad, una de ellas son los tomates deshidratados que, a través de varios métodos artesanales, sofisticados o a gran escala permiten eliminar la cantidad de agua que posee logrando así prolongar su vida útil, reducir la susceptibilidad al deterioro y así se pueda conservar durante mucho tiempo (Reyes et al., 2018).

Al someter al tomate a este proceso se pueden observar una serie de cambios físicos que afectan a su aceptación al consumidor, que depende de las condiciones y el método por el cual se realizó el proceso de deshidratación. Para determinar si el producto final obtenido es de buena calidad se debe tomar en cuenta ciertas características que el tomate deshidratado debe contener y que se describen a continuación en la Tabla 1-4 y se pueden observar en la Figura 1-1 (Vizuete, 2018, p. 25).

Tabla 4-1: Características del tomate deshidratado.

| | |
|-----------------|-----------------------------|
| Color | Rojo intenso |
| Olor | Típico, sin olor a pasado |
| Sabor | Típico a tomate concentrado |
| Semillas | Presencia |
| Piel | Con piel |

Fuente: (Vizuete, 2018: p. 24)

Realizado por: Cuji, J. 2021

En la figura 1-1 se puede observar las características físicas de un tomate deshidratado.



Figura 1-1: Características físicas del tomate deshidratado.

Fuente: (Instancia, 2020)

El tomate deshidratado puede llegar a conservar sus propiedades nutricionales hasta un período de 18 meses siempre y cuando se mantenga en un ambiente fresco y seco con una temperatura de almacenamiento por debajo de los 25 °C, mientras las temperaturas de conservación sean inferiores o de preferencia a 15° centígrados ayudarán a preservar su sabor olor, color, tasa de

deshidratación y contenido de vitamina C. Los usos que se le puede dar al tomate deshidratado son variados entre ellos se encuentran las sopas, salsas, consomés o simplemente como snacks (Vizuet, 2018, p. 25).

1.2.4. Evaluación de producto final

Los factores como el aspecto y la textura del producto final no son suficientes para definir si el alimento fue deshidratado satisfactoriamente; se debe emplear un método confiable que permita determinar si el producto que se obtuvo es de calidad (Instancia, 2020).

La forma de evaluar si el producto fue secado satisfactoriamente es a través de un control de pérdida de peso del producto deshidratado, es de suma importancia registrar el peso inicial neto (Pf) del alimento a deshidratar (Instancia, 2020). Para determinar el valor del rendimiento teórico (R) se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación: 1-1: Cálculo del rendimiento teórico.

$$R = \frac{100\% - H_f}{10\% - H_s} \quad (1-1)$$

En donde:

- **R:** rendimiento teórico, corresponde a un valor constante para cada alimento.
- **Hf:** humedad del producto fresco, corresponde al porcentaje de agua contenida en el alimento antes de someterlo al proceso de deshidratación.
- **Hs:** humedad residual, corresponde al porcentaje de humedad recomendable que debe tener el producto seco para garantizar la calidad y conservación.

Los porcentajes de Hf y Hs pueden variar de acuerdo con el alimento que se desea deshidratar, en la Tabla 5-1 se muestra los valores de humedad en alimento seco y humedad residual.

Tabla 5-1: Humedad en alimento fresco y humedad residual.

| Alimento | Humedad | Humedad residual |
|-------------|------------------------|----------------------|
| | Alimento fresco Hf (%) | Alimento seco Hs (%) |
| Melocotón | 85 | 18 |
| Manzana | 84 | 14 |
| Higo | 80 | 16 |
| Albaricoque | 87 | 18 a 24 |
| Banana | 80 | 15 |
| Uva | 80 | 15 a 20 |
| Mango | 85 95 | 12 a 16 |

| | | |
|---------------------------|----|----|
| Tomate | 95 | 8 |
| Zanahoria | 70 | 5 |
| Cebolla | 80 | 4 |
| Apio | 94 | 12 |
| Pimiento | 87 | 8 |
| Hiervas aromáticas | - | - |

Fuente: (Instancia, 2020)

Realizado por: Cuji, J. 2021

Obtenido el valor del (R) se puede conocer el peso final del producto seco (Ps) realizando un cálculo con la Ecuación 2-1.

Ecuación: 2-1: Cálculo del peso en seco.

(2-1)

$$P_s = R * P_f$$

Es de suma importancia considerar que el proceso de deshidratación finalizará cuando el peso del alimento ya deshidratado corresponda al valor de Ps calculado (Instancia, 2020).

1.3. Tipos de deshidratadores

Existe una variedad de deshidratadores que permiten la conservación de productos, investigaciones han permitido clasificarlos de forma general tomando en consideración tres parámetros principales; según el método de intercambio de calor, según la fuente de energía y según el tipo de construcción como se muestra a continuación en la Figura 2-1 (Brenes et al., 2018: p. 8).

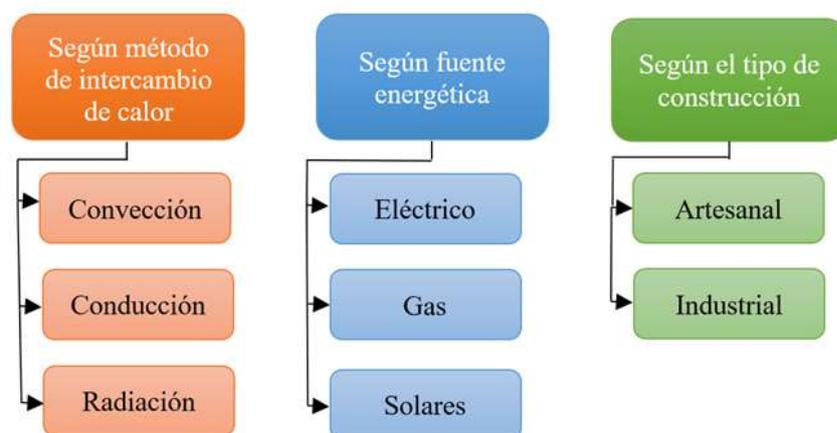


Figura 2-1: Clasificación de deshidratadores

Fuente: (Brenes et al., 2018, p. 8)

1.3.1. Según el método de intercambio de calor

Es el proceso mediante el cual se realiza la propagación de calor por diversos medios, se produce para alcanza una estabilidad térmica en los deshidratadores y eliminar gradualmente la humedad de los alimentos. Existen 3 maneras de lograr transferencia de calor las cuales se describen a continuación:

- ***Convección:*** Consiste en el intercambio de calor a través de aire caliente el cual hace contacto con el alimento y permite la eliminación de agua. La estructura de estos secadores contiene generalmente bandejas fijas o rotatorias que permiten una mejor distribución del calor (Brenes et al., 2018, p. 9).
- ***Conducción:*** Para este método es necesaria una superficie sólida en la que se coloca sobre ella los alimentos y se transfiere el calor a los mismos como ejemplo tenemos los secadores con estructura de tambor o al vacío (Brenes et al., 2018, p. 9).
- ***Radiación:*** En el caso del método por radiación se produce la eliminación de agua de los alimentos mediante la acción de rayos de luz, los secadores solares son los más comunes debido a que aprovecha la radiación solar para el procedimiento (Brenes et al., 2018, p. 9).

1.3.2. Según fuentes energéticas

Una vez determinado el método de intercambio de calor para la deshidratación es importante determinar que fuente de energía que se empleara para el funcionamiento del sistema, de los cuales se mencionan las siguientes:

- ***Eléctricos o Gas:*** Los deshidratadores basados en estas dos fuentes de energía por lo general funcionan como un horno convencional, para el proceso utilizan bandejas en las cuales se coloca el alimento y se extrae la humedad mediante una corriente de aire caliente que circula por el sistema a través de un ventilador (Brenes et al., 2018, p. 10).

Este tipo de alimentación energética impactan directa o indirectamente con la producción de energía, por un lado en el proceso de deshidratación con la fuente de alimentación a gas se producen gases durante el proceso de combustión que a la larga puede llegar a ser perjudicial para la salud, mientras para la fuente de alimentación eléctrica es importante indicar que actualmente en el país el 92% de la generación eléctrica proviene de las centrales hidroeléctricas, el 7% de térmicas y el 1% de fuentes no convencionales como: fotovoltaica,

eólicas, biomasa, biogás, geotérmica entre otras. Esta producción de energía es limpia y amigable con el medioambiente, además satisface la demanda nacional de electricidad (Brenes et al., 2018, p. 10).

En la Figura 3-1 se muestra la estructura interna de un deshidratador según su fuente energética eléctrico/gas.

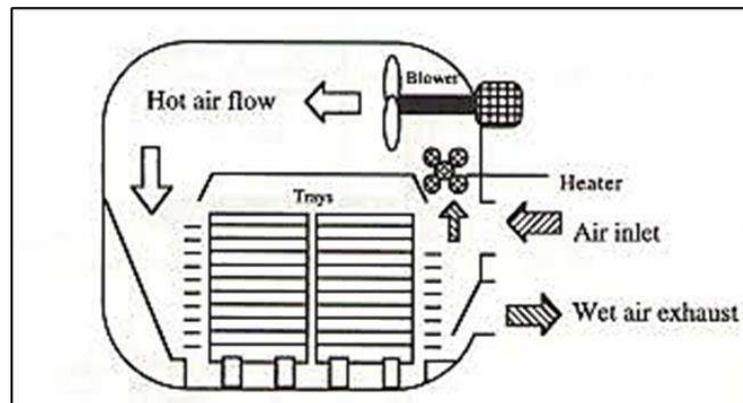


Figura 3-1: Estructura interna de un deshidratador eléctrico o a gas
Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/carrillo_a_j/capitulo1.pdf

- **Solares:** los sistemas en los que se utiliza la radiación solar como fuente de energía consisten en captar los rayos de sol mediante la utilización de un colector solar que está constituido por una superficie metálica oscura y una cobertura transparente de vidrio o material acrílico que permitirá la entrada de los rayos solares con el fin de provocar un efecto invernadero en el secador aumentando la temperatura y con la ayuda de las corrientes de aire eliminar la humedad de los alimentos, en este punto es de suma importancia considerar tres aspectos claves:

1. El aire debe alcanzar una temperatura entre 40 y 70 °C.
2. El aire debe contener bajo nivel de humedad.
3. Se debe mantener un flujo constante de aire.

A este tipo de deshidratadores se puede integrar una fuente de energía auxiliar con el propósito de no afectar en el proceso o aumentar la velocidad de deshidratación. También pueden presentarse varios casos como: la existencia de periodos con baja radiación solar y que haya poco flujo de aire; con esta fuente auxiliar se puede aprovechar las horas de la noche para continuar con la deshidratación y además forzar una mayor circulación de aire manteniéndolo siempre continuo para que el aire cargado de humedad salga del colector solar (Brenes et al., 2018, p. 10).

1.3.3. Según el tipo de construcción

En este apartado se describe el tipo de construcción que pueden tener los deshidratadores, existen dos maneras artesanal e industrial.

Artesanal: este tipo de deshidratadores o secadores están compuesto por dos elementos estructurales la cámara de calefacción de aire y la torre de secado como se muestra en la Figura 4-1.

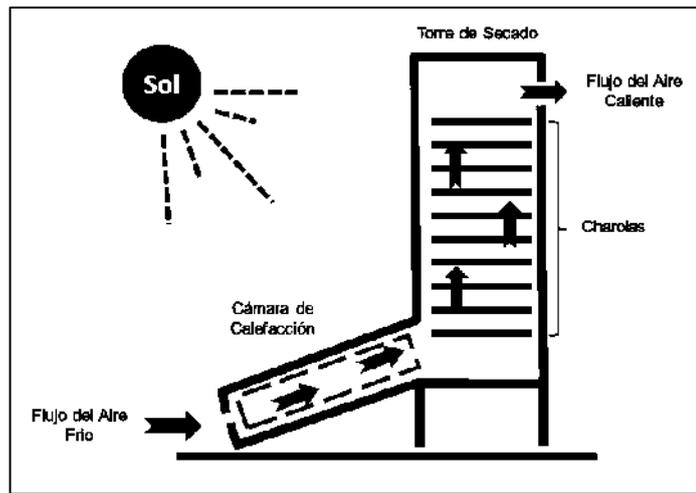


Figura 4-1: Estructura de un deshidratador artesanal.

Fuente: <https://n9.cl/ictky>

- **Cámara de calefacción:** es un cajón que debe tener una ligera inclinación con respecto al suelo la cual facilitará la circulación de aire; el aire frío del ambiente ingresa y con ayuda de la radiación solar calienta el aire que subirá a la torre de secado (Irvás et al, 2017, p. 3).
- **Torre de secado:** está conformado por un cajón cerrado y una puerta de acceso para el ingreso y la salida de las charolas de secado; en la parte superior deberá existir una apertura cubierta por malla mosquitera o manta de cielo para evitar el ingreso de insectos y permita que el aire caliente cargado de humedad circule hacia el exterior (Irvás et al, 2017, p. 3).

Industrial: los deshidratadores industriales son máquinas diseñadas con la estructura de hornos industriales que pueden tener una capacidad máxima de 4 toneladas, su funcionamiento se basa en flujos de aire caliente generados por la presencia de ventiladores que hacen circular el aire por mallas que contienen el producto a deshidratar, el aire cargado de humedad es evacuado al ambiente gracias a extractores de aire. Su estructura externa está conformada por acero inoxidable de alta eficiencia térmica, iluminación interna para la inspección del proceso, sensores medidores

de humedad y un tablero de control que permite acondicionar la temperatura requerida para el producto que se desee deshidratar (Irvás et al, 2017, p. 3). En la Figura 5-1 se muestra la estructura de un horno industrial



Figura 5-1: Estructura de un horno deshidratador industrial.

Fuente: <https://n9.cl/xyd6f>

1.4. Sistemas de control

Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracterizan principalmente por involucrar una serie de elementos que de alguna manera influyen en el funcionamiento del sistema, tienen como finalidad conseguir mediante la manipulación de variables de control un dominio sobre la variable de entrada logrando que éstas alcancen un valor prefijado o deseado.

Para terminar si un sistema de control es ideal, este debe ser capaz de conseguir su objetivo considerando las siguientes exigencias:

- Garantizar la estabilidad y que sea robusto frente a perturbaciones o errores en los modelos.
- Ser tan eficiente como sea posible según un criterio preestablecido, en el cual la acción de control se realice de tal manera que evite comportamientos bruscos e irreales.
- Ser fácilmente implementado y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

1.4.1. Elementos y señales de un sistema de control

Existen componentes básicos que se utilizan en los sistemas de control con el fin de manipularlos, los mismos que se presentan a continuación:

- **Sensores:** a través de ellos se puede conocer los valores de las variables medidas en el sistema (Ogata, 2010, p. 3).

- **Controlador:** compara los valores obtenidos por los sensores y el valor deseado para obtener el error, luego mediante la acción de control reduce la señal de error a un valor aproximado a cero y así la variable controlada alcance el valor de referencia (Ogata, 2010, p. 3).
- **Actuador:** es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador para activar un elemento final de control (Ogata, 2010: p. 7).
- **Sistema:** o conocido como planta, es lo que se desea controlar (Ogata, 2010: p. 3).

A continuación, en la Tabla 6-1 se presentan las señales en un sistema de control.

Tabla 6-1: Señales de sistemas de control.

| Señal | Nombre | Función |
|--------|----------------|--|
| $r(t)$ | Referencia | es el estado que se desea alcanzar en el sistema. |
| $e(t)$ | Error | es la diferencia entre el estado deseado y el estado real del sistema a controlar. |
| $c(t)$ | Control | es la señal que genera el controlador. |
| $u(t)$ | Accionamiento | es la acción que se ejerce sobre el sistema para controlarlo. |
| $y(t)$ | Salida | es el estado real que ha alcanzado el sistema a controlar. |
| $h(t)$ | Realimentación | es la medida del estado del sistema. |

Fuente: (Pardo, 2021)

Realizado por: Cuji, J. 2021

1.4.2. Estrategia de control

En los sistemas de control se realizan operaciones con mando de verificación dependiendo de cuáles sean las características del sistema de regulación, en estos la señal de salida puede afectar o no en el funcionamiento del sistema por lo que se distinguen dos tipos de acción de control, lazo abierto y lazo cerrado.

Control en lazo abierto: son aquellos en los que la señal de salida no afecta el funcionamiento del sistema total, es decir que en este tipo de sistemas no se compara la salida con la entrada por lo que son más utilizados cuando se conoce la relación entrada/salida y no existe la presencia de perturbaciones internas o externas (Ogata, 2010, p. 8). En la Figura 6-1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control en lazo abierto.

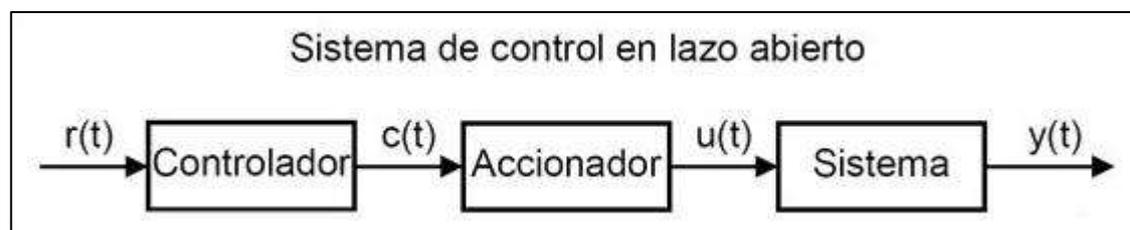


Figura 6-1: Diagrama de bloques de sistema de control en lazo abierto.

Fuente: (Pardo, 2021)

Los sistemas de control en lazo abierto son de fácil construcción y mantenimiento; generan menos costos con respecto a los sistemas en lazo cerrado; no existen problemas de estabilidad, además conviene utilizarlos cuando no es fácil medir la salida de manera precisa o no es económicamente viable. Como contraparte son vulnerables a perturbaciones y cambios en la calibración originando errores por lo que la salida puede ser diferente a la deseada, por lo cual es recomendable para mantener el valor deseado realizar una calibración con frecuencia (Ogata, 2010, p. 9).

Control en lazo cerrado: En los sistemas de control en lazo cerrado o retroalimentados la acción de control se determina en función del error medido entre la variable controlada y el valor deseado, consiguiendo reducir el error del sistema. Esta estrategia de control puede ser utilizada sea cual sea la variable controlada, por ello la mayor parte de sistemas de control se desarrollan en lazo cerrado (Ogata, 2010, p. 7). A continuación, se muestra en la Figura 7-1 el diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

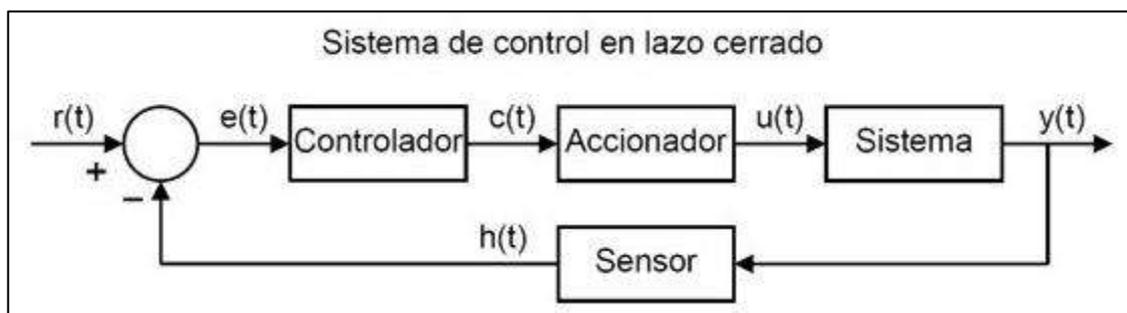


Figura 7-1: Diagrama de bloques de sistema de control en lazo cerrado.
Fuente: (Pardo, 2021)

El lazo cerrado con retroalimentación hace que la respuesta del sistema sea sensible a perturbaciones externas o variaciones internas del sistema, de tal manera que es posible emplear componentes de baja precisión y económicos para obtener el control apropiado de la planta. Esto no es posible en los sistemas de control en lazo abierto (Ogata, 2010, p. 9).

1.4.3. Tipos de controladores

De acuerdo con la acción de control se distinguen varios tipos de controladores, existen acciones de control básicas que según la forma en la que responda el actuador pueden ser combinadas, por ello se deben seleccionar de acuerdo con la naturaleza del sistema o planta, así como también considerando las condiciones de operación, seguridad, costo, disponibilidad, fiabilidad, precisión, peso y tamaño (Ogata, 2010, p. 22). Entre las cuales podemos citar las siguientes:

Acción de encendido y pagado On-Off: Esta acción de control tiene como referencia dos posiciones fijas de encendido y apagado por tal motivo sólo puede cambiar entre dos estados. Este tipo de acción de control no pueden generar valores exactos en la variable de control debido a que tienen una desviación constante del valor de referencia. Su mecanismo de construcción es sencillo y de bajo costo por ello es utilizado muy a menudo en sistemas de control de temperatura industriales o domésticos (Ogata, 2010, p. 22). Si tomamos como referencia una señal de salida $u(t)$ con un valor máximo o mínimo en la acción de control de dos posiciones y una señal de error $e(t)$ ya sea positiva o negativa tenemos:

Ecuación: 3-1: Cálculo del error en control de dos posiciones.

$$\begin{aligned} u(t) &= U_1 ; && \text{cuando } e(t) > 0 \\ u(t) &= U_2 ; && \text{cuando } e(t) < 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

Donde U_1 y U_2 corresponden a valores constantes, en ciertos casos el valor mínimo de U_2 puede ser cero o $-U_1$ (Ogata, 2010, p. 22). En la Figura 8-1 se muestra el diagrama de bloque de un sistema control con acción de control On-Off

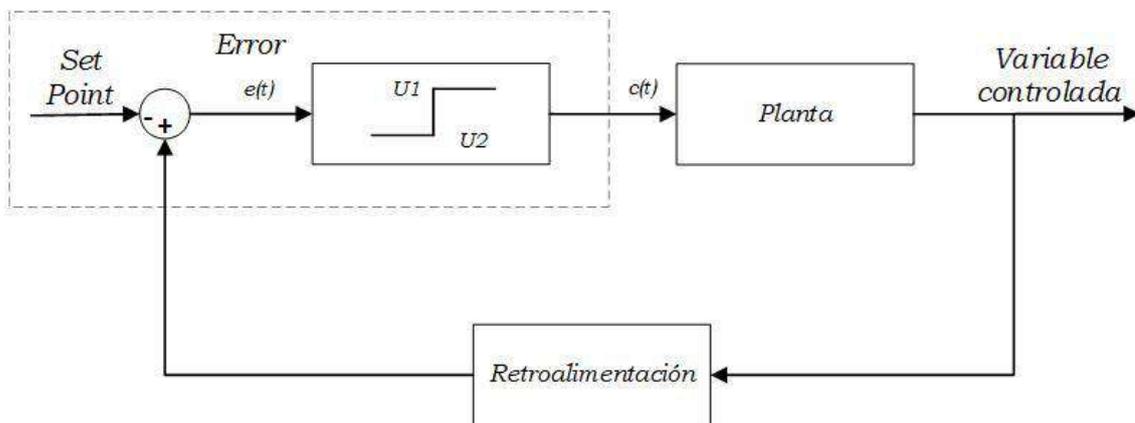


Figura 8-1: Diagrama de bloques de un sistema de control On-Off.

Fuente: (Muñoz, 2018)

En la Figura 9-1 se muestra las características dinámicas de un sistema de regulación con acción de control On-Off donde:

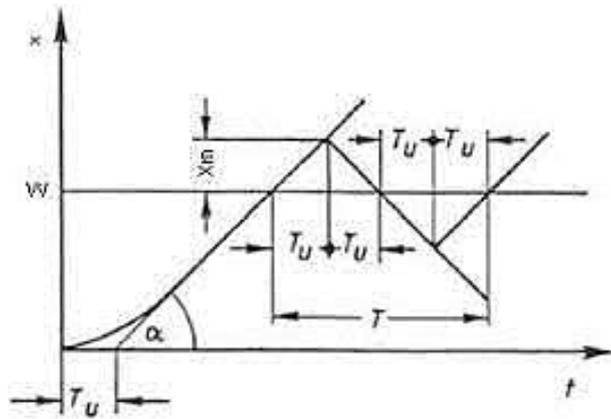


Figura 9-1: Características dinámicas con control On-Off.

Fuente: <https://n9.cl/ou8ek>

Donde:

T_u = Tiempo muerto del sistema

w = Valor de referencia

T = Período de oscilación

X_m = Ancho de sobreimpulso de la oscilación.

Para evitar el número excesivo de conmutaciones es necesario incluir una brecha diferencial o histéresis, la histéresis es el rango que en el cual la señal de error $e(t)$ debe moverse antes de la conmutación y hace que la señal de salida $u(t)$ no cambie su valor hasta que la señal de error ligeramente se desplace hasta tomar un valor diferente de cero. Para determinar la dimensión de la brecha diferencial se debe considerar la precisión deseada y la vida útil del componente (Ogata, 2010, pp. 23-24). La figura 10-1 muestra el diagrama de bloques de un sistema con acción de control On-Off con histéresis.

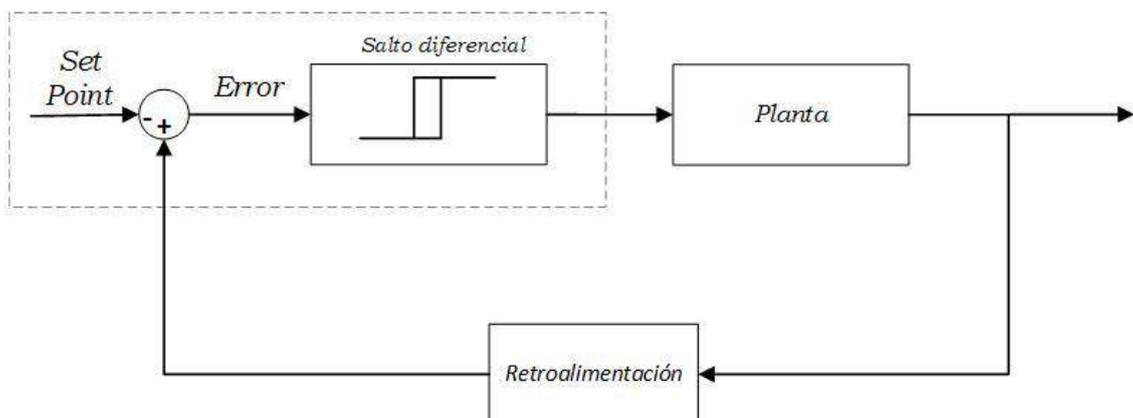


Figura 10-1: Sistema de control On-off con histéresis.

Fuente: (Muñoz, 2018)

Acción Proporcional- Integral: En la acción de control PI (Proporcional-Integral) el valor de salida del controlador $u(t)$ varía en razón proporcional a la señal de error $e(t)$ y su magnitud, es decir elimina el error estacionado que se genera por la acción proporcional P y corrige el error tomando en cuenta su magnitud y el tiempo en el que este ha permanecido (Ogata, 2010, pp. 24-25). A continuación, en la Figura 11-1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema con controlador PI.

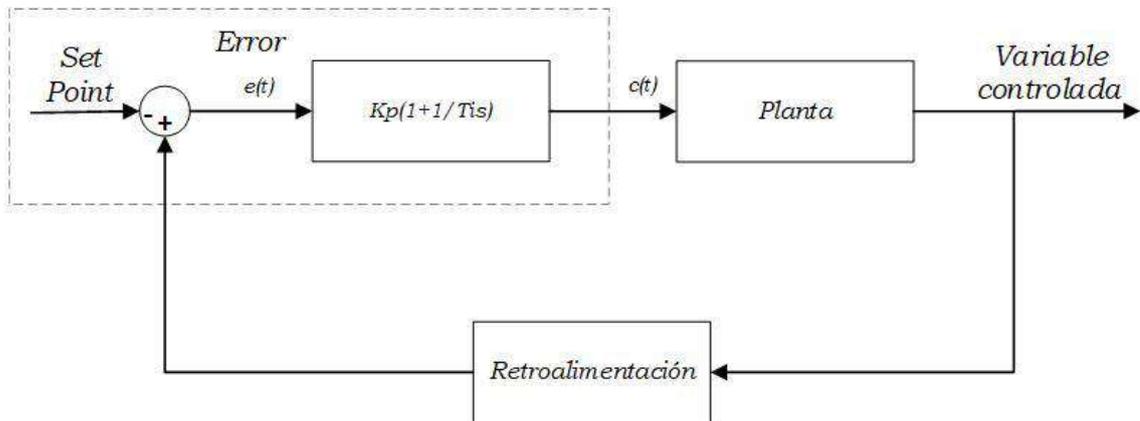


Figura 11-1: Diagrama de bloques de un sistema con controlador PI.
Fuente: (Muñoz, 2018)

Ecuación: 4-1: Cálculo de la función de transferencia con controlador PI.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4-1)$$

Donde:

K_p = Ganancia proporcional.

T_i = Tiempo integral.

$\frac{1}{T_i}$ = Frecuencia de reposición.

Acción Proporcional-Derivativa: Un sistema de control con acción PD (Proporcional-Derivativa) es aquel en el que al control P se le adiciona la capacidad para considerar la velocidad de la variable controlada en el tiempo con el propósito de adelantar la acción de control de salida $u(t)$ obteniendo una respuesta una más estable (Golato, 2016). En la Figura 12-1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema con controlador PD.

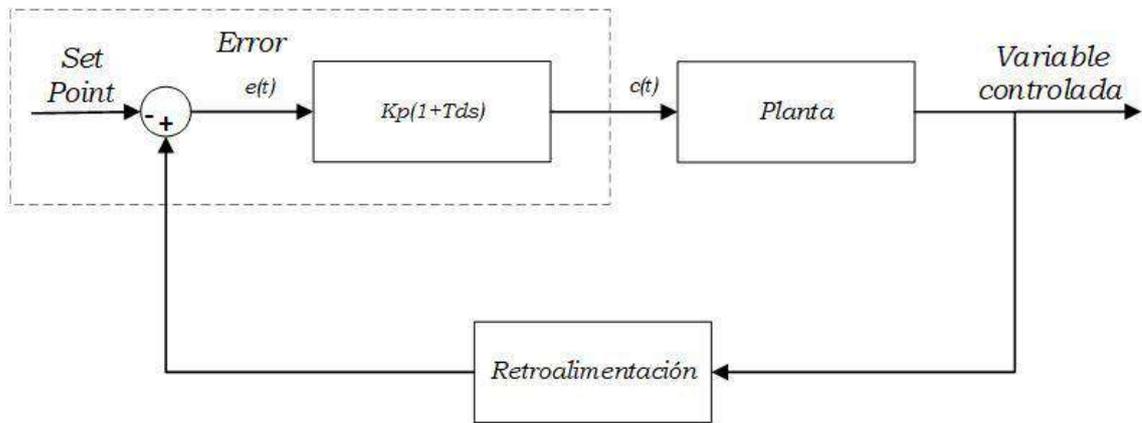


Figura 12-1: Diagrama de bloques de un sistema con controlador PD.

Fuente: (Muñoz, 2018)

Ecuación: 5-1: Cálculo de la función de transferencia con controlador PD.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s) \quad (4-5)$$

Donde:

K_p = Ganancia proporcional.

T_d = Tiempo derivativo.

Acción Proporcional-Integral-Derivativa: En esta acción controladores se emplea la combinación de las tres acciones de control para brindar las ventajas de cada una de ellas de manera individual (Ogata, 2010: p. 25). Si la señal de error $e(t)$ varía lentamente en el tiempo predomina la acción proporcional-integral mientras que, si la señal de error varía rápidamente tiende a predominar la acción derivativa, ofrece una rápida respuesta y en el caso de perturbaciones la señal de error se compensa inmediatamente (Golato, 2016). En la Figura 13-1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema con controlador PID.

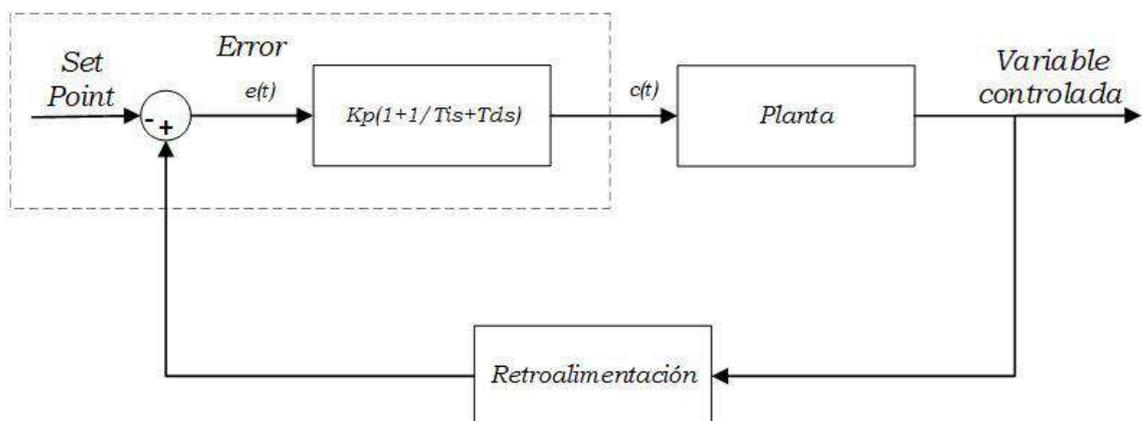


Figura 13-1: Diagrama de bloques de un sistema con controlador PID.

Fuente: (Muñoz, 2018)

Ecuación: 6-1: Cálculo de la función de transferencia con controlador PID.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (6-1)$$

Donde:

K_p = Ganancia proporcional.

T_i = Tiempo integral.

$\frac{1}{T_i}$ = Frecuencia de reposición.

T_d = Tiempo derivativo.

1.5. Sistemas térmicos

Un sistema térmico es aquel que comprende la transferencia de calor de una sustancia a otra. En este tipo de sistemas el flujo calórico es igual a la potencia calórica, energía transferida o almacenada por unidad de tiempo. Se puede transferir de tres formas diferentes; conducción, convección y radiación, aunque la mayor parte de los procesos térmicos con sistemas de control no involucran la transferencia de calor por radiación (Ogata, 2010, p. 136). Para cuantificar la velocidad de flujo calórico se emplea la siguiente ecuación:

Ecuación: 7-1: Cálculo de la velocidad de flujo calórico.

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (7-1)$$

Donde:

q = Velocidad de flujo calórico.

T_1 y T_2 = Diferencia de temperaturas.

R = Resistencia térmica.

1.5.1. Resistencia térmica

El valor de la resistencia térmica depende del modo por el cual se realizó la transferencia calórica ya sea por conducción o convección (Ogata, 2010: p. 137). La resistencia térmica se puede expresar para ambos mediante la Ecuación 8-1.

Ecuación: 8-1: Cálculo de la velocidad de flujo calórico.

$$R = \frac{\text{Cambio a las diferencias de temperatura}}{\text{Cambio en el flujo de calor}} * \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kcal/seg}} \right] \quad (8-1)$$

1.5.2. Capacitancia térmica

La capacitancia o inercia térmica permite determinar el nivel de capacidad que tiene una sustancia para almacenar energía térmica. Es la relación que existe entre el calor entregado a una sustancia y la variación de temperatura producida (Ogata, 2010: p. 137). La capacitancia térmica se define como:

Ecuación: 9-1: Cálculo de la capacitancia térmica.

$$C = \frac{\text{Cambio de calor almacenado}}{\text{Cambio en la temperatura}} * \left[\frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C}} \right] \quad (9-1)$$

Donde,

m = masa de la sustancia considerada [kg].

c = calor específico de la sustancia [kcal/kg °C].

1.6. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son elementos de medición que permiten medir la temperatura de líquidos o del aire mediante una señal eléctrica determinada, dicha señal puede ser enviada directamente o mediante un cambio en la resistencia.

1.6.1. Sensores RTD

Los sensores detectores de temperatura por resistencia (RTD) son dispositivos que permiten medir la temperatura a través de un alambre metálico devanado en torno a un núcleo de cerámica o vidrio, el mismo que se encuentra sellado herméticamente. Los materiales empleados para su construcción suelen ser platino, cobre, níquel o molibdeno. El metal más utilizado en los RTD es el platino en parte a su punto de fusión, resistencia a la oxidación, características de temperatura predecibles y valores de calibración estables (Vargas et al., 2016).

En su funcionamiento tiene como principio de medición la variación de resistencia del alambre metálico en función la temperatura, es decir que al aumentar la temperatura se genera una mayor agitación térmica que provoca un aumento de resistencia (Vargas et al., 2016).

Este tipo de sensores por lo general están asociados a un montaje eléctrico con puentes de Wheatstone debido a que corresponden a la variación de resistencia eléctrica por efecto de la temperatura originando una señal analógica de 4-20 mA que normalmente se utiliza en sistemas de control como señal de medida.

Los RTD son ideales cuando se requieren precisión a altas temperaturas, pueden medir hasta 650 °C superando en rango a los termistores. También tienen una menor sensibilidad al entorno, su carcasa protectora proporciona una excelente inmunidad a los problemas ocasionados por el entorno adverso.

Por último, se caracterizan por su inmunidad al ruido eléctrico. Una de las mejores opciones son los Pt100 que son un tipo específico de RTD y los más comunes, están fabricados con platino lo que les proporciona más linealidad, estabilidad y precisión en comparación a otros sensores de temperatura, además son perfectos para aplicaciones en entornos de automatización industrial donde existan motores, generadores y otros equipos de alta tensión (Vargas et al., 2016).

1.6.1.1. Pt100

Los sensores Pt100 están conformados por un alambre de platino encapsulado con una resistencia de 100 ohmios a 0 °C, esta resistencia varía en función de la temperatura de tal manera que sí medimos el valor de resistencia en ese instante se podrá obtener el valor de la temperatura. Estos dispositivos de medición de temperatura pueden trabajar a temperaturas que oscilan desde los -200 °C hasta 850 °C (Ingeniería Mecafenix, 2018).

En la Tabla -1 se muestra las ventajas y desventajas que poseen este tipo de sensores RTD.

Tabla 7-1: Ventajas y desventajas de sensores Pt100.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Superan a los termopares específicamente cuando se realizan aplicaciones a bajas temperaturas (-100 a 200°C) • Entregan fácilmente precisiones de 1/10 de grado • Difícilmente se descomponen gradualmente entregando lecturas erróneas sino más bien abren el circuito y el dispositivo medidor detecta | <ul style="list-style-type: none"> • Alto costo • Mecánicamente no son rígidos en comparación con otros medidores de temperatura. |

| | |
|--|--|
| <p>inmediatamente la falla del sensor para su reemplazo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pueden ser colocados a cierta distancia del medidor sin ningún problema, hasta 30 m utilizando cable de cobre convencional para la extensión. | |
|--|--|

Fuente: (Cerven et al., 2017)

Realizado por: Cuji, J. 2021

Existen tres modos de conexión de los Pt100 de 2 hilos, 3 hilos y 4 hilos, cada uno de ellos requiere de un instrumento lector diferente y los cuales se describen a continuación.

- **Conexión a 2 hilos:** es una de las configuraciones más simples y de bajo costo, proporciona una medición de temperatura acertada cuando el dispositivo receptor está conectado directamente al receptor sin la necesidad de utilizar cables de extensión. Se recomienda para mediciones máximas de 10m de distancia del regulador de temperatura, por lo que a mayor distancia el sensor puede presentar pérdida de señal (Cerven et al., 2017). En la Figura 14-1 se muestra el sensor Pt100 de dos hilos.



Figura 14-1: Sensor Pt100 de dos hilos.

Fuente: (Mercado Libre, Sensor De Temperatura Pt100 2 Hilos Rtd, 2021)

Las especificaciones técnicas de un sensor pt100 de dos hilos se describen en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1: Especificaciones técnicas del sensor Pt100 de dos hilos.

| | |
|----------------------------|---|
| Rango de trabajo: | -50°C hasta 450°C |
| Conexión: | 2 hilos |
| Longitud del cable: | 1m |
| Precisión: | Clase B ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ a 0°C) |
| Dimensiones: | D4mm x L30mm |
| Material de sonda: | acero inox. |
| Protección cable: | fibra de vidrio |
| Resistente al agua: | La parte del sensor, no del cable. |
| Costo: | 5,00 USD |

Fuente: (Aliexpress, 2021)

Realizado por: Cuji, J. 2021

En la Figura 15-1 se muestra el circuito de conexión en 2 hilos, la resistencia de los cables R1 y R2 que se unen al Pt100 representado por la resistencia R(t). Al medir en los terminales nos dará la suma total de las resistencias $R(t) + R1 + R2$ en vez de $R(t)$, lo cual genera un error inevitable. Para ello se puede usar un cable más grueso y así disminuir la resistencia de R1 y R2 reduciendo así el error en la lectura (Cerven et al., 2017).

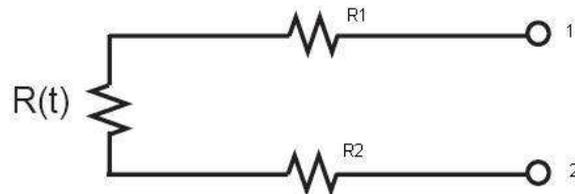


Figura 15-1: Circuito de conexión de Pt100 de dos hilos.
Fuente: (WordPress, 2012)

- **Conexión a 3 hilos:** en este dispositivo es más utilizado en procesos industriales; la sonda se encuentra conectada por 3 hilos del puente que resuelven problemas de error generado por los cables, de tal manera que la temperatura ni la longitud de los cables afectan en la medición de temperatura. La principal condición es que los cables deben tener la misma resistencia eléctrica ya que el sistema de medición se fundamenta en un Puente de Wheatstone y del mismo modo el instrumento lector debe estar acondicionado para este tipo de conexión (Cerven et al., 2017). En la Figura 16-1 se observa el sensor Pt100 de tres hilos.



Figura 16-1: Sensor Pt100 de tres hilos.
Fuente: (Mercado Libre, Sensor De Temperatura Pt100 2 Hilos Rtd, 2021)

Las especificaciones técnicas de un sensor Pt100 de tres hilos se describen en la Tabla 9-1.

Tabla 9-1: Especificaciones técnicas del sensor Pt100 de tres hilos.

| | |
|---------------------------|---|
| Rango de trabajo: | -40°C hasta 300°C |
| Conexión: | 3 hilos |
| Longitud de cable: | 1m |
| Precisión: | Clase B ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ a 0°C) |

| | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Dimensiones: | D3mm x L20mm |
| Material de sonda: | acero inox. |
| Protección del cable: | Teflón |
| Resistente al agua: | La parte del sensor, no del cable |
| Costo: | 10,00 UDS |

Fuente: (Aliexpress, 2021)

Realizado por: Jessica Cuji, 2021

En la figura 17-1 se observa el circuito de conexión de 3 hilos, como se señaló anteriormente el valor de R_1 , R_2 y R_3 son iguales. Para obtener el valor de $R(t)$ en este caso particular se hace pasar una corriente conocida a través del cable 2 (azul) y 3(verde), en el cual el instrumento mide $2R$, posteriormente se mide la resistencia en los cables 1 (café) y 2 (azul) con el propósito de restarle $2R$ al valor medido obteniendo finalmente $R(t)$ (Cerven et al., 2017).

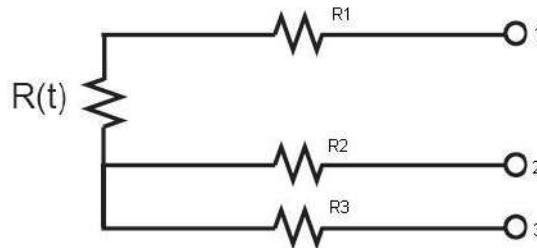


Figura 17-1: Circuito de conexión de Pt100 de tres hilos.

Fuente: (WordPress, 2012)

- **Conexión a 4 hilos:** estos dispositivos son utilizados cuando se requiere una mayor precisión ya sea en convertidores digitales de temperatura o en la calibración de patrones de resistencia. Los cables pueden tener diferentes resistencias eléctricas y no presenta problemas al utilizar conductores de menor calibre. En la Figura 18-1 se muestra el sensor Pt100 de cuatro hilos.

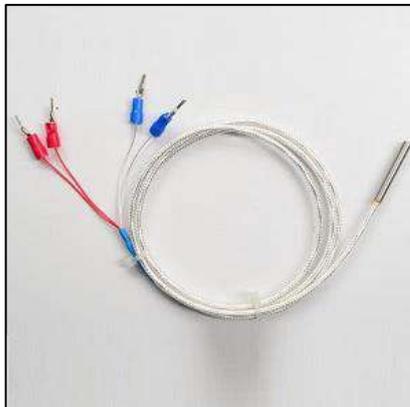


Figura 18-1: Sensor Pt100 de cuatro hilos.

Fuente: (AliExpress, Sensor de temperatura PT100 Grado A, 4mm x 30mm, Detector térmico impermeable, blindado, PTFE, 4 cables, 2,5 m, 4m, alta precisión, 2021)

Las especificaciones técnicas de un sensor Pt100 de cuatro hilos se describen en la Tabla 10-1.

Tabla 10-1: Especificaciones técnicas del sensor Pt100 de cuatro hilos.

| | |
|------------------------------|--|
| Rango de trabajo: | -50°C hasta 300°C |
| Conexión: | 4 hilos |
| Longitud de cable: | 2m |
| Precisión: | Clase ($\pm 0,15^\circ\text{C}$ a 0°C) |
| Dimensiones: | D3mm x L16mm |
| Material de sonda: | acero inox. |
| Protección del cable: | Cable aislado PTFE |
| Resistente al agua: | La parte del sensor, no del cable |
| Costo: | 15,00 UDS |

Fuente: (AliExpress, Sensor de temperatura PT100 Grado A, 4mm x 30mm, Detector térmico impermeable, blindado, PTFE, 4 cables, 2,5 m, 4m, alta precisión, 2021)

Realizado por: Cuji, J. 2021

En la figura 19-1 se observa el circuito de conexión de cuatro hilos, en el que a través de $R(t)$ se hace circular una corriente I por los cables uno y cuatro induciendo una diferencia de potencial V en los extremos de $R(t)$. Se conecta un voltímetro de alta potencia en las entradas de los cables 2 y 3 debido a que por los dos cables no circula corriente. La caída de potencial en los 2 cables será igual donde ($dV=I \cdot R=0 \cdot R=0$) y el voltímetro obtendrá la medida exacta del voltaje V en los extremos de $R(t)$. Por último, se obtiene el valor de $R(t)$ dividiendo el valor medido de V entre la corriente I conocida (Cerven et al., 2017).

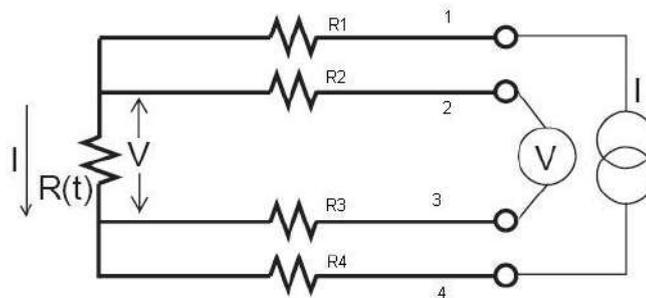


Figura 19-1: Circuito de conexión de Pt100 de cuatro hilos.

Fuente: (WordPress, 2012)

1.6.2. Circuitos de acondicionamiento de señal

Los circuitos que se utilizan para adecuar la señal de salida de un sensor se los conoce como acondicionadores de señal los mismos que tienen como principio convertir una recibida por los sensores RTD y obtener una fácil lectura por el sistema de procesamiento. Hay varias maneras de acondicionar una señal (Corona, 2014). Al tratarse de sensores resistivos existen tres formas de acondicionarlos: divisor de voltaje, divisor de corriente y puente de Wheatstone que se describen a continuación.

1.6.2.1. Acondicionamiento por divisor de tensión

Este tipo de circuitos de acondicionamiento son la forma más sencilla y económica de implementación, consiste en acondicionar el valor obtenido por el sensor resistivo mediante un divisor de tensión entre una resistencia fija y el sensor como se muestra en la Figura 20-1, donde R_1 corresponde al valor de una resistencia fija y R_2 al sensor RTD (Corona,2014: p. 41).

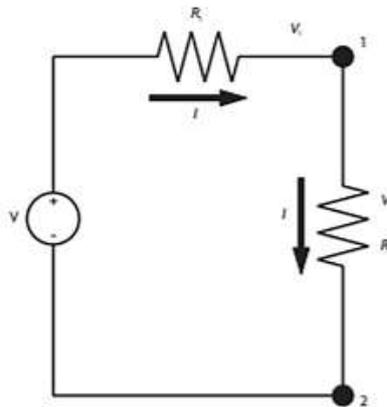


Figura 20-1: Acondicionamiento por divisor de tensión.
Fuente: (Corona, 2014: p. 41)

Mediante el análisis del circuito utilizando las leyes de Kirchoff se obtiene fácilmente la siguiente expresión:

Ecuación: 10-1: Cálculo del voltaje de entrada.

$$V = IR_1 + IR_2 \quad (10-1)$$

Despejando la corriente I tenemos la Ecuación 11-1.

Ecuación: 11-1: Cálculo de la corriente.

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (11-1)$$

Y aplicando la Ley de Ohm sobre las resistencias R_1 y R_2 se obtiene la Ecuación 12-1.

Ecuación: 12-1: Cálculo del voltaje V_1 y V_2 .

$$V_1 = IR_1 = V \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (12-1)$$

$$V_2 = IR_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Es evidente que en la Ecuación 12-1 los voltajes V_1 y V_2 están en función del voltaje de entrada V y además que el cociente que multiplica a V siempre será menor que 1, se puede afirmar que en voltaje V_1 y V_2 que cae sobre las resistencias serán siempre menor que V (Corona,2014: p. 42).

Este tipo de circuitos de acondicionamiento se utilizan como auxiliares para medir sensores resistivos, esto debido a que si se mantiene una resistencia fija es posible conocer el valor de la otra resistencia utilizando la ley de ohm, siempre y cuando sean conocidos el valor de V_1 o V_2 del divisor de voltaje. De esta manera al medir un voltaje sobre el divisor se puede obtener el valor correspondiente a la resistencia del sensor que se relaciona con la magnitud física detectar (Corona,2014: p. 42).

Finalizando, es importante mencionar que el divisor de voltaje tiene una respuesta lineal, así como también la variación de la resistencia del sensor siempre y cuando el cociente de la resistencia fija entre la resistencia del sensor sea igual o mayor a 100 (Corona,2014: p. 42).

1.6.2.2. Acondicionamiento por divisor de corriente

El circuito de acondicionamiento por divisor de corriente es casi similar a la anterior, se diferencian en que las resistencias se encuentran en paralelo y la fuente de alimentación este corriente como se muestra en el circuito de la Figura 21-1 (Corona,2014: p. 42).

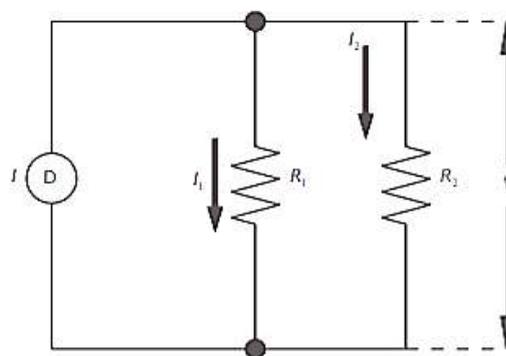


Figura 21-1: Acondicionamiento por divisor de corriente.
Fuente: (Corona, 2014: p. 42)

Ecuación: 13-1: Cálculo aplicando la ley de ohm.

$$V_2 = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (13-1)$$

De modo que a partir de la Ecuación 14-1 se puede calcular el valor de las corrientes I_1 e I_2 y se obtiene la ecuación 14-1.

Ecuación: 14-1: Ecuación 14-1. Cálculo de las corrientes I_1 e I_2 .

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (14-1)$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Observando la Ecuación (14-1) es evidente que la corriente I se divide entre las resistencias R_1 y R_2 . La aplicación del circuito divisor de corriente en comparación con el de voltaje es más recomendable ya que resulta más práctico medir voltajes de corrientes (Corona,2014: p. 42).

1.6.2.3. Acondicionamiento por puente de Wheatstone

Para obtener el valor de lectura de sensores resistivos a través de puente de Wheatstone, esta toma las variaciones de resistencia y los divisores de voltaje de modo que el cambio de resistencia del sensor se interpreta en un cambio de voltaje entre los terminales del puente. El circuito de acondicionamiento por puente de Wheatstone está conformado por cuatro resistencias distribuidas de tal manera que forman un cuadrado con una fuente de excitación que puede ser de voltaje o de corriente que está conectada entre 2 nodos opuestos, un medidor de voltaje está conectado entre los 2 nodos restantes como se muestra en la Figura 22-1 (Corona,2014: p. 43).

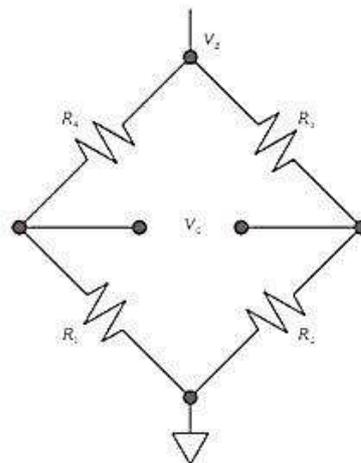


Figura 22-1: Puente de Wheatstone.
Fuente: (Corona, 2014: p. 43)

Analizando de manera técnica el circuito de puente es evidente que está compuesto por dos divisores de voltaje y que al medir el voltaje de salida V_0 se establece que el valor es la diferencia

de los voltajes de salida de los dos divisores como se puede apreciar en la Ecuación 15-1 (Corona,2014: p. 43).

Ecuación: 15-1: Ecuación 15-1. Cálculo del voltaje de salida del divisor.

$$V_0 = V \frac{R_1}{R_1+R_4} - V \frac{R_2}{R_2+R_3} \quad (15-1)$$

En el caso de que una resistencia del puente es reemplazada por un sensor resistivo este se puede utilizar para detectar cuando un sistema alcanza un punto nulo o de estabilidad, así como también para medir cambios de la magnitud de la resistencia del sensor. Para ilustrar el modo de uso del detector de punto nulo se supone el caso en el que se requiera mantener permanente la temperatura de una habitación, esto se llevará a cabo siempre y cuando el circuito puente permanezca en equilibrio (Corona,2014: p. 43).

Este equilibrio se logra cuando el voltaje de salida V_0 es nulo, de tal manera que es necesario determinar los valores de las resistencias fijas del circuito que debe cumplir con la relación que se describe en la Ecuación 16-1.

Ecuación: 16-1: Cálculo de la resistencia fija.

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (16-1)$$

Ecuación: 17-1: Cálculo de la resistencia R_1 .

$$R_1 = R_4 \frac{R_2}{R_3} \quad (17-1)$$

Debido a que R_1 y R_2 son resistencias fijas, la división de estas será un valor fijo que da como resultado la Ecuación 18-1.

Ecuación: 18-1: Cálculo del voltaje de salida del divisor.

$$R_1 = R_4 K \quad (18-1)$$

Para lograr un acondicionamiento óptimo es importante entender que los valores de las resistencias fijas deben permitir un cambio elegible de V_0 ante una variación pequeña de R_1 que se logra teniendo valores de resistencia iguales al valor nominal de R_1 . (Corona, 2014: p. 44).

En el caso de que se desee medir la variación de la magnitud de la resistencia de un sensor es recomendable utilizar un puente con más elementos variables, es decir con 2 o más sensores (Corona, 2014: p. 43). En la Figura 23-1 se puede observar las configuraciones más utilizadas para medir variaciones de magnitud de resistencia.

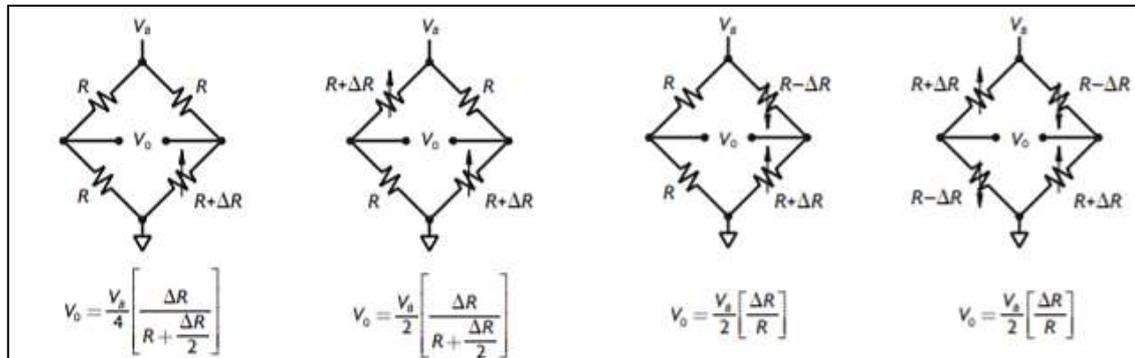


Figura 23-1: Configuraciones del puente de wheatstone con 1 o mas elementos variables.
Fuente: (Corona, 2014: p. 44)

1.6.3. Amplificador operacional

Un amplificador operacional (Opamp), es aquel que permiten transferencia de voltaje de entrada a una salida amplificada, por lo que tiene una amplia aplicación es el acondicionamiento de señales. Es un circuito integrado como se muestra en la Figura 24-1 (a), posee dos entradas una inversora (-) y otra no inversora (+), además de una salida que puede ser utilizada por elementos externos. En la figura 24-1 (b) se muestra el símbolo con el cual se denota al amplificador operacional, además en él se describe como un bloque que requiere para su funcionamiento dos conexiones de alimentación voltaje positivo y negativo (Corona, 2014: p. 46).

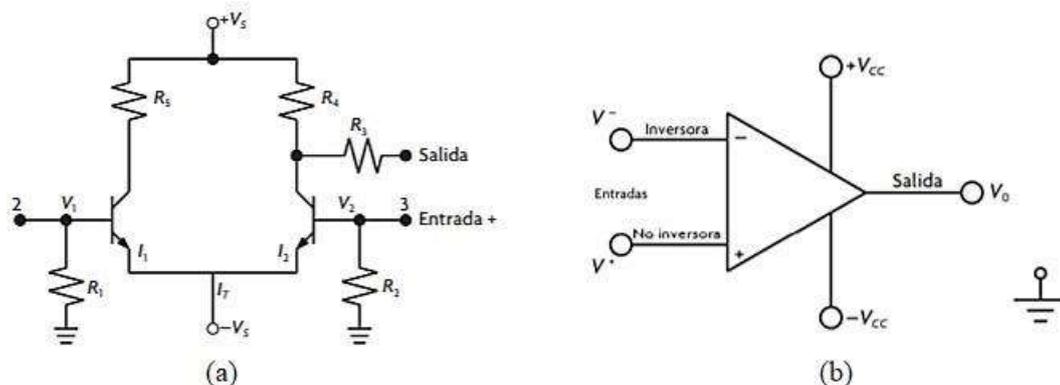


Figura 24-1: (a) Circuito del Opam; (b) Símbolo del Opam.
Fuente: (Corona, 2014: p. 45)

Los Opamps son ideales cuando se requiere acondicionar una señal para sensores y actuadores, ya sea para amplificación, atenuación, filtrado, alineación o comparar señales. Pero para lograr este objetivo el opamp debe tener una configuración, ya sea en lazo abierto como se puede apreciar en la Figura 25-1 (a) o también retroalimentado como se muestra en la figura 25-1 (b) (Corona, 2014: p. 47).

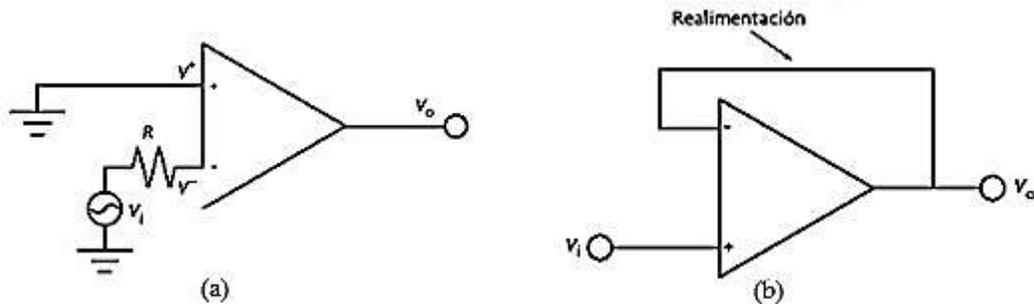


Figura 25-1: (a) Amplificador en lazo abierto; (b) Amplificador retroalimentado.
Fuente: (Corona, 2014: p. 47)

1.6.4. Convertidor analógico-digital

Los convertidores analógicos-digitales (ADC) son circuitos que convierten señales analógicas de voltaje o de corriente a señales que pueden acoplarse a circuitos digitales como los microcontroladores (Corona, 2014: p. 57). En la conversión A/D se presentan principalmente tres procesos:

- Transmisión de tiempo discreto a continuo (muestreo de la señal)
- Cuantificación de la amplitud de la señal.
- Correlación de cantidades respecto a una referencia.

Cuando se realiza un acondicionamiento de señal en un sistema de sensado los convertidores ADC son indispensables, esto debido a que son el interfaz entre la señal de salida de los sensores y el elemento digital de procesamiento de la información. Si se requiere utilizarlos para el acondicionamiento de la señal se debe considerar la velocidad de la señal a tratar, la precisión con la que se desea convertir y la frecuencia con la que se desea trabajar, de modo que se debe conocer la velocidad de muestreo, la resolución y el ancho de banda necesario para el correcto tratamiento de la señal (Corona, 2014: p. 57).

Existen diversas arquitecturas de un convertidor ADC pero, para elegir una arquitectura determinada, esta debe cumplir con ciertos requisitos; considerar la velocidad de muestreo que según el teorema fundamental del muestreo establece que debe ser el doble de la máxima

frecuencia en la señal a convertir y la resolución que está definida por el número de bits del convertidor (Corona, 2014: p. 57).

1.7. Tarjeta de desarrollo

Son placas o circuitos que poseen un microcontrolador que ejecuta las instrucciones que se encuentran almacenadas en la memoria de manera permanente, el diseño electrónico de estos dispositivos permite definir varias acciones como: la programación de componentes, suministrar un voltaje adecuado para el funcionamiento del controlador y además proporciona acceso a las entradas y salidas tanto analógicas como digitales del microcontrolador para conexión de sensores o actuadores (Casco, 2014).

Existe una gran variedad de plataformas de desarrollo con características especiales para múltiples aplicaciones que se adaptan a las necesidades para el diseño de proyectos de electrónica, entre las más conocidas tenemos:

Arduino: es una plataforma open source que está compuesta de hardware y software para desarrollar el diseño de prototipos electrónicos. Su principal objetivo es realizar algoritmos de programación con lenguaje C o C++ de forma sencilla que combinados con las librerías estándar dan como resultado un archivo hexadecimal que puede ser transferido mediante USB o puerto serial de la computadora, dependiendo de su uso esta plataforma está disponible para un sinnúmero de configuraciones (Casco, 2014).

El hardware de estos dispositivos está diseñado para reducir la complejidad de la circuitería, las placas Arduino usan principalmente microcontroladores de alta gama AVR de 8 bits de Atmel, con un cristal de 16Mhz y un regulador de 5V, se complementa con un juego completo de programas y sistemas de desarrollo incluyendo compiladores C, ensambladores, emuladores en circuito, kit de evaluación, etc.

Raspberry Pi: es una plataforma que está revolucionando a nivel de microprocesadores, su lenguaje de programación es de alto nivel como: Python, C++ o Java. Esta minicomputadora fue desarrollada con fines didácticos y un alto desempeño, su controlador Broadcom cuenta con un poderoso procesador ARM11 a 700Mhz, puede ser conectado a la red mediante ya que contiene un puerto Ethernet por lo que se pueden cargar sistemas operativos como: Linux, Windows y Mac (Casco, 2014).

BegleaBone Black: es una tarjeta de desarrollo open source de bajo costo, es una plataforma que está dirigida para desarrolladores avanzados con un sistema operativo Linux, su entorno de programación es Cloud9 que permite programar a través de un interfaz web y así acceder a los pines de la placa. Cuenta con un puerto Ethernet para la comunicación de red y un puerto USB (Casco, 2014).

1.7.1. Comparación entre las tarjetas de desarrollo

Luego de revisar las diferentes tarjetas de desarrollo en el apartado anterior, se procede a realizar la Tabla 11-1 con las especificaciones técnicas de las tarjetas para seleccionar la más accesible para el sistema electrónico que se pretende implementar.

Tabla 11-1: Especificaciones técnicas de las tarjetas de desarrollo.

| | Arduino Mega | Raspberry Pi B+ | BeagleBone Black |
|-----------------------------|--------------|---|--|
| Procesador | Atmega 2560 | ARM11 | AM355x |
| Velocidad | 16MHz | 700MHz | 1GHz |
| RAM | 2KB | 512MB | 512MB |
| Voltaje de entrada | 7 -12 V | 5 V | 5 – 7V |
| Voltaje de operación | 5 V | 3.3 – 5V | 0.5 – 3.8 V |
| Entradas digitales | 54 | 8 | 65 I/O |
| Entradas analógicas | 16 | 6 | 7 |
| Sistema operativo | N/A | Linux | Andrioid, Linux, Windows, Cloud9, CE, etc. |
| Entorno | Arduino IDE | Linux, IDLE, Open-Embedded, QEMU, Scratchbox, Eclipse | Python, Scratch, Linux, Eclipse, Andriod ADK |
| Costo | \$15,00 | \$35,00 | \$45,00 |

Fuente: (Casco, 2014)

Realizado por: Cuji, J. 2021

Con un costo de \$15,00 la tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560 es la adecuada para la implementación de hardware y software del sistema debido a que es fácil de usar, presenta flexibilidad en distintos tipos de interfases y posee una velocidad de procesamiento de 16MHz.

1.8. Simuladores de circuitos eléctricos

Son programas que permiten el diseño de circuitos, su principal objetivo es reproducir situaciones reales considerando sus componentes y conexiones, estos softwares otorgan la posibilidad de simular el funcionamiento y obtener conclusiones con respecto al diseño y puesta en marcha (Pérez

et al., 2020). A continuación, se realiza un análisis funcional de acuerdo con las características como: presentación uso, limitaciones acceso y requerimientos técnicos.

Proteus: es uno de los programas de simulación más utilizado en ingeniería, consta con más de 800 controladores y permite simular el funcionamiento de circuitos eléctricos de toda clase con total precisión, ya sean analógicos o digitales.

Eagle: es un programa para diseño de diagramas eléctricos y PCBs con un autoenrutador DiY, dispone de una biblioteca de componentes por parte de empresas como SparkFun o aficionados que las distribuyen de forma gratuita por la red.

Multisim: es un software estándar de simulación SPICE para electrónica de potencia, analógica y digital, su entorno esquemático interactivo para analizar y visualizar el comportamiento en el diseño de circuitos eléctricos.

1.8.1. Comparación entre los simuladores

Luego de revisar las diferentes tarjetas de desarrollo en el apartado anterior, se procede a realizar la Tabla 12-1 en donde se puede apreciar la funcionalidad de cada simulador.

Tabla 12-1: Funcionalidad de los simuladores.

| | Funcionalidad |
|-----------------|--|
| Proteus | <ul style="list-style-type: none"> • Proteus ISIS: creación de esquemas y simulación eléctrica • Proteus ARES: solución de enrutamiento de circuito impreso con colocación automática de los componentes |
| Eagle | <ul style="list-style-type: none"> • Editor de esquemática (vinculado a biblioteca, reglas eléctricas, generación de una lista de interconexiones) • Editor de circuitos Impresos PCBs • Autorouter • Plan de implantación con características avanzadas |
| Multisim | <ul style="list-style-type: none"> • Puntas de pruebas industriales • Intercambio de datos con instrumentos virtuales y reales • Corrector de errores y sugerencias de cambios de circuitos • Simulación integrada con microcontroladores |

Fuente: (Pérez et al., 2020).

Realizado por: Cuji, J. 2021

Del análisis de funcionalidad de los simuladores se puede decir que, Proteus es el ideal para el diseño de circuito eléctrico ya que es el más utilizado, mientras que Eagle es el más recomendable para la edición de la placa en PCBs y será de gran utilidad en este proyecto, además se puede realizar un autorouter de las pistas con facilidad.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En el siguiente capítulo trata las fases para el desarrollo del proyecto con los sistemas de control ON-OFF, PI y PID sobre el proceso de deshidratación térmica del tomate. En la Figura 1-2 se puede observar 5 etapas para la obtención del sistema térmico, en la primera etapa se determinan los requerimientos del sistema para cumplir con el proceso de deshidratación, la segunda etapa la arquitectura del sistema eléctrico, en la tercera etapa se realizara el diseño e implementación de la etapa de potencia, la cuarta etapa consta del diseño de los controladores propuestos para este proyecto, y finalmente se concluye con la etapa de software de desarrollo del sistema térmico con los diferentes controladores acoplados al deshidratador adquirido en el mercado.

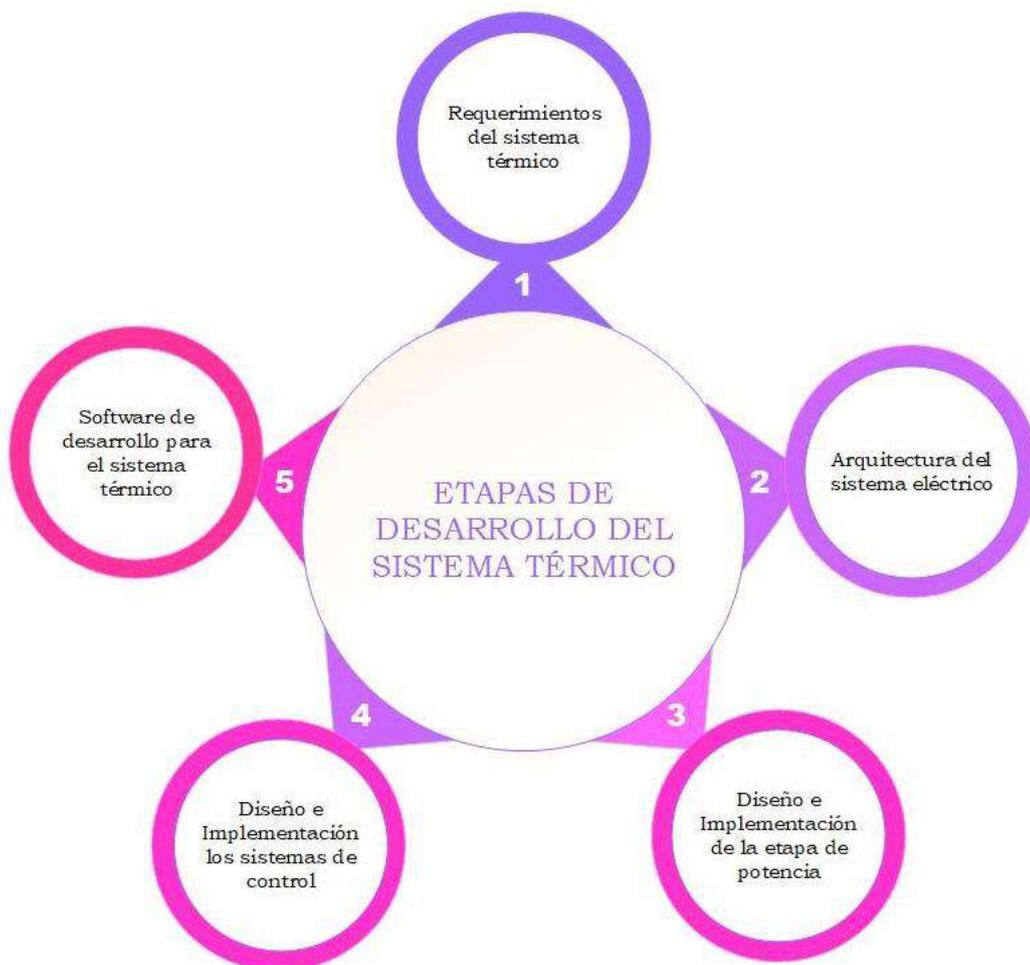


Figura 1-2: Etapas para el desarrollo del sistema térmico.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.1. Requerimientos del sistema térmico

Para realizar el proceso de deshidratación del tomate, el sistema térmico desarrollado permite el control de temperatura con los 3 tipos de controladores planteados de manera individual, su sistema de regulación y control tiene que ser eficiente para mantener las condiciones térmicas ideales en cada uno de ellos y alcance una temperatura estable de 60 °C que es la requerida para el proceso. Por mayor simplicidad se ha optado por adquirir en el mercado un electrodoméstico deshidratador que permita realizar las pruebas de los diferentes controladores. Además, es necesario incorporar un instrumento de medición que permita monitorear la temperatura en el deshidratador y así determinar si el sistema térmico está funcionando correctamente.

2.1.1. Funcionamiento del sistema térmico

Para satisfacer los requerimientos establecidos anteriormente para el sistema térmico se realizó un diagrama general del funcionamiento como se muestra en la figura 2-2, donde se puede apreciar los pasos para el proceso de deshidratación que se realizó con cada uno de los controladores propuestos con los mismos gramos de tomate para cada caso.

El primer paso para dar inicio con el proceso de deshidratación es pesar, cortar y colocar las bandeja con los tomates en el electrodoméstico. Posteriormente el usuario encenderá el equipo y automáticamente el ventilador empezará a hacer circular el aire por el sistema. Se debe seleccionar el tipo de controlador y la temperatura con el cual se realizará la deshidratación.

El sistema de control térmico está gobernado por un microcontrolador que permite la recepción del valor de la temperatura ambiente emitida por los sensores y empieza a aumentar la temperatura hasta el valor establecido. El proceso se realiza de manera continua y mantenido la temperatura óptima para el proceso. El control de la temperatura se efectúa a través del aumento o disminución de la corriente AC que circula por la resistencia calefactora, esto varía según el tipo de controlador que se haya sido seleccionado.

Una vez finalizado el proceso de deshidratación se procede a pesar los tomates deshidratados en los 3 casos para la verificación del producto final.

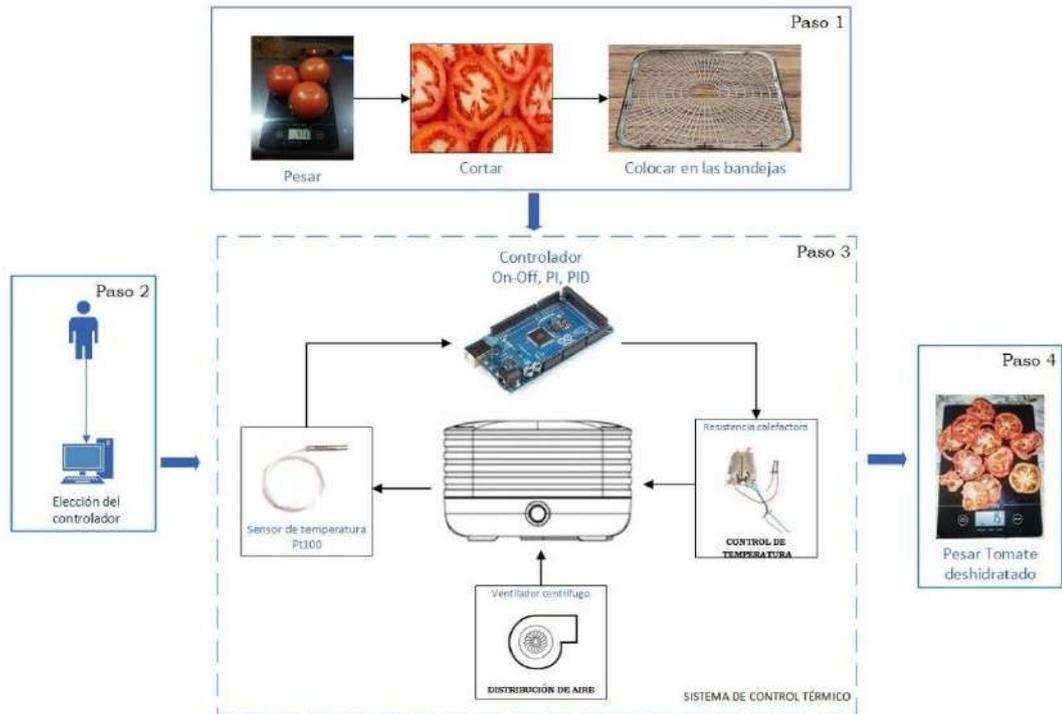


Figura 2-2: Diagrama general del funcionamiento del sistema eléctrico.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.1.2. Especificaciones técnicas del deshidratador

En el país no existe una gran variedad de electrodomésticos que permitan la deshidratación de alimentos, debido al desconocimiento de las personas sobre las ventajas que ofrecen el consumo de alimentos deshidratados, así como también su conservación.

Para el sistema térmico se ha adquirido el modelo EZ-Store de la marca Ronco como se puede apreciar en la Figura 3-2, es uno de los electrodomésticos más distribuidos a nivel nacional y permite realizar las pruebas de los diferentes tipos de sistemas de control planteados en este proyecto.



Figura 3-2: Deshidratador EZ-Store 5 bandejas marca Ranco.

Fuente: https://m.media-amazon.com/images/I/713MPh3ECjL._AC_SS450_.jpg

En este deshidratador el método de intercambio de calor es por convección, el sistema térmico está conformado por un ventilador que permite el flujo de aire caliente que circula por los alimentos al calentarse la níquelina o resistencia térmica, para ello cuenta con rejillas de ventilación en la tapa y conductos de ventilación en la base de las bandejas cumpliendo así con en el proceso de deshidratación. Consta de un termostato Bimetálico de Hierro KST254 que realiza el control de la temperatura como se puede apreciar en la Figura 4-2. Su fuente de energía es de corriente alterna AC y cuenta con un enchufe polarizado que reduce el riesgo de descarga eléctrica, su funcionamiento es igual a la de un horno convencional.



Figura 4-2: Sistema Térmico del deshidratador EZ-Store.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

A continuación, en la Tabla 1-2 se presenta las especificaciones técnicas de funcionamiento del deshidratador Ronco:

Tabla 1-2: Especificaciones técnicas de funcionamiento del deshidratador EZ-Store.

| | |
|------------------------------------|---------|
| Voltaje de Alimentación AC: | 120VAC |
| Frecuencia: | 60Hz |
| Potencia: | 240WATT |

Fuente: (Ronco Holdings, 2014)

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.1.3. Elección de los elementos de hardware y software

En el capítulo anterior se analizó la importancia de los elementos de hardware para el sistema eléctrico que permitirá la interacción del sistema con los elementos de medición externos, la adquisición y transferencia de datos, así como también el monitoreo en tiempo real.

2.1.3.1. Elección de la tarjeta de desarrollo

Para la implementación del sistema eléctrico se adquirió un Arduino Mega 2560 como tarjeta de desarrollo para hardware del sistema, está conformada por un microcontrolador ATmega2560 como se muestra en la Figura 5-2, está basado en la arquitectura mejorada RISC de AVR y tecnología CMOS de 8 terminales a baja potencia. Cuenta con 54 terminales digitales que pueden ser utilizados como entradas o salidas a través de las funciones `pinModel()`, `digitalWrite()` y `digitalRead()` además de 16 terminales de entrada analógica. Es ideal cuando se desea controlar una cantidad considerable de sensores.



Figura 5-2: Tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Tabla 2-2 se presenta a detalle las características técnicas de la placa, mismas que serán indispensables para el diseño del sistema.

Tabla 2-2: Características técnicas de arduino con microcontrolador Atmega2560.

| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| Tarjeta de desarrollo: | Arduino Mega 2560 |
| Voltaje de operación: | 5 V |
| Voltaje de entrada: | 7-12 V (recomendado) |
| | 6-20 V (mínimo-máximo) |
| Corriente CC: | 20 mA (cada pin E/S) |
| | 50 mA (pin 3.3V) |
| Potencia: | 93 mA (consumo) |
| Frecuencia del reloj: | 16 MHz |
| Memoria flash: | 256KB (8 KB bootloader) |

Fuente: (Arduino,2021)

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.1.3.2. Convertidor ADS1115

El ADS1115 es un módulo de conversión A/D con 4 canales de 16bits y velocidad de muestreo de 8HZ a 860Hz como se muestra en la Figura 6-2, es ideal cuando se desea conversores análogos adicionales que permitan liberar el procesador ganando precisión y calidad de conversión. Permite trabajar en tres modos diferentes; modo un solo extremo, modo diferencial y modo comparador. Se comunica con el microcontrolador mediante comunicación I2C lo cual lo hace sencillo su configuración y es compatible con la placa Arduino.



Figura 6-2: Convertidor A/D ADS1115.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Tabla 3-2 se muestra a detalle las características técnicas del módulo de conversión A/D ADS1115.

Tabla 3-2: Características técnicas del convertidor A/D ADS1115.

| | |
|---------------------------------|------------------------|
| Voltaje de operación | 2V a 5.5 V |
| Corriente | 150 uA (modo continuo) |
| Velocidad de muestreo | 8 Hz a 860 Hz |
| Resolución | 16 bits |
| Canales | 4 entrada |
| | 2 diferenciales |
| Interfaz de comunicación | I2C (4 direcciones) |

Fuente: (Programarfacil, 2021)

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.1.3.3. Elección de software de simulación

Para la simulación se utilizó Proteus en la versión 8.6 como se muestra en la Figura 7-2, es ideal ya que cuenta con casi todos los microcontroladores existentes en el mercado de tal manera que es compatible con Arduino. Incluye capturas esquemáticas y una amplia biblioteca de componentes que hacen posible simular el funcionamiento del circuito eléctrico.



Figura 7-2: Software de simulación Proteus 8.6

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Para el diseño de la placa impresa en PCB se utilizó el software de simulación Eagle en la versión 7.6.0 como se muestra en la Figura 8-2, debido a la máscara de componentes y la función Autorouter se generó fácilmente las pistas para la placa.

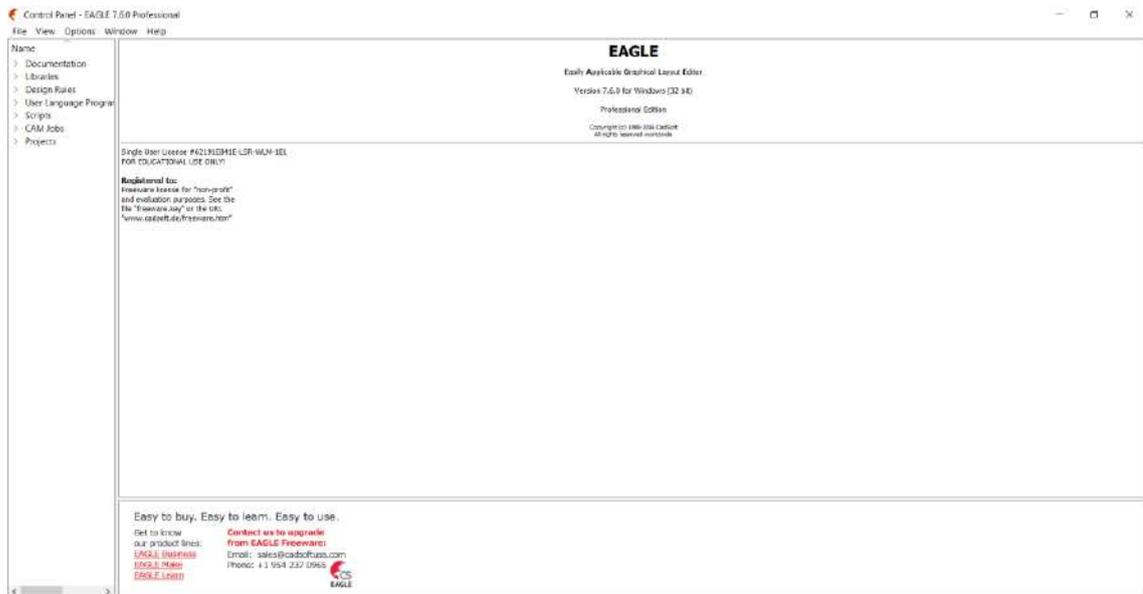


Figura 8-2: Software de simulación Eagle versión 7.6.0.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.1.4. Elección del elemento de medición

Para determinar si la temperatura que está proporcionando el sistema térmico es la adecuada es necesario incorporar un elemento de medición que permitan obtener esa información.

El sensor idóneo para la aplicación en el sistema es el sensor de temperatura Pt100 de 2 hilos debido a que se los puede instalar a una distancia de medición corta del controlador, la poca complejidad en su configuración permite conectarlo de forma directa logrando así un menor rango de error haciéndolo un instrumento óptimo para captar la temperatura del aire circundante en el deshidratador. La principal ventaja de este tipo de sensor RTD es su bajo costo y accesibilidad en el mercado.

En la Figura 7-2 muestra el diagrama de bloques para la adquisición de datos que estará encargado de sensar la temperatura el equipo mediante el uso de 4 sensores Pt100 el valor en tiempo real y que posteriormente será comparado con el valor deseado y activará la acción de control.

En el bloque de conversión de datos se emplea un ADS1115 que obtiene con precisión los valores de temperatura. Luego esta información pasa al bloque de amplificación de la señal a través del LM324 para ser procesada por el microcontrolador ATmega 2506 que tiene programado los tres tipos de sistemas de control.

Independientemente del tipo controlador que se esté utilizando para el proceso, en el bloque del actuador si la temperatura no es la deseada se envía una señal de control que activa la niquelina aumentando la temperatura y de igual manera si sobrepasa el valor deseado desactiva la niquelina, esto a que cuenta con una etapa de potencia que alimenta tanto al actuador con 110V a 1.8A como al microcontrolador con 5V mediante la regulación de voltaje.

Por último, en el bloque de visualización realiza el monitoreo de la temperatura en el deshidratador, en él se puede observar el valor de la temperatura actual y el tipo de controlador que se está utilizando en el proceso.

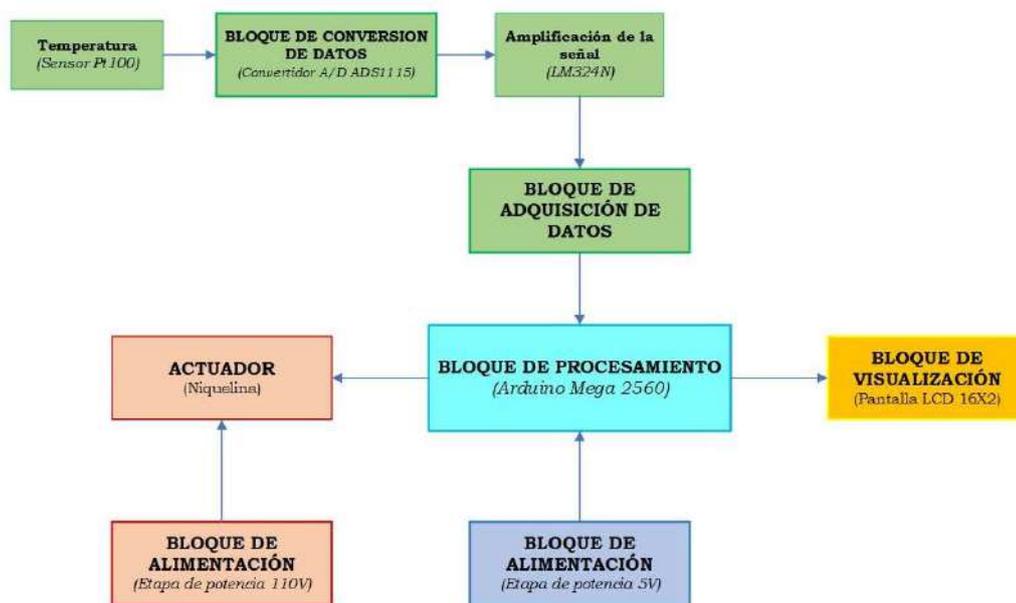


Gráfico 1-2: Diagrama de bloques de adquisición de datos.
Realizado por: Cují, J. 2021.

2.2. Diseño e implementación de la etapa de potencia

Para simular el circuito para la etapa de potencia se utilizó la herramienta software Proteus como se muestra en la Figura 9-2, todos los circuitos están gobernados por un microcontrolador Atmega 2560 quien recibe la señal de los sensores mediante un circuito de acondicionamiento, el cruce por cero envía una señal que activa el optoacoplador MOC3031M para la potencia. Con el objetivo de obtener una visualización de los datos de temperatura obtenida por los sensores Pt100 se optó por incorporar al deshidratador una LCD 16x2. Es un circuito básico que está conformado por una resistencia de 330Ω que permite regular la entrada de alimentación del LCD y una resistencia variable de $10k$ que regula el contraste de la pantalla.

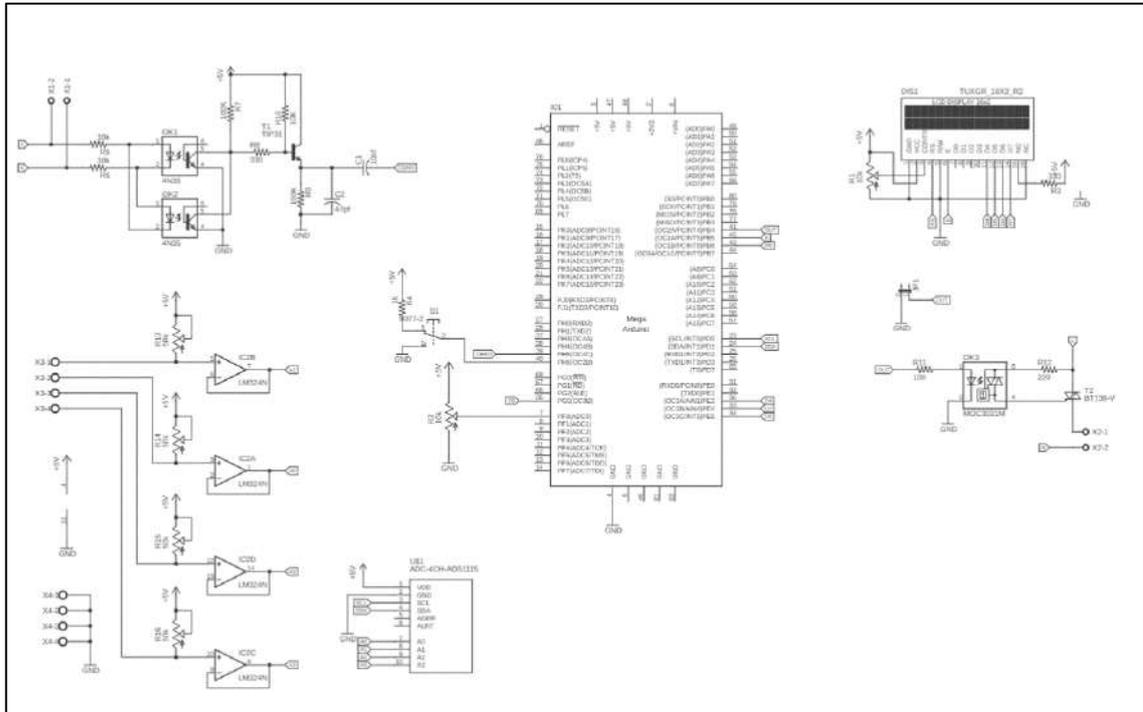


Figura 9-2: Esquema del circuito eléctrico para la etapa de potencia.

Realizado por: Cuij, J. 2021.

Realizada la comparación de la temperatura con el valor de referencia, el controlador envía una señal de activación o desactivación del actuador, es decir si la señal es un “1” lógico la tensión se elevará aproximadamente a 110V de AC para activar la niquelina o si es un “0” lógico se desactivará la niquelina. Un circuito detector de cruce por cero es ideal para transmitir las señales digitales a través de un circuito de corriente alterna. Para la conducción de la corriente AC hacia la niquelina es necesario un circuito de disparo del Triac que permite encender o apagar la niquelina y así mismo de manera intermitente para conseguir el control de la temperatura en el deshidratador.

Para comprender mejor el funcionamiento de la etapa de potencia se procedió a la ejecución de la simulación en Proteus con un generador de señales. En la Figura 10-2 se muestra la generación de la señal de cruce por cero de color azul y de disparo del Triac de color rojo, cuando el ángulo de disparo es 10° la señal sinusoidal que se aplica a carga es casi completa porque existe un mayor paso de corriente.

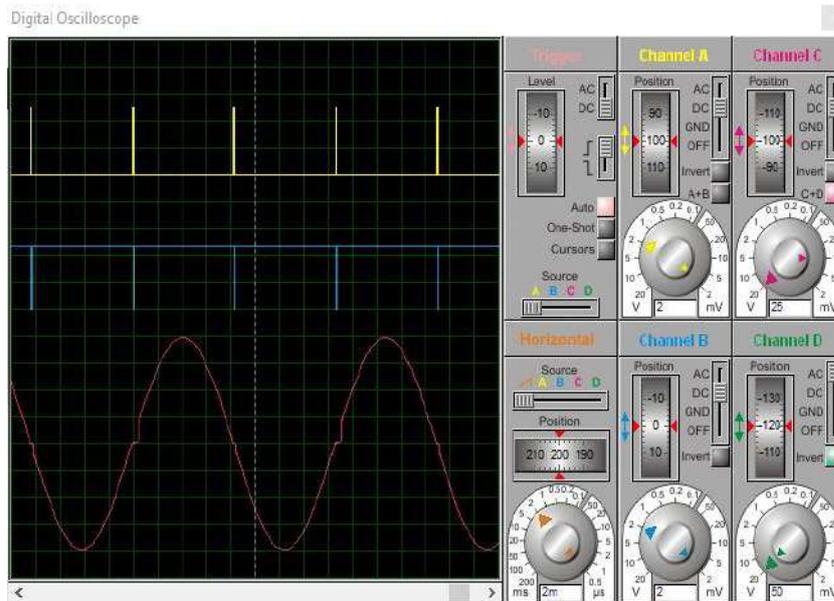


Figura 10-2: Señal senoidal con ángulo de disparo de 10°
 Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Figura 11-2 se puede observar cuando el ángulo de disparo es 45° , la señal senoidal aplicada a la carga permite regular el paso de la corriente.

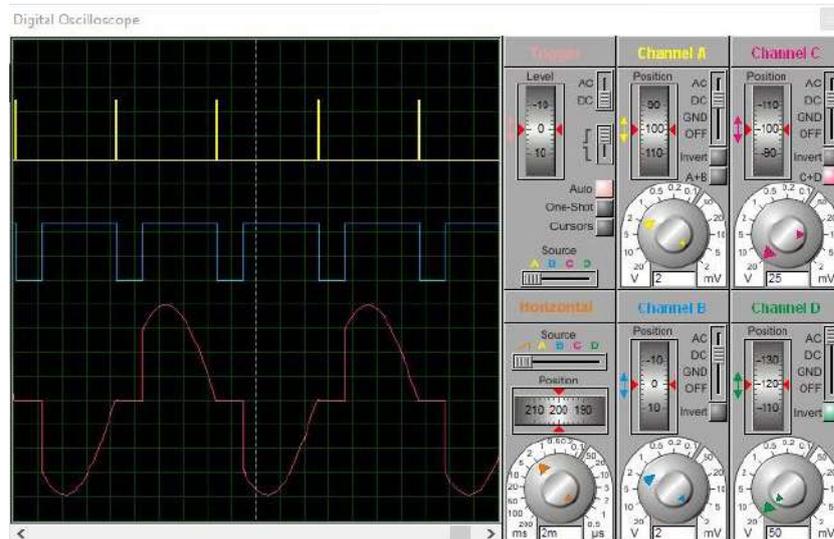


Figura 11-2: Señal senoidal con ángulo de disparo de 45°
 Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la figura 12-2 se puede observar cuando el ángulo de disparo es 90° , la señal senoidal aplicada a la carga es casi nula por lo que existe poca circulación de corriente hacia la carga.

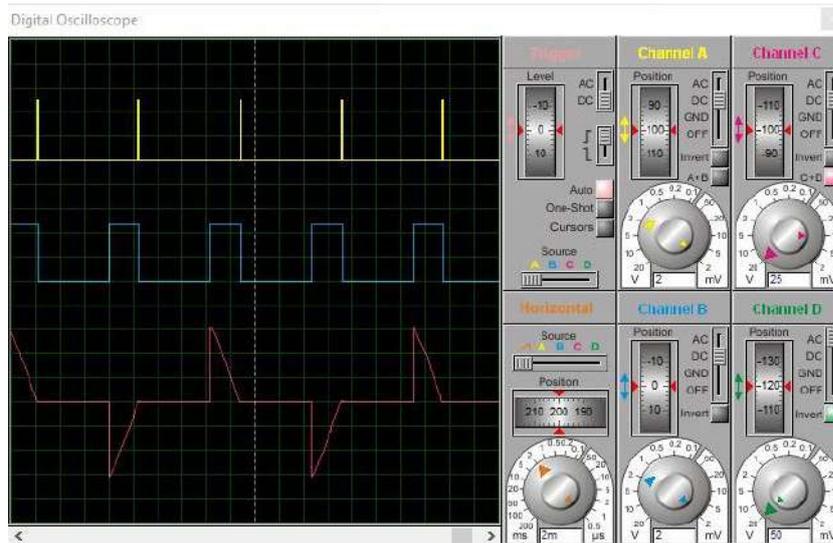


Figura 12-2: Señal senoidal con ángulo de disparo de 90°
 Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la figura 13-2 se puede observar cuando el ángulo de disparo es 180° , la señal senoidal aplicada a la carga es nula por lo que no existe circulación de corriente a la carga.

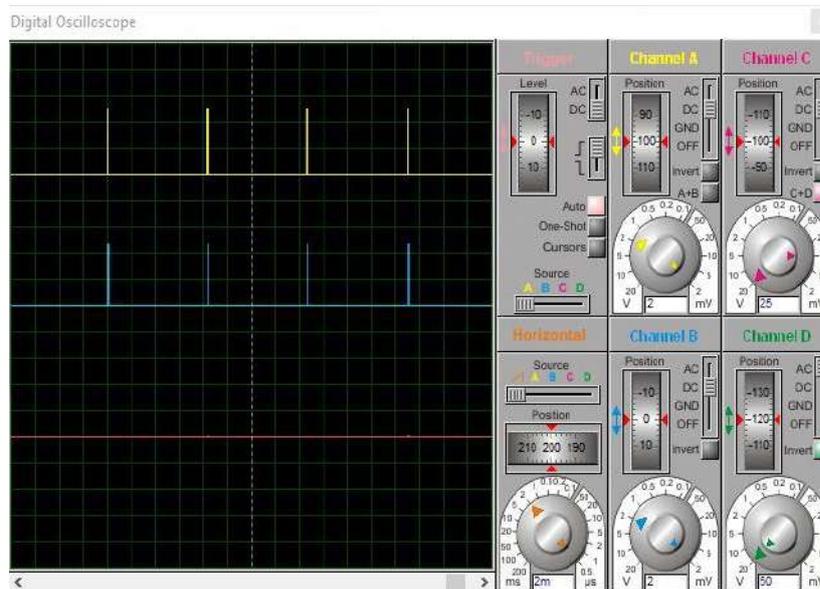


Figura 13-2: Señal senoidal con ángulo de disparo de 180°
 Realizado por: Cuji, J. 2021.

En el control del sistema térmico se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Si la temperatura no es la deseada el ángulo de disparo disminuye y permite mayor paso de corriente hacia la niquelina hasta alcanzar el valor deseado.
- Si la temperatura sobrepasa el valor deseado el ángulo de disparo aumenta impidiendo el paso de la corriente que posteriormente desactivará la niquelina disminuyendo la temperatura.

2.2.1. Circuito de acondicionamiento PT100

El sistema térmico que conforma el deshidratador debe tener una distribución de calor uniforme para lo cual se utilizara 4 sensores Pt100 ubicados en los puntos donde existe mayor concentración de temperatura, registra la variación de temperatura a medida que da inicio el proceso de deshidratación.

El circuito acondicionador se encarga de receptor las pequeñas señales emitidas por los sensores para posteriormente amplificarlas de tal manera que sean medibles y se puedan interpretar en los diferentes tipos de controladores. Mediante la Ecuación 1-2 de divisor de tensión se pudo calcular el voltaje de salida V_{OUT} a través de las Pt100.

Ecuación: 1-2: Cálculo del voltaje por divisor de tensión.

$$V_{OUT} = \frac{V_{CC} * R_{TD}}{R_{TD} * R} \quad (1-2)$$

Se sabe que la resistencia R_{TD} cambia de acuerdo con la variación de temperatura y que por consiguiente la tensión de salida también cambiará, analizando la tabla de conversión de temperatura de las Pt100 ver Anexo A, la resistencia en los terminales a una temperatura de 60°C da como resultado $R_{TD} = 123.24\Omega$.

Además, que el valor de la resistencia fija R debe ser lo suficientemente grande para así evitar que exista un autocalentamiento y mejorar la relación señal-ruido, mientras que si utilizamos un valor de resistencia baja la caída de tensión a través de las Pt100 aumentará los errores con respecto a la relación señal-ruido. Por lo que se ha determinado utilizar una resistencia $R=10k\Omega$, entonces la Ecuación 2-2:

Ecuación: 2-2: Cálculo del voltaje de salida en mV.

$$V_{OUT} = \frac{5V * 123.24\Omega}{123.24\Omega * 10000\Omega} \quad (2-2)$$
$$V_{OUT} = 0.5mV$$

Para simular el rango de salida del lazo de retroalimentación se expresa en voltios por lo que se multiplica el rango de salida por 1000 dando como resultado la Ecuación 3-2:

Ecuación: 3-2: Cálculo del voltaje de salida en V.

$$V_{OUT} = 0.5mV * 1000$$

$$V_{OUT} = 0.5V \quad (3-2)$$

En la Figura 14-2 se muestra el diagrama del circuito de acondicionamiento de los sensores PT100 el cual consta de un amplificador de instrumentación LM324N como elemento de conversión de temperatura a voltaje conectado en serie al divisor de tensión para cada uno de los sensores Pt100, mientras que para la conversión de A/D se adquirió un convertidor ADS1115 de 16bits que permite la interacción con el microcontrolador.

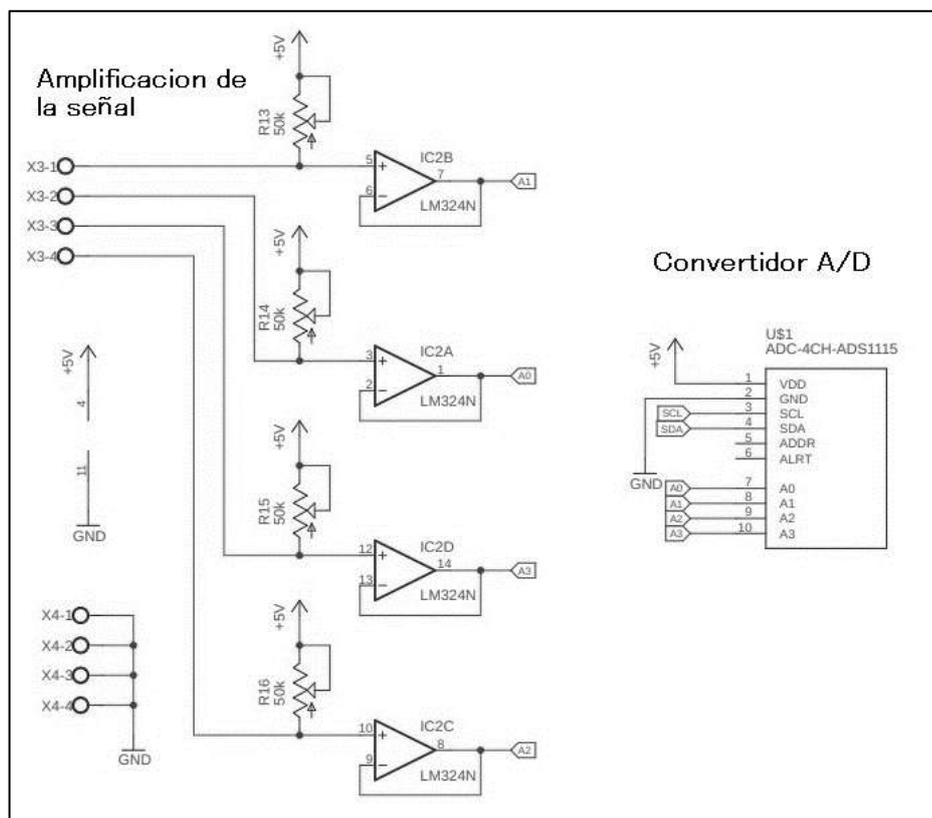


Figura 14-2: Circuito eléctrico de acondicionamiento de las Pt100.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.2.1.1. Implementación del circuito de acondicionamiento de las Pt100 en protoboard.

Una vez analizado el acondicionamiento de la señal para los sensores Pt100 se realizó la implementación en protoboard del circuito eléctrico de acondicionamiento presentado anteriormente en la figura 14-2 y para el cual se fue necesario los materiales que se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Materiales para la implementación del circuito de acondicionamiento.

| Descripción | Cantidad |
|---|----------|
| Microcontrolador ATmega2560 | 1 |
| Sensores Pt100 de dos hilos | 4 |
| ADS1115 (convertidor analógico-digital) | 1 |
| LM324N (amplificador operacional) | 4 |
| Resistencias variables 50Kohm | 4 |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Figura 15-2 se muestra el circuito eléctrico de acondicionamiento implementado en el protoboard utilizando los materiales descritos en la Tabla 4-2.

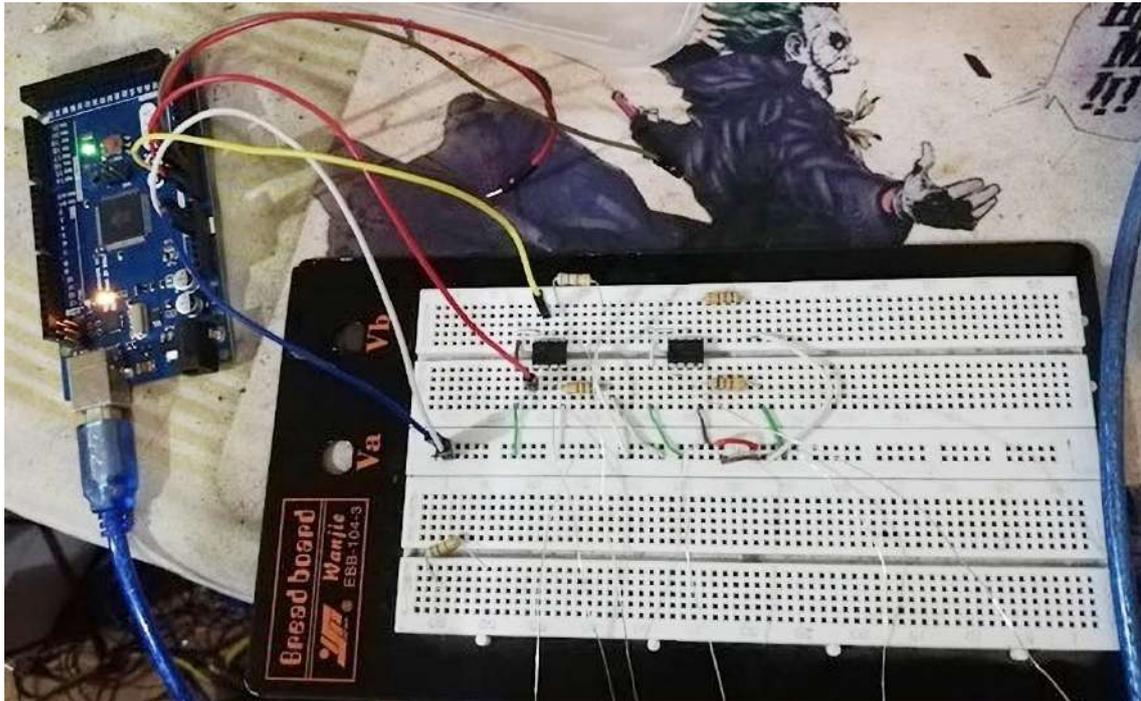


Figura 15-2: Implementación del circuito eléctrico de acondicionamiento.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Para realizar las pruebas de adquisición de datos de temperatura se utilizó el sistema térmico del electrodoméstico con la finalidad de verificar que el circuito de acondicionamiento esté funcionando correctamente. En la Figura 16-2 se muestra los valores de temperatura de los 4 sensores y la temperatura promedio adquiridas en el proceso de deshidratación.

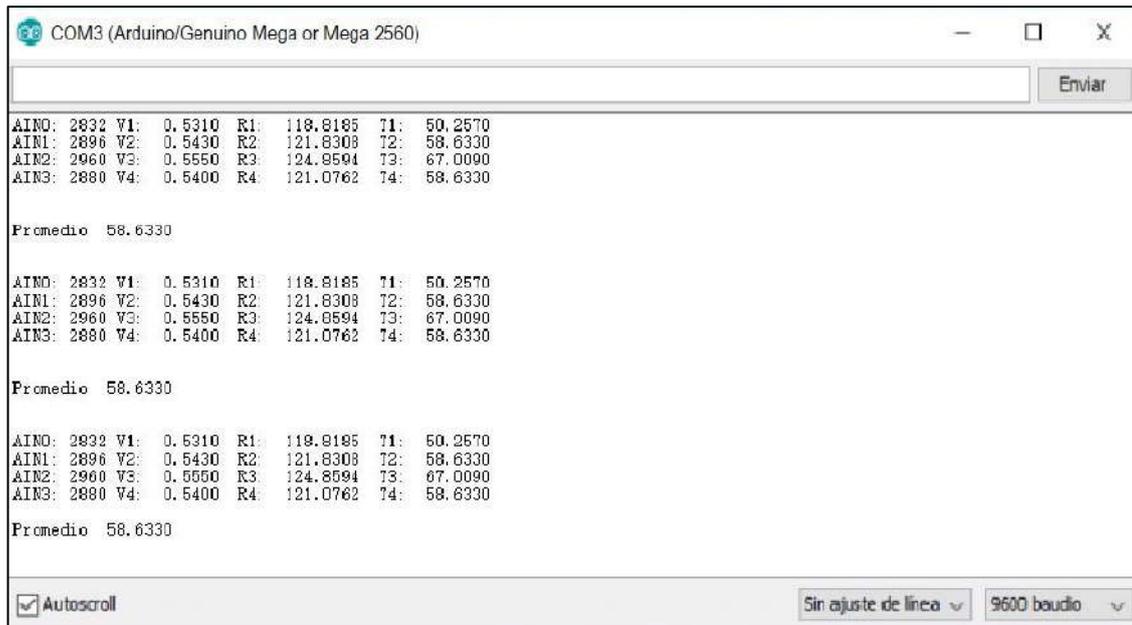


Figura 16-2: Adquisición de datos de la temperatura promedio en Arduino.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.2.2. Circuito detector de Cruce por Cero

Este circuito está encargado del monitoreo de la señal de entrada a través de la detección de cruce de la señal alterna por la referencia cero, esto permite una sincronización entre la señal de entrada y la etapa de control. En el diseño del circuito detector de Cruce por Cero de onda completa se utilizaron dos optoacopladores 4n35 conectados en antiparalelo con la finalidad de protegerse mutuamente y además de generan un pulso en cada semiciclo, esto permite que al momento de conectarse al microcontrolador pueda controlar la señal de corriente alterna de la red eléctrica y así realizar la activación del Triac BT138-V, como se muestra a continuación en la Figura 17-2.

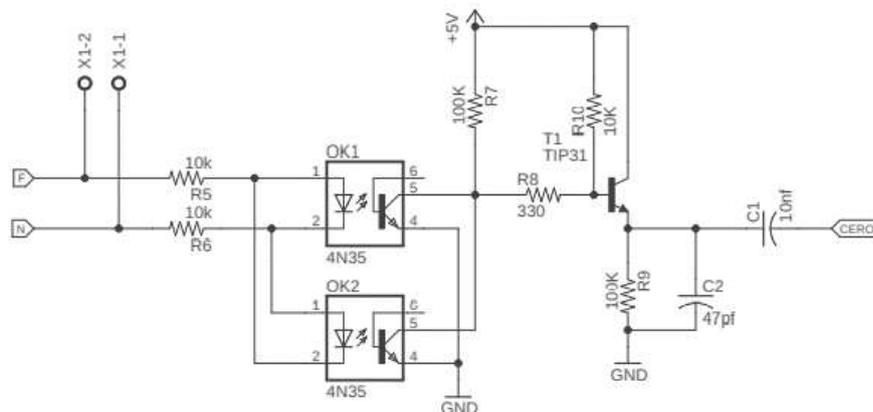


Figura 17-2: Circuito Detector de Cruce por Cero

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.2.2.1. Circuito de disparo del Triac

Para el circuito de disparo del Triac se utilizó un optoacoplador MOC3020 disponible en el mercado que permite realizar un aislamiento óptico entre los circuitos de baja y el de alta potencia, para ello se envía una señal de entrada emitida por microcontrolador al optoacoplador que activa el Triac y enciende la lámpara con 110V en AC.

En la Figura 18-2 podemos observar el circuito de disparo del Triac en el que se ha conectado una resistencia de 100Ω como protección para el led interno del optoacoplador.

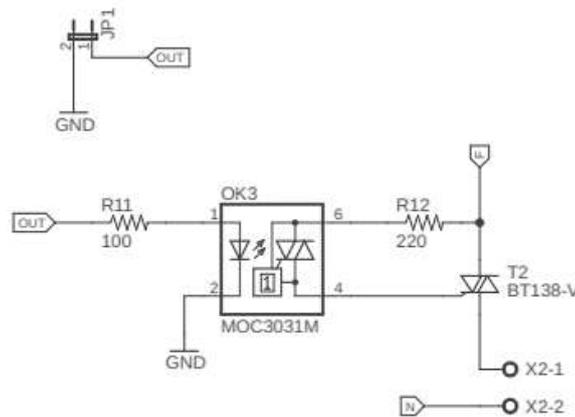


Figura 18-2: Circuito de disparo del Triac.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.2.2.2. Implementación del cruce por cero y disparo del Triac

Una vez diseñados los dos circuitos se realizó la implementación en el protoboard del circuito eléctrico para el cual se fue necesario los materiales que se muestran en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Materiales para la implementación del circuito eléctrico de potencia.

| Descripción | Cantidad |
|------------------------------|----------|
| Optoacoplador 42N35 | 2 |
| Optoacoplador MOC3020M | 1 |
| Transistor TIP31 | 1 |
| Triac BT138V | 1 |
| Capacitor cerámico 47pF | 1 |
| Capacitor electrolítico 10nF | 1 |
| Resistencias 100Ω | 1 |
| Resistencia 220Ω | 1 |
| Resistencia 330Ω | 1 |
| Resistencia 10KΩ | 4 |
| Potenciómetro 100KΩ | 1 |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Figura 19-2 se muestra el circuito eléctrico de cruce por cero y disparo del Triac en el protoboard utilizando los materiales descritos en la Tabla 5-2.

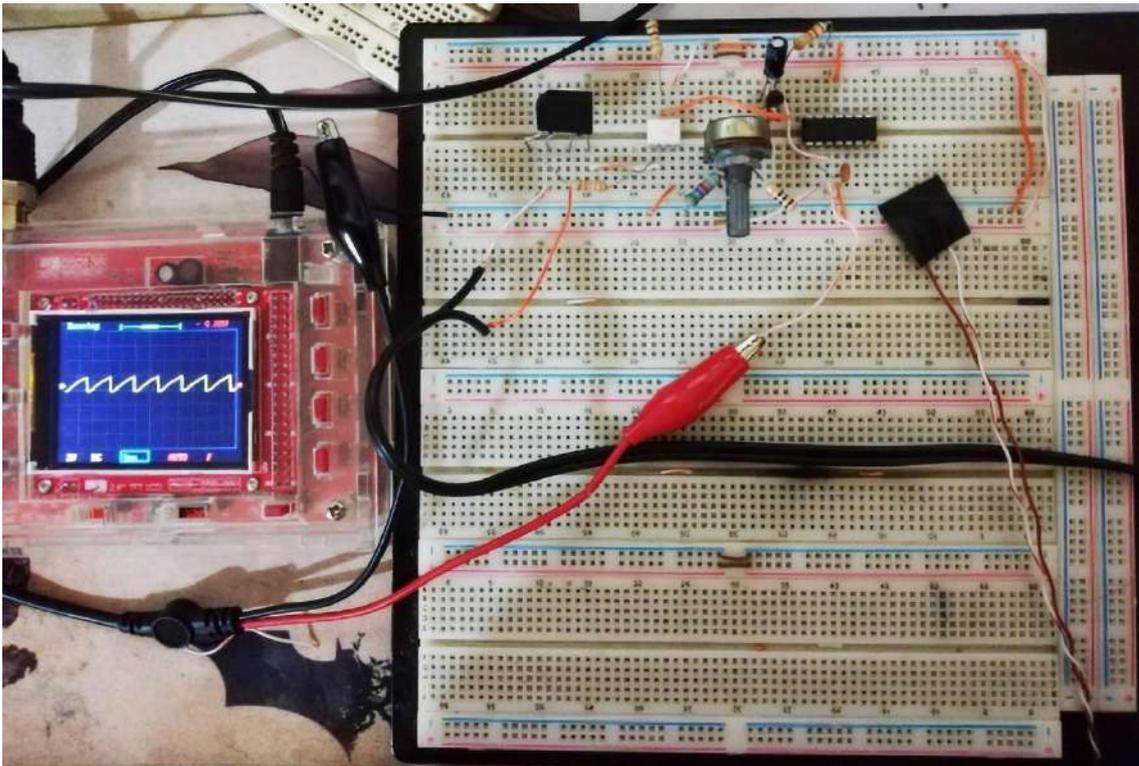


Figura 19-2: Implementación del circuito eléctrico de potencia.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

Con la ayuda del osciloscopio se pudo apreciar las formas de onda senoidal en un ángulo de disparo de: 10° , 45° y 150° para comprobar el funcionamiento del sistema implementado como se observa en la Figura 20-2.

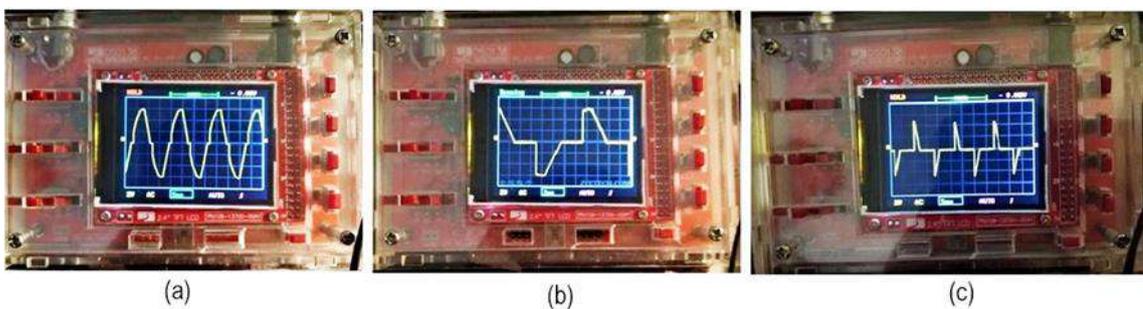


Figura 20-2: (a) Disparo de 10° , (b) Disparo de 45° , (c) Disparo de 150° .
Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.2.3. Circuito de pantalla LCD 16X2

En la Figura 21-2 se realizó un circuito básico que está conformado por una resistencia de 330Ω que permite regular la entrada de alimentación del LCD y una resistencia variable de $10k\Omega$ que regula el contraste de la pantalla.

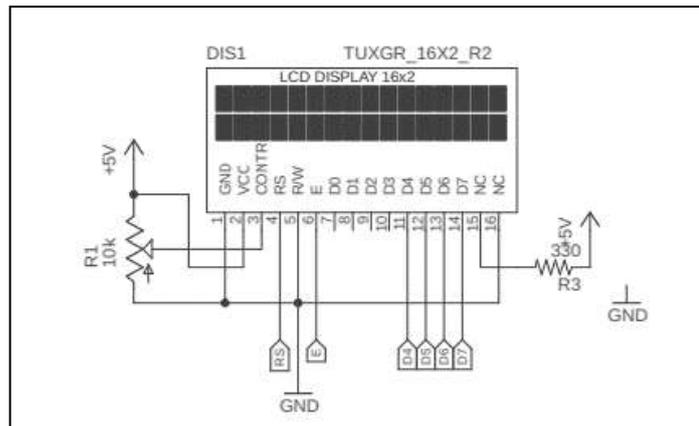


Figura 21-2: Circuito de pantalla LDC

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.3. Diseño e implementación de los sistemas de control

Para realizar el diseño de los sistemas térmicos con controladores ON-OFF, PI y PID se propuso el esquema de la Figura 22-2 en el que se presenta las etapas de procedimiento. En la primera etapa se obtiene el modelo de la planta a través de la herramienta de identificación Toolbox Ident y el diseño de los controladores con sus respectivas simulaciones, en la segunda etapa se realizó la implementación en tiempo real de cada uno de los controladores en el sistema térmico y se afina los parámetros de sintonía de ser requerido. Por último, en la tercera etapa de verificación del diseño se comprueba el comportamiento del sistema según las condiciones de diseño.

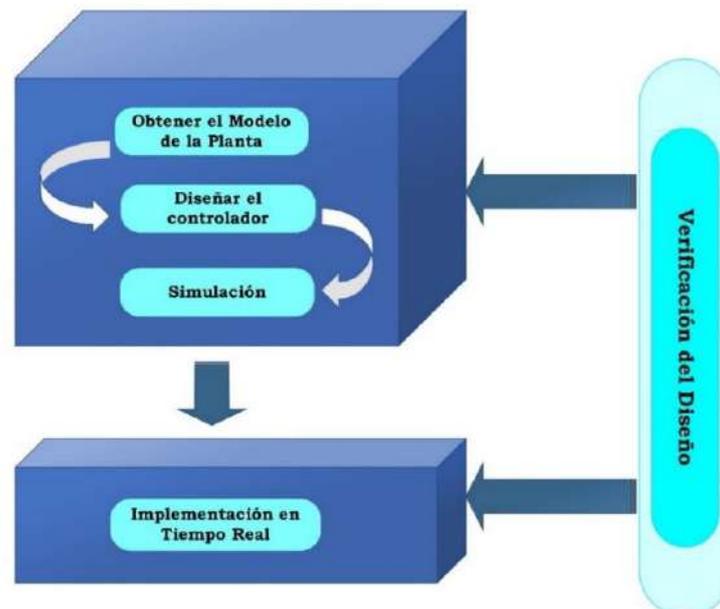


Figura 22-2: Etapas para el diseño de los sistemas de control.

Realizado por: Cuji, J. 2021

2.3.1. Modelo de la planta

Para identificar la función de transferencia de la planta se procedió a obtener la curva de temperatura total del sistema en condiciones nominales mediante los datos de temperatura proporcionado por los sensores. Se encendió el deshidratador por un periodo de tiempo de 30 min tomando en cuenta que este tipo de sistemas poseen una dinámica lenta, después se receptaron los datos experimentales en un intervalo de 3 segundos y partiendo con una temperatura ambiente de 20 °C, posteriormente en una hoja de cálculo de Excel se obtuvo la curva (temperatura vs tiempo) como muestra en la Figura 23-2.

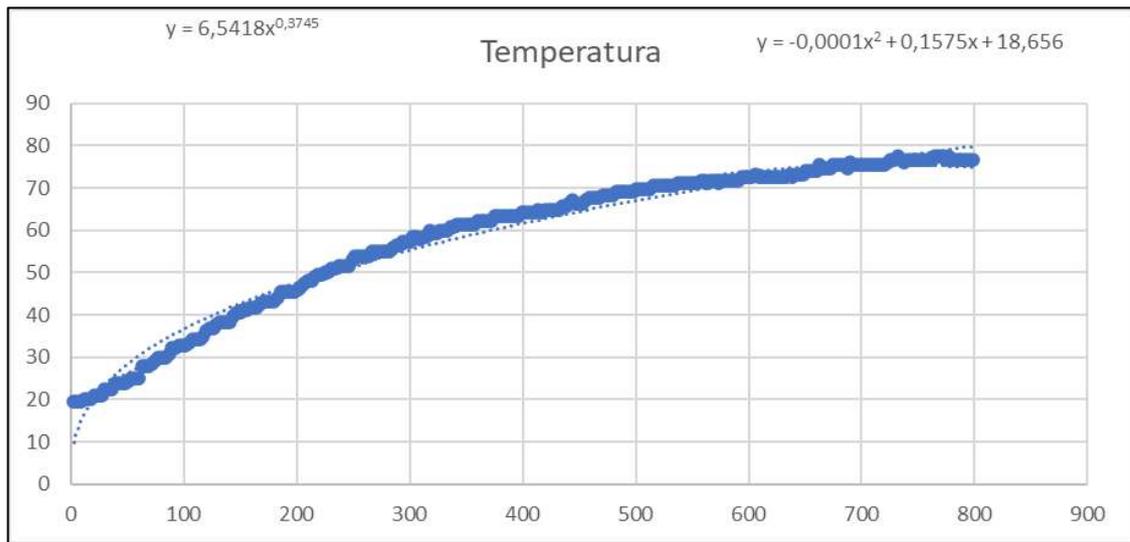


Figura 23-2: Datos graficados en Excel del sistema térmico
Realizado por: Cuji, J. 2021.

Un sistema térmico por general es un modelo de primer orden que da una respuesta monótona creciente sin oscilaciones que se representa con la Ecuación 4-2. Para el modelado de la planta se utilizó el método de identificación clásico aplicando una señal escalón como señal de prueba. Esta función es la más empleada para este tipo de planta ya que permite obtener modelos sencillos y exactos.

Ecuación: 4-2: Función de transferencia de la planta.

$$G(s) = \frac{K e^{-t_d s}}{\tau s + 1} \quad (4-2)$$

Mediante el uso de la herramienta de identificación Toolbox Ident Real-Tiemer de Matlab se llevo a cabo la prueba con los datos experimental para obtener la función de transferencia de la

planta. En la Figura 24-2 se observa la respuesta del sistema ofrecido por la planta con un escalon de amplitud 1.

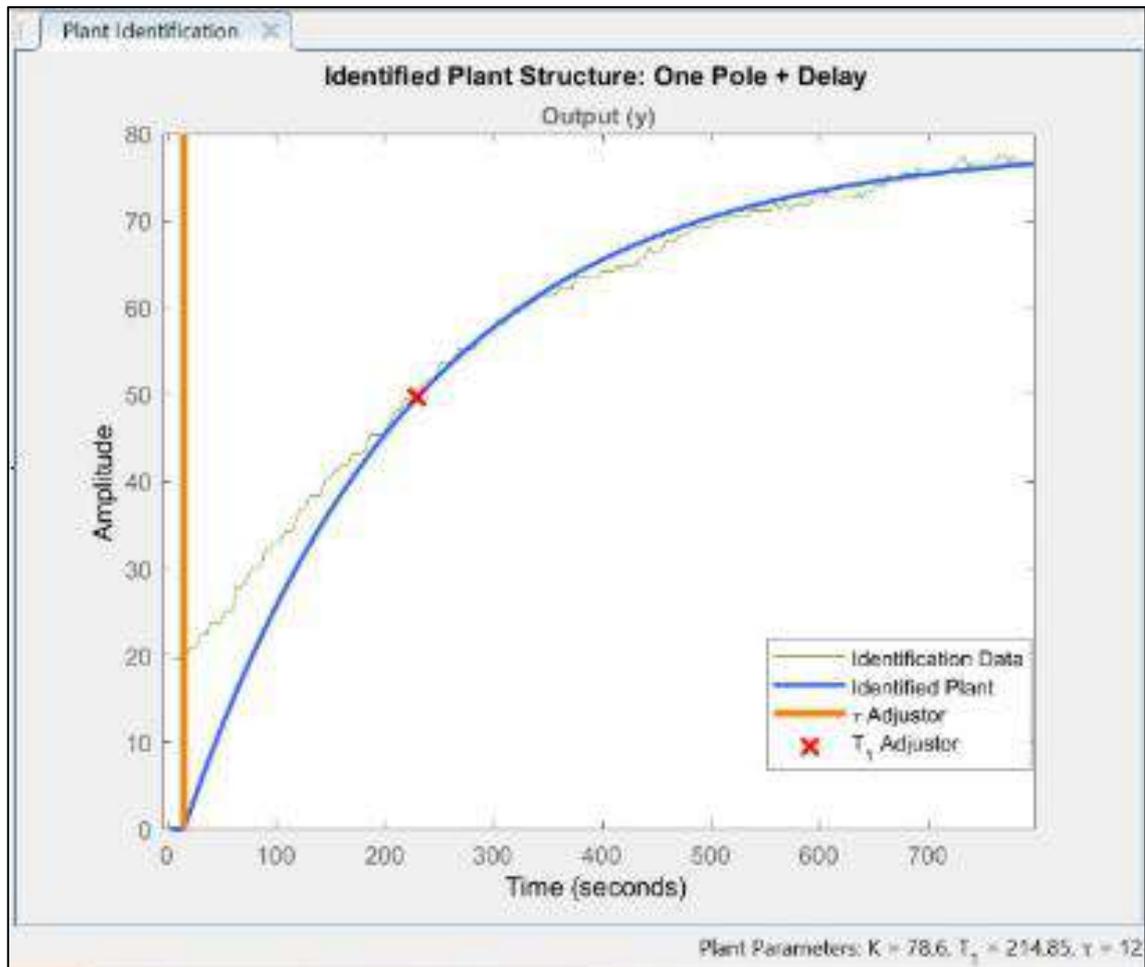


Figura 24-2: Obtención de la Función de Transferencia de la Planta.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

Es evidente que el rango de operación de la planta no es lineal, por lo que se puede obtener la función de transferencia mediante la Ecuación 5-2 donde los parámetros de la planta están dados por: la ganancia del sistema $K= 78.6$, el tiempo de retardo $t_d=12s$ y tiempo de estabilización $\tau = 214.85s$, obteniéndose la siguiente función de transferencia.

Ecuación: 5-2: Cálculo de la función de transferencia de la planta.

$$G(s) = \frac{78.6 e^{-12s}}{214.85s + 1} \quad (5-2)$$

2.3.2. Diseño de los controladores

Para el diseño de los controladores en el sistema de temperatura es importante analizar las condiciones y requerimientos de diseño. Se sabe que este tipo de sistemas tiene una respuesta lenta creciente y que los valores extremos en el rango de la temperatura deben tener un margen de error aceptable para la planta. Por ello en la arquitectura del sistema térmico se ha considerado un control en lazo cerrado (retroalimentado) como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 25-2, está conformado por: controlador automático (On-Off, PI o PID), el actuador (Niquelina), la planta (Deshidratador) y el sensor (RTD Pt100).

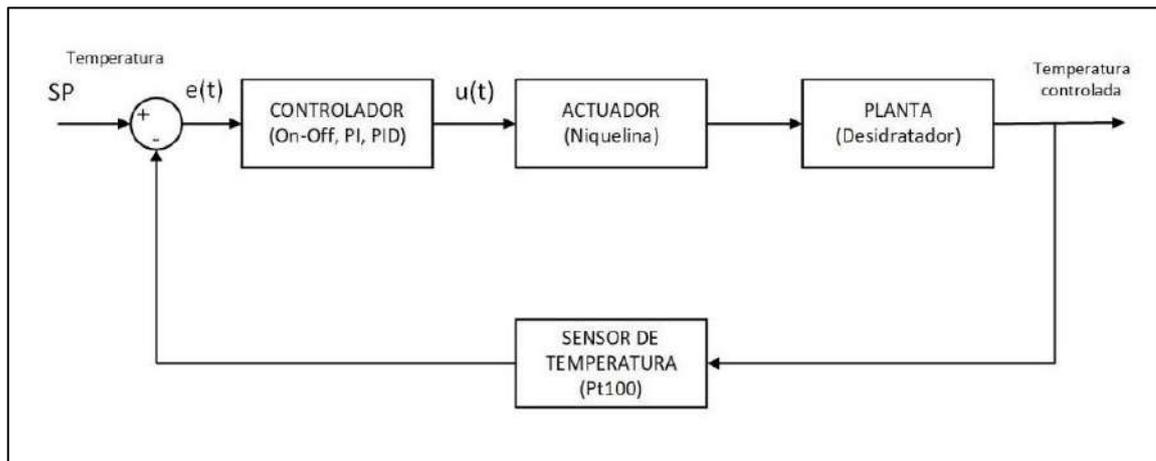


Figura 25-2: Diagrama de bloques en lazo cerrado del sistema.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.3.2.1. Modelamiento del sistema de control On-Off

En la Figura 26-2 se muestra las etapas que conforman el modelamiento de un sistema térmico con controlador On-Off, para ello se ha propuesto por simplicidad utilizar una tarjeta programable. El sistema estará conformado por un sensor la temperatura que conforma el elemento primario de regulación y la etapa de potencia como elemento final de regulación.

Para la regulación de la temperatura se ha optado por un comparador con histéresis igual a 1 que permite ajustar el sistema a las condiciones deseadas. Cuando existe una diferencia importante entre el tiempo de encendido y apagado o en otras palabras cuando la histéresis es grande la desviación de la variable de control con respecto al valor deseado es grande por lo que la conmutación de encendido y apagado no es tan frecuente.

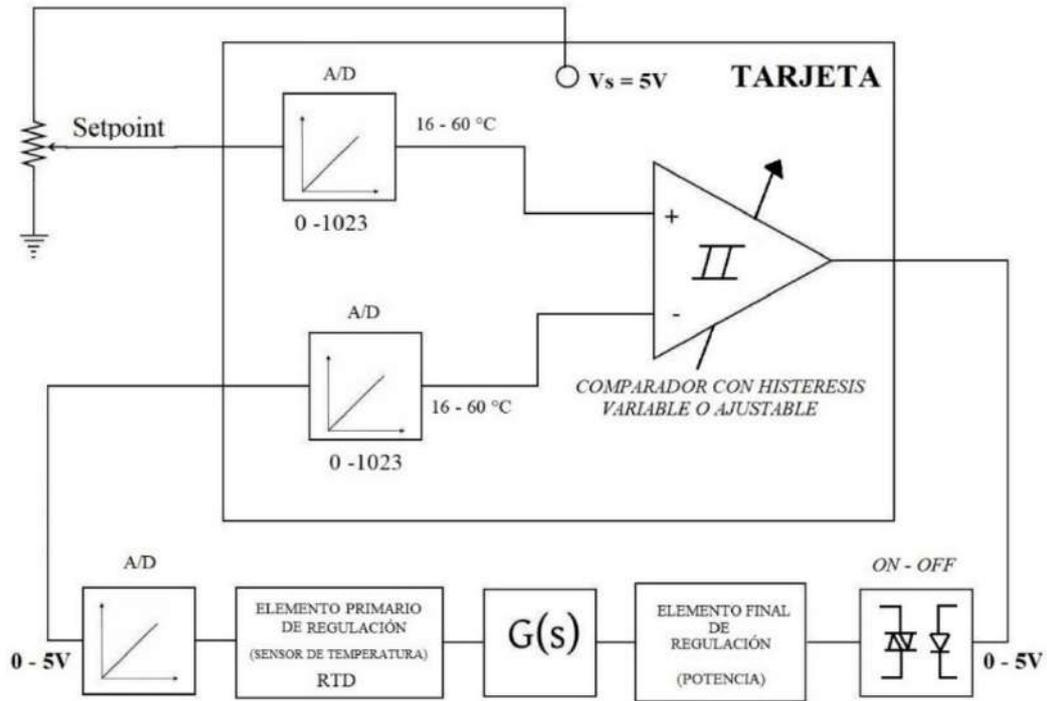


Figura 26-2: Modelamiento del sistema con controlador On-Off.
 Realizado por: Cujj, J. 2021.

Por otra parte, si se disminuye la histéresis la amplitud de oscilación de salida se reduce aumentando la cantidad de conmutaciones de encendido y apagado, de tal manera que podría llegar a ser perjudicial y aceleraría el desgaste de los componentes. Con estas consideraciones se realizó la programación del controlador On-Off en simulink de Matlab en conjunto con la función de transferencia de la planta como se muestra en la Figura 27-2.

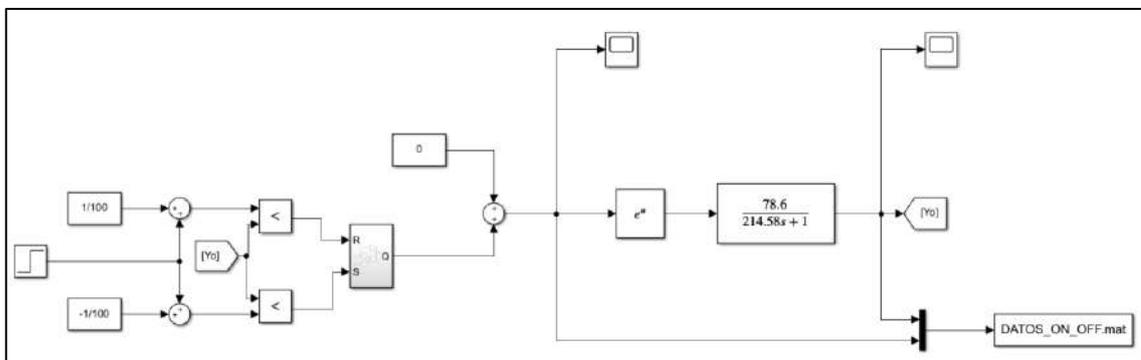


Figura 27-2: Simulación del Controlador ON-OFF.
 Realizado por: Cujj, J. 2021.

En la Figura 28-2 se muestra que la temperatura se estabiliza en un valor aproximado de 78.6 °C en un tiempo de-- con un controlador On-Off.

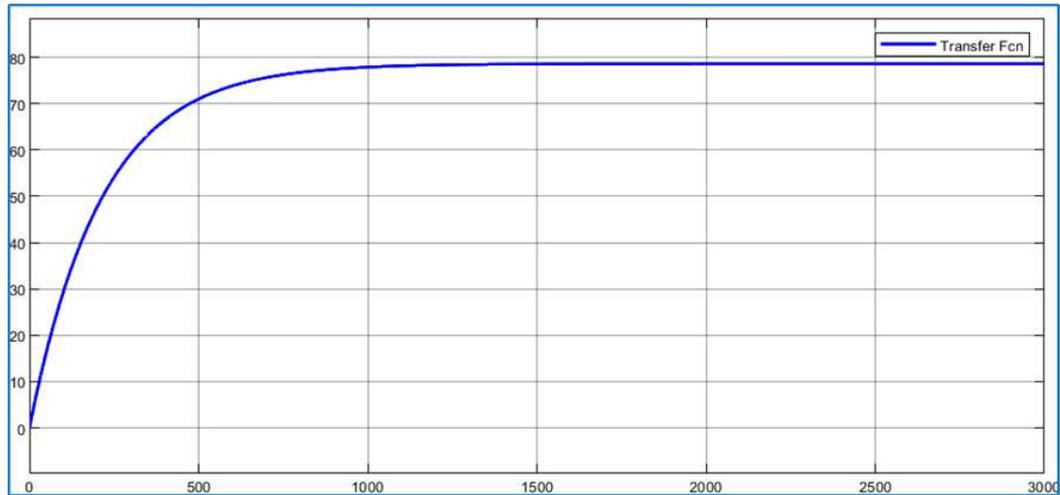


Figura 28-2: Respuesta del sistema con controlador On-Off.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

2.3.2.2. Modelamiento de los sistemas de control PI y PID.

Para modelar el sistema térmico con controladores PI y PID de igual manera que en el caso anterior se ha considerado utilizar una tarjeta programable. El sistema tendrá un elemento primario de regulación (Sensor de temperatura) y un elemento final de regulación (Potencia) que permite controlar el sistema. En la Figura 29-2 se ilustra el modelamiento del sistema térmico PI, esta estructura también es considerada para el sistema de control PID ya que cumple con las mismas condiciones.

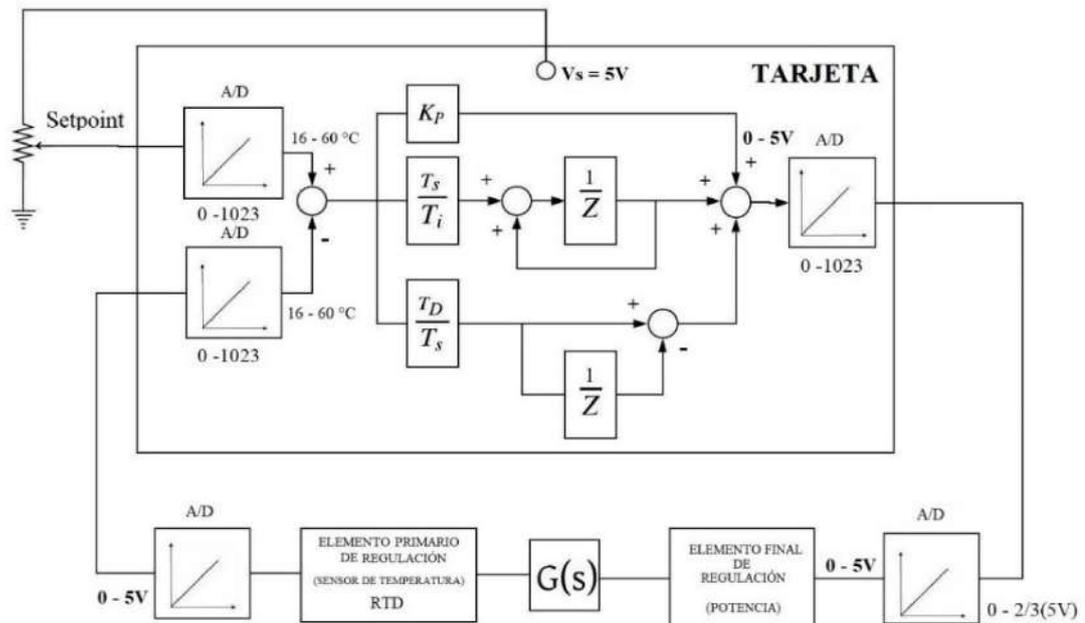


Figura 29-2: Modelamiento de un sistema térmico con controlador PID
Realizado por: Cuji, J. 2021.

Para determinar los valores de las constantes de ajuste de los controladores PI y PID se eligió la técnica empírica de sintonización el método de Ziegler-Nichols a la respuesta de planta con una entrada escalón unitario. En la Tabla 6-2 se puede apreciar los parámetros de sintonización del controlador por el modelo matemático de Ziegler-Nichols.

Tabla 6-2: Sintonización del controlador por el método de Ziegler-Nichols.

| Controlador | K_P | T_I | T_D |
|-------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| PI | $0.9 \frac{T}{L} = 0.9 \frac{214.855}{12} = 16.11$ | $\frac{L}{0.3} = \frac{12}{0.3} = 40$ | - |
| PID | $1.2 \frac{T}{L} = 1.2 \frac{214.855}{12} = 21.49$ | $2L = 2 * 12 = 24$ | $0.5L = 0.5 * 12 = 6$ |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Con los parámetros de sintonización se puede obtener los valores de K_i y K_d que posteriormente serán de gran utilidad para las respectivas simulaciones.

Ecuación: 6-2: Cálculo de las constantes de sintonización para el controlador PI:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{16.1141}{40} = 0.4028 \quad (6-1)$$

Ecuación: 7-2: Cálculo de las constantes de sintonización para el controlador PID:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{21.4855}{24} = 0.8952 \quad (7-2)$$

$$K_d = K_p * T_d = 21.4855 * 6 = 128.918$$

Una vez obtenidos los parámetros de controlador a través de las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols se obtuvo como resultado las expresiones de los controladores PI y PID sintonizados respectivamente.

Ecuación: 8-2: Cálculo de la función de transferencia del controlador PI:

$$G(s)_{PI} = \frac{16.11s + 0.40}{s} \quad (8-2)$$

Ecuación: 9-2: Cálculo de la función de transferencia del controlador PID:

$$G(s)_{PID} = \frac{132.94s^2 + 21.49s + 0.895}{s} \quad (9-2)$$

Para diseño del sistema control se utilizó el método del lugar geométrico de las raíces mediante el uso de la herramienta Matlab ya que permite encontrar la solución de manera sencilla, rápida y precisa, además esto permite aproximar la función de transferencia de la planta a una de tipo 1 que es lo más usual en sistemas térmicos. En la Figura 30-1 se muestra la ecuación característica de la planta mediante el lugar geométrico de las raíces.

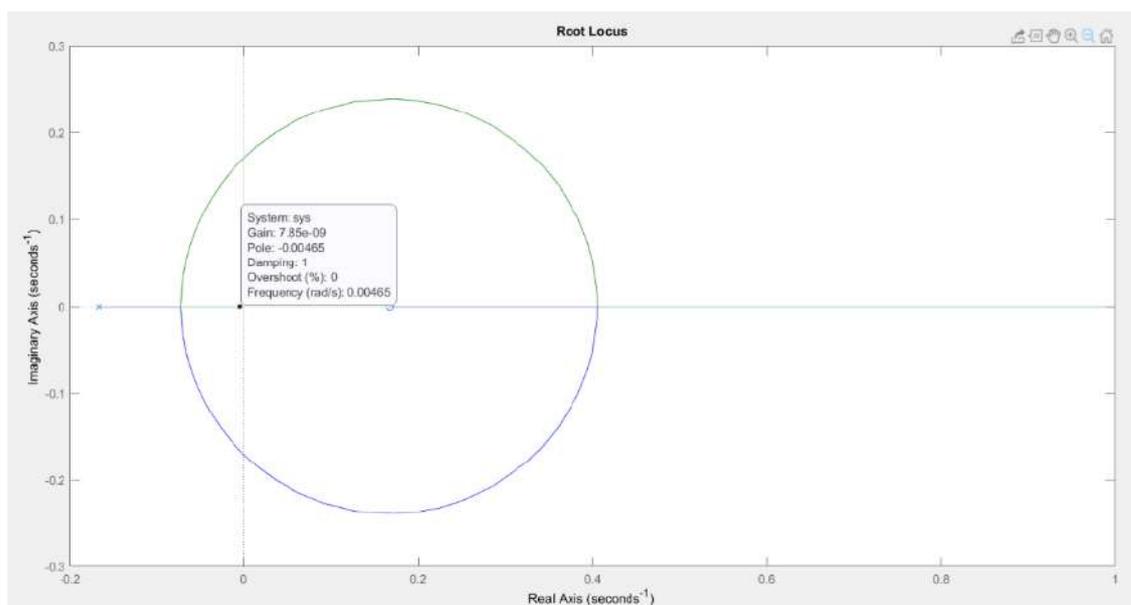


Figura 30-2: Ecuación característica en el lugar geométrico de las raíces.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Se observa en la figura anterior que el polo en lazo abierto se encuentra en la posición $s = -1/124.85$ y además en el sistema las raíces tocan el eje imaginario, en consecuencia, el sistema se comporta de manera oscilante.

Mediante la aproximación de Padé de primer orden del retardo puro se puede obtener un resultado más preciso para encontrar la ecuación característica del sistema en el tiempo de retardo de 12 seg. Para lograr que el sistema sea estable es necesario utilizar la técnica de cancelación de polos como se muestra en la Figura 31-2, en la que se debe eliminar un cero del controlador y situar un polo en lazo abierto en $s=0$ para encontrar el valor de la ganancia K_c con la cual el sistema se hace oscilatorio.

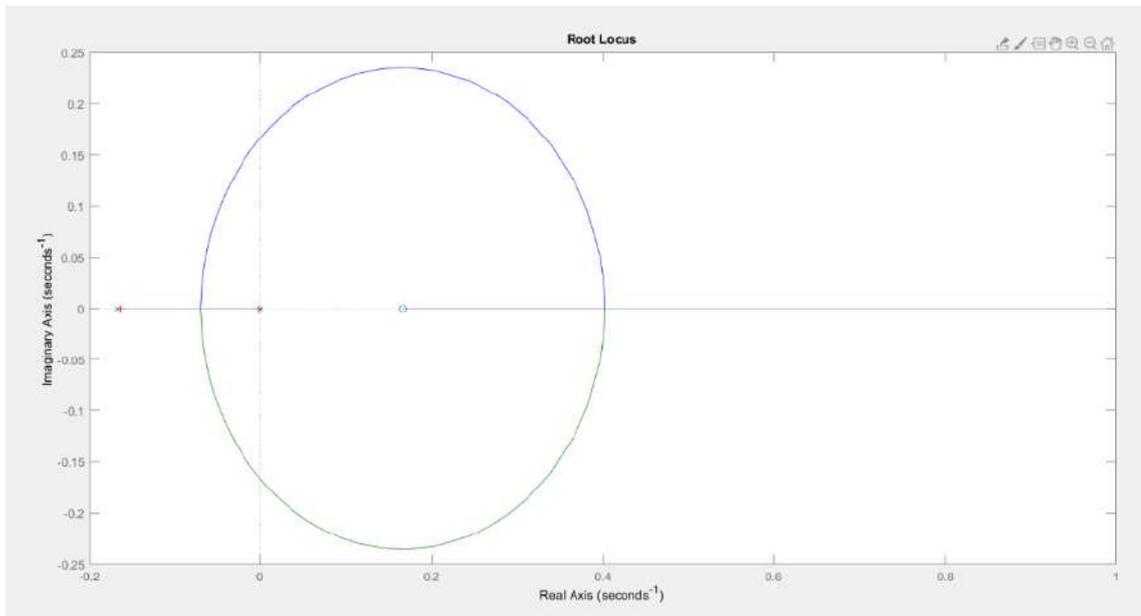


Figura 31-2: Obtención de la Ecuación característica con aproximación de Padé.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

Ecuación: 10-2: Cálculo de la función de transferencia con Padé.

$$G_c(s) = K_c \frac{214.85s + 1}{s} \quad (10-2)$$

Mediante el comando “rlocusfind” se pudo obtener el valor de la ganancia $K_c=0.01$ para obtener la siguiente Ecuación:

Ecuación: 11-2: Cálculo de la función de transferencia con $K_c=0.01$.

$$G_c(s) = \frac{2.1485s + 0.01}{s} \quad (11-2)$$

Con esto se puede demostrar que la frecuencia natural de oscilación depende del retardo puro para un sistema de primer orden como es el caso del sistema implementado.

2.4. Software de desarrollo para el sistema térmico

Una vez realizado el diseño de cada uno de los controladores es necesario utilizar una herramienta para el software de desarrollo de la comunicación, el proceso y control de temperatura con los diferentes controladores diseñados en el apartado anterior.

2.4.1. Programación en el software de desarrollo IDE de Arduino

La versión de software que se utilizó para el desarrollo del sistema fue IDE Arduino 1.8.5, en esta plataforma se creó el código con la ayuda de un diagrama de flujo de la programación general del sistema térmico. En la Tabla 7-2 se muestra una breve descripción de las librerías utilizadas en la programación.

Tabla 7-2: Librerías de Arduino para la programación.

| MÓDULOS | LIBRERÍA | DESCRIPCIÓN |
|----------------------|------------------------------|--|
| PLACA ARDUINO | # include <Wire.h> | Permite comunicar la placa Arduino con los dispositivos que trabajan mediante comunicación I2C |
| LCD | # include <LiquidCrystal.h> | Permite controlar la pantalla LCD |
| ADS1115 | #include<Adafruit.ADS1015.h> | Permite controlar convertidor A/D |
| PID | #include<PID> | Permite la sintonización del sistema de manera autónoma. |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Al dar inicio se hace el llamado se las librerías necesarias para la interacción con la placa Arduino y los módulos externos (LDC, ADS1115), también se ha requerido la librería PID de Arduino en la cual se puede ingresar las constante encontradas en el apartado anterior.

Se obtiene el valor de la temperatura promedio actual cada 8.33ms y se imprime en la pantalla LCD, luego se accede a un menú de opciones en donde el usuario debe seleccionar uno de los 3 tipos de controladores. En los tres casos se ha tomado como referencia 10 horas como tiempo de estimado para finalizar con el proceso de deshidratación. En el Gráfico 2-2 de muestra el diagrama de flujo empleado en la programación en IDE de Arduino.

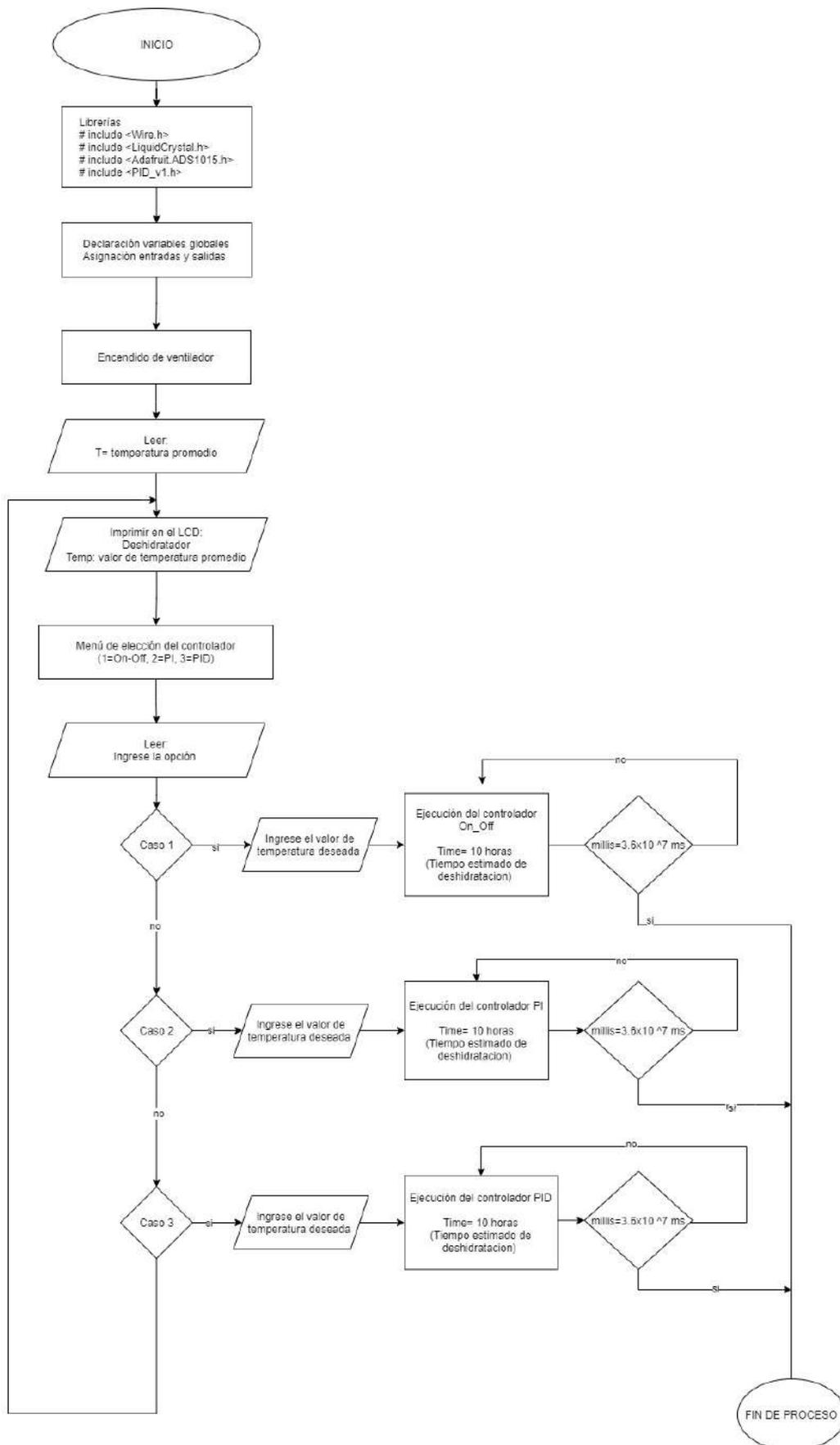


Gráfico 2-2: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema térmico.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En el Gráfico 3-2 se muestra el diagrama de flujo cuando el usuario selecciona la opción 1 (Controlador On-Off), al dar inicio se enciende inmediatamente el ventilador y se recepta el valor de temperatura en tiempo real, luego se envía una señal de control al actuador (niquelina).

Esta temperatura se compara con el valor de referencia en donde: si $T < 60^{\circ}\text{C}$ la niquelina se enciende, si $T = 60^{\circ}\text{C}$ se mantendrá encendida y si $T > 60^{\circ}\text{C}$ la niquelina se apagará. El ciclo del sistema térmico se repetirá de manera continua e intermitente por un lapso de 10 horas que es la hora estimada hasta que el tomate se deshidrate por completo.

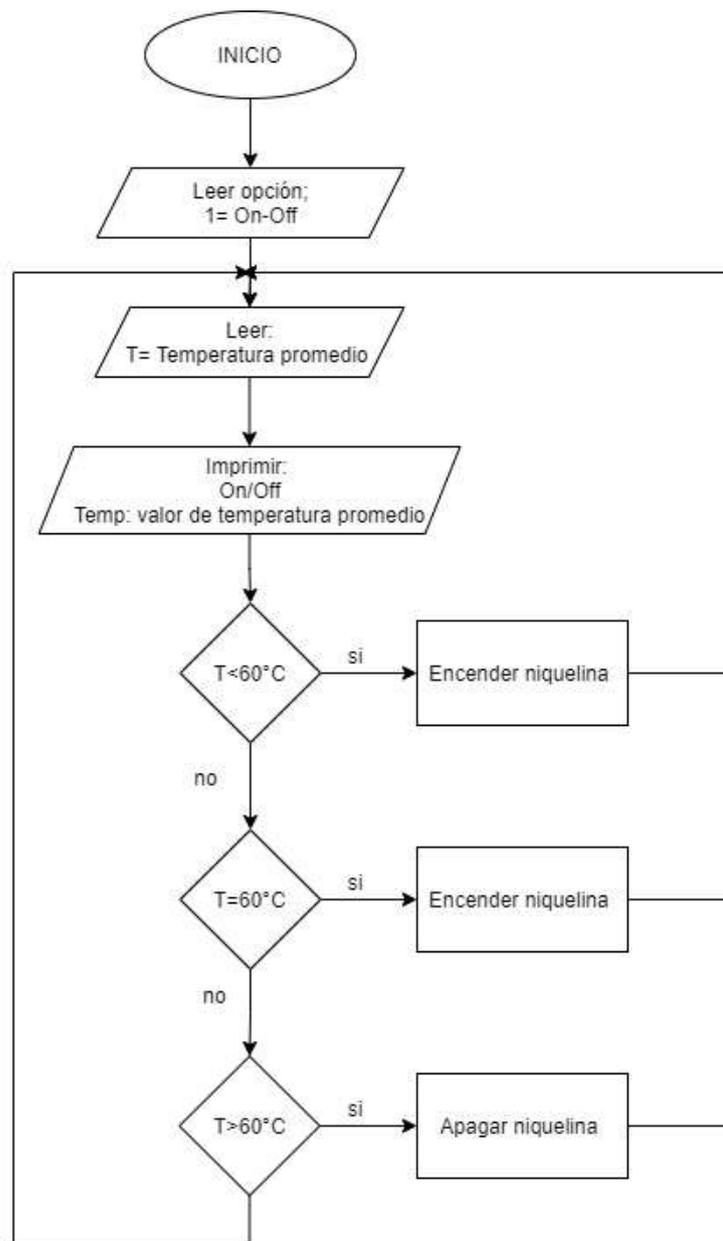


Gráfico 3-2: Diagrama de flujo para inicialización del controlador On-Off.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En el Gráfico 4-2 se muestra el diagrama de flujo cuando el usuario selecciona la opción 2 (Controlador PI), la dinámica del sistema es parecida al anterior pero en este caso la acción de control se encuentra en función de las constantes de sintonización $K_p=16.77$ y $K_i=0.4028$ encontradas en el diseño del controlador, es decir que control que se envía al actuador (niquelina) está gobernada por el cruce por cero, de tal manera que si hay menor temperatura disminuye el ángulo de disparo y permite mayor paso de corriente, mientras que a mayor temperatura aumenta el ángulo de disparo y por ende menor paso de corriente.

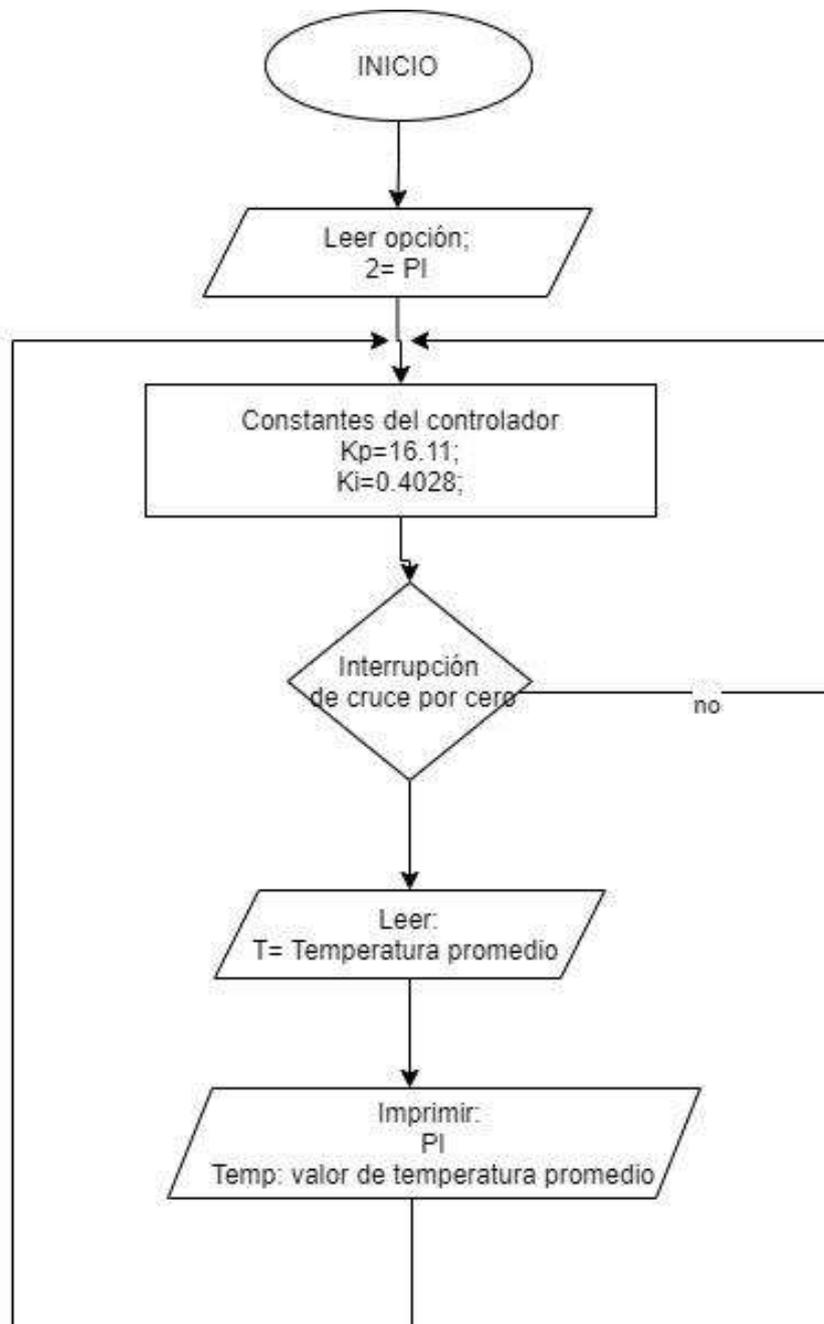


Gráfico 4-2: Diagrama de flujo para inicialización del controlador PI.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En el Gráfico 5-2 se muestra el diagrama de flujo cuando el usuario selecciona la opción 3 (Controlador PID), el comportamiento del sistema en este caso también está gobernado por el cruce por cero como el controlador PI pero las constantes de sintonización vienen dadas por $K_p=21.49$, $K_i=0.8952$ y $K_d=128.918$ que activaran o desactivaran el actuador (niquelina). En este caso el efecto diferencial hace que los cambios de temperatura con esta acción de control son más oscilantes que la del controlador anterior.

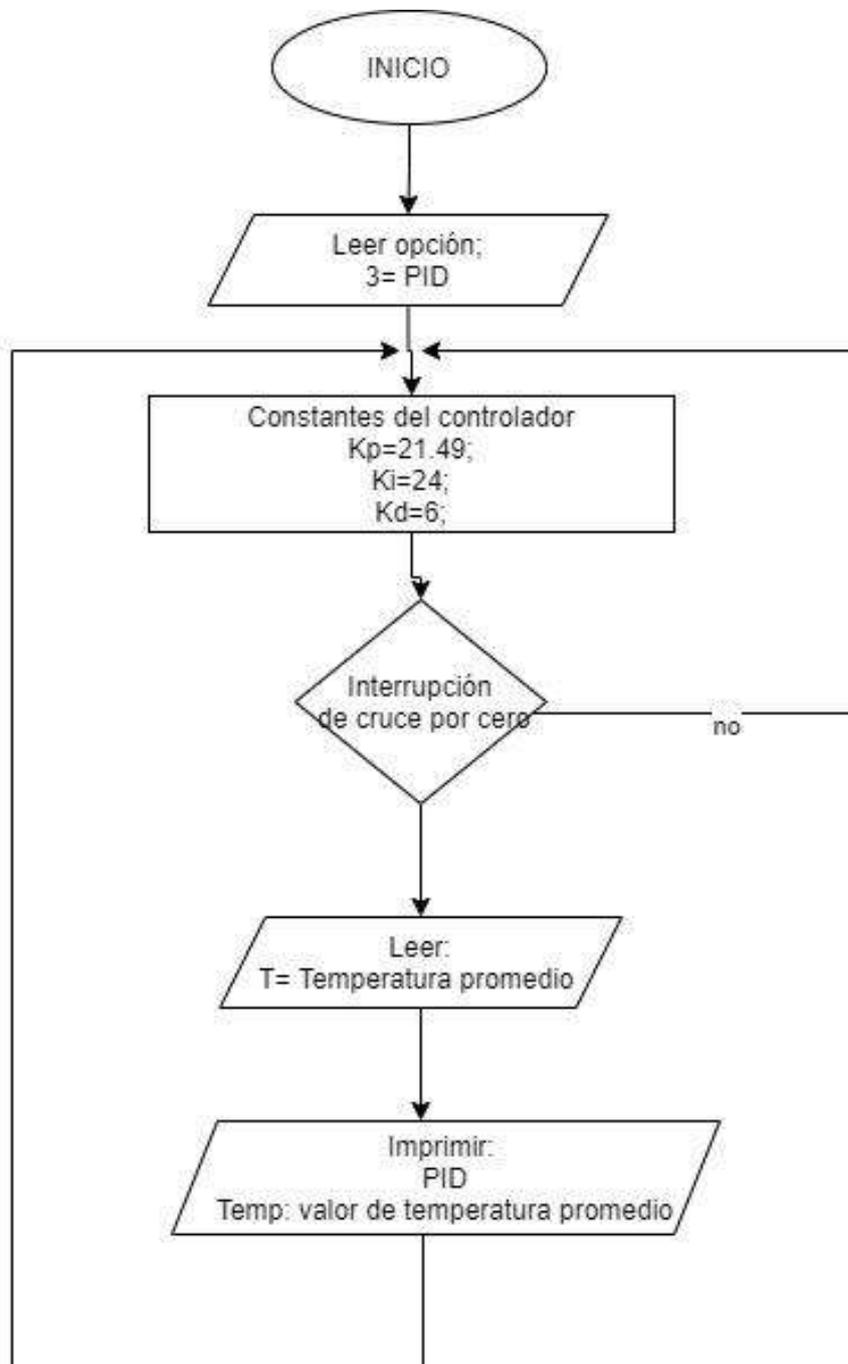


Gráfico 5-2: Diagrama de flujo para inicialización del controlador PID.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Figura 32-2 se muestra la captura del monitor serial de Arduino, en el que se visualiza las opciones de controlador.



```
COM3 - PuTTY
*****
SELECCIONE UN TIPO DE CONTROL
1. CONTROL ON-OFF
2. CONTROL PI
3. CONTROL PID
*****
█
```

Figura 32-2: Menú de opciones en el monitor serial de Arduino.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

CAPITULO III

3. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

En este capítulo se lleva a cabo la descripción de las pruebas realizadas en el deshidratador una vez realizado el acoplamiento del circuito eléctrico y la distribución de los sensores Pt100 en el electrodoméstico, los parámetros establecidos para la evolución de los controladores en el proceso están basados en: el consumo de potencia en el circuito eléctrico, el análisis de respuesta transitoria y estacionaria en cada caso, el porcentaje de humedad que contiene el tomate en fresco y el alimento en seco y la calidad del producto final. Para estas pruebas se estableció deshidratar la misma cantidad de tomate en un periodo de 10 horas, que es el tiempo estimado para obtener el producto final. Con esta evaluación se podrá comprobar el funcionamiento correcto del sistema térmico y que controlador es óptimo para el proceso de deshidratación.

3.1. Acoplamiento del circuito eléctrico al deshidratador

Una vez realizado el diseño e implementación de placa en PCB del circuito eléctrico ver Anexo 2, se realizó el acoplamiento al deshidratador como se observa en la Figura 1-3.

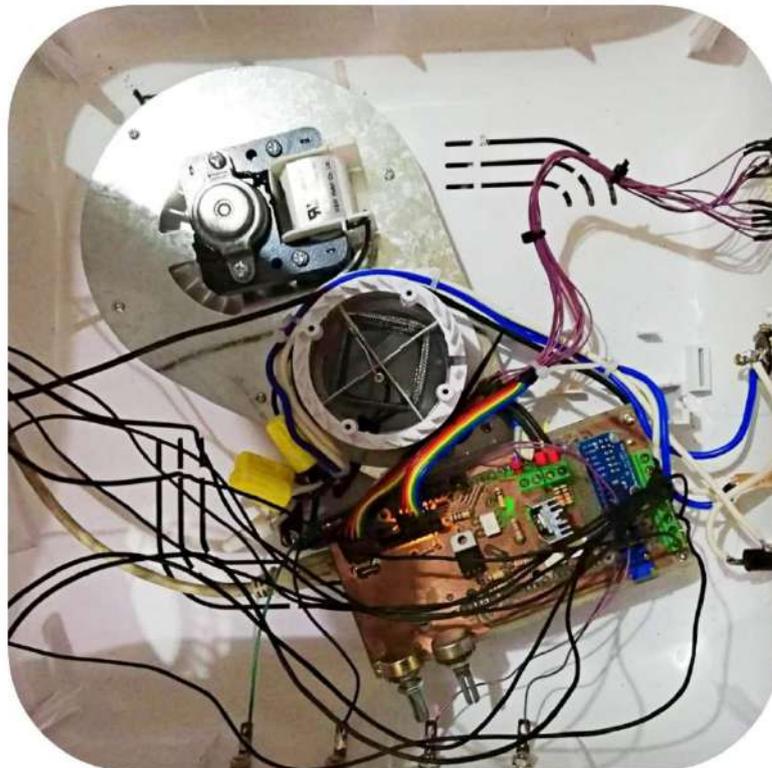


Figura 1-3: Acoplamiento del circuito eléctrico al deshidratador.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

3.1.1. Distribución de los sensores Pt100 en el deshidratador

Para el monitoreo de la temperatura en el deshidratador se instaló 4 sensores Pt100 distribuidos a 45° en 4 puntos estratégicos como se muestra en la Figura 2-3, de tal manera que pueda medir el aire caliente que circula por todo el sistema tiempo real. Además, permitirá evaluar si los diferentes controladores están brindando el control de temperatura deseado con respecto al valor deseado.

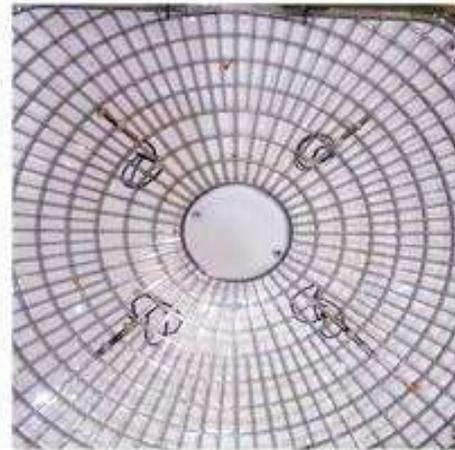


Figura 2-3: Distribución de los sensores Pt100.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

3.2. Verificación de los controladores en el sistema térmico.

Para determinar el desempeño del sistema térmico con cada uno de los controladores y verificar cual es óptimo para el proceso de deshidratación se realizó una evolución final con los siguientes parámetros: consumo de potencia del sistema eléctrico, el análisis de la curva de estabilidad de temperatura vs tiempo, el análisis de la curva de estabilidad de temperatura vs tiempo, control de calidad del tomate deshidratado y control de pérdida de peso del producto deshidratado.

3.2.1. Consumo de potencia del sistema eléctrico.

Esta prueba se realizó con la finalidad de determinar el consumo de energía en el proceso de deshidratación. Para determinar la potencia máxima de consumo fue necesario utilizar la siguiente ecuación:

Ecuación: 1-3: Cálculo de la potencia máxima.

$$P = I * V \quad (1-3)$$

El voltaje empleado para el cálculo de la potencia viene dado por 113V que fue obtenido con la ayuda de un multímetro conectado al suministro de la red eléctrica del domicilio, mientras que el valor de corriente máxima que circula por el sistema eléctrico en cada caso se determinó utilizando un amperímetro como se muestra en la Figura 3-3, esta medición se realizó cuando la temperatura del sistema se encontraba en estado estable.



Figura 3-3: Medición de la corriente máxima en el sistema térmico.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la Tabla 2-3 se observa el cálculo de las potencias máximas de consumo eléctrico en cada caso.

Tabla 1-3: Consumo energético del sistema eléctrico.

| CONTROLADOR | CONSUMO DE CORRIENTE (A) | CONSUMO DE POTENCIA (W) |
|-------------|--------------------------|-------------------------|
| On-Off | 1,5 | 169,5 |
| PI | 1,4 | 158,2 |
| PID | 1,3 | 146,9 |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Del análisis que se muestra en la Grafica 1-3 se puede determinar que el controlador PID es de menor consumo de corriente y potencia mientras que el controlador On-Off es el de mayor consumo de corriente y potencia.

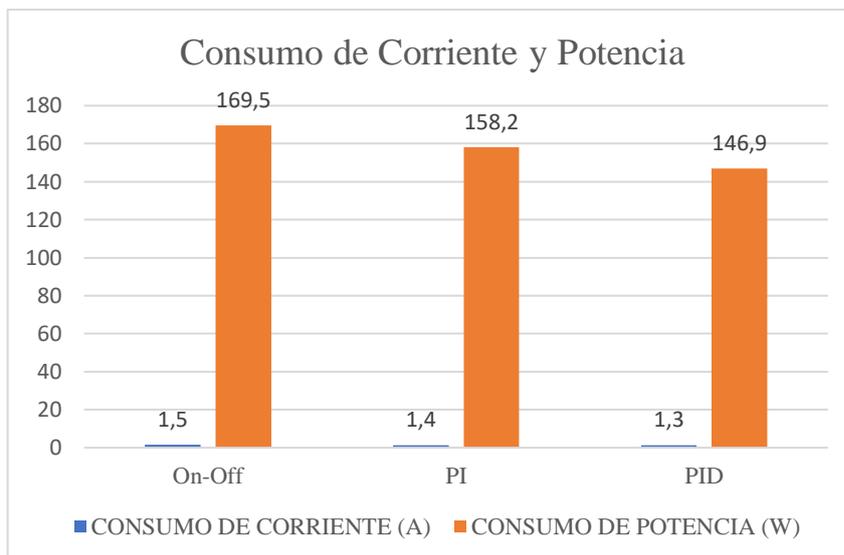


Gráfico 1-3: Consumo de corriente y potencia del sistema eléctrico.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

3.2.2. Análisis de la curva de estabilidad de Temperatura vs Tiempo

En el análisis de la curva de estabilización de la temperatura vs tiempo como se muestra en la Figura 4-3, se puede observar el comportamiento de la curva exponencial en cada tipo de controlador durante el tiempo de respuesta transitoria, estacionario y el tiempo de estabilización absoluto. La repuesta transitoria del sistema se evaluó durante 3.6×10^7 ms, tiempo en el que se demoró en deshidratar el tomate.

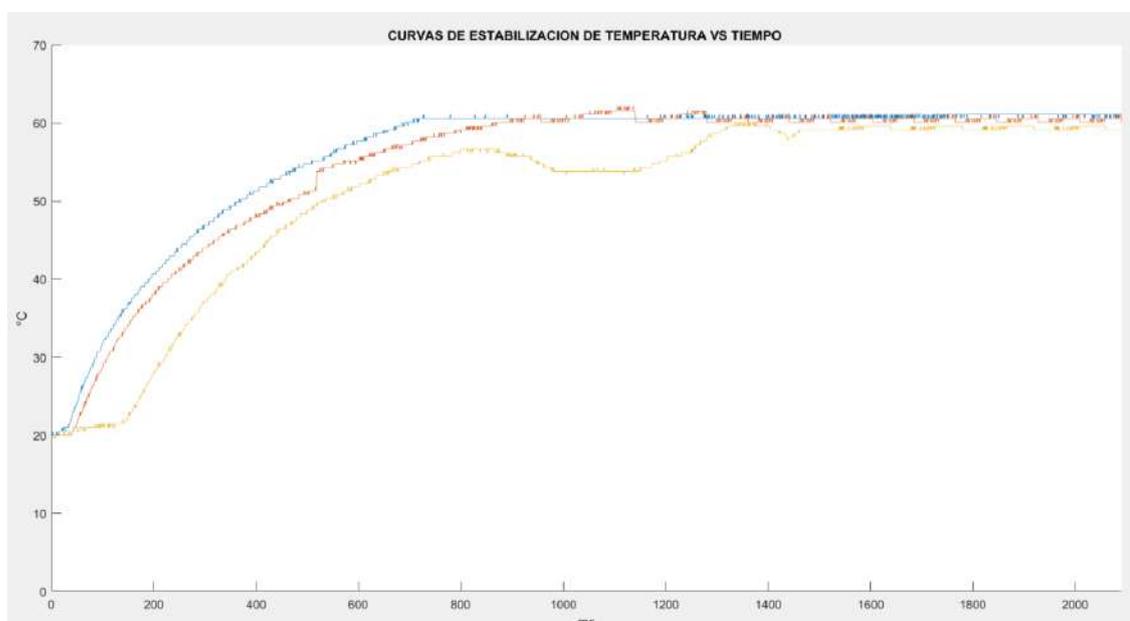


Figura 4-3: Curva de respuesta exponencial en estado transitorio del sistema.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

A continuación, en la Tabla 2-3 se detalla el comportamiento dinámico de los controladores.

Tabla 2-3: Comportamiento dinámico de los controladores

| Controlador | Señal | Rango de Temperatura (°C) | Tiempo en estado estacionario(ms) | Tiempo de estabilidad absoluta (ms) |
|---------------|----------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| On-Off | Azul | 60.6 - 61.1 | 12 | 710 |
| PI | Rojo | 60.2 - 61.1 | 40 | 1280 |
| PID | Amarillo | 59.1 - 59.6 | 124 | 1458 |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

De la tabla 2-3 se puede concluir que el controlador On-Off tiene una respuesta en estado estacionario de 12ms y se estabiliza en 710ms a una temperatura entre 60.6-61.1°C que se encuentra el rango establecido por otra parte, el controlador PI presenta una respuesta en estado estacionario de 40ms y se estabiliza en 1280ms a una temperatura entre 60.2-61.1°C que se encuentra el rango establecido, y finalmente en el controlador PID su respuesta en estado estacionario es de 124ms y se estabiliza en 1458 ms a una temperatura entre 59.1-59.6°C por debajo del rango establecido.

Del análisis de la Grafica 2-3 se puede determinar varios aspectos, que el controlador On-Off tiene un menor tiempo de estabilización entre una temperatura de 60-61.1°C en comparación al controlador PID entre 59.1-59.6°C por lo que no llega a estabilizarse en el valor deseado.

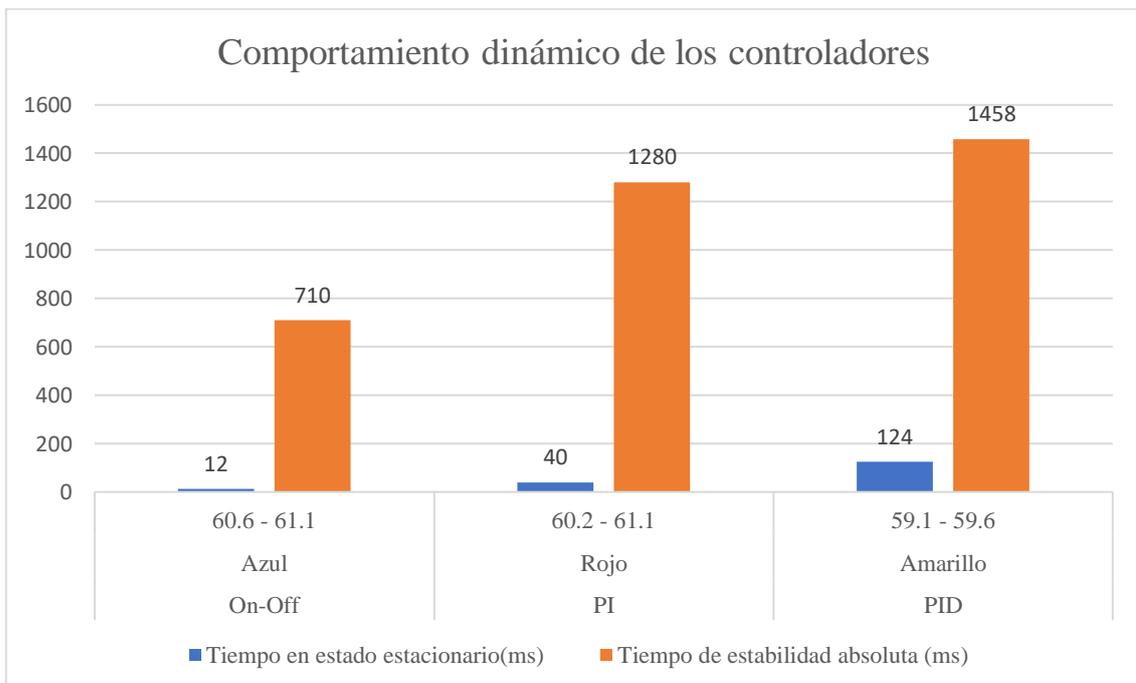


Gráfico 2-3: Comportamiento dinámico de los controladores.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En la figura 5-3 muestra la curva de respuesta de estabilidad absoluta del sistema.

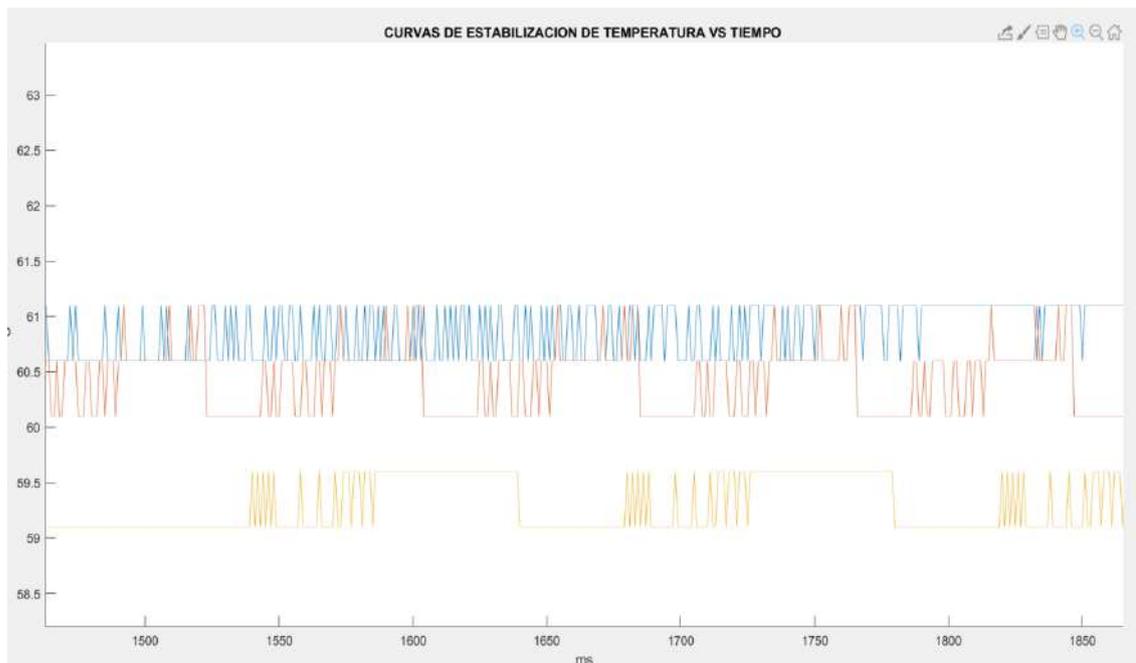


Figura 5-3: Respuesta de estabilización absoluta del controlador.

Realizado por: Cuji, J. 2021.

Analizando la Figura 5-3 se observa la respuesta la estabilidad absoluta con los diferentes tipos de controladores, es decir cuando en el sistema térmico la acción de control es estable y de la cual se obtiene que:

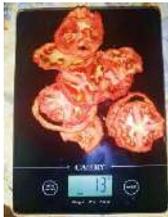
- El controlador On-Off se presenta una mayor acción de control de la temperatura, pero las conmutaciones excesivas en el sistema pueden acortar la vida útil de los componentes.
- El controlador PI se observa que la acción control hace que la temperatura se mantenga fluctuando de manera constante entre los extremos de la temperatura, además de puede ver claramente que existe una regulación permanente aceptable que no pone en riesgo la vida útil de los elementos a largo plazo.
- El Controlador PID la acción derivativa hace que el sistema tenga importantes problemas de implementación esto debido a perturbaciones externas asociada a la amplificación de las componentes frecuenciales del ruido en los sensores y por ende provocar que el sistema sea más oscilatorio. Esto a su vez provoca que la temperatura no llegue al valor deseado.

3.2.3. *Control de calidad del tomate deshidratado*

Una vez transcurrido el tiempo de deshidratación con cada uno de los controladores, se procedió a analizar el producto final y comparar las características que debe presentar un tomate correctamente deshidratado. La validación se realizó en un periodo de 7 días con la finalidad de determinar el aspecto físico una vez almacenado, las misma que se detalla en la Tabla 3-3. Esto

se consideró ya que apenas se finaliza el proceso de deshidratación los tomates en todos los casos manifiestan aspecto similar.

Tabla 3-3: Evaluación de las características físicas del tomate entero deshidratado.

| Controlador | Aspecto físico | Color | Olor | Sabor |
|-------------|--|--|-------------------------|-------------|
| On-Off |  | Rojo claro | Aroma propio del tomate | Ácido-dulce |
| PI |  | Rojo | Aroma propio del tomate | Ácido-dulce |
| PID |  | Rojo amarillento con rasgos de deterioro | Aroma rancio o acre | Insípido |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

3.2.4. Control de pérdida de peso del producto deshidratado

Los factores como el aspecto y la textura del producto final no son suficientes para definir si el alimento fue deshidratado correctamente, por ello se empleó el control de pérdida de peso del producto deshidratado. Para calcular el peso en seco de referencia que debe tener el tomate una vez deshidratado se emplea la Ecuación 2-3:

Ecuación: 2-3: Cálculo del rendimiento.

$$R = \frac{100\% - 95\%}{10\% - 8\%} \quad (2-3)$$

En donde:

Hf=95% humedad del producto fresco

Hs=8% humedad residual

Ecuación: 3-3: Cálculo del rendimiento del tomate.

$$R = 2.5\% = 0.025 \quad (3-3)$$

El peso en fresco del tomate que se tomó para todos los casos fue 471g y reemplazando en la Ecuación 3-3 tenemos:

Ecuación: 4-3: Cálculo del peso en seco.

$$P_s = R * P_f \quad (4-3)$$

Ecuación: 5-3: Cálculo del peso en seco del tomate.

$$P_s = 0.025 * 471g \quad (5-3)$$
$$P_s = \mathbf{11.76 g} \text{ Valor de referencia}$$

En la Tabla 4-3 se muestra el peso en seco de los tomates deshidratados en cada controlador.

Tabla 4-3:Control de pérdida de peso de tomate deshidratado.

| Controlador | Peso final (g) |
|--------------------|-----------------------|
| On-Off | 15 |
| PI | 13 |
| PID | 18 |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En el análisis de la Grafica 3-3 se observa que el proceso de deshidratación con el controlador PI permite una mayor extracción de humedad del tomate obteniéndose 13g de peso en seco a comparación del controlador PID en el que se obtuvo 18g de peso en seco, este exceso de agua en el tomate puede generar un crecimiento de hongos durante el almacenamiento.

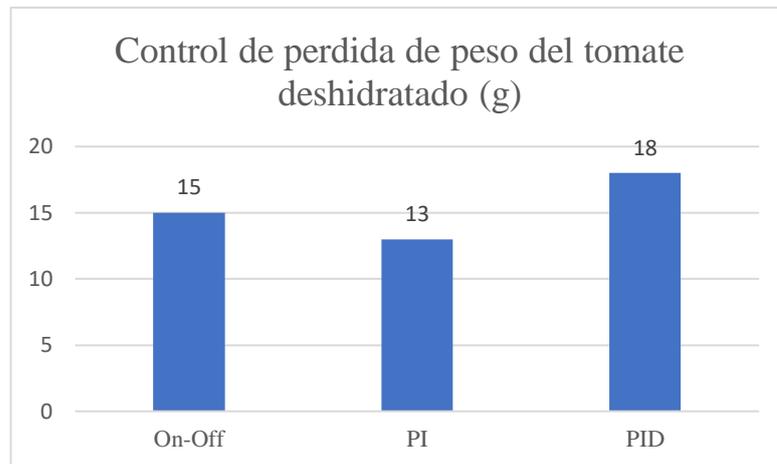


Gráfico 3-3: Control de pérdida de peso del tomate deshidratado.
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En conclusión, se determina que el sistema térmico con controlador PI es el más adecuado para realizar el proceso de deshidratación, es evidente que posee un tiempo de estabilización un poco lento en comparación al controlador On-Off, pero en el tiempo transitorio tiene una respuesta estable y no pone en riesgo la vida útil de los dispositivos, además que ofrece un producto de buena calidad y con una extracción de humedad aceptable en comparación a los otros tipos de controladores.

CAPITULO IV

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este capítulo se realiza el análisis de los costos realizados durante la implementación del sistema eléctrico en el deshidratador, para ello se realizó la Tabla 1-4 donde se detalla el costo de cada elemento adquiridos para la implementación de este proyecto.

Tabla 1-4: Costos de los elementos adquiridos para el sistema eléctrico.

| | DISPOSITIVOS | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO | PRECIO FINAL |
|--|-----------------------------------|----------|-----------------|-----------------|
| ACOPLAMIENTO | Deshidratador EZ-Store Ronco | 1 | \$97,00 | \$97,00 |
| | CARMY (Balanza) | 1 | \$18,00 | \$18,00 |
| | Sensores Pt100 2 hilos | 4 | \$5,00 | \$20,00 |
| | Arduino Mega 2560 | 1 | \$15,00 | \$15,00 |
| | ADS1115 (Convertidor A/D) | 1 | \$8,00 | \$8,00 |
| | LCD 16X2 | 1 | \$8,00 | \$8,00 |
| | TOTAL | | | |
| CIRCUITO DE POTENCIA | LM324N (Amplificador Operacional) | 2 | \$0,50 | \$1,00 |
| | Optoacoplador MOC3020M | 1 | \$0,85 | \$0,85 |
| | Resistencias de precisión 50Kohm | 4 | \$0,50 | \$2,00 |
| | Transistor TIP31 | 1 | \$1,00 | \$1,00 |
| | Triac BT138V | 1 | \$2,00 | \$2,00 |
| | Capacitor cerámico 47pF | 1 | \$0,10 | \$0,10 |
| | Capacitor electrolítico 10nF | 1 | \$0,10 | \$0,10 |
| | Resistencias 100Ω | 1 | \$0,05 | \$0,05 |
| | Resistencia 220Ω | 1 | \$0,05 | \$0,05 |
| | Resistencia 330Ω | 1 | \$0,05 | \$0,05 |
| | Resistencia 10KΩ | 4 | \$0,05 | \$0,05 |
| | Potenciómetro 100KΩ | 2 | \$0,35 | \$0,70 |
| | Borneras | 6 | \$0,20 | \$1,20 |
| | Pulsador | 1 | \$0,55 | \$0,55 |
| | Varios | 1 | \$30,00 | \$30,00 |
| TOTAL | | | | \$39,70 |
| COSTO TOTAL DEL SISTEMA ELÉCTRICO | | | | \$205,70 |

Realizado por: Cuji, J. 2021.

En base a los costos analizados en la tabla anterior se observa que el costo de los dispositivos para el acoplamiento es \$166 que equivale al 80.07% del costo total y el circuito de potencia con \$39.70 que equivale al 19.93%.

Cabe recalcar que si se realizara este dispositivo a gran escala podría reducirse el costo de implementación ya que obteniendo los elementos y dispositivos electrónicos al por mayor se disminuiría considerablemente el precio.

4.1. Comparación de costo con un dispositivo similar en el mercado

Para la comparación de costos se considero un dispositivo que reúne las mismas características eléctricas y de control que el deshidratador con el acoplamiento del sistema térmico diseñado en este proyecto. El deshidratador de acero inoxidable Colzer como se muestra en la Figura 4-1, con un precio de \$295 en el mercado posee un temporizador y control de temperatura con un termostato, ofrece un sistema de flujo de aire horizontal que funciona de forma estable, asegura un secado más uniforme.



Figura 1-4: Deshidratador Colzer.
Fuente: (Mercado Libre,2021)

En la Tabla 2-4 se muestra a detalle las especificaciones del funcionamiento del deshidratador Colzer.

Tabla 2-4: Especificaciones técnicas del deshidratador Colzer.

| Especificaciones | Deshidratador Colzer | Sistema Térmico |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Voltaje | 110V 50/60Hz | 110V 60Hz |
| Potencia: | 500W | 146.9-169.5 W |
| Temperatura ajustable | 20-90°C | 16-80°C |
| Tiempo programable | 0-24 horas | 0-24 hora |
| Panel de control | Digital | Digital |
| Sistema de circulación de aire | Ventilador vertical | Ventilador horizontal |

Fuente: (Mercado Libre,2021)
Realizado por: Cuji, J. 2021.

En comparación con el deshidratador al cual se le realizó el acoplamiento del sistema térmico diseñado con un valor total de \$205.70 y el deshidratador Colzer con un valor de \$295 excede en un 30.27% del costo total del sistema térmico por lo que se concluye que implementar este sistema térmico es de bajo costo y similares características de funcionamiento. Al construirlo a gran escala podría representar un electrodoméstico accesible para el proceso de deshidratación de tomate, así como también de varios alimentos.

Además, el deshidratador Colzel genera un consumo de potencia de 500W y el sistema implementado solo se requiere máximo 169.5W lo que significa un bajo consumo eléctrico.

CONCLUSIONES

- En referencia a los valores de potencia calculados se concluye que el sistema térmico con el controlador PID representa un bajo consumo energético con una potencia máxima de 146.5W en comparación al controlador On-Off con 169.5W y al controlador PI con 158.2W.
- En base al criterio de selección del controlador se concluye el controlador PI es ideal para el control de temperatura en un sistema térmico, aunque tarda un poco más en estabilizarse que el controlador On-off presenta una mejora en la capacidad de seguimiento para la respuesta transitoria y una respuesta estacionaria satisfactoria en la regulación de la acción de control fluctuando a una temperatura de 60.2-61.11 °C.
- Mediante la evaluación del tomate deshidratado en cada caso se puede decir que el proceso realizado con el controlador PI presenta el mejor aspecto conservando sus características físicas ideales de una correcta deshidratación y se considera de mejor calidad en comparación a los resultados obtenidos por los controladores On-Off y PID, cabe indicar que mientras menos humedad existe en el alimento más tiempo de vida útil tendrá almacenado para su consumo.
- En conclusión, se puede decir que el controlador PI genera mayor pérdida de humedad del tomate en el proceso de deshidratación con un peso en seco de 13g con respecto al valor de referencia de 11.76g a diferencia del controlador On-Off con un peso en seco de 15g y de controlador PID con un peso en seco de 18g.
- Con respecto a la evaluación económica se concluye que el electrodoméstico con el diseño del sistema de control PI es de bajo costo en comparación al deshidratador Colzer ya que supera en 43.41% del valor total.
- Como conclusión final se puede decir que, mediante la verificación de los diferentes tipos de controladores en el proceso de deshidratación del tomate, el controlador PI cumple con los parámetros requeridos para el sistema térmico y permite obtener un producto deshidratado de calidad, brindando una respuesta transitoria y absoluta estable en comparación a los otros tipos de controladores, por lo que es el más idóneo para el proyecto propuesto.

RECOMENDACIONES

- Para obtener un producto deshidratado con características físicas ideales es recomendable que el alimento seleccionado este en buen estado y no sea muy maduro.
- Se recomienda realizar una sintonización fina del controlador PI que podría ser mediante el método de sintonía de prueba y error el cual consiste en ajustar los valores de K_p y T_i con referencia a los calculados y así obtener valores más adecuados para una respuesta satisfactoria del sistema.
- Se recomienda implementar un sistema híbrido con ayuda de energía renovable que permita mejor el consumo de potencia brindando un ahorro energético.
- Realizar el prototipo con una interfaz más amigable para el usuario para que pueda realizar la deshidratación automáticamente ya solo con el controlador PI.

BIBLIOGRAFÍA

- ALIEXPRESS. *Sensor de temperatura de resistencia térmica de platino, resistente al agua, pt1000, PT100* [en línea]. 2021. [Consulta: 15 de febrero de 2021]. Disponible en: https://es.aliexpress.com/item/4001091203590.html?spm=a2g0o.detail.0.0.4283334aPHmL&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.169870.0&scm_id=1007.13339.169870.0&scm-url=1007.13339.169870.0&pvid=a256f9a5-87d3-46a6-96ed-805688e62a1a&t=gps-id:pc
- ALIEXPRESS. *Sensor de temperatura PT100 Grado A, 4mm x 30mm, Detector térmico impermeable, blindado, PTFE, 4 cables, 2,5 m, 4m, alta precisión* [en línea]. 2021. [Consulta: 15 de febrero de 2021]. Disponible en: https://es.aliexpress.com/item/32868816875.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.51012b56ChcVO5&algo_pvid=38d5f897-ccc8-4d0b-b17c-6d97cd214548&algo_exp_id=38d5f897-ccc8-4d0b-b17c-6d97cd214548-26&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000018389673403%22%7D
- ARROYO, Paula; et al. *Frutas y hortalizas: nutrición y salud en España del S.XXI* [en línea]. España: Fundación española de la nutrición, 2018. [Consulta: 5 de febrero de 2021]. Disponible en: https://www.fen.org.es/storage/app/media/imgPublicaciones/informe_frutas_y_hortalizas_fen_2018-v1.pdf
- Aström, K., & Hägglund, T. *Control PID avanzado*. 1ª ed. Madrid-España: Pearson Educación, S.A, 2009, pp.111-145.
- BALADO MUÑOZ, Elena; et al. *El Tomate* [en línea]. Univesitat Jaume I. 2018. [Consulta: 12 de septiembre de 2019]. Disponible en: <https://bibliotecavirtualesenior.es/wp-content/uploads/2019/06/EL-TOMATE.pdf>
- BALLESTEROS, María. *Desarrollo de un producto derivado del tomate y su proceso de transformación en la finca productora "El Regalito" de Fomeque, Cundinamarca* [en línea]. (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle. Bogotá, 2017. [Consulta: 30 de enero de 2021]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&context=ing_industrial
- BANCO CENTRAL DEL ECUADOR. *Reporte de Coyuntura Sector Agropecuario* [en línea]. Ecuador, 2021. [Consulta: 2 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Encuestas/Coyuntura/Integradas/etc202003.pdf>
- Barbosa Canovas, G., & Vega Mercado, H. *Dehydration of Foods*. 1ª ed. Board, 1996. doi:10.1007 / 978-1-4757-2456-1

- BRENES, Laura; et al. *Deshidratación de tomate (Solanum Lycopersicum): revision de elementos técnicos y proceso* [en línea]. Cartago-Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2018. [Consulta: 23 de enero de 2020]. Disponible en: https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/manual_para_deshidratacion_de_tomate_tec-inta-fittacori-ilovepdf-compressed.pdf
- CASCO, Sergio. *Raspberry Pi, Arduino y Beaglebone Black Comparación y Aplicaciones* [en línea]. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción. Asunción-Paraguay, Septiembre de 2014. [Consulta: 12 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/MiniPCs.pdf>
- CERVEN, Diego; & NARANJO, Erika. *Instrumentacion de procesos industriales* [en línea]. Universidad de Carabobo. Carabobo-Venezuela, 2017. [Consulta: 20 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-termometros-de-resistencia-1>
- CORONA, Leonel; et al. *Sensores y actuadores* [en línea]. México, 2014. [Consulta: 25 de febrero de 2021]. Disponible en: [http://www.eet476.edu.ar/documentos/Aula%20Virtual/ABBONIZIO-6TM%20\(2\).pdf](http://www.eet476.edu.ar/documentos/Aula%20Virtual/ABBONIZIO-6TM%20(2).pdf)
- DISTEFANO, Joseph; et al. *Retrialimentacion y sistemas de control*. 2ª ed. Colombia, 2014.
- EL COMERCIO. "Tomate, ají y frutos se exportan con sus sello". *Lideres* [en línea]. 2016, (Ecuador). [Consulta: 12 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.revistalideres.ec/lideres/tomate-aji-frutos-exportan-sello.html>
- FITO, Pedro; et al. *Introducción al secado de alimentos por calentamiento* [en línea]. Valencia-España: Universitat Politecnica de Valencia, 2016.[Consulta: 20 de agosto de 2020]. Disponible en: https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/e8b523c5-4970-4ae6-b2a3-86f576e81359/TOC_4092_02_01.pdf?guest=true
- GALAVIZ RODRÍGUEZ, José Victor; et al. *Estrategia Tecnológica Suatentable para Deshidratar Frutas, Verduras y Legumbres* [en línea]. España, 2012. [Consulta: 15 de septiembre de 2019]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=cHMBbXTx5eMC&printsec=frontcover&source=gs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- INSTANCIA. "¿A qué temperatura y por cuánto tiempo se deshidratan las frutas y verduras?". [en línea]. 20 de enero de 2020. [Consulta: 20 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.instantia.com/temperatura-cuanto-tiempo-se-deshidratan-las-frutas-verduras/>
- IVARS, Yanina; et al. *Deshidrtador solar pantagonico familiar Los antiguos, Santa Cruz* [en línea]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Santa Cruz. Santa Cruz-Argentina, 2017. [Consulta:1 de marzo de 2021]. Disponible en: https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_deshidratador_solar_patagonico.pdf

- LLUMIQUINGA MOROMENACHO , Paul Alberto, & SUQUILLO PULUPA, Byron
Santiago. Diseño y construcción de un deshidratador de frutas de capacidad de 12kg, con circulación de aire forzado utilizando resistencias eléctricas [en línea] (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. 2015. [Consulta: 11 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8726>
- MERCADO LIBRE. Deshidratador De Alimentos Colzer 8 Bandeja Tipo Industrial [en línea]. 2021. [Consulta: 10 de septiembre de 2021]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-500104232-_JM?redirectedFromChild=MEC503517912
- MERCADO LIBRE. Sensor De Temperatura Pt100 2 Hilos Rtd [en línea]. 2021. [Consulta: 26 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://n9.cl/p24ei>
- MUÑOZ, Santiago. (2018). Implementación de estrategias de control Para la regulación de laplataforma festo [en línea] (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar, Chile. 2018. [Consulta:13 de abril de 2021]. Disponible en: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/468894/PG_FA-es_2021-02_56827_Screen.pdf
- OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. Madrid, España: Pearson Education, S. A, 2010.
- PARDO, Carlos. "Control Automático". *Picuino* [en línea], 2021. [Consulta: 17 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-auto.html>
- PENELO, Lúdia. "Tomate: propiedades, beneficios y valor nutricional". *La Vanguardia* [en línea], 2020. [Consulta:10 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/comer/frutas/20181024/452518270095/alimentos-frutas-tomates-beneficios-propiedades-valor-nutricional.html>
- PERÉZ, Nelcy, & Ruiz, Sergio. Caracterización de software bde simulación de circuitos eléctricos como alternativa de uso en educación superior [en línea] (Tesis de pregrado). Universidad de Santander, Medellín, Colombia. 2020. [Consulta: 14 de mayo de 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Ruiz-Obando/publication/345253519_CHARACTERIZACION_DE_SOFTWARE_DE_SIMULACION_DE_CIRCUITOS_ELECTRONICOS_COMO_ALTERNATIVAS_DE_USO_EN_EDUCACION_SUPERIOR/links/5fa1853892851c14bcff78b3/CARACTERIZACION-DE-SOFTWARE-DE-
- PIRAGAUTA PLAZAS, Sara Catalina, & MELO DAZA , Andrés Fabián. *Plan de Negocios para la Creación de una planta de Deshidratación solar de Frutícola* [en línea]. Universidad Externado de Colombia, Bogotá D.C. 2018. [Consulta: 12 de enero de 2020]. Disponible en: <https://bdigital.uexternado.edu.co/bitstream/handle/001/733/ABA-spa-2018->

Plan_de_negocios_para_la_creacion_de_una_planta_de_deshidratacion_solar_fruticola.pdf
;jsessionid=34D1EDB820C890ADFFF77CAA0BAC2F25?sequence=1

- REYES, Emilio; et al. "TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN PARA LA PRESERVACIÓN DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.)". *Biotecnia* [en línea], 2018, pp. 39-46. [Consulta: 22 de enero de 2021]. Disponible en: <https://biblat.unam.mx/hevila/Biotecnia/2013/vol15/no2/7.pdf>
- ROMERO, Indira; et al. *Fortalecimiento de la cadena de valor de los snacks nutritivos con base en fruta deshidratada en El Salvador* [en línea]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), México, 2016. [Consulta: 10 de enero de 2021]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40251/1/S1600668_es.pdf
- VARGAS, Javier; et al. Sistema de instrumentación virtual utilizando un sensor RTD experimental. *Ingenium*, vol 17, pp. 31-46, mayo de 2016.
- VIVEROS FOLLEGO, Andrés Mauricio, & MAYORGA CASTELLANOS, Erika Lorena. Diseño e implementación de un prototipo de deshidratador Híbrido (Solar-Eléctrico) e implementación de su sistema de control [en línea] (Monografía). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. 2017. [Consulta: 23 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://1library.co/document/7qvn50dz-diseno-implementacion-prototipo-deshidratador-hibrido-electrico-implementacion-sistema.html>
- VIZUETE, Maía. Creación de una línea de producción de tomate deshidratado para la asociación "ASOTOTUN" de la provincia de Tungurahua [en línea] (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2018. [Consulta: 11 de enero de 2021], Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/27336/1/451%20o.e..pdf>
- WORDPRESS. PT100, RTD [en línea]. [Consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://conbotassucias.wordpress.com/2012/09/14/pt100-rtd/>

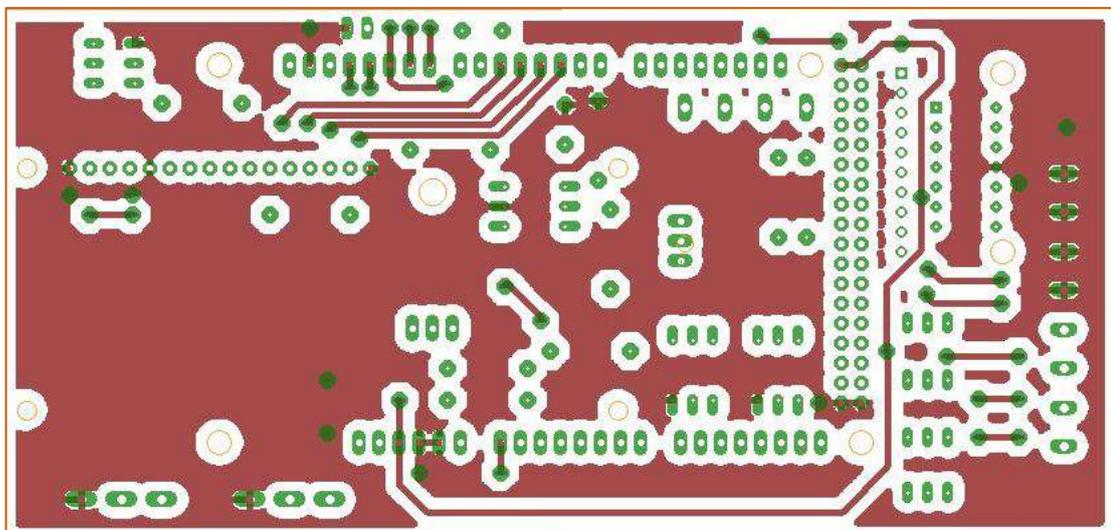
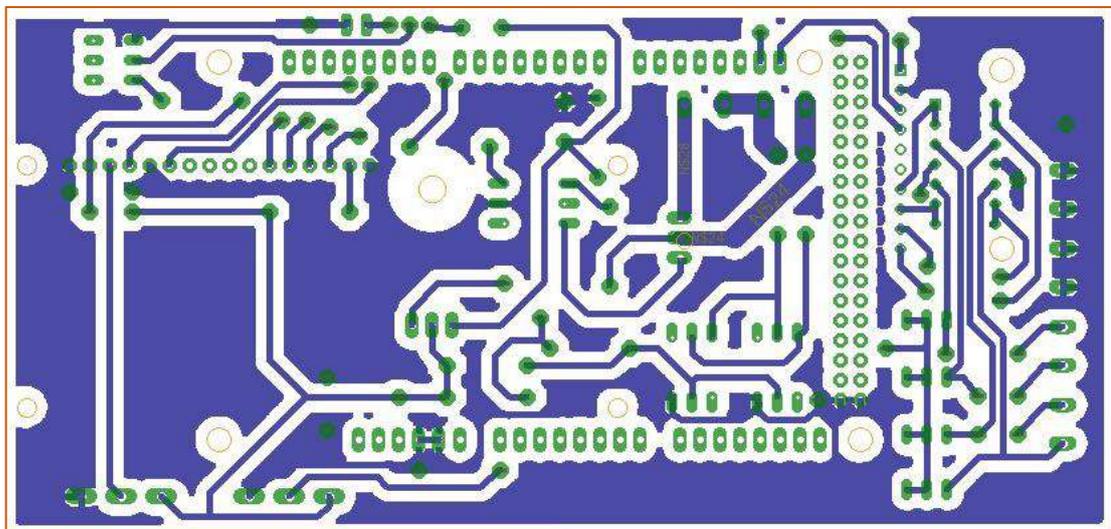
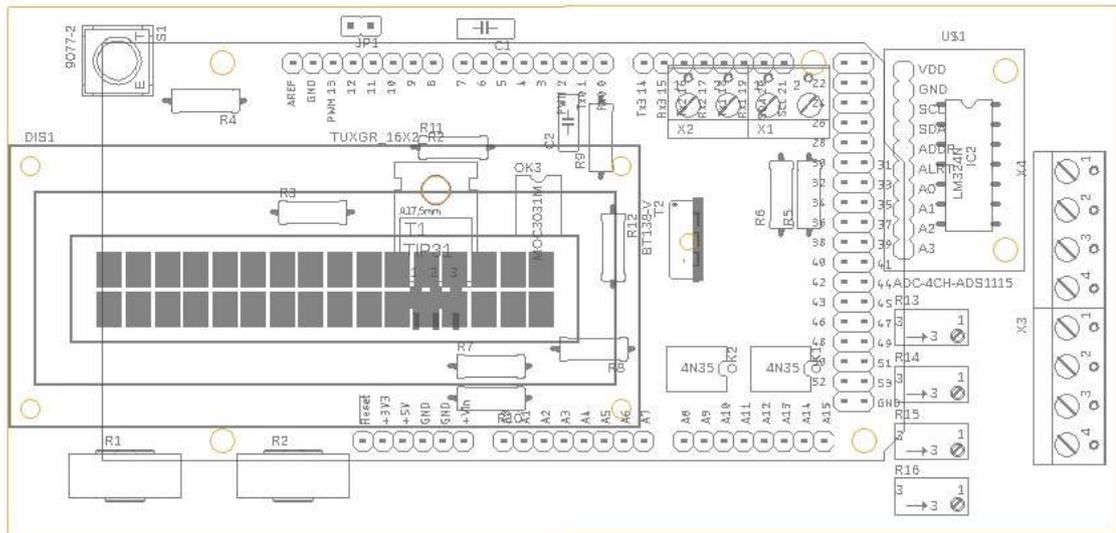
ANEXOS

Anexo A: Tabla de conversión de temperatura a resistencia de Pt100.

| Pt 100 ohms | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| °C | 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 |
| °C | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Nota Técnica 4, rev. a, <http://www.arian.cl>

Anexo B: Diseño del circuito de potencia en Eagle Design PCB.





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

Fecha de entrega: 31 / 01 / 2022

| |
|---|
| INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S) |
| Nombres – Apellidos: JESSICA ALEXANDRA CUJI SECAIRA |
| INFORMACIÓN INSTITUCIONAL |
| Facultad: INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA |
| Carrera: INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES |
| Título a optar: INGENIERA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES |
| f. Analista de Biblioteca responsable: Lcdo. Holger Ramos, MSc. |



Firmado electrónicamente por:
**HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA**

2165-DBRA-UPT-2021