

**Desarrollo de un prototipo tipo túnel para el secado del grano de cacao automatizado
implementando un sistema de control de temperatura y monitoreo de humedad**

Luigi Jesús Forgioni Carvajal

Asesor

Alexander Flórez Martínez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías ECBTI

Ingeniería Electrónica

2024

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por darme la fortaleza para no desfallecer en este camino.

Agradezco profundamente a mis tías, quienes me han brindado su apoyo incondicional en los momentos más difíciles. También, me gustaría expresar mi gratitud al ingeniero Alexander Flórez Martínez por su valioso apoyo, aportando su experiencia y conocimiento al desarrollo exitoso de este proyecto. Su orientación ha sido clave para alcanzar este logro, y estoy muy agradecido por su acompañamiento en este proceso.

También me gustaría agradecer al ingeniero Brayan Vargas Niño, quien en varias ocasiones dedicó parte valiosa de su tiempo y conocimiento para contribuir a la realización del proyecto. Su apoyo fue fundamental en momentos clave, y su disposición para ayudar en el desarrollo de este trabajo es algo que siempre apreciaré profundamente. Gracias a sus aportes, el proyecto avanzó de manera significativa, y su guía fue una gran ayuda en el proceso.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de grado a mi mamá, quien es la persona más importante en mi vida. Ella es mi inspiración diaria, mi fortaleza y mi guía. Junto a mi papá, me formaron con los valores y principios que hoy me definen, tanto como persona como futuro profesional.

Agradezco su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios, que me han permitido llegar a este punto. Este logro es también suyo, y siempre estaré agradecido por todo lo que me han dado.

Resumen

Considerando contribuir al mejoramiento de la calidad del grano de cacao, se ha definido el diseño y construcción de un prototipo automatizado tipo túnel. Este dispositivo permitirá el control de variables críticas en el proceso de secado, como la temperatura y monitoreo de humedad, además de utilizar equipos de secado con flujos de aire a temperaturas preestablecidas que beneficien la calidad del grano. En la región, actualmente se utilizan métodos artesanales para el secado del cacao, lo que resulta en una eficiencia limitada en los procesos y escaso control automático, sobre la calidad del producto final.

En el desarrollo, se busca construir un prototipo adecuado que permita el control de los parámetros deseados para el proceso de secado del grano de cacao. Para lograrlo, se emplearán actuadores, sistema de control y sensores de temperatura y humedad. Este último parámetro es de extrema importancia, ya que el control de temperatura en el proceso de secado del grano incide sobre la pérdida de peso del grano y previene la posibilidad de exceso de humedad evitando el desarrollo de mohos que deterioran la calidad y facilita el almacenamiento, El desarrollo se realiza con la orientación del semillero de investigación Seed Solution In Engineering.

Palabras clave: Temperatura, Humedad, Secado, Control, Variables

Abstract

Considering contributing to the improvement of cocoa bean quality, the design and construction of an automated tunnel-type prototype have been defined. This device will allow the control of critical variables in the drying process, such as temperature and humidity monitoring, in addition to using drying equipment with pre-established air flows at temperatures that benefit the quality of the bean. In the region, traditional methods are currently employed for cocoa drying, resulting in limited efficiency in processes and minimal automatic control over the quality of the final product.

In the development phase, the aim is to build a suitable prototype that enables the control of desired parameters for the cocoa bean drying process. To achieve this, actuators, a control system, and temperature and humidity sensors will be employed. The latter parameter is of utmost importance, as temperature control in the drying process affects the weight loss of the bean and prevents the possibility of excess moisture, avoiding the development of molds that deteriorate quality and facilitate storage. The development is carried out with the guidance of the research seedbed Seed Solution in Engineering

Keywords: Temperature, Humidity, Drying, Control, Variable

Tabla de Contenido

| | |
|------------------------------------|-----|
| Introducción | 13 |
| Justificación..... | 14 |
| Planteamiento del Problema..... | 15 |
| Metodología | 17 |
| Objetivos | 19 |
| Objetivo General | 19 |
| Objetivos Específicos | 19 |
| Estado del Arte | 20 |
| Marco Teórico | 26 |
| Diseño del Secador | 30 |
| Materiales para el diseño..... | 56 |
| Implementación del algoritmo | 59 |
| Pruebas de funcionamiento | 87 |
| Conclusiones | 107 |
| Referencias bibliográficas | 110 |

Listado de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 <i>Características y Especificaciones de la Resistencia PTC</i> | 35 |
| Tabla 2 <i>Características y Especificaciones del Ventilador de Refrigeración</i> | 37 |
| Tabla 3 <i>Características y Especificaciones de la Lámina Difusora</i> | 38 |
| Tabla 4 <i>Características y Especificaciones del Controlador de Temperatura</i> | 39 |
| Tabla 5 <i>Características y Especificaciones del Motor de Vibración</i> | 40 |
| Tabla 6 <i>Características y Especificaciones del Resorte Helicoidal</i> | 41 |
| Tabla 7 <i>Características y Especificaciones de la Arandela de Seguridad</i> | 42 |
| Tabla 8 <i>Características y Especificaciones del Esqueleto en Madera</i> | 43 |
| Tabla 9 <i>Características y Especificaciones de la Termocupla Tipo K</i> | 45 |
| Tabla 10 <i>Características y Especificaciones del Relé de Estado Sólido (SSR)</i> | 46 |
| Tabla 11 <i>Características y Especificaciones de Indicador LED</i> | 47 |
| Tabla 12 <i>Características y Especificaciones de la Tarjeta de Expansión Arduino Mega 2560</i> | 48 |
| Tabla 13 <i>Características y Especificaciones del Interruptor (On/Off)</i> | 49 |
| Tabla 14 <i>Características y Especificaciones del Módulo de Relé</i> | 50 |
| Tabla 15 <i>Características y Especificaciones de la Bornera de Riel Omega</i> | 52 |
| Tabla 16 <i>Características y Especificaciones del Riel Omega</i> | 53 |
| Tabla 17 <i>Características y Especificaciones de la Canaleta Ranurada</i> | 54 |
| Tabla 18 <i>Características y Especificaciones del Gabinete Eléctrico</i> | 55 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>Secador Solar Tipo Invernadero</i> | 20 |
| Figura 2 <i>Partes Principales del Secador Solar Tipo Túnel de Policarbonato</i> | 21 |
| Figura 3 <i>Secado en Dos Capas con el Secador Solar Tipo Túnel</i> | 22 |
| Figura 4 <i>Diseño del Prototipo Secadora de Cacao Tipo Tanque</i> | 23 |
| Figura 5 <i>Modelo Maquina Secadora de Cacao</i> | 24 |
| Figura 6 <i>Fabricación de Maquina Secadora de Cacao</i> | 24 |
| Figura 7 <i>Secador Artificial de Cacao con Convección Forzada</i> | 28 |
| Figura 8 <i>Secador de Cacao Tipo Túnel</i> | 30 |
| Figura 9 <i>Partes del Secador Vista Lateral</i> | 31 |
| Figura 10 <i>Partes del Secador Vista Frontal</i> | 32 |
| Figura 11 <i>Partes del Gabinete de Control (Exterior)</i> | 32 |
| Figura 12 <i>Partes del Gabinete de Control Interior)</i> | 33 |
| Figura 13 <i>Bandejas de Secado de Grano de Cacao</i> | 34 |
| Figura 14 <i>Bandejas de Secado con Carga de Cacao</i> | 35 |
| Figura 15 <i>Elemento de Calefacción PTC de 500W</i> | 35 |
| Figura 16 <i>Ventilador de Refrigeración Axial de 2 Hilos</i> | 36 |
| Figura 17 <i>Lamina Difusora en Policarbonato</i> | 37 |
| Figura 18 <i>Controlador de Temperatura REX-CI00FK02-V-EN</i> | 38 |
| Figura 19 <i>Motor de Vibración</i> | 40 |
| Figura 20 <i>Resorte Helicoidal</i> | 41 |
| Figura 21 <i>Arandela de Fijación Tipo Grower</i> | 42 |
| Figura 22 <i>Esqueleto en Madera Vista Frontal</i> | 43 |
| Figura 23 <i>Esqueleto en Madera Vista Lateral</i> | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 <i>Termocupla Tipo K</i> | 44 |
| Figura 25. <i>Relé de Estado Sólido (SSR)</i> | 45 |
| Figura 26 <i>Indicador LED</i> | 47 |
| Figura 27 <i>Tarjeta de Expansión Arduino Mega 2560</i> | 48 |
| Figura 28 <i>Interruptor (On/Off)</i> | 49 |
| Figura 29 <i>Módulo de Relé</i> | 50 |
| Figura 30 <i>Borneras Para Riel Omega</i> | 52 |
| Figura 31 <i>Riel Omega</i> | 53 |
| Figura 32. <i>Canaleta Plástica</i> | 54 |
| Figura 33 <i>Gabinete Electrico</i> | 55 |
| Figura 34 <i>Construcción del Secador de Cacao</i> | 56 |
| Figura 35 <i>Montaje del Ducto de Ventilación</i> | 57 |
| Figura 36 <i>Ensamble del Prototipo y Sistema de Control de Temperatura</i> | 58 |
| Figura 37 <i>Diagrama de Bloques de un Sistema Típico de Ciclo Cerrado</i> | 60 |
| Figura 38 <i>Respuesta de un Sistema Típico de Ciclo Cerrado PID</i> | 61 |
| Figura 39 <i>Respuesta de un Sistema en Ciclo Cerrado con Tiempo Muerto</i> | 62 |
| Figura 40 <i>Diagrama de Bloques de un Algoritmo Básico de Control PID</i> | 63 |
| Figura 41 <i>Curva de Reacción del Sistema</i> | 66 |
| Figura 42 <i>Grafica de Respuesta Humedad vs Tiempo</i> | 66 |
| Figura 43 <i>Respuesta al Escalón en Lazo Abierto del Prototipo Tipo Túnel</i> | 67 |
| Figura 44 <i>Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)</i> | 69 |
| Figura 45 <i>GUI-LabVIEW Para el Proceso Térmico del Prototipo de Secador de Cacao</i> | 69 |
| Figura 46 <i>Programa en LabVIEW Para el DAQ del Proceso Térmico en el Secador de Cacao</i> . 70 | |
| Figura 47 <i>Interpretación de los Datos Obtenidos Por el DAQ</i> | 71 |

| | |
|--|----|
| | 10 |
| Figura 48 <i>Diagrama de Temperatura vs Tiempo</i> | 72 |
| Figura 49 <i>Hoja de Cálculo de Excel</i> | 73 |
| Figura 50 <i>Hoja de Cálculo Nombrada “Registro”</i> | 74 |
| Figura 51 <i>Selección de Data en Matlab</i> | 74 |
| Figura 52 <i>Grafica de Comportamiento de la Temperatura en Matlab</i> | 75 |
| Figura 53 <i>Curva de Reacción en Lazo Abierto Para Una Planta Ideal.</i> | 76 |
| Figura 54 <i>Temperatura de Proceso del Secador</i> | 76 |
| Figura 55 <i>Tiempo Tomado de la Curva de Reacción Graficada en Matlab.</i> | 78 |
| Figura 56 <i>Repuesta del Sistema en Matlab</i> | 79 |
| Figura 57 <i>Grafica Respuesta Sistema PI</i> | 83 |
| Figura 58 <i>Grafica Respuesta Sistema PID</i> | 84 |
| Figura 59 <i>Bloque de Parámetros del Controlador</i> | 85 |
| Figura 60 <i>Iniciación Software LabVIEW</i> | 85 |
| Figura 61 <i>Descarga de Instrumentos Virtuales y Librería Arduino LINX</i> | 86 |
| Figura 62 <i>Grano de cacao fermentado</i> | 87 |
| Figura 63 <i>Tabla de Control de Temperatura Primer Día de Secado</i> | 88 |
| Figura 64 <i>Gráfico de Barras Primer Día de Secado</i> | 88 |
| Figura 65 <i>Medición de Humedad (dia 1)</i> | 89 |
| Figura 66 <i>Tabla de Control de Temperatura Segundo Día de Secado</i> | 90 |
| Figura 67 <i>Gráfico de Barras Segundo Día de Secado</i> | 91 |
| Figura 68 <i>Medición de Humedad (Dia 2)</i> | 91 |
| Figura 69 <i>Tabla de Control de Temperatura Tercer Día de Secado</i> | 92 |
| Figura 70 <i>Gráfico de Barras Tercer Día de Secado</i> | 93 |
| Figura 71 <i>Medición de Porcentaje de Humedad (Dia 3)</i> | 93 |

| | |
|---|-----|
| Figura 72 <i>Balanza Digital (Muestra#1)</i> | 94 |
| Figura 73 <i>Resultado del Proceso de Secado Artificial (Muestra #1)</i> | 94 |
| Figura 74 <i>Balanza Digital (Muestra #2)</i> | 95 |
| Figura 75 <i>Resultado del Proceso de Secado Artificial (Muestra #2)</i> | 95 |
| Figura 76 <i>Balanza Digital (Muestra #3)</i> | 96 |
| Figura 77 <i>Resultado del Proceso de Secado Artificial (Muestra #3)</i> | 96 |
| Figura 78 <i>Medición de Temperatura Grano de Cacao Fermentado</i> | 97 |
| Figura 79 <i>Prueba de Corte Posterior al Secado</i> | 97 |
| Figura 80 <i>Esquemático de Conexión Relé de Estado Solido</i> | 98 |
| Figura 81 <i>Esquemático del Extractor de Aire</i> | 99 |
| Figura 82 <i>Montaje del Tablero Eléctrico</i> | 100 |
| Figura 83 <i>Muestra 1 de Cacao Clon</i> | 102 |
| Figura 84 <i>Muestra 2 de Cacao Clon</i> | 102 |
| Figura 85 <i>Muestra 3 de Cacao Clon</i> | 103 |
| Figura 86 <i>Corte Longitudinal de Muestra de Cacao</i> | 103 |
| Figura 87 <i>Semillas de Cacao con Mucilago</i> | 104 |
| Figura 88 <i>Medición de la Masa de los Granos de Cacao</i> | 104 |
| Figura 89 <i>Encuentro CCAV Cúcuta</i> | 107 |
| Figura 90 <i>Carga de Cacao Secado.</i> | 107 |

Lista de Apéndices

| | |
|--|-----|
| Apéndice A <i>Esquemático de Conexión Tablero Eléctrico</i> | 112 |
| Apéndice B <i>Esquemático de Conexión (Interna)</i> | 114 |
| Apéndice C <i>Diagrama Arduino Mega 2560</i> | 115 |
| Apéndice D <i>Referencias de Puertos</i> | 115 |
| Apéndice E <i>Pines Análogos</i> | 117 |
| Apéndice F <i>Pines Digitales</i> | 118 |
| Apéndice G <i>Acotado Externo del Secador</i> | 119 |
| Apéndice H <i>Acotado Ducto de Ventilación</i> | 120 |
| Apéndice I <i>Acotado Cúpula y Lamina Difusora</i> | 121 |
| Apéndice J <i>Acotado Puerta</i> | 122 |
| Apéndice K <i>Acotado Bandeja de Secado</i> | 123 |
| Apéndice L <i>Diagrama de Cooler</i> | 124 |
| Apéndice M <i>Diagrama de Bisagras</i> | 125 |
| Apéndice N <i>Motor de Vibración 3650</i> | 126 |
| Apéndice O <i>Certificado Participación Redcolsi</i> | 127 |

Introducción

En el cambiante paisaje de la producción cacaotera en Norte de Santander, Colombia, se presenta un desafío crucial: mejorar la calidad y eficiencia del proceso de secado del grano de cacao. Conscientes de la importancia del cacao como fuente de ingresos para los agricultores locales y su papel destacado en la economía regional, nos embarcamos en un proyecto innovador para diseñar y construir un prototipo automatizado tipo túnel. Este dispositivo, concebido bajo la metodología CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar), busca revolucionar la etapa postcosecha del cacao, incorporando tecnología avanzada para controlar variables críticas como la temperatura y humedad, y optimizando así la calidad del producto final.

La región, que históricamente ha empleado métodos artesanales de secado, se enfrenta a la necesidad de modernizar sus prácticas para mantener y elevar la competitividad de los productores de cacao en los mercados nacional e internacional. Nuestro proyecto no solo aborda esta necesidad, sino que también aspira a contribuir al desarrollo económico sostenible de Norte de Santander, consolidando el lugar de Colombia en la industria cacaotera.

Este proyecto surge como respuesta a los desafíos específicos que enfrentan los agricultores locales en la región de Norte de Santander. La escasa adopción de tecnologías modernas en el proceso de secado del cacao ha limitado la calidad y eficiencia, afectando la competitividad de los productos en un mercado cada vez más exigente. Al implementar un prototipo automatizado tipo túnel, no solo buscamos mejorar la calidad del cacao, sino también proporcionar a los agricultores herramientas innovadoras que les permitan destacarse en la industria, fomentando así un desarrollo económico más sólido y sostenible en la región

Justificación

La justificación para el diseño y construcción del prototipo automatizado tipo túnel para el secado del grano de cacao, se fundamenta en la necesidad imperante de mejorar la calidad y la eficiencia en el proceso de secado en la región. La utilización de métodos artesanales ha tenido resultados, pero se pueden mejorar con el apoyo de la tecnología y generar un valor agregado, aumentando la competitividad de los productores locales. Este prototipo permitirá un control de variables críticas como la temperatura y monitoreo de humedad como un escenario controlado al interior del prototipo, que permita la apuesta por la calidad del producto final. Además, al adoptar tecnología avanzada, podría ser una alternativa que incrementará la competitividad de los productores de cacao de Norte de Santander, contribuyendo al desarrollo económico de la región y al fortalecimiento de su industria cacaotera.

Los datos estadísticos actuales revelan que la dependencia de métodos manuales ha llevado a pérdidas considerables y ha afectado la competitividad de los productores locales. La adopción de este prototipo automatizado representa un salto cuántico hacia la mejora de la calidad del cacao y, por ende, de su posición en el mercado. Además, estudios previos.(López Cerino & Chávez García, 2018) han señalado la correlación directa entre el control preciso de variables críticas, como temperatura y humedad, y la calidad final del grano de cacao. Al implementar esta tecnología avanzada, no solo se garantiza una mayor competitividad para los productores locales, sino que también se contribuye al desarrollo económico de la región, fortaleciendo así la industria cacaotera en Norte de Santander.

Planteamiento del Problema

El cacao ha desempeñado un papel significativo en la historia económica de Norte de Santander durante muchos años. Sin embargo, la producción de cacao en esta región se caracteriza por la escasa adopción de tecnología para los productores, actualmente se realiza control manual del proceso, lo que afecta la competitividad y limita en valor agregado, especialmente en la etapa postcosecha de cacao en el secado, donde se debe asegurar que la humedad del grano sea baja para evitar proliferación de mohos, facilite el almacenamiento y sea apto para compra.

Las estadísticas revelan que un alto porcentaje de productores aún se enfrenta a desafíos relacionados con la humedad del grano, resultando en pérdidas significativas y menoscabo en la calidad final del cacao. Esta realidad no solo afecta la rentabilidad de los agricultores, sino que también tiene un impacto directo en la economía regional. Para abordar este problema, es esencial implementar soluciones tecnológicas innovadoras que no solo mejoren la eficiencia del proceso de secado, sino que también empoderen a los productores y promuevan la competitividad sostenible del sector cacaotero en Norte de Santander. La producción de cacao en Norte de Santander y en Colombia, se caracteriza por el uso de bajos niveles de tecnología en plantaciones sembradas a partir de semilla híbrida con bajas densidades de siembra (Fedecacao, 2012). Mientras el acceso a mercados segmentados sea limitado, se mantenga el oligosopnio en la demanda del grano seco y el precio de mercado mantenga esa alta volatilidad, difícilmente el campesino tendrá incentivos para mejorar la calidad del grano que reposa primordialmente en el proceso poscosecha. Hace falta mayor gestión gremial y gubernamental para promover a Colombia como productor de cacao fino de aroma y más emprendimientos regionales que apuesten en general a la agroindustria. (Valero et al. 2020)

Hay otros aspectos que disminuyen la competitividad del cacao en Norte de Santander, como lo son las malas prácticas del grano y la escasa generación de valor agregado, dado que no se cuenta actualmente con una estrategia de alto impacto para la generación de valor agregado en el cacao de la región; una manera de generar valor sería con la implementación de certificaciones ambientales del cultivo.(Rangel-S, J. M.*; Ortiz-R, O.; Villamizar-G, R.*I.A. Joshua Mauricio Rangel Suárez,2013)

Según datos del Ministerio de Agricultura, Agronet y la Secretaría de Desarrollo Económico de la Gobernación de Norte de Santander (2013), el departamento es el tercer productor nacional de cacao, año 2013, con 8.315 toneladas de las 79.686 toneladas producidas en Colombia; es decir, Norte de Santander aporta el 10,44% de cacao producido en el país. Los dos departamentos con mayor producción a nivel nacional son Santander con 21.571 toneladas y Arauca con 8.802 toneladas. En cuanto al área de cosecha el departamento se ubica en el segundo lugar (año 2013), con 17.001 hectáreas cosechadas de un total de 151.930 hectáreas con las que cuenta Colombia; es decir, Norte de Santander tiene el 11,19% del área cosechable de cacao a nivel nacional. Norte de Santander cuenta con una productividad por hectárea cultivada de 0,5; además, la cantidad de productores en ese año fue de 9.485 y un porcentaje de comercialización del cacao producido del 93%. Sin embargo, según Fedecacao, el departamento se ubicó en el año 2013 en el séptimo lugar con 1.779 toneladas, la diferencia se da al registrar la producción facturada en Norte de Santander.(Vásquez-Barajas et al., 2018)

Metodología

La metodología CDIO (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar) del proyecto se desarrolla en cinco fases fundamentales. En la fase de Concebir, se investigan las condiciones de secado del cacao en la región y se definen los objetivos del proyecto. En la fase de Diseñar, se crea un diseño técnico y arquitectónico detallado para el prototipo automatizado tipo túnel, incluyendo especificaciones técnicas y un plan de ejecución. La fase de Implementar involucra la construcción y programación del prototipo, asegurando el cumplimiento de normativas. En la fase de Operar, se realizan pruebas exhaustivas y se optimiza el sistema. Finalmente, en la fase de Seguir de cerca, se establece un mecanismo de monitoreo para evaluar el impacto continuo del prototipo en la calidad del cacao, la competitividad de los productores y el desarrollo económico regional.

Concebir: Investigación y Definición de Objetivos

Realizar una investigación exhaustiva de las condiciones actuales de secado de cacao en la región.

Identificar las necesidades y desafíos específicos de los agricultores locales.

Definir claramente los objetivos del proyecto en función de los hallazgos de la investigación.

Diseñar: Creación de Prototipo Detallado

Desarrollar un diseño técnico y arquitectónico detallado para el prototipo automatizado tipo túnel.

Incluir especificaciones técnicas y un plan de ejecución en el diseño.

Implementar: Construcción y Programación

Construir el prototipo según el diseño establecido.

Programar y configurar los sistemas, asegurando el cumplimiento de las normativas.

Operar: Pruebas Exhaustivas y Optimización

Realizar pruebas exhaustivas en el prototipo para evaluar su eficacia en términos de calidad del cacao, eficiencia en el secado y reducción de pérdidas de peso.

Recopilar datos durante las pruebas y analizar los resultados.

Seguir de Cerca: Evaluación Continua del Impacto

Implementar un mecanismo de monitoreo para evaluar el impacto a largo plazo del prototipo.

Evaluar continuamente la calidad del cacao y la rentabilidad de los agricultores, ajustando el sistema según sea necesario.

Objetivos

Objetivo General

Implementar un prototipo automatizado tipo túnel con ambiente controlado implementando un sistema de control de temperatura y monitoreo humedad para el beneficio de la calidad del grano, aplicado a la etapa de secado del grano de cacao.

Objetivos Específicos

Identificar las variables físicas que intervienen en el proceso de secado del grano de cacao para realizar la selección de sensores, actuadores e instrumentación mediante el uso de hojas técnicas que permita una selección adecuada para el monitoreo y control del sistema.

Diseñar la estructura física y diagrama de conexión electrónico ajustado al proceso de secado de cacao mediante el uso de herramientas de software que permitan identificar las partes que integran el prototipo.

Configurar dispositivos electrónicos e instalación en el prototipo de secado de cacao para realizar pruebas de operación de cada uno de los instrumentos que conforman el sistema.

Evaluar la operación del sistema con control automatizado de temperatura y medición de humedad en el prototipo con el propósito de asegurar el secado adecuado del grano de cacao.

Estado del Arte

Se realizó en México un trabajo de investigación denominado Eficacia de secador solar tipo túnel con cacao orientado a evaluar la eficacia en el tiempo de secado de un secador solar tipo túnel de policarbonato, con convección forzada, aplicado al grano de cacao en la región de la Chontalpa, Tabasco, México. Actualmente, los campesinos de la región se enfrentan a problemas relacionados con la contaminación del grano durante el proceso de secado al aire libre, como polvo, hongos y la presencia de animales, lo que afecta la inocuidad del producto. (López Cerino & Chávez García, 2018)

Además de la eficiencia en el tiempo de secado, el trabajo también evalúa la satisfacción del productor participante en relación con diversas características del grano seco de cacao. Estas características incluyen el color interno y externo, el olor, el sonido, el peso final, la separación de la cascarilla y la presencia de hongos. La satisfacción del productor es un factor clave, ya que se busca no solo mejorar la eficacia del proceso de secado, sino también asegurar que el producto final cumpla con los estándares de calidad y las expectativas del agricultor.

Figura 1

Secador Solar Tipo Invernadero



Nota. Secador solar de túnel de policarbonato

en el modelo tailandés propuesto por (Janjai, 2012) (Figura 1) está diseñado para el secado de alimentos en industrias de pequeña escala.

El secador consta de un techo parabólico cubierto con paneles de policarbonato, una construcción de acero galvanizado y un piso de concreto. Sus dimensiones son 8 metros de ancho, 20 metros de largo y 3,5 metros de alto, con una capacidad de carga hortofrutícola de 1.000 kg. Se realizaron cambios significativos al diseño original, incluida la adición de un ventilador de techo alimentado por paneles solares para mantener una temperatura interior uniforme y acelerar el proceso de secado. Además, se decidió utilizar aluminio para la construcción con el fin de obtener un dispositivo más ligero, duradero y portátil.

1) cubierta de policarbonato con protección UV; 2) ventanillas que permite la entrada de aire; 3) ventiladores para homogeneizar el calor interior; 4) ventiladores extractores de aire; 5) porta charolas; y 6 charolas. Extractores.

Figura 2

Partes Principales del Secador Solar Tipo Túnel de Policarbonato.



Nota. Ubicación de partes secador tipo túnel

En resumen, describimos en detalle la situación en la que se utilizó un secador solar tipo túnel con cubierta de policarbonato para realizar pruebas de secado de granos de cacao.

analizan y discuten aspectos importantes como la temperatura y humedad relativa dentro del secador, la radiación solar, el contenido de humedad y la proporción de granos de cacao. Estos elementos proporcionan una visión integral de las condiciones durante el proceso de secado y permiten una evaluación completa de la efectividad y los resultados obtenidos.

Figura 3

Secado en Dos Capas con el Secador Solar Tipo Túnel



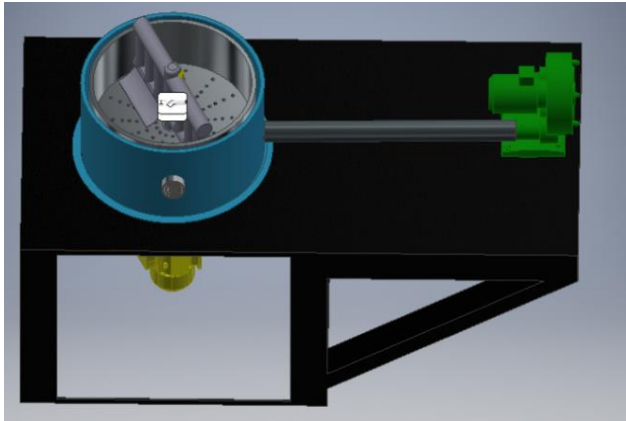
Nota. Granos de cacao secos

Por otra parte, (Ruiz & Nohely, 2022) diseño y construcción de una secadora de cacao tipo tanque empleando una cámara de acondicionamiento para la inyección de aire caliente su objetivo principal fue Desarrollo de un prototipo de secador de cacao de tanque orientado a brindar una alternativa más eficiente al secado tradicional, reduciendo el tiempo de la fase de secado y evitando pérdidas de producto por malas condiciones climáticas.

Como parte de las pruebas realizadas, se comprobó la velocidad y capacidad del material para pasar aire caliente y se encontró que el cobre conduce más rápido que el aluminio y puede mantener temperaturas más altas durante un período de tiempo más corto.

Figura 4

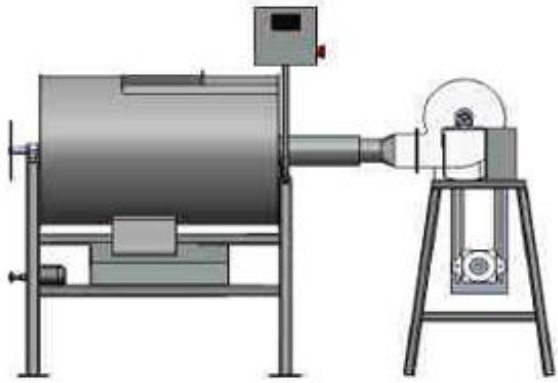
Diseño del Prototipo Secadora de Cacao Tipo Tanque.



Nota. Modelado en 3D de secador de granos de cacao

Para obtener el calor necesario para el proceso de secado, realizamos pruebas mediante el método de radiación y descubrimos que tardaba mucho en alcanzar la temperatura deseada. Para mejorar la transferencia de calor y permitir alcanzar la temperatura especificada mediante métodos de convección, se perforaron agujeros tanto en la capa de acero inoxidable o fondo del tanque como en el serpentín de cobre, dando el resultado más cercano a la propuesta.

El dispositivo coonstruido permite seccar una capacidad de 50 kg e un tiempo de 9 horas,el tiempo establecido para el diseño fue de 8 horas,esto se debe a que la humedad el producto varia y no es del todo uniforme sin embargo la humedad se encuentra dentro de los parámetros establecidos para normas de alimentos.(Guailas & Fabián, 2019)

Figura 5*Modelo Maquina Secadora de Cacao*

Nota. Modelado maquina secador de cacao tipo tambor

Para fabricar la estructura y el tambor de secado, se emplearon tubos cuadrados de acero inoxidable calibre 16 y láminas de acero inoxidable del mismo calibre, unidos mediante soldadura utilizando el proceso INOX 308 L MIG AWS asF. El tambor externo se construyó utilizando lámina galvanizada de calibre 16. Se utilizó aislamiento térmico de lana de vidrio con un espesor de 2 cm.

Figura 6*Fabricación de Maquina Secadora de Cacao*

Nota. Sistema integrado secador de cacao

El objetivo general del proyecto se logró mediante el desarrollo de un secador de cacao que mejora el rendimiento del proceso a través de un sistema integrado y garantiza condiciones óptimas de secado (temperaturas inferiores a 60 °C, velocidades de hasta 10 m/s). Esto reduce el contenido de humedad del cacao al 12%, lo que lo hace apto para el almacenamiento.

El concepto de solución se basa en una combinación de sistemas de secado rotativos y de tambor de última generación existentes. Esta combinación elimina la necesidad de agitar el producto durante el proceso, facilitándolo al operador.

Marco Teórico

El proceso de secado de los granos de cacao se puede realizar de forma natural o artificial. Durante la etapa de secado continúa el proceso de oxidación iniciado durante la fermentación y finaliza la formación de compuestos que determinan características sensoriales, como el aroma y sabor del cacao. En esta etapa, la pigmentación marrón también se desarrolla a partir de compuestos fenólicos.(Fernández et al.,2012)

El contenido de humedad varía de un producto a otro; por ejemplo, la sal de mesa tiene un 0,5% de humedad, el cacao fermentado un 55% y el maíz un 20%. La deshidratación es un término relativo, en realidad se refiere al proceso de reducción del líquido contenido en un sólido. Asimismo, los productos secos tienen diferentes formas, escamas, gránulos, cristales, polvos, etc., y también presentan diferentes propiedades físico-químicas diferentes.

La temperatura que puede soportar un sólido en el proceso de secado varía de un producto a otro, y los cambios de temperatura también dependen de la cinética de secado de cada sólido. Estas razones explican que existan muchos tipos diferentes de secado en el mercado industrial y sus diferencias se deben principalmente a la forma en que los sólidos se mueven a través de la zona de secado y a la forma de la transferencia de calor.

Este tipo de secadora utiliza transferencia de calor por conducción, generalmente con una pared metálica. Las fuentes de calor pueden ser:

- Vapor condensado
- Agua caliente
- Aceites térmicos
- Gases de combustión
- Resistencia eléctrica

Según los mismos autores, los secadores directos e indirectos operan en un régimen continuo o discontinuo. Además, los secadores indirectos permiten la regeneración de disolventes y son adecuados para el secado a baja presión y en atmósfera inerte, pudiendo utilizarse para secar productos termolábiles o fácilmente oxidables. Los secadores por radiación son sistemas que utilizan energía radiante para eliminar la humedad del producto. La energía radiante se obtiene eléctricamente mediante radiación infrarroja o materiales refractarios quemados con gas. El precio de la energía necesaria para su uso es significativamente superior al precio del combustible utilizado en sistemas directos o indirectos.

Los secadores dieléctricos generan calor dentro del sólido que se seca mediante un campo de alta frecuencia, lo que crea fricción molecular, que a su vez genera el calor necesario para la vaporización. Este tipo de secadora se ha utilizado muy poco debido a los altos costos de operación.

Un secador tipo samoano consta de un tubo metálico en el que se coloca una fuente de calor, que puede ser leña, carbón, diésel, etc. Encima del tubo y a una distancia de aproximadamente 1,20 metros, se coloca un lecho, placa o bandeja perforada, sobre la que se extiende una fina capa de granos de cacao. La parte inferior debajo del pallet debe estar completamente cerrada, en este caso forma una cámara de aire caliente. Si no se toman las precauciones adecuadas suele ocurrir contaminación por vapores de combustión, pero en general el secador tipo Samoa es adecuado para sustituir el secado natural por luz solar directa en épocas en las que las condiciones ambientales son desfavorables para el proceso de secado.

Una variación del secador de estilo samoano, consta de una cámara de aire caliente completamente cerrada con un techo formado por una placa perforada sobre la que se coloca el cacao. La diferencia con el secador tradicional tipo Samoa es que no se utiliza tubería

interna, sino que el aire caliente se suministra desde una fuente de calor externa mediante un ventilador.

En la figura se muestra un sistema de secado con convección forzada. El secador tipo Samoa utiliza convección natural

Figura 7

Secador Artificial de Cacao con Convección Forzada



Nota. Secador real con sistema de convección

La globalización es un factor importante en la toma de decisiones de países y empresas para entrar en la realidad donde la innovación es el principal componente para impulsar la competitividad. El objetivo de la investigación es analizar la innovación empresarial como eje de la competitividad para las microempresas y pequeñas empresas agroindustriales de Cúcuta. Se utiliza para efectos metodológicos un modelo de elección discreta sobre una muestra de empresas del sector agroindustrial. Esta investigación tiene un enfoque mixto, alcance descriptivo – explicativo, creando la necesidad de estudiar la generación de innovación empresarial. Los resultados muestran que las microempresas y pequeñas empresas del sector agroindustrial de Cúcuta deben mejorar su capacidad de innovar en proceso, producto y organización para ser más competitivos. Cúcuta, frontera y segunda ciudad con mayor desempleo en Colombia, necesita de

la innovación empresarial para lograr competitividad y mejorar sus condiciones sociales desde lo empresarial.(Hernández-Fuentes & Sánchez-Mojica, 2017)

El secado convectivo por aire caliente ha sido ampliamente usado en las etapas postcosecha de diversos productos agroalimentarios. Su uso se debe a que incrementa el grado de conservación de los productos agrícolas a través de la reducción de la actividad de agua, limitando el crecimiento de microorganismos que puedan alterar la calidad del producto final (García & Macías, 2020)

Mediante las pruebas realizadas se pudo determinar que a medida que la demanda del productor aumente será necesario cambiar el motor trifásico del secador tipo bombo mallado deberá ser sustituido por uno de mayor potencia puesto que el que se usa actualmente es de 1 hp afirma (Barco, 2023)

Diseño del Secador

En las siguientes imágenes se puede observar el diseño en 3D del secador tipo túnel, realizado mediante el uso de un software de diseño asistido por computadora (CAD). Este modelo permite visualizar la forma estructural del secador, facilitando la comprensión de las dimensiones exactas y la distribución del calor en su interior. La simulación en 3D proporciona una representación precisa de cómo los flujos de aire y temperatura interactúan dentro del secador, asegurando un control óptimo del proceso de secado del cacao.

Figura 8

Secador de Cacao Tipo Túnel



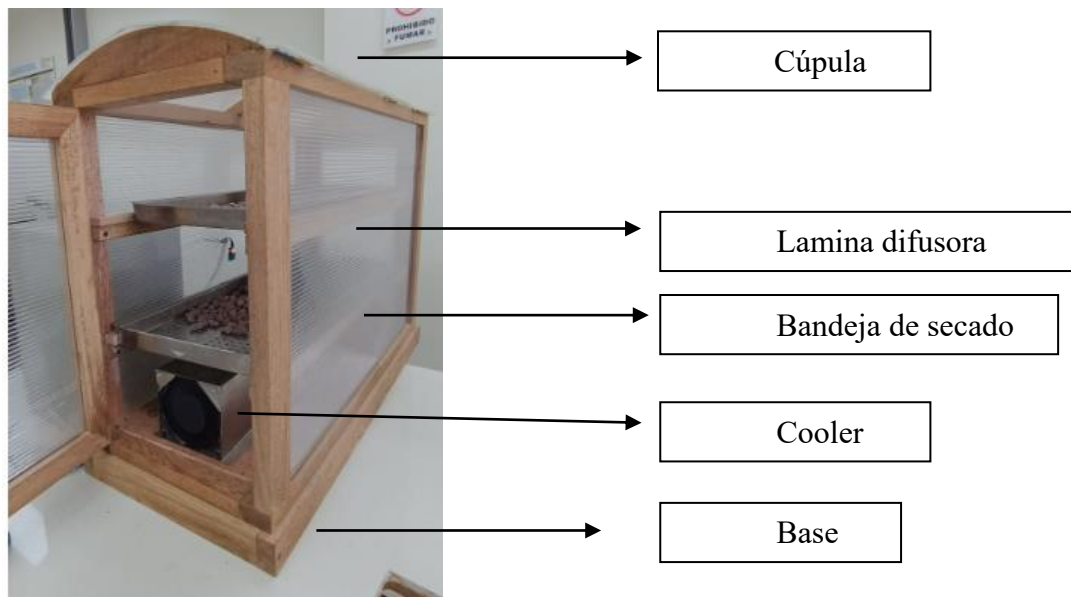
Nota. Modelado prototipo de secador en Solidworks

En las imágenes que se muestran a continuación se pueden identificar claramente las partes clave del prototipo del secador de cacao tipo túnel. Estas imágenes destacan tanto la estructura externa, que proporciona soporte y estabilidad al sistema, como la estructura interna, donde se encuentran los componentes esenciales para el secado. Se pueden observar elementos como los conductos de ventilación, el sistema de control de temperatura, y los sensores de

humedad que forman parte integral del proceso de secado eficiente y controlado del cacao, optimizando la calidad del producto final.

Figura 9

Partes del Secador Vista Lateral



Nota. Ubicación partes en prototipo secado de cacao

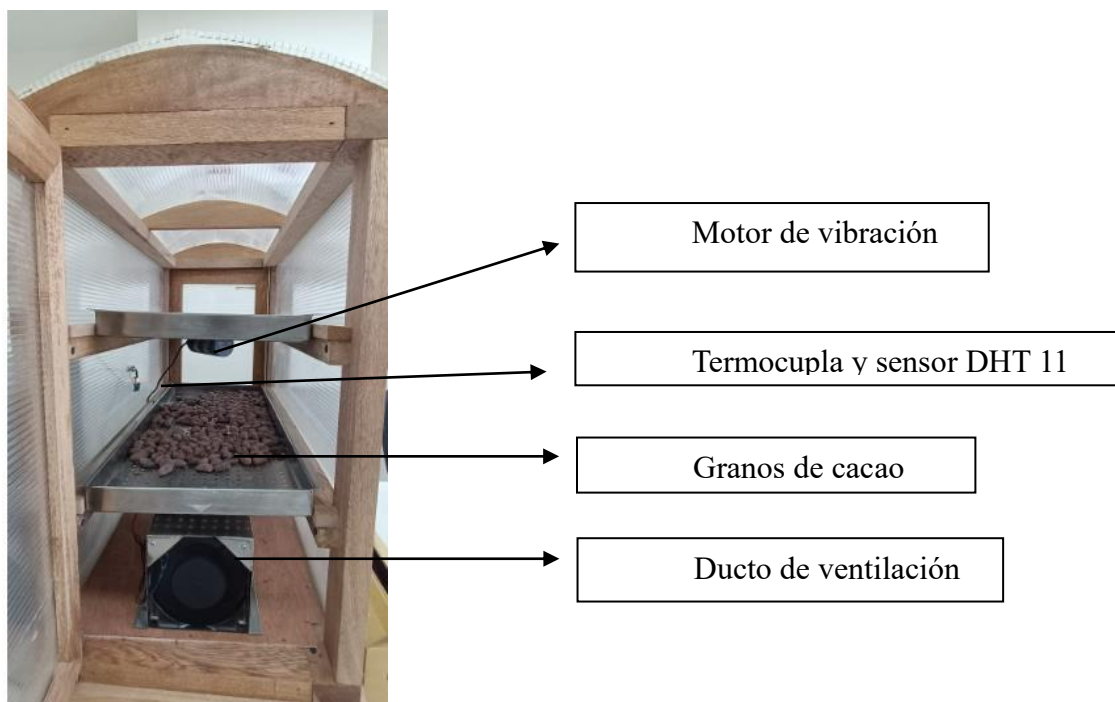
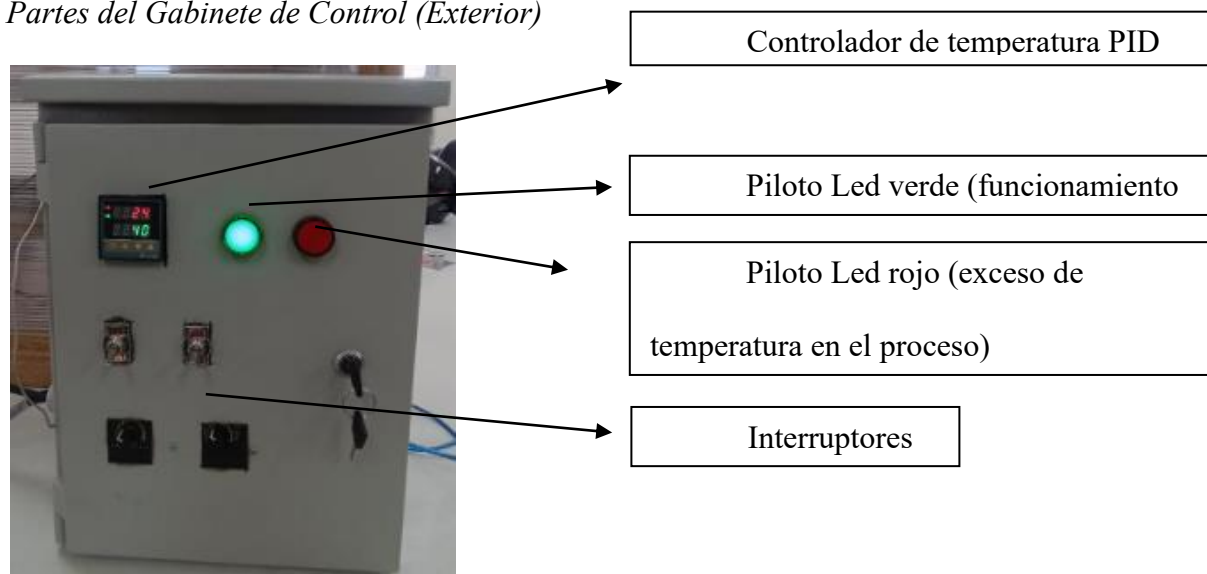
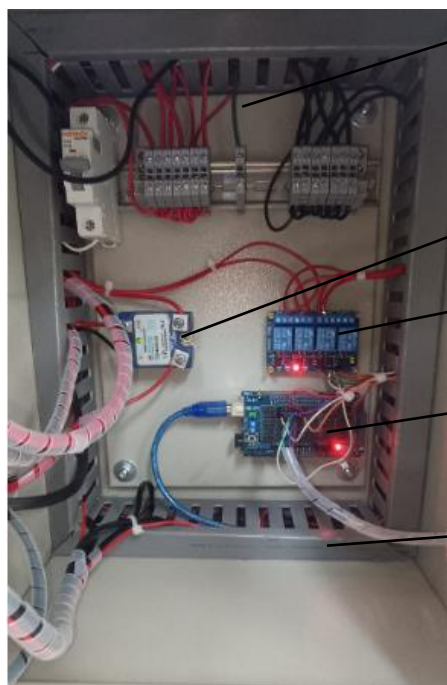
Figura 10*Partes del Secador Vista Frontal**Nota.* Ubicación partes internas del prototipo de secado**Figura 11***Partes del Gabinete de Control (Exterior)**Nota.* Ubicación dispositivos externos en gabinete de control

Figura 12*Partes del Gabinete de Control Interior)*

Borneras de fase,

Relé de estado sólido

Modulo tarjeta de relé

Arduino Mega 2560

canaleta

Nota. Ubicación componentes electrónicos al interior del gabinete

Considerando el proceso de postcosecha del cacao y los métodos actualmente empleados por los cacaos cultores, se ha determinado que la opción más conveniente es diseñar un dispositivo de secado automatizado utilizando madera como material base. Este dispositivo consistirá en dos bandejas suspendidas, cada una con perforaciones de 0.5 cm, y estará equipado con un motor de vibración en su parte inferior. El objetivo principal de este dispositivo es controlar la temperatura y la humedad del grano de cacao para mejorar la calidad del producto final.

La elección de la madera como material se debe a su capacidad para mantener la temperatura interior del dispositivo sin desprender olores que puedan afectar el proceso de secado. El diseño propuesto busca reemplazar la práctica de secado artesanal realizada manualmente por un operario durante el proceso de secado. Para lograr temperaturas homogéneas

en el interior del dispositivo, se incorporará una resistencia PTC de 500W y un ventilador (cooler) con balineras que impulsará el aire de manera forzada a través de las aletas de la resistencia.

En la siguiente imagen se puede observar la bandeja con perforaciones de 0.5 cm y un largo de 70 cm x30cmx3cm las cuales almacenaran los granos de cacao, estas tienen una capacidad máxima de 1.5 kg por bandeja

Figura 13

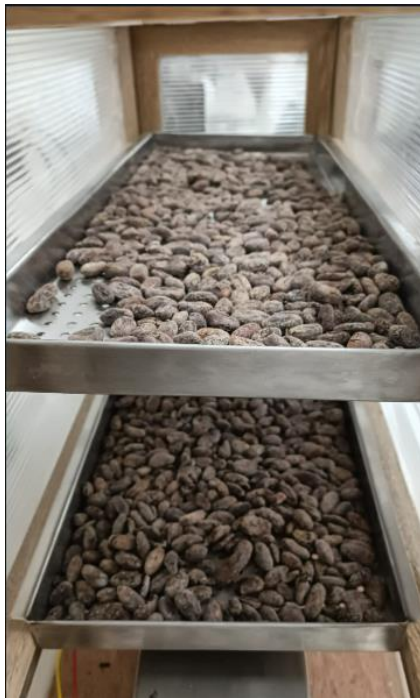
Bandejas de Secado de Grano de Cacao



Nota. Perforaciones y biseles de bandejas de secado de grano

Figura 14

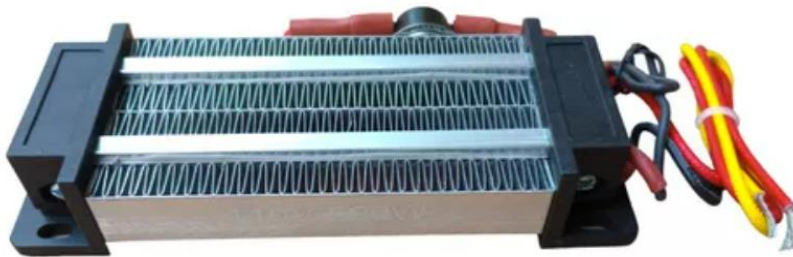
Bandejas de Secado con Carga de Cacao



Nota. Carga de granos de cacao dispuestas en las bandejas inferior y superior

Figura 15

Elemento de Calefacción PTC de 500W



Nota. Resistencia térmica con coeficiente de temperatura positivo

Tabla 1*Características y Especificaciones de la Resistencia PTC*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|
| Equipo | Resistencia eléctrica | Material | Aluminio |
| Conexión | 110 AC. | Material de calefacción | Termistor PTC |
| Potencia | 500W | Peso | 5.8 onzas |
| | | Tamaño | 140*50*26mm/5.5*2*1" |

Nota. La tabla 1 contiene las características y especificaciones del calefactor PTC (calefactor de coeficiente de temperatura positivo)

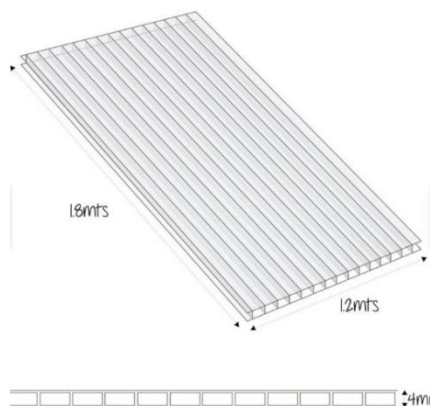
Figura 16*Ventilador de Refrigeración Axial de 2 Hilos*

Nota. Vista frontal del ventilador de flujo axial

Tabla 2*Características y Especificaciones del Ventilador de Refrigeración*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Equipo | Ventilador de refrigeración | Material | Aluminio |
| Conexión | 110 AC. | Conector de alimentación | Cable fase y cable neutro (2 pines= |
| Frecuencia | 60Hz | Peso | 11 onzas |
| Velocidad de rotación | 3800RPM | Tamaño | 4,72"x 0,98"x 4,72" |
| Nivel de ruido | 42 dB | Método de refrigeración | Aire |

Nota. La tabla 2 contiene las características y especificaciones del ventilador de refrigeración útiles para su instalación y montaje

Figura 17*Lamina Difusora en Policarbonato*

Nota. Acotado de la lámina difusora

Tabla 3*Características y Especificaciones de la Lámina Difusora*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|---------------|
| Material | Policarbonato |
| Ancho | 1.2 metros |
| Espesor | 4 mm |
| Largo | 1.80 metros |
| Color | Cristal |

Nota. La tabla 3 contiene las características y especificaciones de la lámina difusora

Figura 18*Controlador de Temperatura REX-C100FK02-V-EN*

Nota. Vista frontal panel de control del controlador de temperatura

Tabla 4*Características y Especificaciones del Controlador de Temperatura*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---|
| Equipo | Controlador de temperatura | Material | Plástico ABS |
| Conexión | 100-240 AC. | Conector de alimentación | 3 pines |
| Tamaño del panel | 48x48 | Peso | 7 onzas |
| Orificio de montaje | 45x45 | Tamaño | 1.89 'x 1.89 'x 3.94' |
| Tipo de control | PID con auto tuning | Rango de temperatura | 0°C - 400°C |
| Señal de entrada | Termocupla tipo K | Primer canal de alarma | Alarma de desviación alta con acción de retención |

Nota. La tabla 4 contiene las características y especificaciones del controlador de temperatura con auto-tuning

Figura 19*Motor de Vibración*

Nota. Vista del motor de vibración junto al controlador de velocidad

Tabla 5*Características y Especificaciones del Motor de Vibración*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|----------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|
| Equipo | Motor de vibración | Material del cuerpo | Nylon |
| Voltaje de alimentación | 12 V. | Vida útil | 10000 horas |
| Frecuencia de vibración | 3800 RMP | Peso | 24 onzas |
| Tipo de motor | Motor de vibración | Tamaño | 1.96' øx5.11' |
| | | Color | Gris |
| Tipo de conexión | Cableado con clavija | Impermeable | No |

Nota. La tabla 5 contiene las características y especificaciones del motor de vibración útiles para su correcta instalación

Figura 20*Resorte Helicoidal*

Nota. Vista de techo del resorte helicoidal

Tabla 6*Características y Especificaciones del Resorte Helicoidal*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|--------------------|
| Tipo | Resorte helicoidal |
| Material | Aluminio |
| Diámetro exterior | 1.1 cm |
| Longitud | 2.3 cm |

Nota. La tabla 6 contiene las características y especificaciones del resorte helicoidal usado para minimizar ruidos y vibraciones

Figura 21*Arandela de Fijación Tipo Grower*

Nota. Vista de la arandela de seguridad y su respectivo corte

Tabla 7*Características y Especificaciones de la Arandela de Seguridad*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Material | Aleación de acero |
| tipo | Arandela de seguridad tipo Grower |
| Acabado superficial | cincado |
| Diámetro interior | 2mm |
| Diámetro exterior | 5mm |
| Espesor | 2mm |
| Peso | 0.10 g |

Nota. La tabla 7 contiene las características y especificaciones de las arandelas de seguridad empleadas

Figura 22*Esqueleto en Madera Vista Frontal*

Nota. Vista frontal de la estructura de madera del prototipo con puerta de apertura

Figura 23*Esqueleto en Madera Vista Lateral*

Nota. Vista lateral del prototipo de secado

Tabla 8*Características y Especificaciones del Esqueleto en Madera*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|----------------------------------|
| Equipo | Esqueleto de madera |
| Material | Madera |
| Peso | 10 kg |
| Tamaño | 60cm x 35cm x 85cm |
| Tipo | Secador tipo túnel |
| Fuente de calor | Resistencia eléctrica |
| Sistema de control | Automatizado |
| Capacidad | 3kg de grano |
| Ventilación | Ventilador de balineras axial |
| Aislamiento térmico | Lamina difusora en policarbonato |

Nota. La tabla 8 contiene las características y especificaciones del prototipo de secado

Figura 24*Termocupla Tipo K*

Nota. Vista de los componentes de una termocupla con puntos calientes y frios

Tabla 9*Características y Especificaciones de la Termocupla Tipo K*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Equipo | Termocupla tipo k | Material | Aleación de cromo alumen |
| Conexión | Conector estándar | Rango de temperatura | -200°C – 1300°C |
| Exactitud | ±1.5°C o ±0.25% de lectura | Peso | 15g |
| Coefficiente de temperatura | Aproximadamente 41 µV/°C | Tamaño | 70cm |
| Resistencia | 10.72 Ω a 0°C | Tiempo de respuesta | 2 segundos |

Nota. La tabla 9 contiene las características y especificaciones del prototipo de secado

Figura 25.

Relé de Estado Sólido (SSR)



Nota. Vista frontal de los puertos de conexión del relé de estado solido

Tabla 10*Características y Especificaciones del Relé de Estado Sólido (SSR)*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Equipo | Relé de estado solido | Material | Aluminio |
| Voltaje de control | 3-32V DC | Conector de alimentación | Mediante tornillos |
| Corriente de control | 3-25 mA | Peso | 100 g |
| Voltaje de carga | 24-480V AC | Tamaño | 5cm x 7cm x 2 cm |
| Corriente de carga | 10-40A | Color | Azul |
| Tipo de salida | AC (Corriente alterna) | Temperatura de operación | -20°C a 80°C (-4°F a 176°F) |
| Tipo de conmutación | Zero-crossing (cruce por cero) | | |
| Tiempo de encendido | ≤ 10 ms | | |
| Tiempo de apagado | ≤ 10 ms | | |

Nota. La tabla 10 contiene las características y especificaciones del relé de estado sólido (SSR) útiles para conocer la capacidad de los componentes electrónicos

Figura 26*Indicador LED*

Nota. Estructura externa de los pilotos LED de color rojo y verde

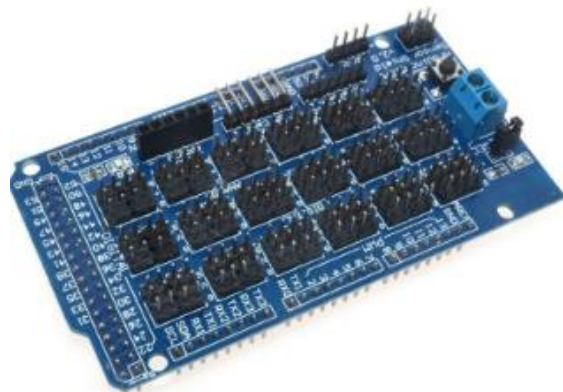
Tabla 11*Características y Especificaciones de Indicador LED*

| Características eléctricas | | Especificaciones físicas | |
|----------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|
| Equipo | Indicador LED | Material de la carcasa | Plástico |
| Voltaje de control | 110-220 | Conector de alimentación | Mediante tornillos |
| Corriente de control | 10-20 mA | Peso | 100 g |
| Consumo de energía | Bajo | Tipo de montaje | Panel |
| | | Color | Rojo/verde |
| Potencia nominal | 0.12W - 0.44W | Diámetro | 22 mm |
| Tipo de corriente | CA/CC (según modelo) | Rango de temperatura | -25°C a +55°C |

Nota. La tabla 11 contiene las características y especificaciones de los pilotos de luz LED

Figura 27

Tarjeta de Expansión Arduino Mega 2560



Nota. Pines y módulos de la tarjeta de expansión para Arduino Mega 2560

Tabla 12

características y especificaciones del Características y Especificaciones de la Tarjeta de Expansión Arduino Mega 2560

| <i>Características eléctricas</i> | | <i>Especificaciones físicas</i> | |
|---|-----------------------------|---------------------------------|--|
| <i>Equipo</i> | <i>Tarjeta de expansión</i> | <i>Material de la PCB</i> | <i>FR4 (fibra de vidrio con epoxi)</i> |
| <i>Voltaje de operación</i> | <i>5V</i> | <i>Interfaz de comunicación</i> | <i>USB tipo B</i> |
| <i>Voltaje de entrada (recomendado)</i> | <i>7-12V</i> | <i>Peso</i> | <i>37 g</i> |
| <i>Corriente por pin I/O</i> | <i>20 mA por pin</i> | <i>Tipo de montaje</i> | <i>Panel</i> |

Nota. La tabla 12 contiene las características y especificaciones de la tarjeta de expansión

Figura 28*Interruptor (On/Off)*

Nota. Vista frontal y puertos de conexión de los interruptores

Tabla 13*Características y Especificaciones del Interruptor (On/Off)*

| <i>Características eléctricas</i> | | <i>Especificaciones físicas</i> | |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| <i>Equipo</i> | <i>Interruptor On/Off</i> | <i>Material de la carcasa</i> | <i>Plástico ABS</i> |
| <i>Voltaje nominal</i> | <i>12V DC</i> | <i>Conector de alimentación</i> | <i>Mediante tornillos</i> |
| <i>Corriente nominal</i> | <i>1-20A</i> | <i>Peso</i> | <i>170 g</i> |
| <i>Temperatura de operación</i> | <i>-20°C a 85°C</i> | <i>Tipo de montaje</i> | <i>Panel</i> |
| <i>Resistencia de aislamiento</i> | <i>100MΩ o más (a 500V DC)</i> | <i>Color</i> | <i>Negro</i> |
| | | <i>Diámetro</i> | <i>15 mm</i> |

Nota. La tabla 13 contiene las características y especificaciones de interruptores de perilla

Figura 29

Módulo de Relé

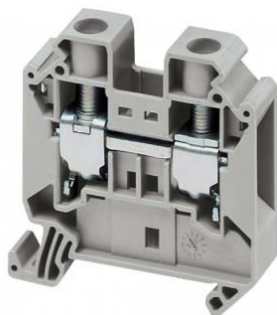


Nota. Vista de techo de los puertos y pines de conexión del módulo de relé

Tabla 14*Características y Especificaciones del Módulo de Relé*

| <i>Características eléctricas</i> | | <i>Especificaciones físicas</i> | |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|
| <i>Equipo</i> | <i>Módulo de relé</i> | <i>Material de la placa</i> | <i>Fibra de vidrio con recubrimiento de resina epoxi (FR4)</i> |
| <i>Voltaje de funcionamiento</i> | <i>12V DC</i> | <i>Conectores</i> | <i>Terminales de tornillo</i> |
| <i>Corriente de activación</i> | <i>15-20mA por canal</i> | <i>Peso</i> | <i>50 g</i> |
| <i>Tensión nominal de relé</i> | <i>250V AC/30V DC</i> | <i>Tipo de montaje</i> | <i>Orificios para tornillos azul</i> |
| | | <i>Color de la placa</i> | |
| <i>Tiempo de activación</i> | <i>10 ms máximo</i> | <i>Tipo de relé</i> | <i>Relés electromecánicos SPDT (Single Pole Double Throw)</i> |
| <i>Vida eléctrica</i> | <i>Mas de 100.000 ciclos</i> | <i>Numero de canales</i> | <i>4</i> |

Nota. La tabla 14 contiene las características y especificaciones de modulo de relé

Figura 30*Borneras Para Riel Omega*

Nota. Vista frontal de los puertos de conexión por cable de las borneras

Tabla 15*Características y Especificaciones de la Bornera de Riel Omega*

| <i>Características eléctricas</i> | | <i>Especificaciones físicas</i> | |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| <i>Equipo</i> | <i>Bornera</i> | <i>Material</i> | <i>Poliamida (PA)</i> |
| <i>Resistencia de aislamiento</i> | $\geq 10^9 \Omega$ a 500V DC | <i>Dimensiones</i> | 42mmx6mmx40mm |
| <i>Corriente nominal</i> | 32 ^a a 41A | <i>Numero de polos</i> | 2 |

Nota. La tabla 15 contiene las características y especificaciones de

Figura 31*Riel Omega*

Nota. Estructura del riel tipo Omega para montaje de borneras

Tabla 16*Características y Especificaciones del Riel Omega*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|---------------------------|
| Equipo | Riel omega |
| Material | Acero galvanizado |
| Tipo de riel | DIN 35 mm (estándar) |
| Tamaño | 35mm x 7.5mm x15mm |
| Forma | Omega |
| Capacidad de carga | Alta resistencia mecánica |

Nota. La tabla 16 contiene las características y especificaciones del riel omega para adaptación de borneras

Figura 32*Canaleta Plástica*

Nota. Estructura física de la canaleta ranurada usada para proteger conexiones eléctricas

Tabla 17*Características y Especificaciones de la Canaleta Ranurada*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|---|
| Equipo | Canaleta ranurada |
| Material | PVC (policloruro de vinilo) |
| Color | Gris |
| Tamaño | 35mm x 7.5mm x15mm |
| Forma | rectangular |
| Capacidad de carga | Soporta la distribución ordenada de múltiples cables eléctricos |

Nota. La tabla 17 contiene las características y especificaciones de la canaleta ranurada

Figura 33*Gabinete Electrico*

Nota. Componentes físicos del gabinete de control del secador de cacao

Tabla 18*Características y Especificaciones del Gabinete Eléctrico*

| Especificaciones físicas | |
|--------------------------|--|
| Equipo | Gabinete eléctrico |
| Material | Acero al carbono |
| Color | Gris |
| Tamaño | 300mm x 400mm x 200mm |
| Forma | rectangular |
| Capacidad de carga | Soporta la instalación de equipos eléctricos pesados |

Nota. La tabla 18 contiene las características y especificaciones de el gabinete eléctrico

Materiales para el diseño

Para la realización e implementación del prototipo, se ha decidido utilizar madera de Urapán debido a su característica de ser inodora, lo cual es fundamental para este tipo de aplicaciones. La madera de Urapán, gracias a sus vetas longitudinales, proporciona la resistencia necesaria a la estructura del prototipo. Además, este material ofrece la ventaja de ser fácilmente trabajado, lo que permite obtener un acabado de alta calidad y durabilidad en el tiempo.

La elección de la madera de Urapán no solo garantiza la solidez y estabilidad estructural del prototipo, sino que también asegura una larga vida útil del material. Por otro lado, los costos de este material son equilibrados y accesibles económicamente, lo que facilita la replicación del prototipo según las necesidades del productor.

Figura 34

Construcción del Secador de Cacao



Nota. Elaboración del prototipo de secador de granos de cacao

En la Figura 34 se muestra la estructura de madera que presenta un techo de forma parabólica, diseñado con el propósito de lograr una distribución homogénea del aire caliente

dentro del recinto. Además, se pueden apreciar dos bandejas perforadas con sus respectivos soportes de madera, así como también dos puertas, una en cada lateral del recinto.

Figura 35

Montaje del Ducto de Ventilación



Nota. Conexiones internas de resistencia térmica y Cooler

En la Figura 35 se muestra una de las entradas del prototipo, donde se encuentra un conducto de ventilación fabricado en acero calibre 14. En el interior de este conducto se encuentra ubicado el ventilador de balineras (cooler), mientras que en el extremo opuesto del conducto se encuentra suspendida la resistencia, la cual está anclada a las pestañas del conducto.

El conducto de ventilación tiene unas dimensiones de 12 cm x 12 cm x 20 cm y ha sido diseñado con el objetivo de mejorar la proyección del flujo de aire dentro del recinto.

Figura 36*Ensamble del Prototipo y Sistema de Control de Temperatura*

Nota. Adaptación de componentes electrónicos y ensamble del sistema

En la Figura 36 se muestra el prototipo junto con el controlador de temperatura y el relé de estado sólido. Es importante destacar que tanto el ventilador como la resistencia ya se encuentran en posición de funcionamiento. En este punto, se procede a cargar las bandejas con el cacao que será sometido al proceso de secado, basándose en los parámetros de calidad específicos del cacao.

Implementación del algoritmo

El controlador PID (proporcional, integral, derivativo) es el algoritmo de control más utilizado en la industria y ha sido ampliamente adoptado en el ámbito del control industrial. Su popularidad se debe en parte a su rendimiento fiable en una variedad de condiciones operativas y en parte a su simplicidad funcional, lo que permite a los ingenieros utilizarlo de manera sencilla y directa.

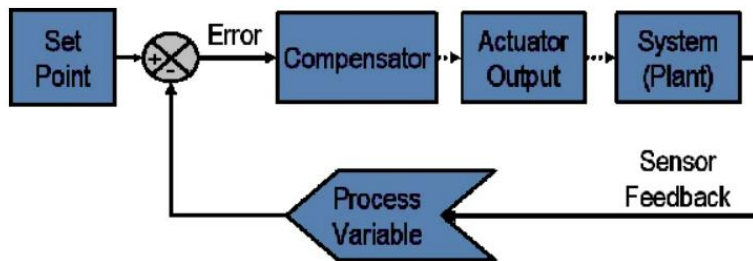
El algoritmo PID incluye tres coeficientes principales: proporcional, integral y derivado, que se ajustan para obtener una respuesta óptima. Este documento analiza los sistemas de ciclo cerrado, la teoría del PID clásico y los efectos de la sintonización en un sistema de control de ciclo cerrado. Además, se tiene en cuenta que el software Labview será usado solo con fines de monitoreo del sistema por otra parte el software Matlab permitirá la simulación de la respuesta del controlador PID.

En un sistema de control típico, la variable de proceso es el parámetro del sistema que se debe regular, como la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la presión (psi) o la tasa de flujo (litros/minuto). Un sensor se emplea para medir esta variable de proceso y proporcionar retroalimentación al sistema de control. El punto de referencia es el valor deseado para la variable de proceso, como 100 grados Celsius en un sistema de control de temperatura. En cualquier momento, la diferencia entre la variable de proceso y el punto de referencia se utiliza por el algoritmo del sistema de control (compensador) para determinar la salida necesaria para accionar el sistema (planta). Por ejemplo, si la variable de proceso de temperatura medida es 100°C y el punto de referencia deseado es 120°C , entonces la salida del actuador especificada por el algoritmo de control podría ser activar un calentador. La activación del calentador provoca un aumento en la temperatura del sistema. Este es un sistema de control de ciclo cerrado, ya que el proceso de lectura de sensores

para proporcionar retroalimentación constante y calcular la salida deseada del actuador se repite continuamente a una tasa de ciclo fija, como se ilustra en la figura

Figura 37

Diagrama de Bloques de un Sistema Típico de Ciclo Cerrado.

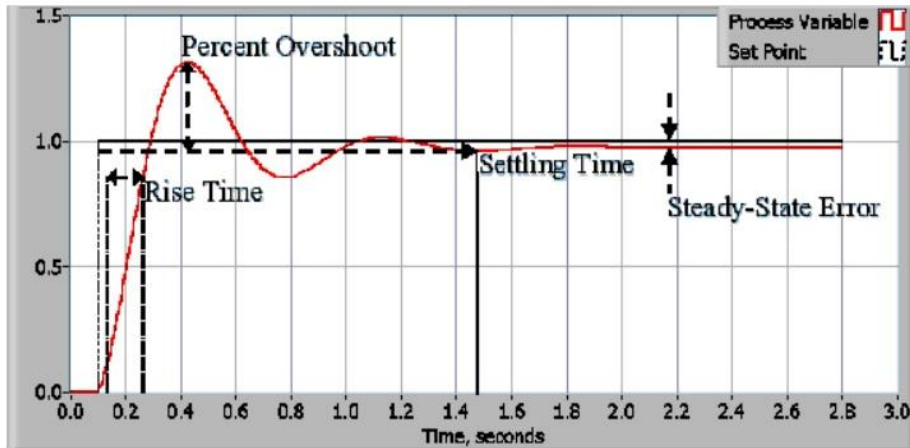


Nota: National Instruments

El proceso de diseño de control comienza con la definición de los requisitos de rendimiento. Generalmente, el rendimiento del sistema de control se mide aplicando una función de paso como la variable de comando del punto de referencia y luego midiendo la respuesta de la variable del proceso. La respuesta se cuantifica comúnmente midiendo características definidas de la forma de onda. El tiempo de incremento es la cantidad de tiempo que tarda el sistema en pasar del 10% al 90% del valor de estado estable o final. El porcentaje de sobre impulsó es la cantidad en que la variable del proceso excede el valor final, expresado como un porcentaje del valor final. El tiempo de estabilización es el tiempo requerido para que la variable del proceso se estabilice dentro de un cierto porcentaje (comúnmente 5%) del valor final. El error de estado estable es la diferencia final entre la variable del proceso y el punto de referencia. Cabe destacar que la definición exacta de estas cantidades puede variar en la industria y la academia.

Figura 38

Respuesta de un Sistema Típico de Ciclo Cerrado PID.



Nota. Grafica National Instruments

Después de utilizar una o todas estas métricas para definir los requisitos de rendimiento de un sistema de control, es crucial identificar las condiciones más adversas bajo las cuales se espera que el sistema cumpla con estos requisitos. A menudo, una perturbación afecta la variable del proceso o su medición, por lo que es esencial diseñar un sistema de control que funcione adecuadamente en las peores condiciones. La capacidad del sistema de control para mitigar los efectos de las perturbaciones se conoce como rechazo de perturbaciones.

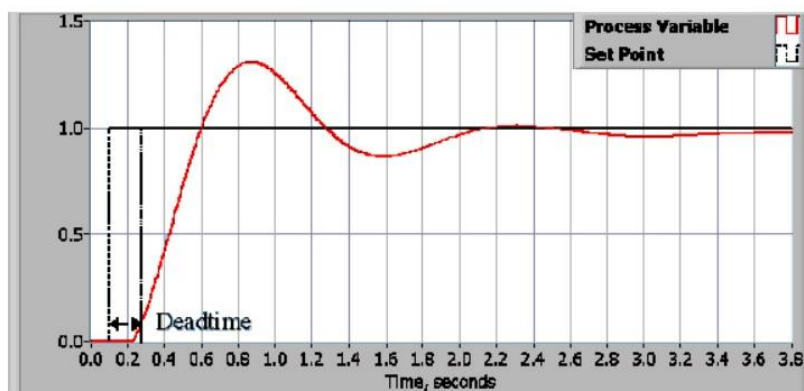
En algunos casos, la respuesta del sistema a una determinada salida de control puede variar con el tiempo o en función de alguna variable. Un sistema no lineal es aquel en el que los parámetros de control que generan una respuesta deseada en un punto de operación pueden no ser efectivos en otro punto. Por ejemplo, una cámara parcialmente llena de fluido reaccionará más rápidamente a la salida del calentador cuando esté casi vacía que cuando esté casi llena. La capacidad del sistema de control para tolerar perturbaciones y no linealidades se denomina robustez del sistema de control.

Algunos sistemas presentan un comportamiento no deseado conocido como tiempo muerto, que es un retraso entre el momento en que cambia una variable del proceso y el momento en que se observa dicho cambio. Por ejemplo, un sensor de temperatura colocado lejos de una válvula de entrada de agua fría no detectará inmediatamente un cambio de temperatura si la válvula se abre o cierra. El tiempo muerto también puede deberse a un sistema o actuador de salida que responde lentamente a los comandos de control, como una válvula que se abre o cierra lentamente. En las plantas químicas, una causa común de tiempo muerto es el retraso provocado por el flujo de fluido a través de las tuberías.

El ciclo de Loop es un parámetro crucial en un sistema de lazo cerrado. El tiempo entre las ejecuciones de un algoritmo de control se conoce como el tiempo de ciclo Loop. Los sistemas que experimentan cambios rápidos o tienen comportamientos complejos necesitan tasas de ciclo de control más rápidas.

Figura 39

Respuesta de un Sistema en Ciclo Cerrado con Tiempo Muerto



Nota. Grafica ciclo cerrado National Instruments

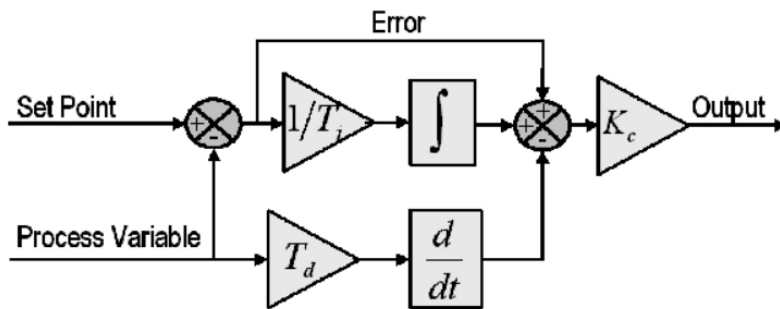
El algoritmo de control PID es una solución robusta y sencilla que se emplea extensamente en la industria. Su flexibilidad le permite ofrecer resultados sobresalientes en una

amplia gama de aplicaciones, lo que ha contribuido significativamente a su uso sostenido a lo largo de los años.

El componente proporcional se basa únicamente en la diferencia entre el punto de referencia y la variable del proceso, conocida como el término de error. La ganancia proporcional (K_c) define la relación entre la respuesta de salida y la señal de error. Por ejemplo, si el término de error es 10 y la ganancia proporcional es 5, se obtendrá una respuesta proporcional de 50. Generalmente, incrementar la ganancia proporcional acelerará la respuesta del sistema de control. No obstante, si la ganancia es excesiva, la variable del proceso puede comenzar a oscilar. Si se incrementa aún más K_c , las oscilaciones se amplificarán, volviendo el sistema inestable y potencialmente descontrolado.

Figura 40

Diagrama de Bloques de un Algoritmo Básico de Control PID.



Nota. Control PID National Instruments

El componente integral acumula gradualmente el error a lo largo del tiempo. Incluso un error pequeño hará que este componente aumente lentamente. La respuesta integral seguirá aumentando continuamente a menos que el error sea cero, corrigiendo así el error de estado estable, que es la diferencia final entre la variable del proceso y el punto de referencia. Sin embargo, puede ocurrir un fenómeno conocido como windup integral cuando la acción integral satura un controlador sin que el error converja a cero.

El componente derivado provoca una salida decreciente si la variable del proceso cambia rápidamente. Su magnitud es proporcional a la velocidad de cambio de la variable del proceso. Ajustar el parámetro de tiempo derivado (T_d) hará que el sistema de control responda más rápidamente a los cambios en el error, mejorando así la respuesta general del sistema. Por lo general, se utiliza un tiempo derivado pequeño (T_d) en sistemas prácticos debido a la sensibilidad de la respuesta derivada al ruido en la señal del proceso o a ciclos de control lentos, lo que podría llevar a inestabilidades en el sistema de control.

El proceso de ajustar las ganancias óptimas de P, I y D para lograr una respuesta ideal de un sistema de control se conoce como sintonización. Existen varios métodos de sintonización, entre los cuales se discuten el método de "ensayo y error" y el método de Ziegler-Nichols.

Las ganancias de un controlador PID pueden determinarse mediante un método de prueba y error. Una vez que un ingeniero comprende la importancia de cada parámetro de ganancia, este método se vuelve relativamente sencillo. En este enfoque, los términos I y D se inicializan a cero y la ganancia proporcional se incrementa gradualmente hasta que la salida del sistema comienza a oscilar.

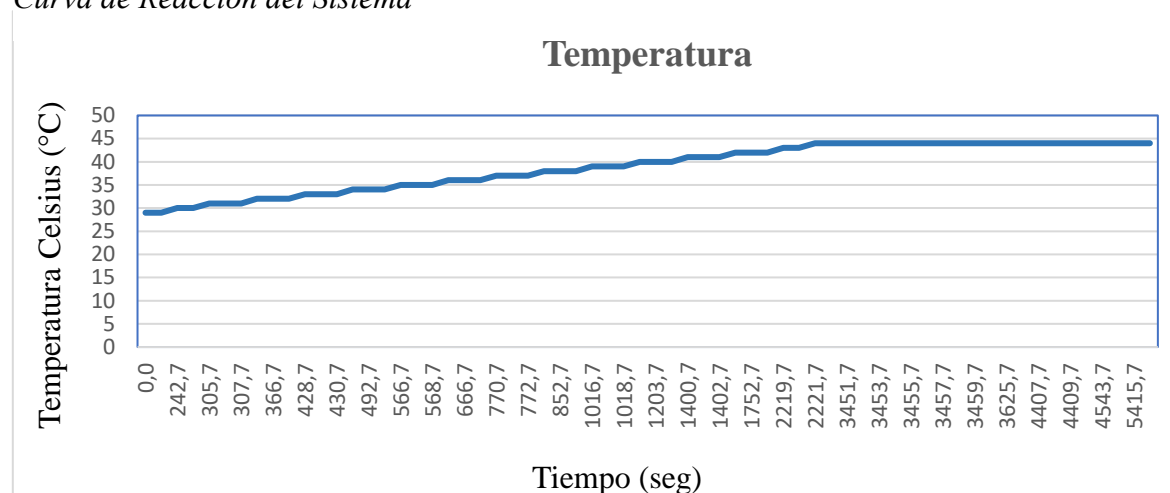
A medida que se aumenta la ganancia proporcional, el sistema se vuelve más rápido, aunque es crucial evitar la inestabilidad. Una vez establecida la ganancia proporcional para obtener una respuesta rápida deseada, se ajusta el término integral para eliminar las oscilaciones. El término integral reduce el error de estado estable pero puede incrementar el sobreimpulso, necesario para asegurar una respuesta rápida del sistema ante cambios. Se ajusta el término integral para minimizar el error de estado estable. Después de configurar P e I para obtener un control rápido con mínimo error de estado estable, se ajusta el término derivativo para mejorar la velocidad de respuesta sin oscilaciones excesivas hacia el punto de referencia.

Aumentar el término derivativo reduce el sobre impulso y mejora la estabilidad, aunque también aumenta la sensibilidad del sistema al ruido. A menudo, los ingenieros deben equilibrar diferentes características del sistema de control para cumplir con los requisitos específicos de la aplicación.

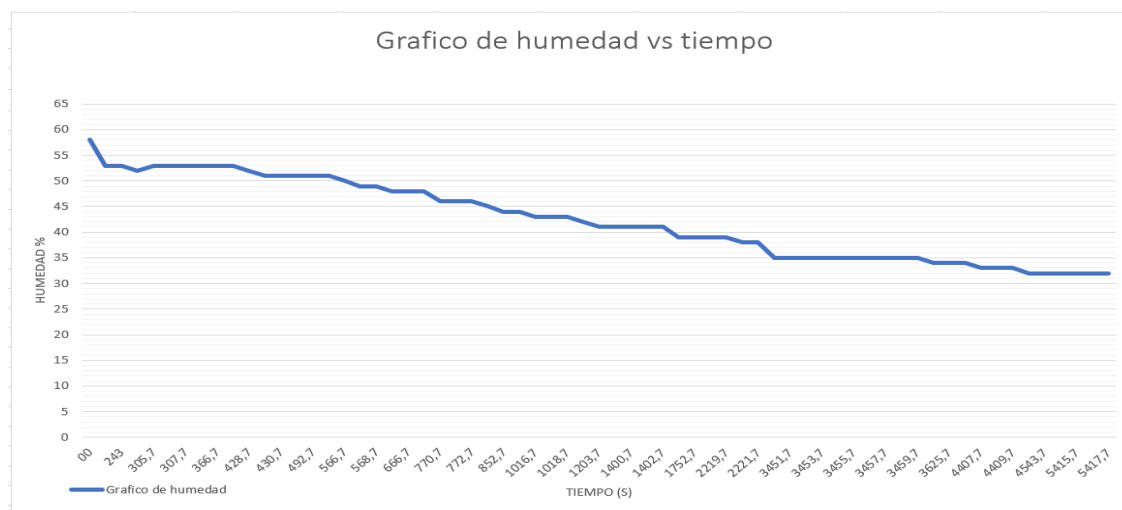
El proceso de modelado y sintonización de Alfaro es un enfoque estructurado y sistemático para el diseño y ajuste de controladores en sistemas de control. Este método es utilizado ampliamente en la industria debido a su capacidad para optimizar el rendimiento del sistema y mejorar la estabilidad y eficiencia operativa. El proceso comienza con la identificación precisa del modelo matemático del sistema a controlar, seguido por la selección de un controlador adecuado y la sintonización de sus parámetros para alcanzar el comportamiento deseado.

La sintonización de Alfaro se basa en una serie de pasos metódicos que incluyen la recolección de datos del sistema en su estado natural, la aplicación de técnicas de identificación para obtener un modelo representativo, y el ajuste iterativo de los parámetros del controlador para minimizar el error entre la salida real y la esperada del sistema. Este enfoque no solo permite un control preciso y eficiente, sino que también facilita la adaptación a cambios en las condiciones operativas y en las dinámicas del sistema.

A lo largo de este proceso, se utilizan herramientas matemáticas y computacionales avanzadas para analizar y validar el modelo del sistema y los ajustes del controlador, asegurando que se cumplan los requisitos de rendimiento y estabilidad. La metodología de Alfaro, con su enfoque riguroso y sistemático, se ha convertido en una referencia en la ingeniería de control, destacándose por su aplicabilidad en una amplia gama de industrias y tipos de sistemas.

Figura 41*Curva de Reacción del Sistema*

Nota. Grafica de línea denotando el comportamiento de la temperatura con el paso del tiempo

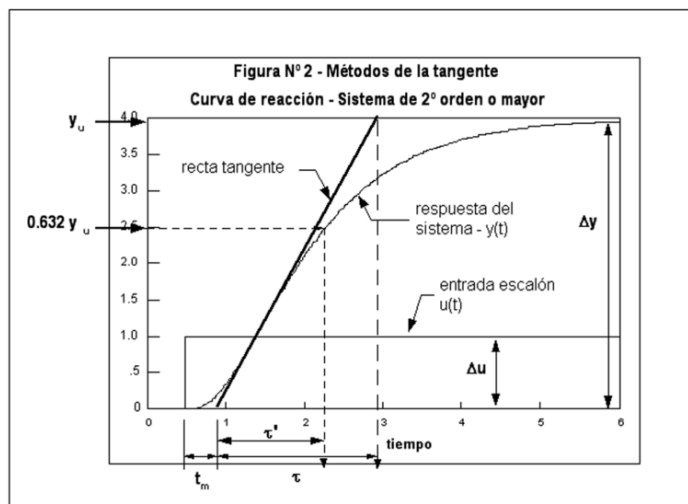
Figura 42*Grafica de Respuesta Humedad vs Tiempo*

Nota. Grafica de línea denotando el comportamiento de la humedad (%) con el paso del tiempo

Se observó que el sistema térmico en lazo abierto produjo una curva de reacción con forma de "S", donde se pueden identificar parámetros como el tiempo muerto (t_m) y el valor máximo de estabilidad.

Figura 43

Respuesta al Escalón en Lazo Abierto del Prototipo Tipo Túnel



Nota. Métodos de la tangente y su curva de reacción

De la curva previamente mostrada, podemos identificar ciertos valores importantes para aplicar los métodos de caracterización. La respuesta obtenida permite clasificar tanto el prototipo de secador de grano de cacao como el proceso en sí como de primer orden.

Empezaremos aplicando el método de dos puntos de Alfaro y el método de Smith. Este último, a su vez, desarrolló su método basándose en otros procedimientos similares que seleccionan dos puntos de la curva de reacción, diferenciándose únicamente en la elección de los instantes en que la respuesta del modelo coincide con la del proceso real.

De esta manera, se pueden establecer ecuaciones generales para los métodos de dos puntos con el objetivo de identificar un modelo de primer orden con tiempo muerto, basado

en los tiempos necesarios para alcanzar dos puntos específicos en la curva de reacción del proceso.

Si p_1 y p_2 son dos valores porcentuales del cambio en la respuesta del sistema a un cambio escalón en la entrada, y t_1 y t_2 son los tiempos necesarios para alcanzar estos valores, como se muestra en la figura 3, entonces los parámetros de un modelo de primer orden con tiempo muerto se pueden determinar a partir de:

$$\tau = a t_1 + b t_2$$

$$t_m = c t_1 + d t_2$$

Tabla 19

Constantes para la identificación de los modelos de primer orden mas tiempo muerto

| <i>Tabla N° 1 - Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto</i> | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <i>Método</i> | <i>%p₁ (t₁)</i> | <i>%p₂ (t₂)</i> | <i>A</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> |
| Alfaro | 250 | 75.0 | -0.910 | 0.910 | 1.262 | -0.262 |
| Bröida | 28,0 | 40.0 | -5.500 | 5.500 | 2.800 | -1.800 |
| Chen y Yang | 33,0 | 67.0 | -1.400 | 1.400 | 1.540 | -0.540 |
| Ho et al. | 35.0 | 85.0 | -0.670 | 0.670 | 1.300 | -0.290 |
| Smith | 28.3 | 63.2 | -1.500 | 1.500 | 1.500 | -0.500 |
| Vitecková et al. | 33.0 | 70.0 | -1.245 | 1.245 | 1.498 | -0.498 |

Nota. Esta tabla contiene valores y contantes útiles para identificar los dos puntos y tiempos en las gráficas de temperatura

$$k_p = \Delta y / \Delta u$$

La función de transferencia en forma normalizada:

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1}$$

Procedimiento preliminar con los datos obtenidos en la prueba final de laboratorio.

Recordemos que se capturaron los datos a través de un sistema de adquisición de datos implementado con una placa Arduino Mega 2560, por puerto USB.

Figura 44

Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

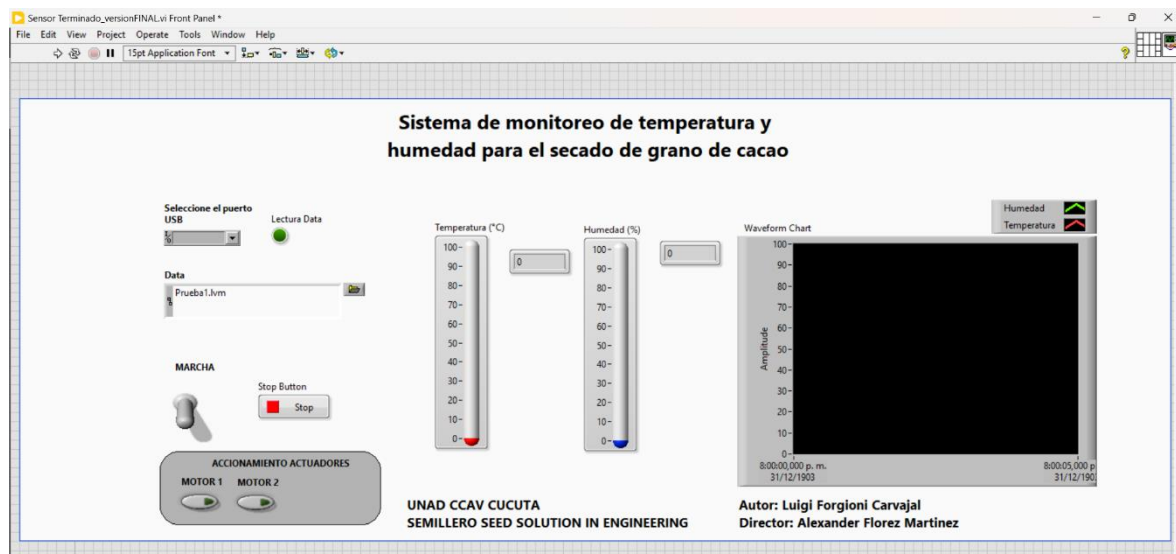


Nota. Diagrama de adquisición y procedimiento para la adquisición de datos Florez,2015

Interfaz gráfica de usuario, bajo plataforma LabVIEW, registro y linealización del sensor (DHT11) de temperatura y conversión a grados Celsius, rango de calibración 0-100 grados.

Figura 45

GUI-LabVIEW Para el Proceso Térmico del Prototipo de Secador de Cacao

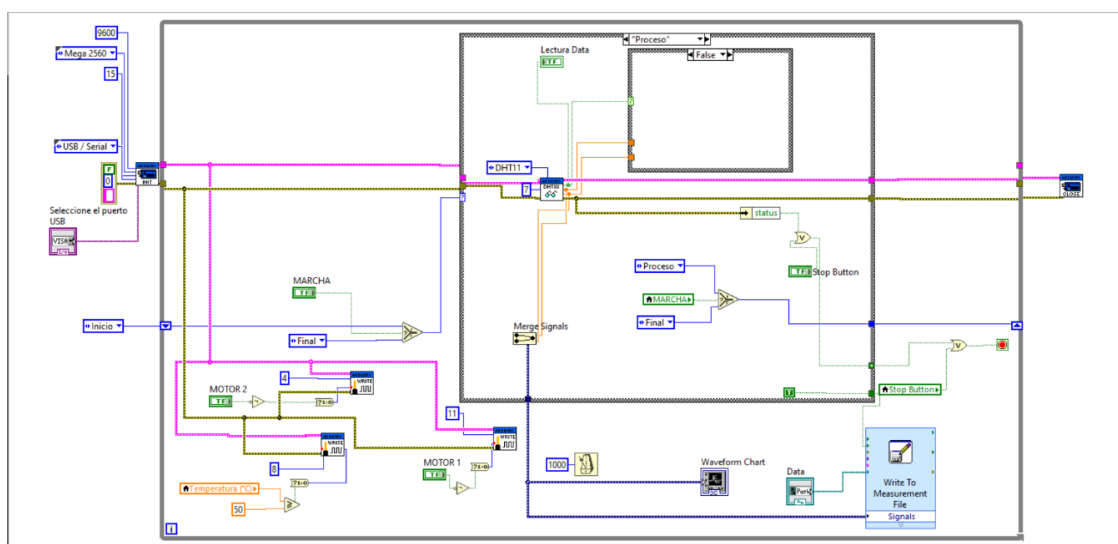


Nota. Interfaz de usuario en donde se pueden ubicar los controles automatizados del sistema de secado

Se desarrolla el código fuente y se programa en Labview. Es importante tener en cuenta que Labview exporta un archivo con la extensión “D:\tempsecador.lvm”. Una vez que el archivo está guardado, es necesario cambiar la extensión “.lvm” a “.xls”. Después de este procedimiento, se abre el archivo en formato EXCEL y se accede a la opción ‘guardar como’, eligiendo un nombre apropiado y seleccionando el tipo de archivo ‘Libro de Excel’.

Figura 46

Programa en LabVIEW Para el DAQ del Proceso Térmico en el Secador de Cacao.



Nota. Diagrama de bloques y secuencia de operaciones para el funcionamiento del sistema de secado automatizado

Posteriormente, se elige la carpeta de destino donde se almacenará este archivo, recomendándose que sea de fácil acceso, ya que se utilizará nuevamente desde MATLAB.

En esta imagen se puede observar la interfaz gráfica propuesta para el monitoreo y control de temperatura y humedad. La interfaz incluye un selector de puerto USB para elegir la placa de Arduino en uso, un campo de texto para nombrar el archivo que almacenará la información de temperatura y humedad, y un interruptor de inicio del sistema junto con un botón de detención para finalizar la medición de estas variables. También se encuentran dos indicadores de medición:

uno para la temperatura (en grados Celsius, °C) y otro para la humedad relativa (%), con sus respectivos displays que muestran los valores exactos en tiempo real. Además, la interfaz cuenta con un graficador de señales que presenta de manera visual el comportamiento de las variables mediante líneas oscilantes, reflejando el funcionamiento del sistema de control de temperatura y monitoreo de humedad para el secado de granos de cacao.

Los archivos generados con el comando “Write to Measurement” de LabView se guardan con la extensión “.lvm”. La forma más sencilla de leerlos desde Excel es cambiando esta extensión a “.xls”, lo que permitirá que Office reconozca el archivo y pueda guardarse con un nuevo nombre. A continuación, se presenta la figura correspondiente:

Figura 47

Interpretación de los Datos Obtenidos Por el DAQ.

| Nombre | Fecha de modificación | Tipo | Tamaño |
|--|-----------------------|----------------------|-----------|
| Actualización documento secador (Recu... | 3/07/2024 7:49 p. m. | Documento de Mi... | 12.227 KB |
| Actualización documento secador | 10/07/2024 3:58 p. m. | Documento de Mi... | 12.964 KB |
| Formato redcolsi | 10/04/2024 6:24 p. m. | Documento de Mi... | 687 KB |
| Promedio de temperatura con sensor | 2/07/2024 6:34 p. m. | Documento de Mi... | 15 KB |
| Secador tipo tunel 1 | 18/03/2024 7:48 a. m. | Documento de Mi... | 913 KB |
| compilacion de datos excel dht11 | 17/06/2024 4:21 p. m. | Documento de tex... | 5 KB |
| excel temperatura | 7/06/2024 5:02 p. m. | Documento de tex... | 1 KB |
| prueba final datos excel | 2/07/2024 8:20 a. m. | Documento de tex... | 174 KB |
| Hoja de cálculo de Microsoft Excel | | | |
| fyxcel graficos secado | 3/05/2024 7:31 p. m. | Hoja de cálculo d... | 30 KB |
| LabVIEW Instrument | | | |

Ruta de almacenamiento

archivos generados en reemplazo de .lvm por “.xls” y guardado con nuevo nombre

Tipo de archivos generados por LabVIEW donde están los datos capturados por la DAQ

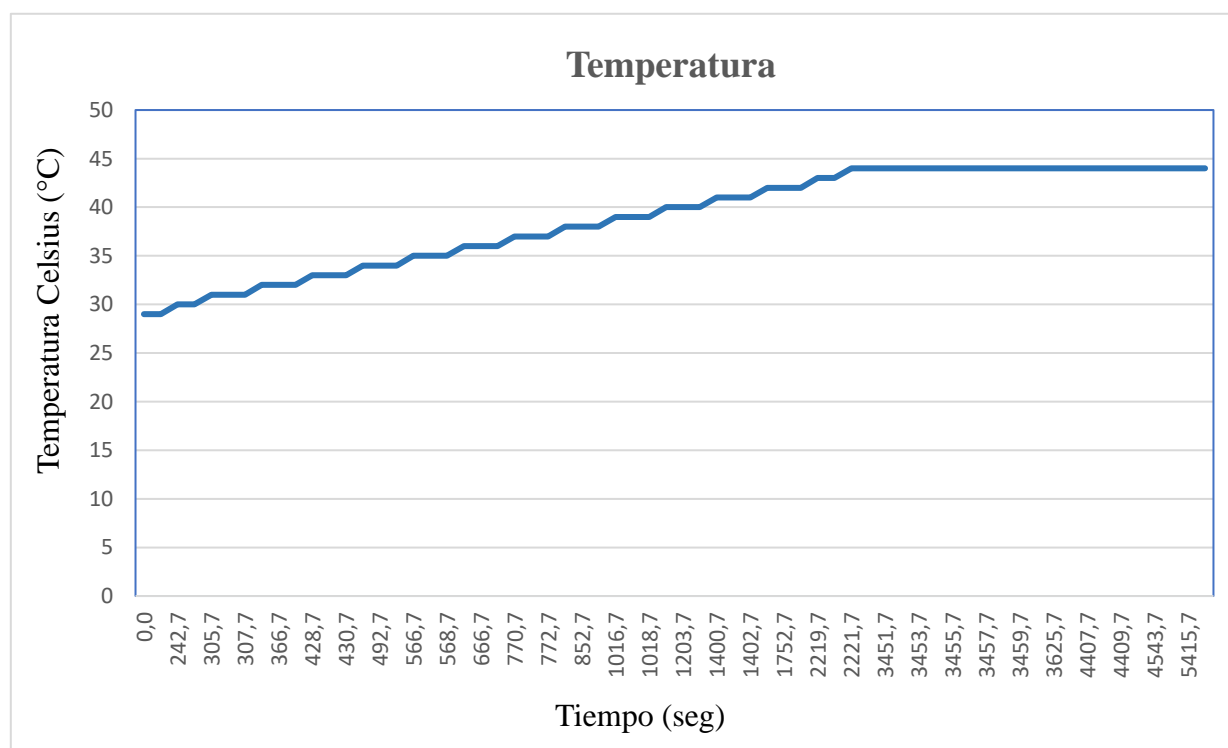
Nota. Secuencia de pasos para almacenar datos obtenidos en las pruebas de secado

Con los resultados obtenidos del sistema de adquisición de datos en Excel, se puede elaborar una gráfica con la temperatura en el eje Y y el tiempo de las muestras en segundos en el eje X. La figura 8 ilustra la curva de reacción en lazo abierto para la planta térmica, representada en Excel.

Figura 48

Diagrama de Temperatura vs Tiempo

Sin embargo, es posible exportar el registro de Excel y leerlo desde MATLAB por medio de los siguientes pasos:



Nota. Gráfica de líneas elaborada en Excel utilizada para evaluar el comportamiento de la temperatura

- Se guarda una copia del archivo, pero en versión Excel 97/2003 en la carpeta de ANTEPROYECTO ubicada en “C:\Users\57300\OneDrive\Escritorio\Anteproyecto”
- El nuevo nombre asignado para este archivo en Excel será “Secador de lazo abierto”

- Abrimos el archivo en Excel, y renombraremos la hoja de cálculo en la parte inferior como “REGISTRO”

- Identificaremos desde que fila y en que columna están ubicados los datos que necesitaremos; para este caso específico los valores de tiempo inician en la columna “C” fila 3 (C23) y finalizan en la columna “C” fila 5441 (C5441), así mismo los valores registrados para temperatura se inician en la posición D23 y finalizan en la posición D5441, tal como se muestran en las figuras a continuación:

Figura 49

Hoja de Cálculo de Excel

| | A | B | C | D |
|----|---------------------|------------|---------|------------|
| 1 | LabVIEW Measurement | | | |
| 2 | Writer_Versio | 2 | | |
| 3 | Reader_Versio | 2 | | |
| 4 | Separator | Tab | | |
| 5 | Decimal_Sepe, | | | |
| 6 | Multi_Headin | No | | |
| 7 | X_Columns | Multi | | |
| 8 | Time_Pref | Absolute | | |
| 9 | Operator | 57300 | | |
| 10 | Date | 27/06/2024 | | |
| 11 | Time | 07:06,7 | | |
| 12 | ***End_of_Header*** | | | |
| 13 | | | | |
| 14 | Channels | 2 | | |
| 15 | Samples | 1 | | 1 |
| 16 | Date | 27/06/2024 | | 27/06/2024 |
| 17 | Time | 07:06,7 | | 07:06,7 |
| 18 | X_Dimension | Time | | Time |
| 19 | X0 | 0,00E+00 | | 0,00E+00 |
| 20 | Delta_X | 1 | | 1 |
| 21 | ***End_of_Header*** | | | |
| 22 | X_Value | Untitled | X_Value | Untitled 1 |
| 23 | 0 | 58 | 0 | 28 |

Nota. Tabla de Excel con los datos obtenidos de la prueba de secado

Figura 50

Hoja de Cálculo Nombrada “Registro”

| | | | | |
|------|-------------|----|--------|----|
| 5438 | 5414,698105 | 32 | 5414,7 | 44 |
| 5439 | 5415,70087 | 32 | 5415,7 | 44 |
| 5440 | 5416,699337 | 32 | 5416,7 | 44 |
| 5441 | 5417,699028 | 32 | 5417,7 | 44 |
| 5442 | | | | |
| 5443 | | | | |

REGISTRO

Listo Accesibilidad: No disponible

Nota. Tabla de Excel con los valores de tiempo y temperatura finales de la prueba de secado

Usar la función “import data” con el objetivo de traer los datos almacenados en la hoja de cálculo de Excel y poderlos seleccionar posteriormente y haciendo uso de la función plot se puede generar una gráfica de líneas con la data seleccionada de las columnas del Excel.

Figura 51

Selección de Data en Matlab

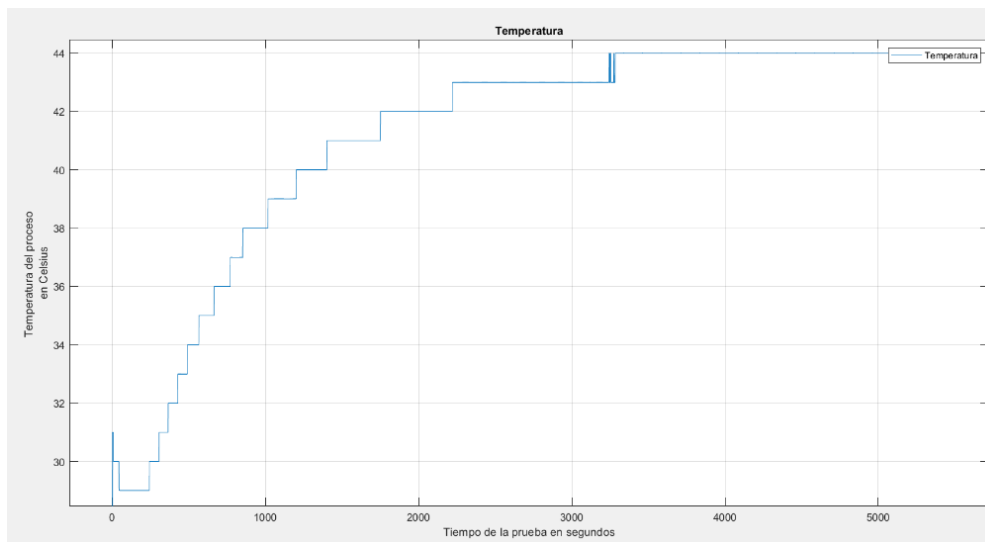
The screenshot shows the MATLAB R2024a interface. The 'Import Data' dialog box is open, displaying a table of data. The table has 14 rows and 12 columns. The first two columns are 'X Value1' and 'Untitled1'. The data is being imported from an Excel file named 'Excelavancealfaro'.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---------|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| 1 | 0 | 28 | | | | | | | | | | |
| 2 | 0.7000 | 28 | | | | | | | | | | |
| 3 | 1.7000 | 28 | | | | | | | | | | |
| 4 | 2.7000 | 28 | | | | | | | | | | |
| 5 | 3.7000 | 31 | | | | | | | | | | |
| 6 | 4.7000 | 31 | | | | | | | | | | |
| 7 | 5.7000 | 31 | | | | | | | | | | |
| 8 | 6.7000 | 31 | | | | | | | | | | |
| 9 | 7.7000 | 31 | | | | | | | | | | |
| 10 | 8.7000 | 31 | | | | | | | | | | |
| 11 | 9.7000 | 30 | | | | | | | | | | |
| 12 | 10.7000 | 30 | | | | | | | | | | |
| 13 | 11.7000 | 30 | | | | | | | | | | |
| 14 | 12.7000 | 30 | | | | | | | | | | |

Nota. Importación de datos obtenidos para ser graficados por medio de Matlab

Figura 52

Grafica de Comportamiento de la Temperatura en Matlab



Nota. Diagrama de líneas conteniendo la respuesta de temperatura con la data almacenada en la prueba de secado

Como se puede apreciar, la gráfica es muy similar a la obtenida con Excel, por lo tanto, se considera como la señal de salida en lazo abierto para el sistema térmico.

Señal de entrada en lazo abierto con Voltaje alimentación aplicado a la resistencia eléctrica es 70 VAC, tiempo total de la prueba fueron 120 minutos; Teniendo en cuenta los datos recopilados podemos identificar los siguientes parámetros:

Temperatura ambiente promedio= 25°C (Offset)

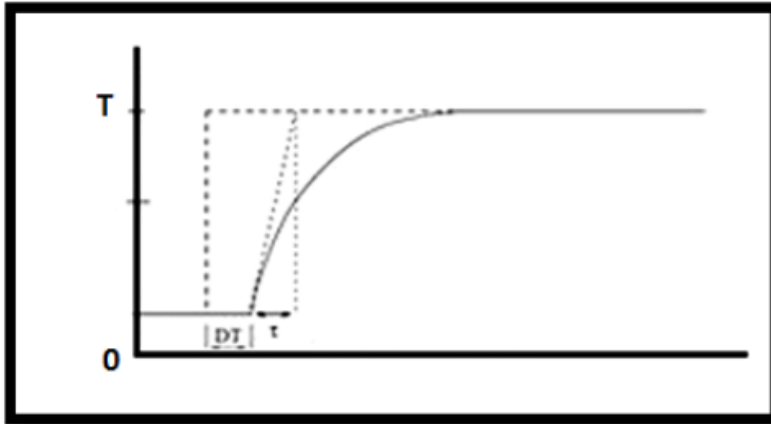
Temperatura estado estable= 44 °C

Tiempo en alcanzar el estado estable= 55 minutos

La Señal de offset está relacionada con la temperatura ambiente, pues se toma como un desfase y no permite que el sistema arranque desde 0 oC.

Figura 53

Curva de Reacción en Lazo Abierto Para Una Planta Ideal.



Nota. Diagrama con el comportamiento ideal para un sistema de lazo abierto

La función de transferencia del sistema estará determinada por:

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1}$$

La temperatura de entrada del sistema, se referencia con respecto al valor que arroja el indicador de temperatura, que posee el controlador local:

Figura 54

Temperatura de Proceso del Secador.



Nota. Panel frontal del controlador de temperatura con valores de proceso y set point

Por lo tanto, la temperatura de entrada= 40°C

Cálculo de la ganancia del sistema en lazo abierto K_p

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$\Delta x = 40 - 28.17 = 11.83^\circ\text{C}$$

$$\Delta y = 44.35 - 28.17 = 16.18$$

$$K_p = 1.3677$$

Aplicando el Método de dos puntos según Alfaro tenemos:

Tabla 20

Constantes para la identificación de los modelos de primer orden

| <i>Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto</i> | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <i>Método</i> | <i>%P₁ (t₁)</i> | <i>%P₂ (t₂)</i> | <i>A</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>d</i> |
| Alfaro | 250 | 75.0 | -0.910 | 0.910 | 1.262 | -0.262 |

Nota. Valores del punto 1 y punto 2 en la grafica y constantes para cálculos de primer orden

Determinar el %P1(t1) con el 25% del valor de salida (según tabla)

Regla de tres:

$$\Delta y \text{ --- } 100\%$$

$$\text{Amp1} \text{ --- } 25\%$$

$$\Delta y = 44,35 - 28,17 = 16,18$$

$$\text{Entonces: } 44.35^\circ\text{C} \text{-----} 100\%$$

$$\text{Amp1} \text{-----} 25\%$$

$$\text{Amp1} = (16,18^\circ\text{C} * 25) / 100 = 4.045^\circ\text{C}$$

$$\text{Amp1} = 4,045^\circ\text{C} + \text{offset}$$

$$\text{Amp1} = 4,045^\circ\text{C} + 28,17^\circ\text{C}$$

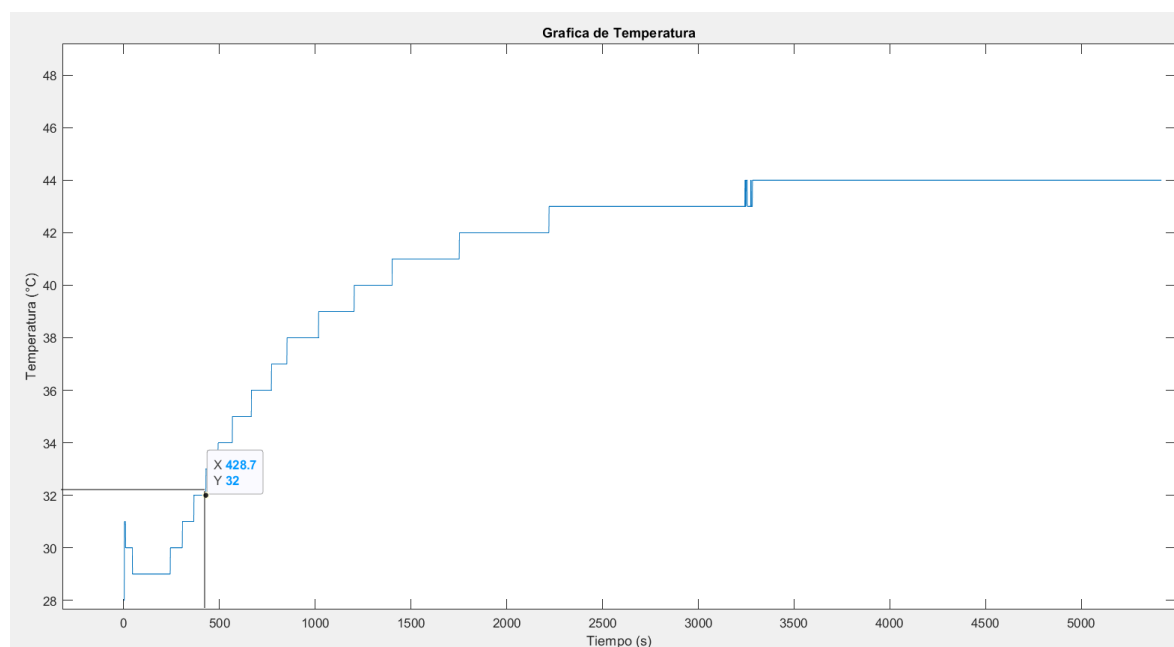
$$\text{Amp1} = 32,21^{\circ}\text{C}$$

Seleccionar de la gráfica, señal de salida en lazo abierto, la primera amplitud (amp1) con motivo de determinar el tiempo1:

Para una amplitud de 32.21°C el tiempo1 equivale a 428.7 segundos.

Figura 55

Tiempo1 Tomado de la Curva de Reacción Graficada en Matlab.



Nota. En la gráfica se puede evidenciar que se encuentra un tiempo1 = 428.7 segundos

Determinar el %P2(t2) con el 75% del valor de salida (según tabla)

Regla de tres:

$$\Delta y \text{ --- } 100\%$$

$$\text{Amp2} \text{ --- } 75\%$$

$$\text{Entonces: } 44^{\circ}\text{C} \text{-----} 100\%$$

$$\text{Amp2} \text{-----} 75\%$$

$$\text{Amp2} = 16,18^{\circ}\text{C} * 75) / 100 = 12,13^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Amp2} = 16,18^{\circ}\text{C} + \text{offset}$$

$$\text{Amp2} = 16,18^{\circ}\text{C} + 28,17^{\circ}\text{C}$$

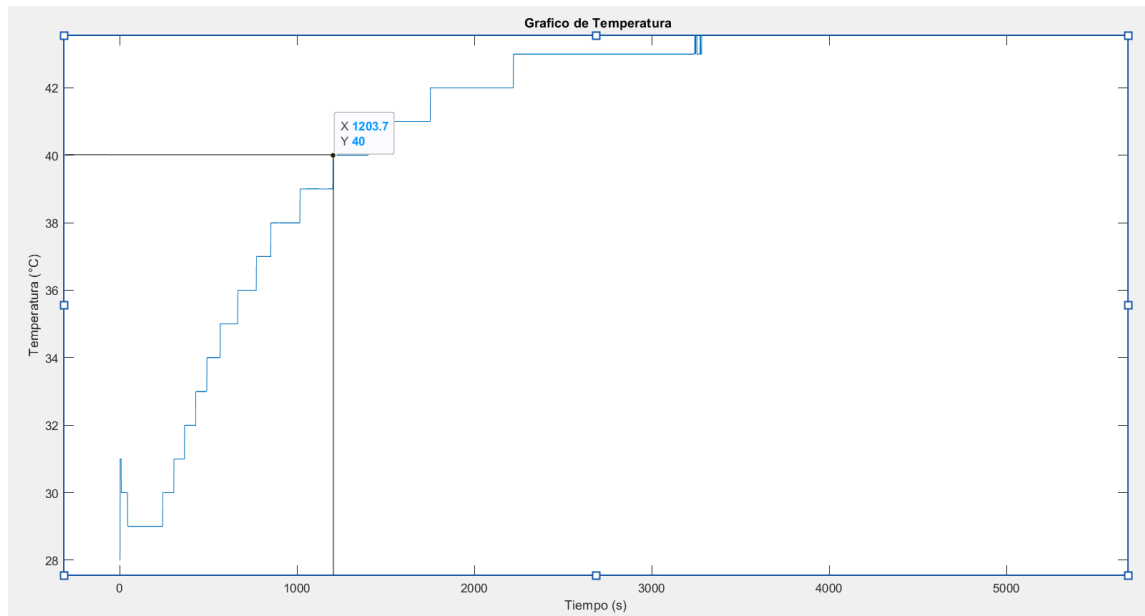
$$\text{Amp2} = 40,30^{\circ}\text{C}$$

Seleccionar de la gráfica, señal de salida en lazo abierto, la primera amplitud (amp2) con motivo de determinar el tiempo2:

Para una amplitud de 40.30°C el tiempo1 equivale a 1203.7segundos

Figura 56

Repuesta del Sistema en Matlab



Nota. En la siguiente grafica se puede localizar un punto en la gráfica con un tiempo 2=1203.7 segundos

Aplicando las ecuaciones según el método de dos puntos, podemos hallar el T(tao) y tiempo muerto:

$$\tau = at_1 + bt_2$$

$$t_m = ct_1 + dt_2$$

Remplazando en la formula tenemos que:

$$T = (-1,5 * 428,7) + (1,5 * 1203,7)$$

$$T = 1162.5seg$$

$$t_m = (1,5 * 428,7) + (-0,5 * 1203,7)$$

$$t_m = 41.2 seg$$

La función de transferencia en lazo abierto queda determinada por:

$$G(S) = [Kp * \exp(-t_m * s)] / (T * s + 1)$$

Reemplazando:

$$G(s) = \frac{1.3677 * e^{-41.2s}}{1162.5s + 1}$$

Para calcular las constantes de sintonización del controlador proporcional integral se hace uso de los parámetros establecidos por Ziegler and Nichols mostrados en la tabla a continuación:

Tabla 21

Parametros Ziegler and Nichols

| Rule | K_c | T_i | Comment |
|--|---------------------------------|--------------|--|
| Process reaction | | | |
| Callender <i>et al.</i> (1935/6). <i>Model: Method 1</i> | ¹ $0.568/K_m \tau_m$ | $3.64\tau_m$ | $\frac{\tau_m}{T_m} = 0.3$ |
| | ² $0.690/K_m \tau_m$ | $2.45\tau_m$ | |
| Ziegler and Nichols (1942). <i>Model: Method 2</i> | $\frac{0.9T_m}{K_m \tau_m}$ | $3.33\tau_m$ | Quarter decay ratio; $\tau_m/T_m \leq 1.$ |

Nota. Ecuaciones para hallar parámetros de sintonización

Primero vamos a calcular K_c :

$$k_c = \frac{0.9 T_m}{K_m \tau_m}$$

Reemplazando por los valores hallados en la función de transferencia tenemos que:

$$K_c = \frac{0.9 * 1162.5 \text{seg}}{1.3677 * 41.2 \text{seg}} = 18.567$$

Ahora procedemos a hallar el tiempo integral (T_i):

$$T_i = 3.33 \tau_m$$

Reemplazando:

$$T_i = 3.33 * 41.2 \text{seg} = 137.196 \text{seg}$$

Diagrama de bloques del controlador PI

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{137.196 s} \right)$$

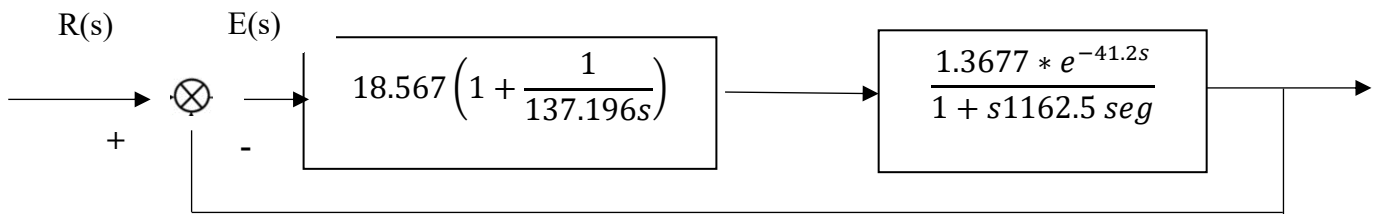


Tabla 22

Ecuaciones para calculo de controlador PID

| Rule | K_c | T_i | T_d | Comment |
|---|-------------------------------|----------------|---------------------------------|---|
| Process reaction | | | | |
| Callender <i>et al.</i> (1935/6). <i>Model: Method 1</i> | $\frac{1.066}{K_m \tau_m}$ | $1.418 \tau_m$ | $0.353 \tau_m$ or $0.47 \tau_m$ | $\frac{\tau_m}{T_m} = 0.3$ |
| Ziegler and Nichols (1942). <i>Model: Method 2</i> | $\frac{x_1 T_m}{K_m \tau_m}$ | $2 \tau_m$ | $0.5 \tau_m$ | $1.2 \leq x_1 \leq 2$; quarter decay ratio. |
| Chien <i>et al.</i> (1952) – <i>regulator.</i> | $\frac{0.95 T_m}{K_m \tau_m}$ | $2.38 \tau_m$ | $0.42 \tau_m$ | 0% overshoot; $0.1 < \tau_m / T_m < 1$. |
| <i>Model: Method 2</i> | $\frac{1.2 T_m}{K_m \tau_m}$ | $2 \tau_m$ | $0.42 \tau_m$ | 20% overshoot; $0.1 < \tau_m / T_m < 1$. |

Nota. Handbook of PI and PID controller tuning rules

Finalmente, para calcular las constantes de sintonización del controlador proporcional integral derivativo se hace uso de los parámetros establecidos por Chien (1952) mostrados en la tabla a continuación:

Primero procederemos a calcular K_c :

$$K_c = \frac{0.95T_m}{K_m\tau_m}$$

Reemplazando:

$$K_c = \frac{0.95 * 1162.5\text{seg}}{1.3677 * 41.2\text{seg}} = 19.5987$$

Seguidamente se calculará el tiempo integral T_i :

$$T_i = 2.38\tau_m$$

Reemplazando:

$$T_i = 2.38 * 41.2\text{seg} = 98.056\text{seg}$$

Finalmente se calcula el tiempo derivativo dado por la siguiente expresión:

$$T_d = 0.42\tau_m$$

Reemplazando:

$$T_d = 0.42 * 41.2\text{seg} = 17.304\text{seg}$$

$$G_c(s) = 19.5987 \left(1 + \frac{1}{98.056s} + 17.304s \right)$$

Respuesta del sistema PI

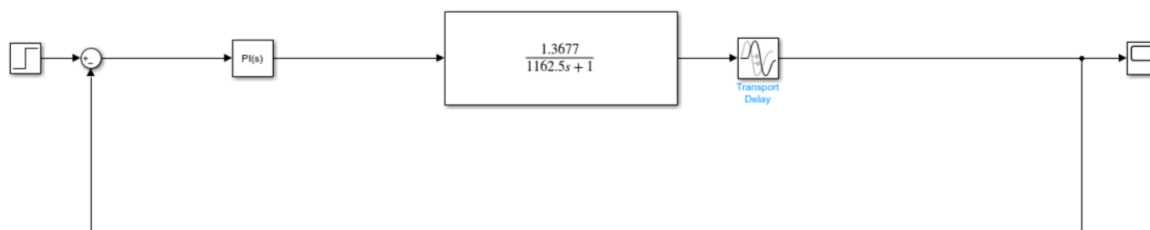
En la gráfica mostrada a continuación se puede evidenciar la respuesta del sistema PI luego de determinar los parámetros, la simulación se realizó en el software simulink.

Figura 57*Grafica Respuesta Sistema PI*

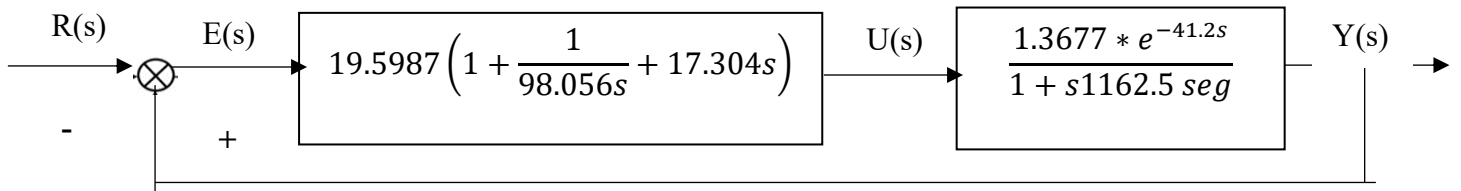
Nota. Grafica en osciloscopio haciendo uso del software Simulink

Diagrama de bloques sistema PI

En la siguiente grafica se puede ver los bloques necesarios para establecer un sistema PI en el software simulink y luego realizar su posterior simulación.

Tabla 23*Parametros de diagramas de bloques PI*

Nota. En el diagrama se pueden evidenciar los bloques necesarios para implementar un sistema de control PI en Matlab



Respuesta del sistema PID

En la gráfica mostrada a continuación se puede evidenciar la respuesta del sistema PID luego de determinar los parámetros, la simulación se realizó en el software simulink

Figura 58

Gráfica Respuesta Sistema PID

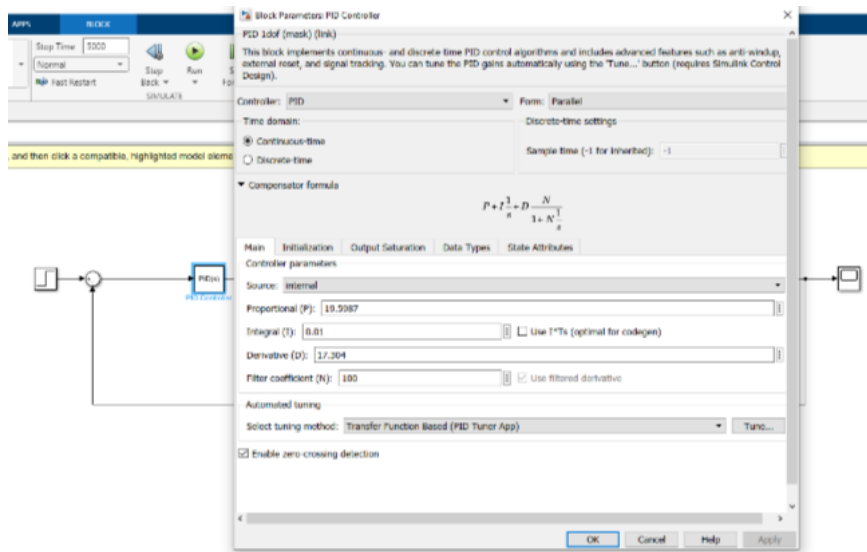


Nota. Gráfico de respuesta del sistema de control de temperatura PID realizado en Matlab

Parámetros controlador PID

En esta imagen se pueden ver los valores que toma cada variable del sistema (proporcional, integral, derivativo)

Figura 59

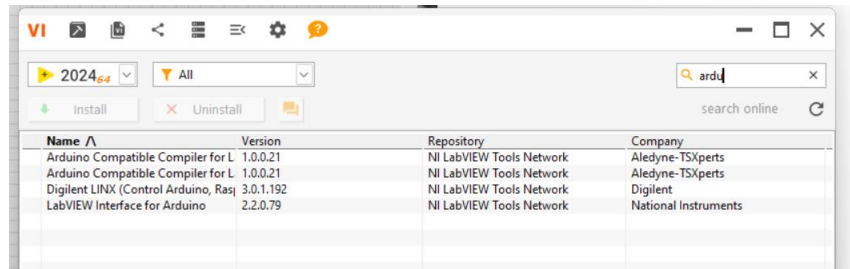
Bloque de Parámetros del Controlador

Nota. Pestaña para configurar los valores de las variables del controlador PID en Matlab

Figura 60

Iniciación Software LabVIEW

Nota. Interfaz de inicio del software LabVIEW

Figura 61*Descarga de Instrumentos Virtuales y Librería Arduino LINX*

Nota. Recursos y librerías virtuales para descargar en LabVIEW

Pruebas de Funcionamiento

La primera prueba del prototipo se llevó a cabo con 2 kilogramos de grano fermentado procedente de una finca cacaotera en el municipio de Chinácota, Norte de Santander (ver figura 25) El secado del cacao es crucial para garantizar la calidad del producto final. Este proceso elimina la humedad de los granos de cacao, previene la fermentación excesiva, desarrolla los sabores y aromas característicos del cacao, y asegura su conservación. Además, un secado adecuado es fundamental para cumplir con los estándares de calidad, facilitar su almacenamiento y transporte, y prolongar su vida útil.

Figura 62

Grano de cacao fermentado



Nota. Carga de grano de cacao después de realizar proceso de fermentación

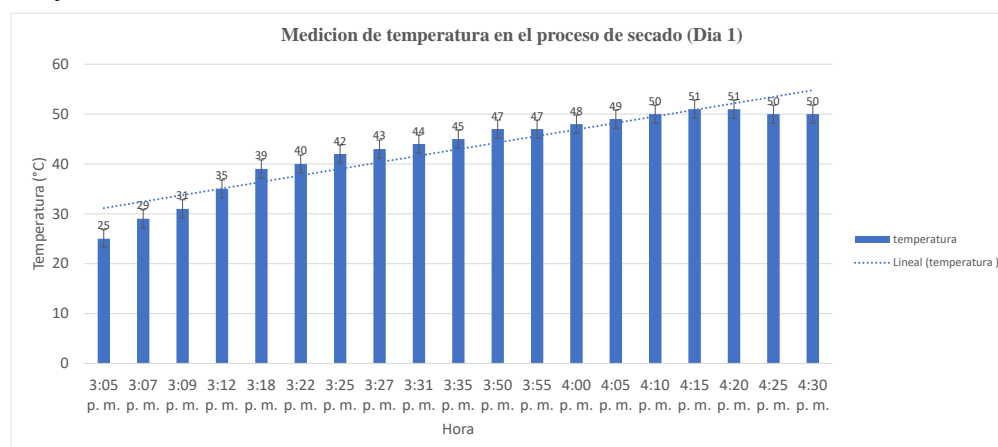
Se llevó a cabo la recolección y obtención de un kilogramo de grano de cacao con el propósito de destinarlo a pruebas experimentales en el interior del secador y de esta manera obtener resultados específicos.

Figura 63*Tabla de Control de Temperatura Primer Día de Secado*

| Contol de temperatura | |
|-----------------------|------------------|
| Hora | Temperatura (°C) |
| 3:05 p. m. | 25 |
| 3:07 p. m. | 29 |
| 3:09 p. m. | 31 |
| 3:12 p. m. | 35 |
| 3:18 p. m. | 39 |
| 3:22 p. m. | 40 |
| 3:25 p. m. | 42 |
| 3:27 p. m. | 43 |
| 3:31 p. m. | 44 |
| 3:35 p. m. | 45 |
| 3:50 p. m. | 47 |
| 3:55 p. m. | 47 |
| 4:00 p. m. | 48 |
| 4:05 p. m. | 49 |
| 4:10 p. m. | 50 |
| 4:15 p. m. | 51 |
| 4:20 p. m. | 51 |
| 4:25 p. m. | 50 |
| 4:30 p. m. | 50 |

Nota. Tabla realizada en Excel con el objetivo de almacenar data de temperatura (°C)

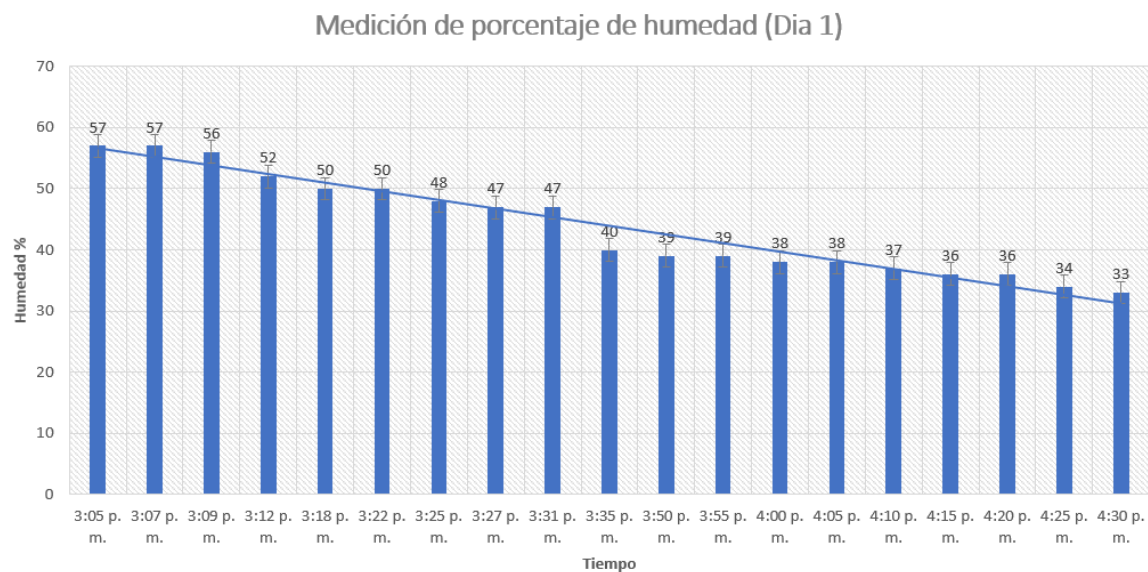
se realizó una tabla que permita ordenar los valores obtenidos durante el secado de grado de cacao en el primer día de pruebas experimentales en la columna izquierda se pueden evidenciar las horas en las que fue tomado el correspondiente valor de temperatura.

Figura 64*Gráfico de Barras Primer Día de Secado*

Nota. Gráfico de barras realizado en Excel para evaluar comportamiento de la temperatura

Figura 65

Medición de Humedad (dia 1)



Nota. Gráfico de barras realizado en Excel para evaluar comportamiento de la humedad (%)

Luego de recolectar los datos obtenidos en el secador de cacao por medio del controlador de temperatura se procedió a realizar una gráfica de barras que permita identificar el comportamiento del sistema de manera grafica como también observar la curva de temperatura y humedad del secador.

Figura 66

Tabla de Control de Temperatura Segundo Día de Secado

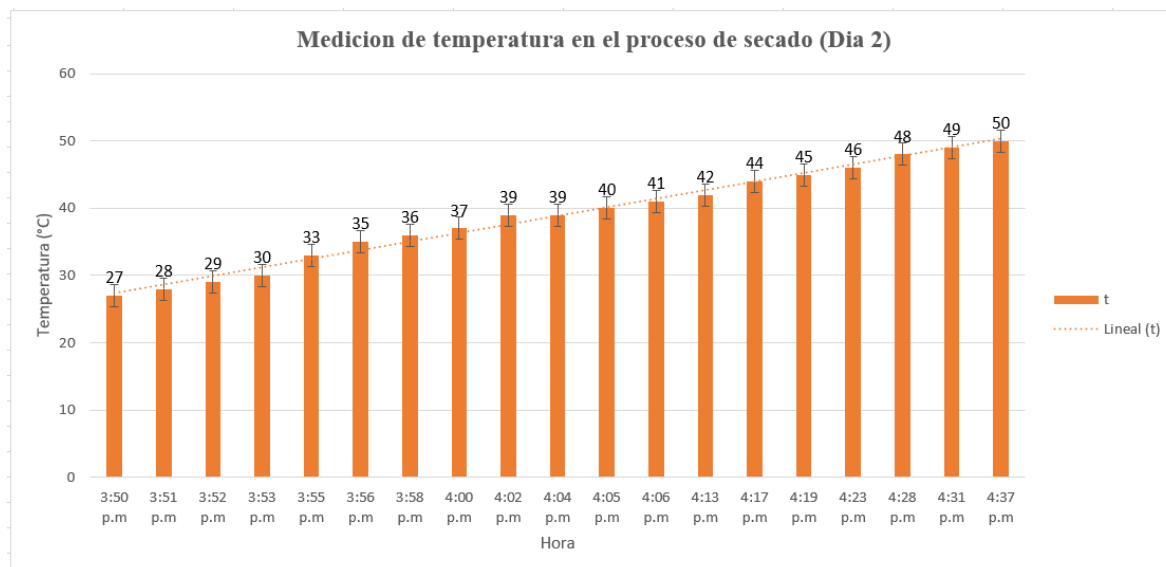
| Control de temperatura | |
|------------------------|------------------|
| Hora | Temperatura (°C) |
| 3:50 p.m | 27 |
| 3:51 p.m | 28 |
| 3:52 p.m | 29 |
| 3:53 p.m | 30 |
| 3:55 p.m | 33 |
| 3:56 p.m | 35 |
| 3:58 p.m | 36 |
| 4:00 p.m | 37 |
| 4:02 p.m | 39 |
| 4:04 p.m | 39 |
| 4:05 p.m | 40 |
| 4:06 p.m | 41 |
| 4:13 p.m | 42 |
| 4:17 p.m | 44 |
| 4:19 p.m | 45 |
| 4:23 p.m | 46 |
| 4:28 p.m | 48 |
| 4:31 p.m | 49 |
| 4:37 p.m | 50 |

Nota. Tabla realizada en Excel con el objetivo de almacenar data de temperatura (°C)

durante el segundo día de secado de grano de cacao se realizó un ejercicio similar al del día uno organizando los valores obtenidos de manera progresiva

Figura 67

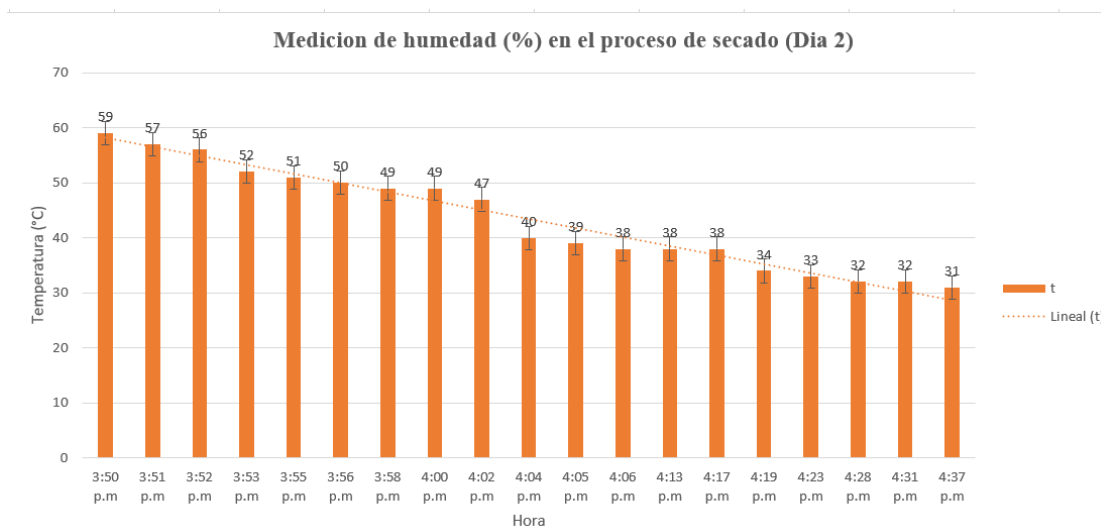
Gráfico de Barras Segundo Día de Secado



Nota. Gráfico de barras realizado en Excel para evaluar comportamiento de la temperatura

Figura 68

Medición de Humedad (Dia 2)



Nota. Gráfico de barras realizado en Excel para evaluar comportamiento de la humedad (%)

En este grafico se puede evidenciar que a medida que transcurre el tiempo de secado así mismo aumenta la temperatura es decir son directamente proporcionales.

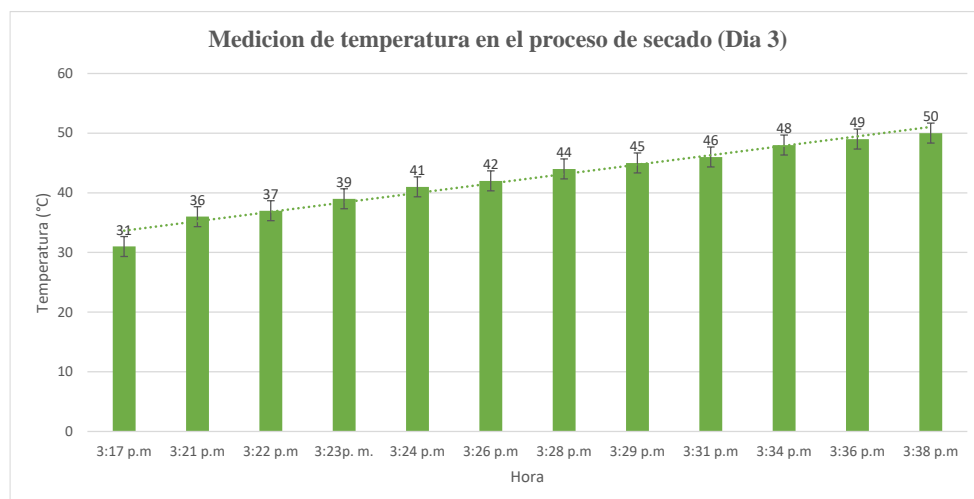
Figura 69

Tabla de Control de Temperatura Tercer Día de Secado

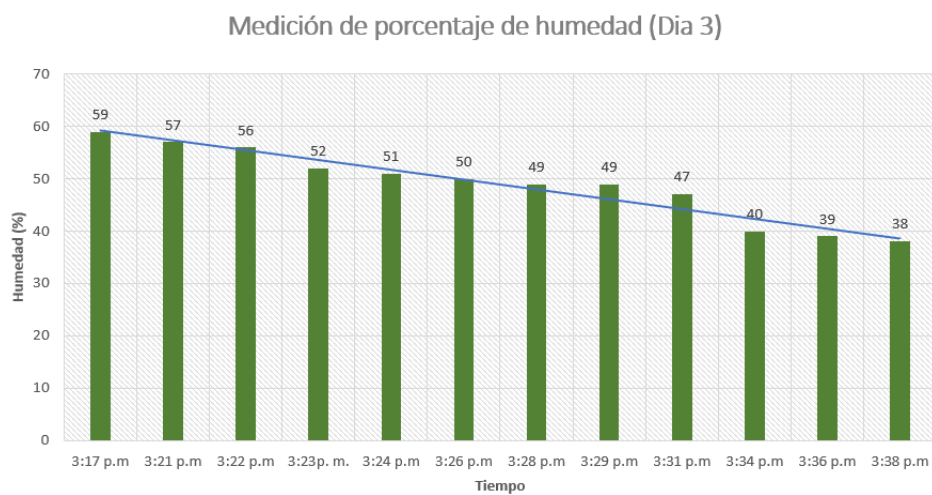
| Contol de temperatura | |
|-----------------------|------------------|
| Hora | Temperatura (°C) |
| 3:17 p.m | 31 |
| 3:21 p.m | 36 |
| 3:22 p.m | 37 |
| 3:23p. m. | 39 |
| 3:24 p.m | 41 |
| 3:26 p.m | 42 |
| 3:28 p.m | 44 |
| 3:29 p.m | 45 |
| 3:31 p.m | 46 |
| 3:34 p.m | 48 |
| 3:36 p.m | 49 |
| 3:38 p.m | 50 |

Nota. Tabla realizada en Excel con el objetivo de almacenar data de temperatura (°C)

Finalmente se realizó una tercera prueba de secado con el fin de reducir a valores mínimos la cantidad de humedad presente en el grano de cacao y se tabularon nuevamente los resultados obtenidos en la prueba realizada.

Figura 70*Gráfico de Barras Tercer Día de Secado*

Nota. Gráfico de barras realizado en Excel para evaluar comportamiento de la temperatura

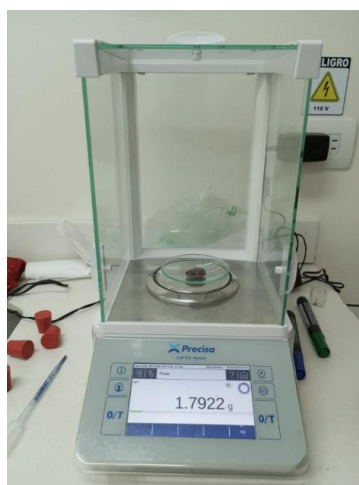
Figura 71*Medición de Porcentaje de Humedad (Dia 3)*

Nota. Gráfico de barras realizado en Excel para evaluar comportamiento de la humedad (%)

Finalmente se graficó por medio de Excel una gráfica de barras que permite identificar la temperatura donde el sistema se establece es decir en 50 °C y esta temperatura se estableció en un transcurso de 20 minutos

Figura 72

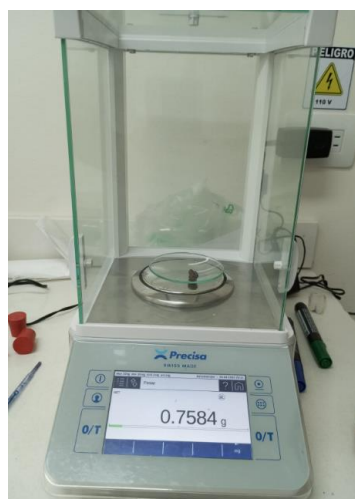
Balanza Digital (Muestra#1)



Nota. Muestreo de grano de cacao y medición de peso

Figura 73

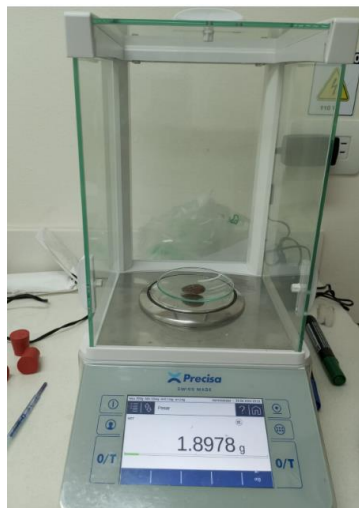
Resultado del Proceso de Secado Artificial (Muestra #1)



Nota. Muestreo de grano de cacao y medición de peso

Figura 74

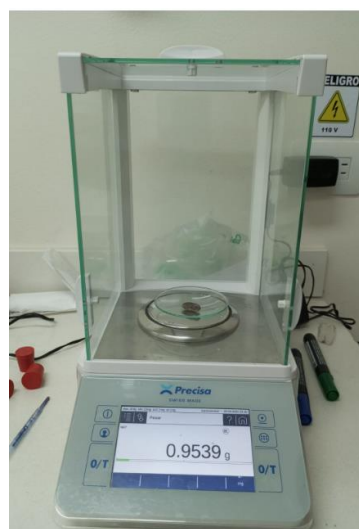
Balanza Digital (Muestra #2)



Nota. Muestreo de grano de cacao y medición de peso

Figura 75

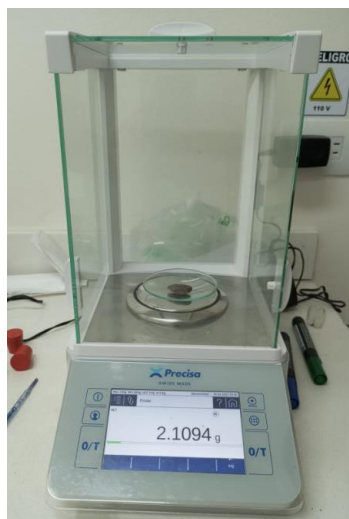
Resultado del Proceso de Secado Artificial (Muestra #2)



Nota. Muestreo de grano de cacao y medición de peso

Figura 76

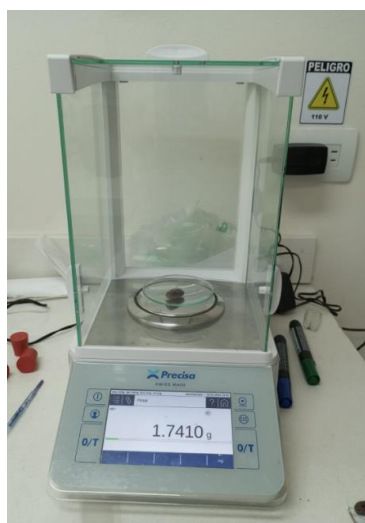
Balanza Digital (Muestra #3)



Nota. Muestreo de grano de cacao y medición de peso

Figura 77

Resultado del Proceso de Secado Artificial (Muestra #3)



Nota. Muestreo de grano de cacao y medición de peso

Figura 78*Medición de Temperatura Grano de Cacao Fermentado*

Nota. Medición de temperatura haciendo uso de termómetro digital

Figura 79*Prueba de Corte Posterior al Secado*

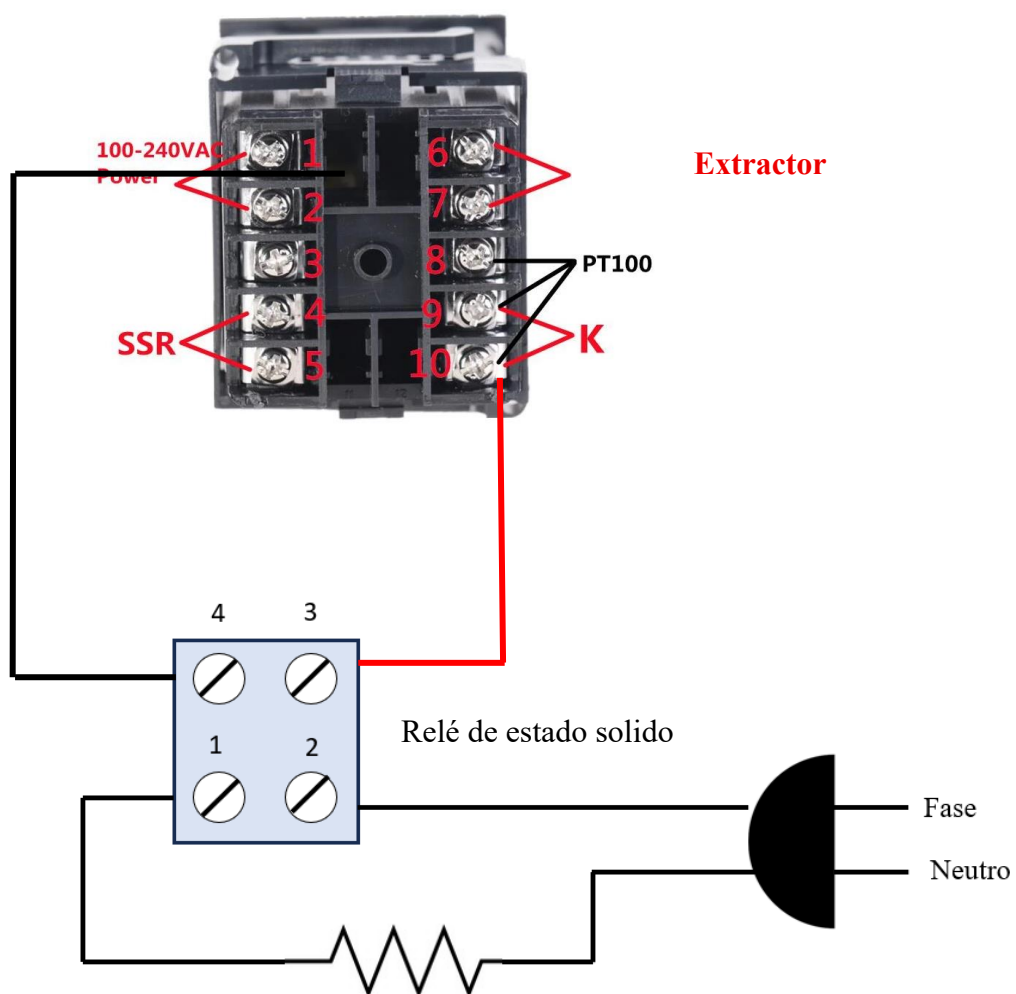
Nota. Corte trasversal de grano de cacao para reconocimiento de parámetros organolépticos

El secado se puede definir como un sistema en el que existe un proceso simultaneo de transferencia de calor, entre el aire del ambiente y del solido (cacao). Dos procesos ocurren en

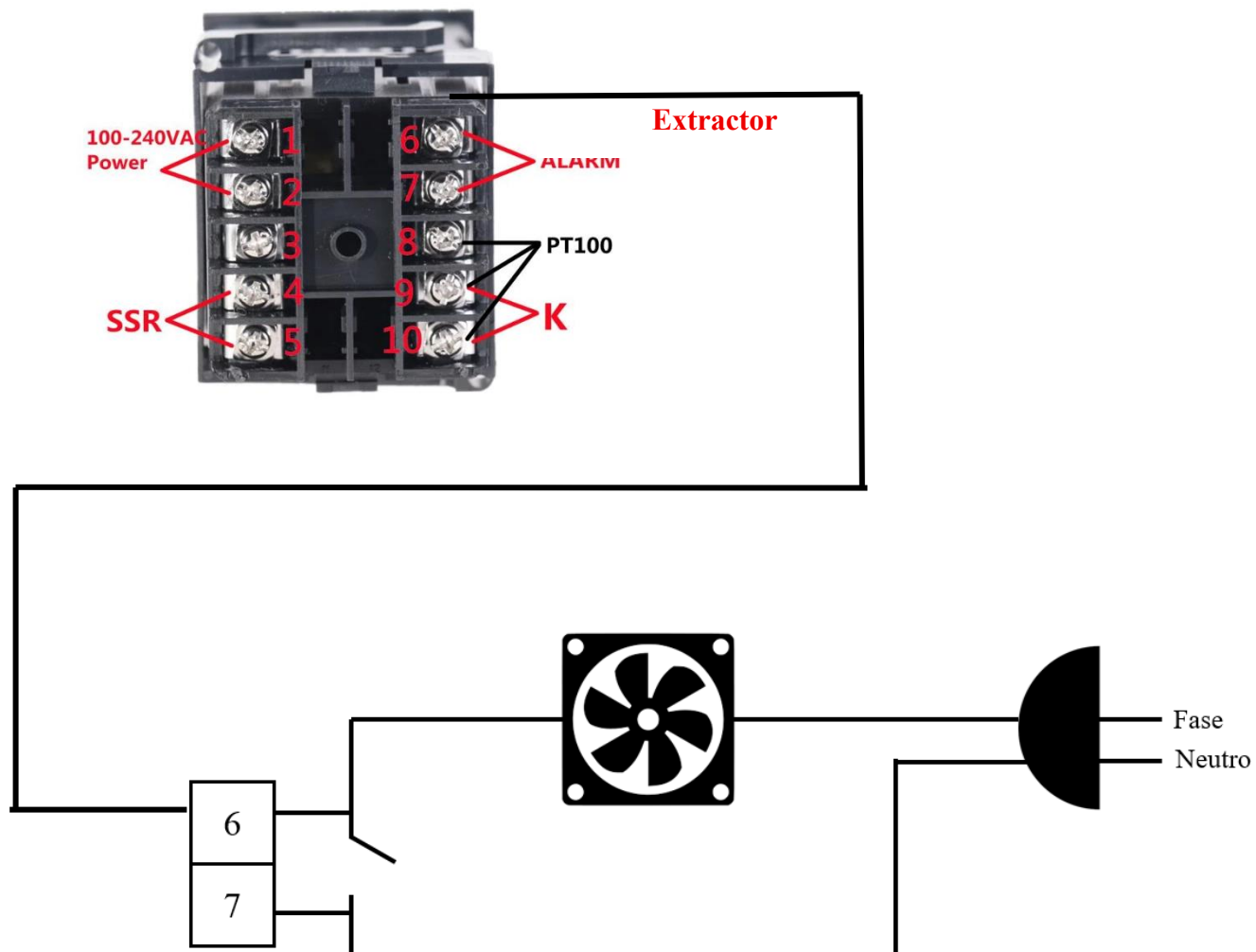
forma simultánea cuando un sólido húmedo es sometido a un secado térmico. Transferencia de energía (calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie. Transferencia de la humedad interna a la superficie del sólido. (Elsa Sanchez Alamo, 2017)

Figura 80

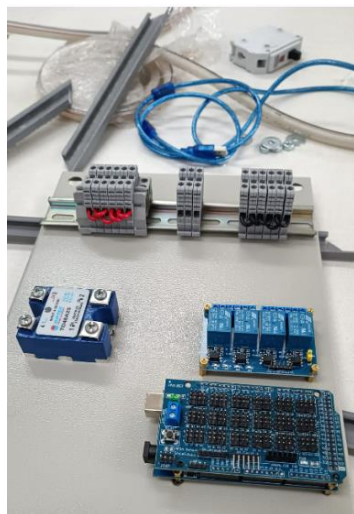
Esquemático de Conexión Relé de Estado Solido



Nota. Diagrama de conexión de relé de estado sólido y controlador de temperatura de temperatura y numeración de puertos de conexión eléctrica

Figura 81*Esquemático del Extractor de Aire*

Nota. Diagrama de conexión de ventilador al controlador de temperatura

Figura 82*Montaje del Tablero Eléctrico*

Nota. Ubicación de componentes electrónicos al interior del gabinete de control selección de posición del sensor de temperatura

Tabla 24*Posición del sensor de temperatura DHT 11*

| Hora | Termocupla tipo K | Posición superior posterior | Posición superior vista frontal | Posición media vista frontal |
|-------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 3:05 p.m. | 25°C | 25°C | 25°C | 25°C |
| 3:18 p.m. | 39°C | 37°C | 38°C | 38°C |
| 3:35 p.m. | 45°C | 42°C | 43°C | 44°C |
| 3:41 p.m. | 46°C | 43°C | 44°C | 45°C |
| 3:55 p.m. | 47°C | 45°C | 45°C | 46°C |
| 4:10 p.m. | 50°C | 47°C | 48°C | 49°C |
| | 43°C | 40.5°C | 41.3 °C | 42°C |
| Promedio total | | | 41.7 °C | |

Nota. Tabla para determinación de la posición del sensor de temperatura teniendo en cuenta parámetros térmicos

Figura 83*Muestra 1 de Cacao Clon*

Nota. Estimación de peso de mazorca de cacao

Figura 84*Muestra 2 de Cacao Clon*

Nota. Estimación de peso de mazorca de cacao

Figura 85

Muestra 3 de Cacao Clon



Nota. Estimación de peso de mazorca de cacao

Figura 86

Corte Longitudinal de Muestra de Cacao



Nota. Estimación de peso y corte de mazorca de cacao

Figura 87

Semillas de Cacao con Mucilago



Nota. Carga de grano de cacao antes de ser fermentada

Figura 88

Medición de la Masa de los Granos de Cacao



Nota. Estimación de peso de los granos de cacao antes de la fermentación

Tabla 25*Día 1 (9 horas de secado)*

| Muestras | Peso (g) | Hora de inicio | Hora de fin |
|-----------|----------|----------------|-------------|
| Muestra 1 | 2.6655 g | 9:00 | 18:00 |
| Muestra 2 | 3.1238 g | 9:00 | 18:00 |

Nota. Organización de data recolectada posterior al proceso de secado de grano de cacao

Tabla 26*Día 2 iniciando el secado (8 horas de secado)*

| Muestras | Peso (g) | Hora de inicio |
|-----------|----------|----------------|
| Muestra 1 | 1.4232 g | 9:30 |
| Muestra 2 | 2.5013 g | 9:30 |


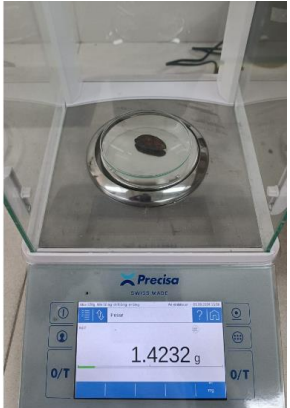

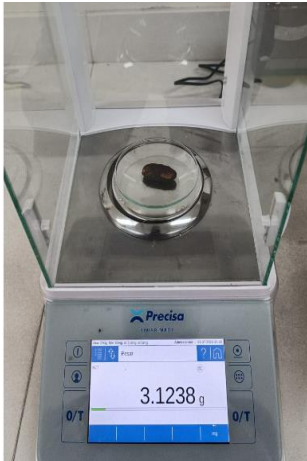

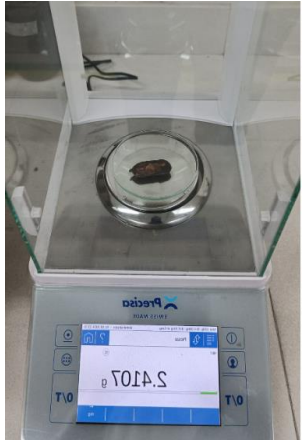
Nota. Organización de data recolectada posterior al proceso de secado de grano de cacao

Tabla 27*Día 2 finalizando el secado (8 horas de secado)*

| Muestras | Peso (g) | Hora de fin |
|-----------|----------|-------------|
| Muestra 1 | 1.3553 g | 17:30 |
| Muestra 2 | 2.4106 g | 17:30 |

Nota. Organización de data recolectada posterior al proceso de secado de grano de cacao

Tabla 28*Comparación de pesos de grano de cacao*

| | Peso inicial | Peso luego de 9 horas de secado | Peso final |
|-----------|--|---|--|
| Muestra 1 |  |  |  |
| Muestra 2 |  |  |  |

Nota. Comparación de pesos iniciales de grado contra pesos finales

Figura 89

Encuentro CCAV Cúcuta



Nota. Imagen de encuentro en el laboratorio CCAV Cúcuta

La figura muestra las pruebas realizadas con el prototipo de secador de cacao en el laboratorio de la UNAD, CCAV Cúcuta. Durante el procedimiento, se inició con la fermentación de los granos, registrando los pesos iniciales y finales. Posteriormente, se ejecutaron las pruebas de secado continuo manteniendo una temperatura isotérmica controlada.

Figura 90

Carga de Cacao Secado.



Nota. Carga de granos de cacao dispuestos al interior del secador

Conclusiones

El secador tipo túnel a pequeña escala puede ser una solución para aquellas personas del campo que quieran mejorar su producto en pequeñas cantidades, pero tenemos que tener en cuenta los requerimientos necesarios para su funcionamiento que consta de energía eléctrica, la construcción del prototipo no es de alta complejidad ya que su estructura de madera facilita su producción.

El análisis del sensor de temperatura DHT11 concluye que tiene una alta precisión en la medición de temperatura y humedad relativa. Sin embargo, se debe tener precaución en la conexión de los pines al Arduino, ya que un error puede provocar un cortocircuito y dañar el sensor. Además, las vibraciones generadas por las bandejas del secador pueden afectar los cables de conexión. Para prevenir estos problemas, se optó por realizar soldaduras en las conexiones, mejorando la estabilidad y evitando desconexiones o fallos eléctricos.

Se concluyó que el proceso de secado del cacao se completó con éxito en un tiempo estimado de 18 horas, manteniendo una temperatura constante de 40°C. Es importante destacar que, para obtener resultados óptimos, se deben considerar los procesos anteriores al secado, ya que estos influyen directamente en la eficiencia del secado. Mantener una cadena de procesos bien controlada garantiza un producto final de alta calidad.

La innovación tecnológica implementada en el prototipo automatizado tipo túnel permite a los agricultores de cacao en Norte de Santander adoptar un proceso más eficiente y controlado para el secado del grano. A diferencia de los métodos artesanales tradicionales, la automatización y el control preciso de las variables críticas, como la temperatura y la humedad, aseguran un mayor rendimiento y mejoran significativamente la calidad del producto. Esta tecnología no solo

optimiza el proceso, sino que también permite a los productores locales competir a nivel global en un mercado más exigente y competitivo.

El mejoramiento en la calidad del secado es uno de los beneficios clave del prototipo automatizado tipo túnel. Al mantener una temperatura constante y controlar la humedad de forma precisa, se asegura un secado uniforme del cacao, evitando daños al grano y preservando su calidad. Esto permite a los productores obtener un producto final de alta gama, con mejores características organolépticas, que cumple con los estándares exigidos por los mercados nacionales e internacionales, aumentando así su valor comercial.

Se concluyó que tanto el controlador PI (proporcional e integral) como el controlador PID (proporcional, integral, derivativo) operan de manera efectiva dentro del sistema diseñado. Ambos presentan un comportamiento similar en términos de respuesta, manteniendo la estabilidad del sistema y controlando con precisión las variables de temperatura. El controlador PID ofrece una ventaja al incluir la acción derivativa, lo que permite mejorar la velocidad de respuesta ante cambios en la temperatura, reduciendo posibles oscilaciones y logrando un ajuste más preciso.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar, H. (2016). *Manual para la Evaluación de la Calidad del Grano de Cacao*.
- Barco, V. C. (2023). *Secado de granos de cacao (variedad TCS01) y su efecto sobre la concentración de compuestos fenólicos, azúcares y ácidos orgánicos*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE. (2005). Documento Metodológico del Cacao. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/doc_met_cacao.pdf.
- Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao). (2012). Guía técnica para el cultivo del cacao. Quinta edición. Bogotá, Colombia.
- Fernández, R. D. R., Gallo, F. W. M., Cedeño, Á. M. G., Mercedes, M., Galeas, P., Quinteros, H. N. M., Ferrín, L. M. C., Álvarez, A. E. B., & Morante, P. E. N. (2012). *EFFECT OF TIME AND TYPE OF FERMENTATION IN PHYSICAL AND CHEMICAL*.
- Guailas, B., & Fabián, A. (2019). *Desarrollo de un prototipo de máquina híbrida de secado de granos de cacao con sistema de control automático de temperatura*.
- Hernández-Fuentes, S. N., & Sánchez-Mojica, K. Y. (2017). Innovación y competitividad: Micro y pequeñas empresas del sector agroindustrial en Cúcuta. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 23-33.
<https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7368>
- Janjai, S. (2012). A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and dissemination. *International Journal of Energy and Environment*, 3(3).
- López Cerino, I., & Chávez García, E. (2018). Eficacia de secador solar tipo túnel con cacao (*Theobroma Cacao L.*) en Tabasco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 21, 4395-4405. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i21.1528>

Rangel-S, J. M.*; Ortiz-R, O.; Villamizar-G, R.*I.A. Joshua Mauricio Rangel

Suárez,(2013). Manejo del ciclo de vida en productos agrícolas: caso cacao en Norte de Santander

Ruiz, G., & Nohely, A. (2022). *Diseño y construcción de una Secadora de Cacao tipo tanque empleando una cámara de acondicionamiento para la inyección de aire caliente.*

Supo, N., & Ariel, J. (2023). *Diseño y construcción de una máquina secadora para cacao tipo rotatoria empleando un sistema de secado automatizado.*

SánchezAlamo, E. N. (2017). Efecto de tipos de secado del cacao.

Teoría PID explicada. (2006, agosto 31). www.ni.com.

Explicación sobre el controlador PID y la teoría. (2024, agosto 31). www.ni.com.

Tinoco, H.A., & Ospina, D.Y., Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado., *Revista EIA*, Vol. 13, 2010

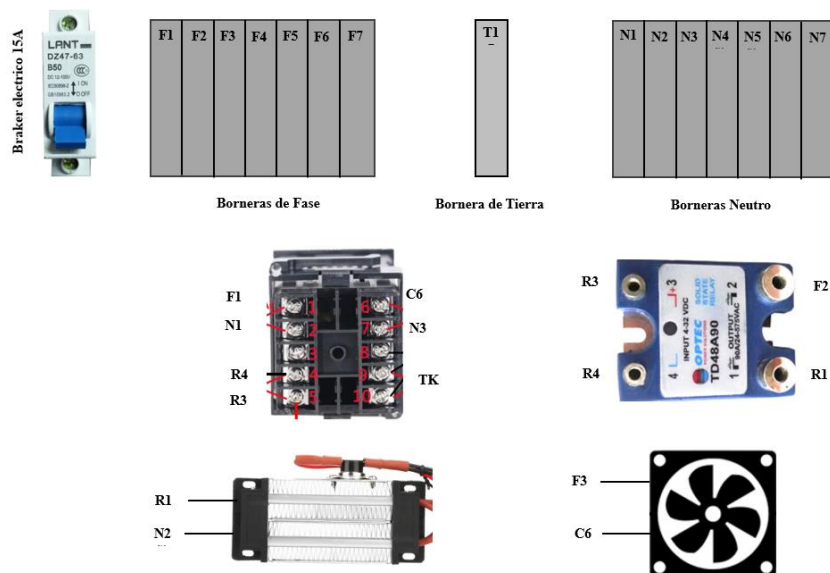
Valero, R. O., Gómez, B. V., Poveda, J. P. G., Torres, S. H. B., & Rojas, J. M. R. (2020). *El sistema productivo del cultivo de cacao en el sur del Tolima.*

Vásquez-Barajas, E. F., García-Torres, N. E., Bastos-Osorio, L. M., & Lázaro-Pacheco, J. M. (2018). Análisis económico del sector cacaotero en Norte de Santander, Colombia y a nivel internacional. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 237-250. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7963>

Apéndices

Apéndice A

Esquemático de Conexión Tablero Eléctrico



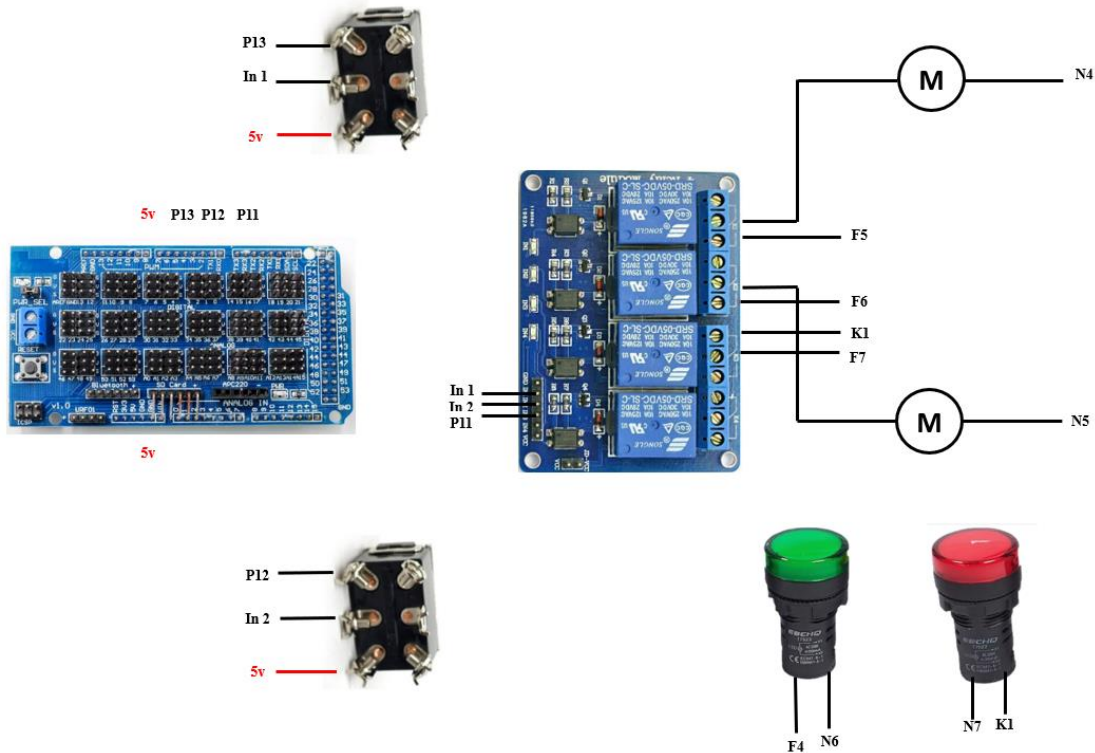
En el esquema anterior se presentan las conexiones necesarias para el correcto funcionamiento del prototipo de túnel automatizado para el secado de granos de cacao. El tablero eléctrico se alimenta desde una toma eléctrica de 110V mediante un cable de 3 vías, que proporciona energía a los tres tipos de borneras utilizadas y al disyuntor eléctrico. Se identifican siete borneras de fase, conectadas en puente mediante un cable calibre 18 de color rojo, una bornera de tierra conectada al conductor verde del cable de 3 vías, y siete borneras neutras, igualmente conectadas en puente por un cable calibre 18 de color negro.

Adicionalmente, se observa un relé de estado sólido (SSR), el cual permite conmutar la señal y, basado en la temperatura medida por la termocupla y ajustada a través del controlador de temperatura, controla el paso de corriente hacia la resistencia eléctrica. El SSR ofrece ventajas como una larga vida útil y un tiempo de respuesta rápido. El controlador de temperatura (REX-C100FK02) es un sistema PID que permite monitorear y regular la

temperatura del sistema (calefactor y ventilador), asegurando que los parámetros de secado se mantengan dentro de los ideales para garantizar un proceso de alta calidad.

Apéndice B

Esquemático de Conexión (Interna)



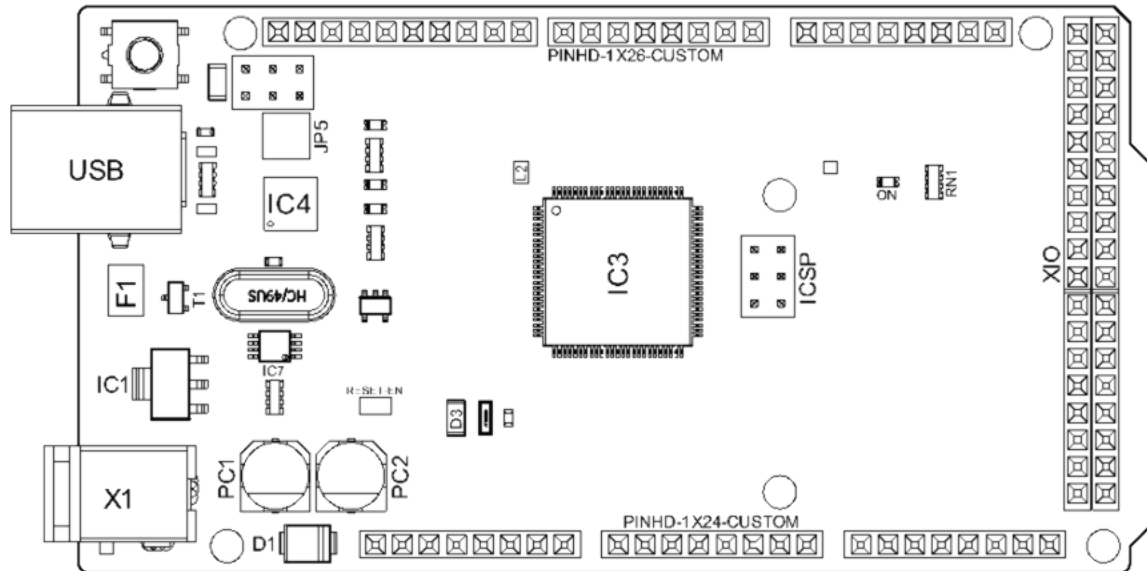
En el esquema anterior se presentan las conexiones para los interruptores, los cuales poseen dos posiciones de trabajo (on/off) y serán controlados mediante una placa Arduino Mega 2560. Estos interruptores están conectados a un módulo de relé, que permitirá encender o apagar los motores de vibración acoplados a cada bandeja de secado.

Además, se han integrado dos pilotos indicadores LED, uno de color verde y otro rojo, que permitirán visualizar el estado operativo del equipo de secado. El LED verde indicará que el sistema está en funcionamiento bajo control y monitoreo a través de un computador portátil y la placa Arduino correspondiente. Por otro lado, si el LED rojo está encendido, indicará que el sistema opera en modo manual, controlado mediante los interruptores descritos previamente.

Apéndice C

Diagrama Arduino Mega 2560

Topología de la placa



Nota: A continuación. Se muestra el Datasheet del Arduino Mega 2560 utilizado en el desarrollo del proyecto para poder controlar el proceso de automatización

Apéndice D

Referencias de Puertos

| Ref. | Description | Ref. | Description |
|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|
| USB | USB B Connector | F1 | Chip Capacitor |
| IC1 | 5V Linear Regulator | X1 | Power Jack Connector |
| JP5 | Plated Holes | IC4 | ATmega16U2 chip |
| PC1 | Electrolytic Aluminum Capacitor | PC2 | Electrolytic Aluminum Capacitor |
| D1 | General Purpose Rectifier | D3 | General Purpose Diode |
| L2 | Fixed Inductor | IC3 | ATmega2560 chip |
| ICSP | Connector Header | ON | Green LED |
| RN1 | Resistor Array | XIO | Connector |

Apéndice E

Pines Análogos

| Pin | Function | Type | Description |
|-----|----------|--------|---|
| 1 | NC | NC | Not Connected |
| 2 | IOREF | IOREF | Reference for digital logic V - connected to 5V |
| 3 | Reset | Reset | Reset |
| 4 | +3V3 | Power | +3V3 Power Rail |
| 5 | +5V | Power | +5V Power Rail |
| 6 | GND | Power | Ground |
| 7 | GND | Power | Ground |
| 8 | VIN | Power | Voltage Input |
| 9 | A0 | Analog | Analog input 0 /GPIO |
| 10 | A1 | Analog | Analog input 1 /GPIO |
| 11 | A2 | Analog | Analog input 2 /GPIO |
| 12 | A3 | Analog | Analog input 3 /GPIO |
| 13 | A4 | Analog | Analog input 4 /GPIO |
| 14 | A5 | Analog | Analog input 5 /GPIO |
| 15 | A6 | Analog | Analog input 6 /GPIO |
| 16 | A7 | Analog | Analog input 7 /GPIO |
| 17 | A8 | Analog | Analog input 8 /GPIO |
| 18 | A9 | Analog | Analog input 9 /GPIO |
| 19 | A10 | Analog | Analog input 10 /GPIO |
| 20 | A11 | Analog | Analog input 11 /GPIO |
| 21 | A12 | Analog | Analog input 12 /GPIO |
| 22 | A13 | Analog | Analog input 13 /GPIO |
| 23 | A14 | Analog | Analog input 14 /GPIO |
| 24 | A15 | Analog | Analog input 15 /GPIO |

Apéndice F

Pines Digitales

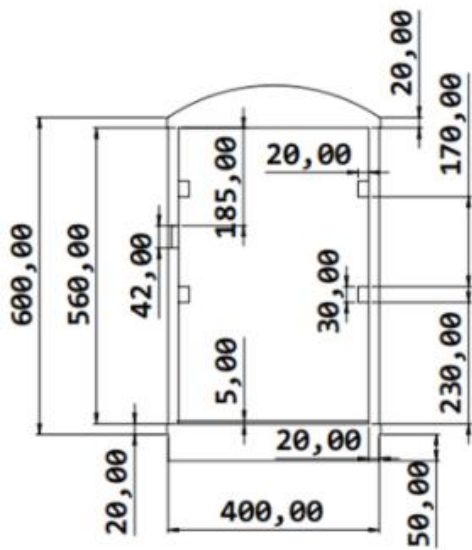
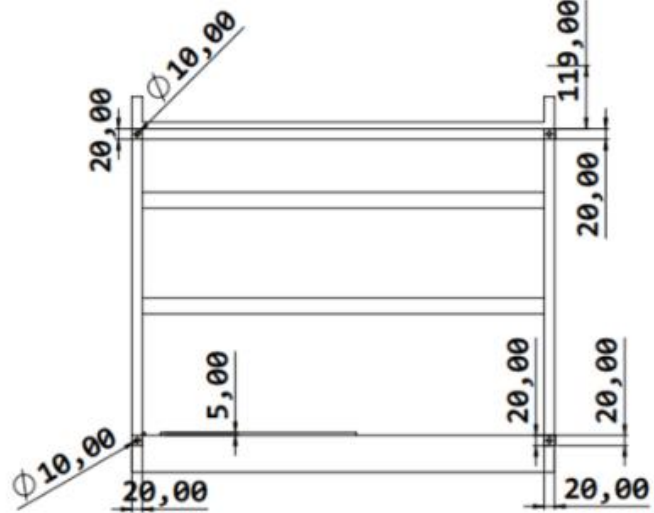
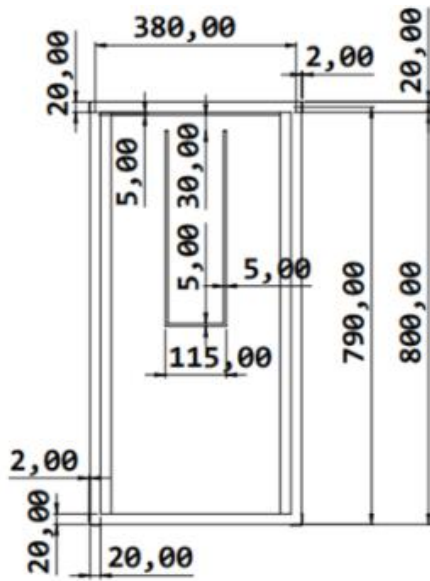
| Pin | Function | Type | Description |
|-----|----------|-------------------|-------------------------------|
| 1 | D21/SCL | Digital Input/I2C | Digital input 21/I2C Dataline |
| 2 | D20/SDA | Digital Input/I2C | Digital input 20/I2C Dataline |
| 3 | AREF | Digital | Analog Reference Voltage |
| 4 | GND | Power | Ground |
| 5 | D13 | Digital/GPIO | Digital input 13/GPIO |
| 6 | D12 | Digital/GPIO | Digital input 12/GPIO |
| 7 | D11 | Digital/GPIO | Digital input 11/GPIO |
| 8 | D10 | Digital/GPIO | Digital input 10/GPIO |
| 9 | D9 | Digital/GPIO | Digital input 9/GPIO |
| 10 | D8 | Digital/GPIO | Digital input 8/GPIO |
| 11 | D7 | Digital/GPIO | Digital input 7/GPIO |
| 12 | D6 | Digital/GPIO | Digital input 6/GPIO |
| 13 | D5 | Digital/GPIO | Digital input 5/GPIO |
| 14 | D4 | Digital/GPIO | Digital input 4/GPIO |

| Pin | Function | Type | Description |
|-----|----------|--------------|------------------------|
| 15 | D3 | Digital/GPIO | Digital input 3/GPIO |
| 16 | D2 | Digital/GPIO | Digital input 2/GPIO |
| 17 | D1/TX0 | Digital/GPIO | Digital input 1 /GPIO |
| 18 | D0/Tx1 | Digital/GPIO | Digital input 0 /GPIO |
| 19 | D14 | Digital/GPIO | Digital input 14 /GPIO |
| 20 | D15 | Digital/GPIO | Digital input 15 /GPIO |
| 21 | D16 | Digital/GPIO | Digital input 16 /GPIO |
| 22 | D17 | Digital/GPIO | Digital input 17 /GPIO |
| 23 | D18 | Digital/GPIO | Digital input 18 /GPIO |
| 24 | D19 | Digital/GPIO | Digital input 19 /GPIO |
| 25 | D20 | Digital/GPIO | Digital input 20 /GPIO |
| 26 | D21 | Digital/GPIO | Digital input 21 /GPIO |

Nota. Adaptado de datasheet Arduino Mega 2560, (docs, Arduino, cc,2024)

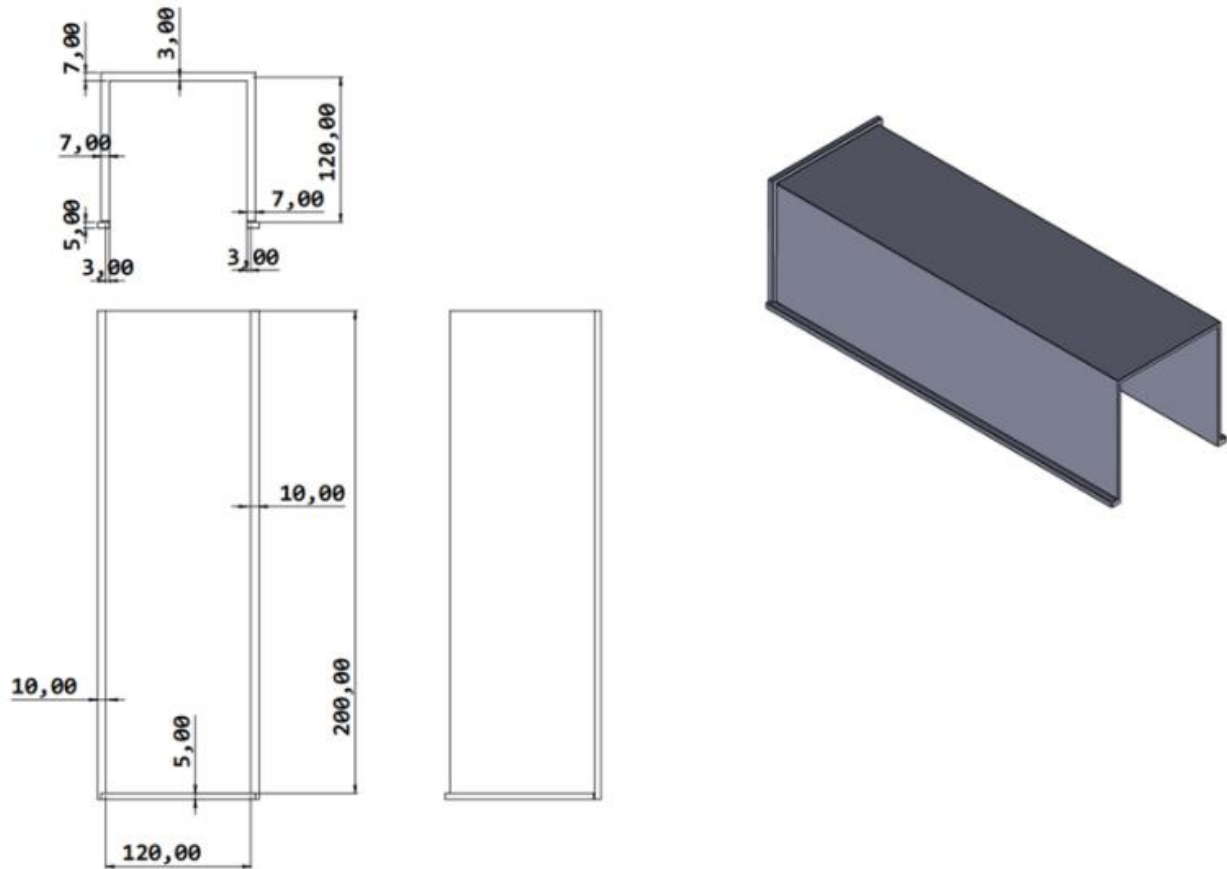
Apéndice G

Acotado Externo del Secador



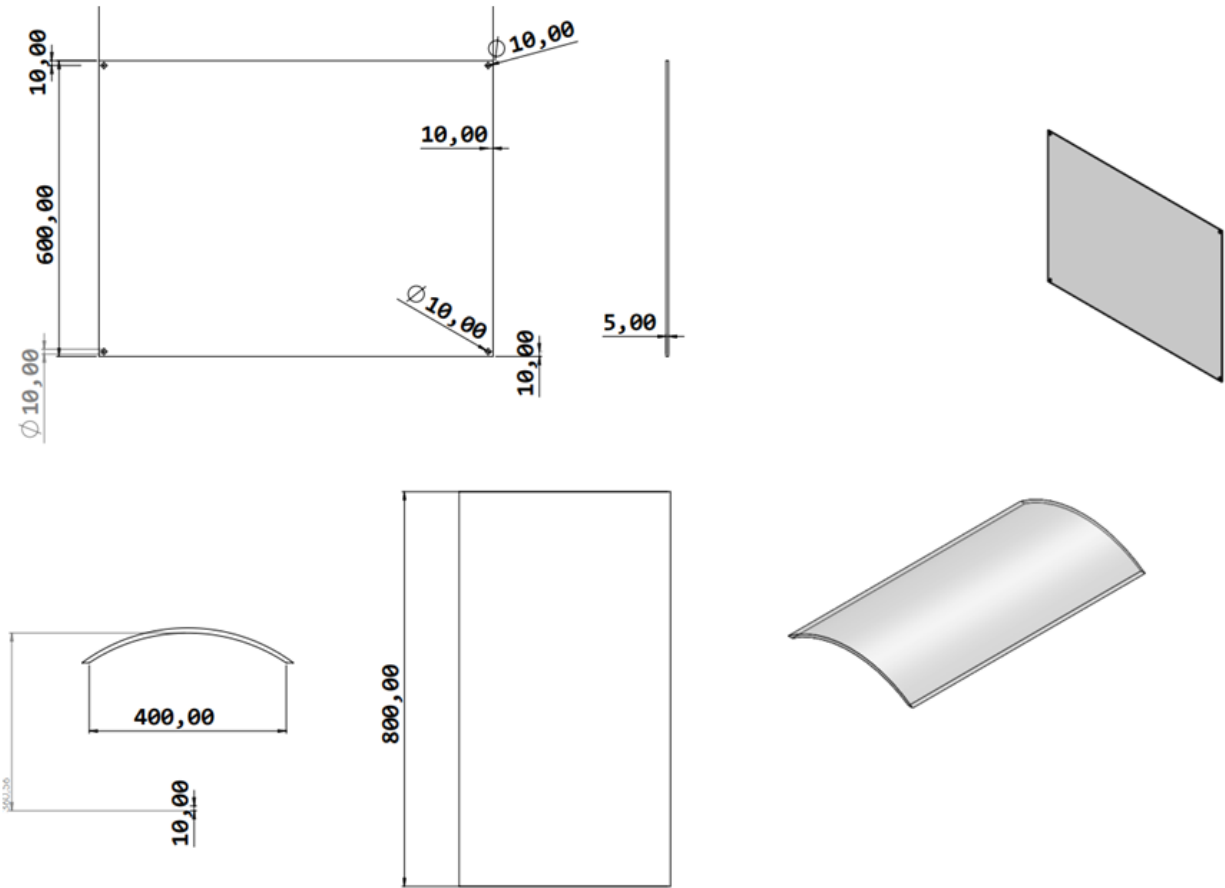
Apéndice H

Acotado Ducto de Ventilación



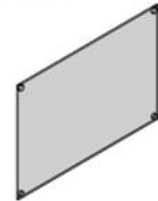
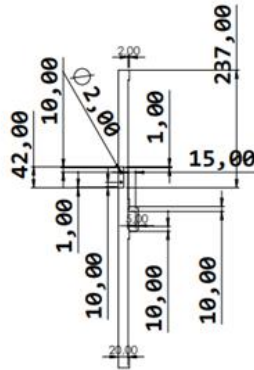
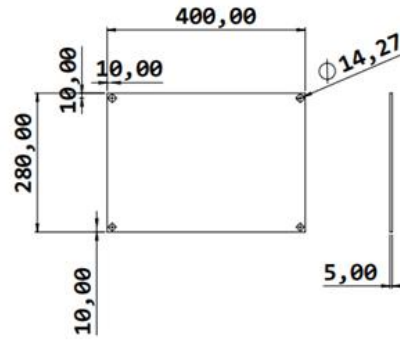
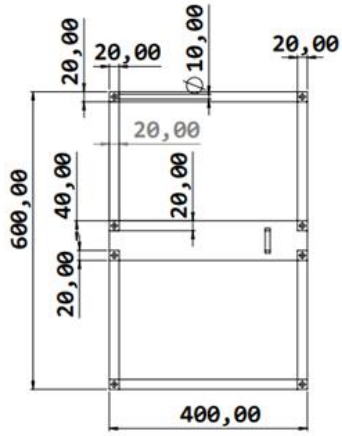
Apéndice I

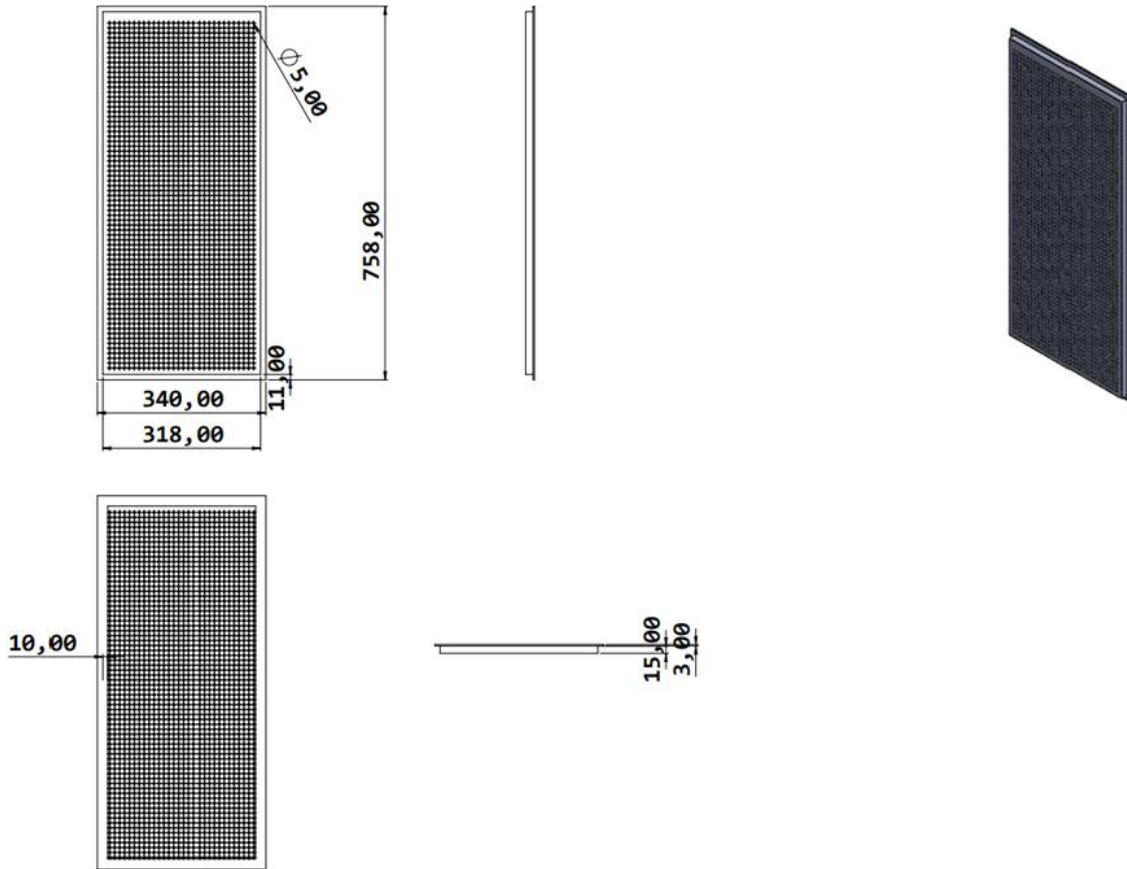
Acotado Cúpula y Lamina Difusora



Apéndice J

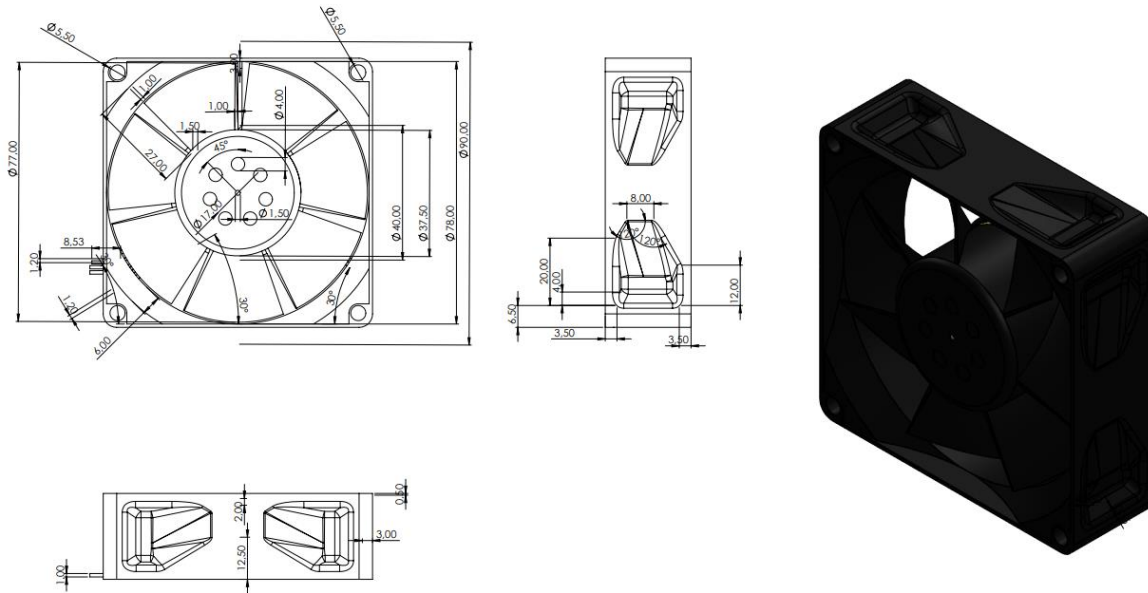
Acotado Puerta

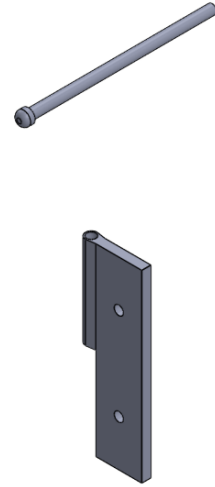
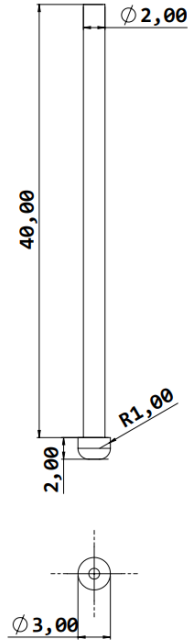
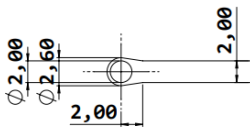
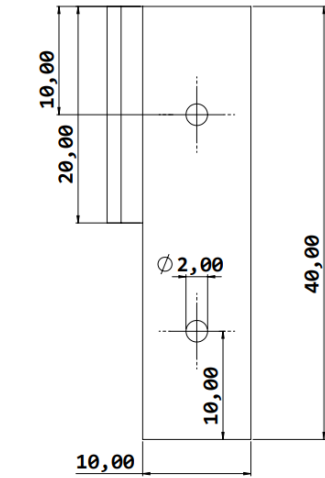


Apéndice K*Acotado Bandeja de Secado*

Apéndice L

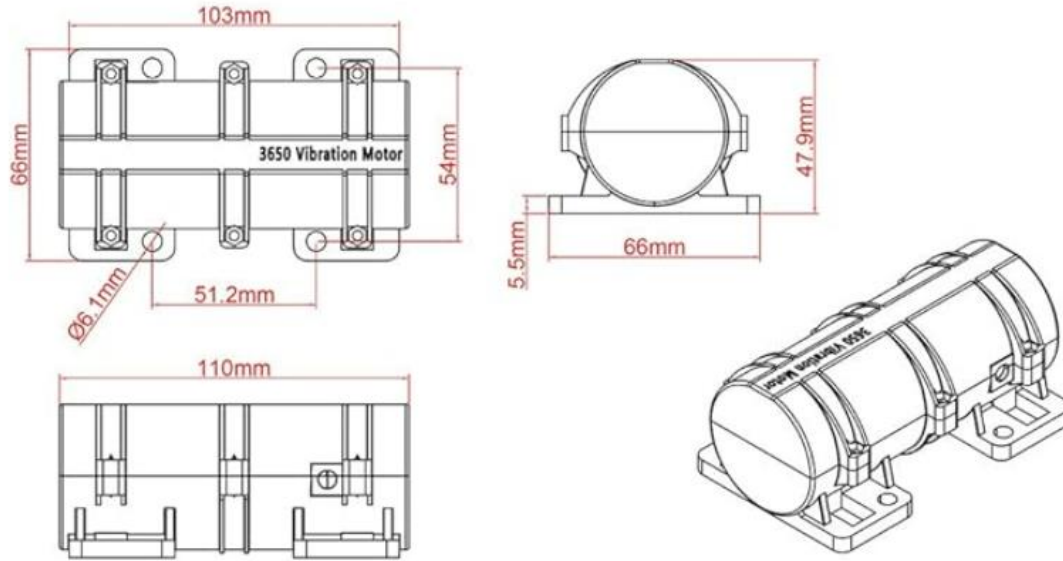
Diagrama de Cooler



Apéndice M*Diagrama de Bisagras*

Apéndice N

Motor de Vibración 3650



Apéndice O

Certificado Participación Redcolsi

