

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Desarrollo de un sistema de medición de masa con control de temperatura en
cámaras de secado de biomateriales del CDTs

Proyecto Integrador

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniera en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Mayra Alejandra Águila Chávez

Angie Doménica Maldonado Ramírez

Guayaquil – Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A mi familia, por su amor incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo, la paciencia y la perseverancia. Dedico este trabajo también a todas aquellas personas que considero familia, quienes me vieron caer y tocar fondo, pero me ayudaron a levantarme y me recordaron que la vida sigue y es valiosa. Los amo con todo mi corazón, y no me alcanzará la vida para agradecerles y demostrarles que tenían razón. Asimismo, lo dedico a quienes creen en la educación y la investigación como herramientas de cambio, con la esperanza de que el fruto de este esfuerzo inspire y abra nuevas oportunidades de conocimiento.

Alejandra Águila Ch.

Dedico este trabajo a mis papás, que, con su apoyo, sacrificio y amor, me enseñaron a que el trabajo honesto y constante puedo lograr mis objetivos. A mis colegas y amigos, que, con su apoyo y compañía, hicieron de mi estadía en la universidad sea llevadera y amena. A mí misma por tener perseverancia y determinación para superar cada desafío.

Doménica Maldonado R.

Agradecimientos

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, por su guía y confianza durante este proceso.

A los docentes y compañeros, quienes con sus aportes enriquecieron mi formación académica y personal, en especial al docente de la materia integradora. Al Centro de Desarrollo Tecnológico y Social (CDTS) por el espacio y facilidades brindadas para el desarrollo de este proyecto. Finalmente, a quienes colaboraron en la recolección de datos, revisión del documento y discusiones, hicieron posible la culminación de este esfuerzo.

Alejandra Águila Ch.

Agradezco profundamente a mis padres y colegas, quienes me brindaron apoyo y consejos valiosos durante mi formación universitaria. Sus palabras de aliento y su ejemplo de constancia fueron guía y motivación en momentos difíciles. A mis tutores y compañera de tesis, por afrontar juntos los desafíos de este proyecto con esfuerzo y paciencia, lo que permitió su culminación. Finalmente, a todas las personas que, con gestos, consejos o colaboración, contribuyeron de alguna manera a alcanzar esta meta.

Doménica Maldonado R.

Declaración Expresa

Nosotras Mayra Alejandra Águila Chávez, y Angie Doménica Maldonado Ramírez acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotras durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, jueves 10 de junio del 2025.



Mayra Águila Chávez
Estudiante de Ing.
Electrónica y
Automatización



Angie Maldonado
Ramírez
Estudiante de Ing.
Electrónica y
Automatización

Evaluadores



Mgtr. Dennys Cortez

Profesor de la materia



PhD. César Martín

Tutor de proyecto

Resumen

El presente trabajo describe la construcción, automatización y validación de una cámara de secado por difusión, con control de temperatura, destinada al estudio del comportamiento de biomasa en procesos de secado. El sistema integra un microcontrolador ESP32 encargado de la adquisición de datos y el control PID de la temperatura, una resistencia helicoidal como fuente de calor y un ventilador para el flujo de aire forzado. La cámara incorpora tubos de PVC, equipado con sensores de humedad SHT31 y apoyado en una balanza diseñada con galgas extensiométricas, lo que permite registrar en tiempo real la variación de masa, humedad y temperatura.

El procedimiento de validación consistió en exponer una muestra de masa conocida (masa patrón) a una temperatura de referencia (setpoint), registrando las variables para la validación del sistema. Los resultados preliminares mostraron que el controlador PID logró mantener la temperatura dentro de márgenes aceptables y el monitoreo de la masa patrón siguió la tendencia esperada, manteniendo un valor constante durante el tiempo de prueba.

Se concluye que el sistema propuesto constituye una plataforma de alta aplicabilidad para fines educativos y de investigación, logrando controlar las variables críticas para el estudio de mecanismos de transferencia de masa y calor en secado de biomasa.

Palabras clave: Secado de biomasa, control PID, sensores, trazabilidad, metrología, humedad.

Abstract

This work describes the construction, automation, and validation of a diffusion-based drying chamber with temperature control, designed to study the behavior of biomass during drying processes. The system integrates an ESP32 microcontroller responsible for data acquisition and PID temperature control, a helical resistance coil as the heat source, and a fan to generate forced airflow. The chamber incorporates PVC tubes, equipped with SHT31 humidity sensors and supported by a balance designed with strain gauges, allowing real-time recording of variations in mass, humidity, and temperature.

The validation procedure consisted of exposing a sample of known mass (reference mass) to a target temperature (setpoint) and recording the variables to validate the system's performance. Preliminary results showed that the PID controller maintained the temperature within acceptable margins, and the monitoring of the reference mass followed the expected trend, remaining constant during the test period.

It is concluded that the proposed system constitutes a highly applicable platform for educational and research purposes, successfully controlling the critical variables required for studying mass and heat transfer mechanisms in biomass drying.

Keywords: Biomass drying, PID control, sensors, traceability, metrology, humidity.

Índice General

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE PLANOS	VIII
CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.5 MARCO TEÓRICO	6
1.5.1 Procesos de secado de biomasa	6
1.5.2 Medición de masa en sistemas de secado	8
1.5.3 Medición de humedad y temperatura	10
1.5.4 Control de temperatura en cámara de secado	12
1.5.5 Limitaciones de los métodos tradicionales	13

1.5.6	<i>Avances tecnológicos en sistemas de secado</i>	13
1.5.7	<i>Componentes tecnológicos del sistema propuesto</i>	14
CAPÍTULO 2	15
2.1	METODOLOGÍA	16
2.1.1	<i>Diseño del sistema</i>	16
2.1.2	<i>Instrumentación y componentes</i>	17
2.1.3	<i>Componentes para el diseño de la automatización del sistema</i>	20
2.1.3.1	<i>Lista materiales</i>	20
2.1.4	<i>Sistema de control de peso y humedad</i>	25
2.1.5	<i>Sistemas de control de temperatura</i>	26
2.1.6	<i>Adquisición y procesamiento de datos</i>	27
2.1.7	<i>Consideraciones técnicas y de seguridad</i>	29
2.1.8	<i>Códigos fundamentales</i>	31
2.1.8.1	<i>Lectura y calibración de balanzas (HX711)</i>	31
2.1.8.2	<i>Control PID implementado en ESP32</i>	31
2.1.8.3	<i>Registro y transmisión de datos en formato CSV</i>	33
2.1.9	<i>Modelo matemático del proceso de secado</i>	34
2.1.9.1	<i>Fundamentos teóricos</i>	34
2.1.9.2	<i>Solución del modelo de primer orden</i>	34
2.1.9.3	<i>Estimación de parámetros</i>	35
2.1.9.3.1	<i>Determinación de m_{eq}</i>	35
2.1.9.3.2	<i>Ajuste lineal para k</i>	35
2.1.9.3.3	<i>Validación del ajuste</i>	35
2.1.9.4	<i>Dependencia de la constante con la temperatura</i>	35
2.1.9.5	<i>Conclusiones del modelo matemático</i>	36
CAPÍTULO 3	37

3.1	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	38
3.1.1	<i>Procedimiento experimental.....</i>	38
3.1.2	<i>Resultados experimentales.....</i>	40
3.1.3	<i>Análisis de desempeño.....</i>	43
3.1.4	<i>Discusión comparativa con antecedentes.....</i>	47
CAPÍTULO 4	48
4.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
4.1.1	<i>Conclusiones.....</i>	49
4.1.2	<i>Recomendaciones.....</i>	50
REFERENCIAS	1
APÉNDICE A	58
APÉNDICE B	59
APÉNDICE C	60
APÉNDICE D	61
APÉNDICE E	62

Abreviaturas

PV	Process Variable – Variable de proceso (temperatura medida por el sensor DS18B20).
SV	Setpoint Value – Valor de referencia de temperatura ingresado por el usuario.
PID	Proportional–Integral–Derivative – Controlador proporcional-integral-derivativo.
SSR	Solid State Relay – Relé de estado sólido.
ADC	Analog to Digital Converter – Convertidor analógico-digital.
CSV	Comma-Separated Values – Formato de archivo de texto para almacenamiento de datos.
BIAS	Sesgo (diferencia promedio entre valor medido y valor teórico).
RMSE	Root Mean Square Error – Raíz del error cuadrático medio (precisión de las mediciones).
HR	Humedad relativa.
MCU	Microcontroller Unit – Unidad de microcontrolador (ESP32).
PM	Pulsador de marcha
PP	Pulsador paro
PE	Parada de emergencia

Simbología

T	Temperatura del aire en la cámara	°C
T_ref	Temperatura de referencia (setpoint, SV)	°C
T_PV	Temperatura medida (variable de proceso, PV)	°C
m	Masa de la biomasa	g
m _o	Masa inicial de la biomasa	g
$\Delta m/\Delta t$	Variación de masa respecto al tiempo	g/min
HR	Humedad relativa medida por SHT31	%
e	Error de control (e = SV – PV)	°C
u(t)	Señal de control del PID	% (ciclo de trabajo)
K _p	Ganancia proporcional del PID	adimensional
K _i	Ganancia integral del PID	1/min
K _d	Ganancia derivativa del PID	min
BIAS	Sesgo medio entre valor medido y patrón	g
RMSE	Raíz del error cuadrático medio	g

Índice de tablas

TABLA 2.1	17
TABLA 2.2	20
TABLA 2.3	21

Índice de figuras

FIGURA 2.1	31
FIGURA 2.2	32
FIGURA 2.3	33
FIGURA 3.1	40
FIGURA 3.2	42
FIGURA 3.3	43
FIGURA 3.4	45

Índice de planos

PLANO 1	58
PLANO 2	59
PLANO 3	60
PLANO 4	61

Capítulo 1

1.1 Introducción

El secado de biomateriales constituye una de las operaciones más relevantes en múltiples áreas de aplicación, incluyendo agricultura, bioenergía, industria alimentaria, laboratorios químicos y el sector biomédico (Yu et al., 2025). El proceso consiste en la remoción de agua a través de mecanismos combinados de transferencia de calor y de masa, con el fin de reducir la actividad de agua y preservar las propiedades físicas, químicas y biológicas del material (Mak et al., 2020). Su adecuada implementación permite extender la vida útil, mejorar la estabilidad en almacenamiento y, en algunos casos, facilitar procesos posteriores de transformación o análisis (Nuñez Vega et al., 2016).

Los métodos de secado más utilizados a nivel tradicional son el secado al sol y los sistemas de aire forzado sin control automatizado. Sin embargo, dichos métodos presentan limitaciones importantes: alta dependencia de las condiciones ambientales, falta de homogeneidad en la calidad del producto, largos tiempos de proceso y pérdidas de energía significativas (Mohammed et al., 2020; Mak et al., 2020). Adicionalmente, la ausencia de monitoreo en tiempo real impide establecer criterios objetivos para determinar el final del proceso, lo que puede conducir a sobre- o sub-secado, con consecuencias negativas sobre la eficiencia y la calidad del biomaterial (Yang et al., 2023).

Diversos estudios han propuesto alternativas tecnológicas que integran fuentes híbridas de energía (solar y biomasa), almacenamiento térmico y sistemas de control electrónico como el PID, demostrando mejoras en la eficiencia del secado, reducción de tiempos y preservación de calidad (Elwakeel et al., 2025; Wang et al., 2024). A nivel experimental, se ha evidenciado que la regulación de temperatura con estrategias de control permite alcanzar condiciones más estables y reproducibles, mientras que la medición continua de variables críticas (peso, humedad y temperatura) constituye un insumo fundamental para la caracterización del comportamiento de los biomateriales durante el secado (Djuraev & Uvayzov, 2023; Nuñez Vega et al., 2016).

En esta línea, la patente ES2969662B2 describe un dispositivo de medición de transferencia de masa basado en cámaras térmicamente aisladas y sensores distribuidos para registrar en tiempo real variables como temperatura, humedad y peso, permitiendo determinar con mayor precisión parámetros críticos como la difusividad y los coeficientes de transferencia de masa (Velázquez et al., 2025). Este tipo de desarrollos respaldan la necesidad de implementar sistemas automatizados y sensorizados que mejoren la exactitud de los datos y la reproducibilidad de los ensayos experimentales.

En este contexto, el sistema de secado por difusión con aire forzado y control automático de temperatura se diseñó tomando como referencia la patente ES2969662B2, adaptando sus principios al desarrollo de un prototipo experimental. El sistema integra sensores distribuidos, un controlador PID y un módulo de visualización e interacción con el usuario, lo que permite registrar en tiempo real las variables críticas del proceso y establecer un criterio objetivo de finalización basado en la estabilidad de la masa de la muestra. Gracias a esta integración, el sistema no solo optimiza la caracterización de biomateriales durante el secado, sino que también constituye una plataforma educativa y experimental para investigación y desarrollo en procesos térmicos.

1.2 Descripción del problema

Actualmente, los procesos de secado de biomateriales en entornos experimentales y productivos presentan alta variabilidad en términos de temperatura, humedad y flujo de aire. Esta variabilidad genera ineficiencia energética, tiempos de proceso prolongados y calidad final poco uniforme (Liu, 2022). Por ejemplo, se ha demostrado que el control continuo del flujo de aire mediante sistemas embebidos en secadores de grano ofrece ahorros energéticos significativos (Ademiluyi et al., 2020).

Además, la ausencia de un sistema que registre de manera continua las variables críticas limita la posibilidad de analizar el comportamiento del material durante el secado y de establecer estrategias de

optimización. Tecnologías que integran sensores conectados a microcontroladores han permitido monitorizar continuamente y controlar con precisión las condiciones de secado, optimizando la eficiencia energética y la calidad del producto (Petković, 2025).

Adicionalmente, en los sistemas convencionales no existe un criterio automático para determinar el final del proceso. Generalmente, la decisión de detener el secado depende de la experiencia del operador o de mediciones puntuales de humedad, lo que introduce subjetividad e incertidumbre. Si bien el peso de la muestra constituye un indicador objetivo de la pérdida de agua, la mayoría de los sistemas disponibles no cuentan con un registro continuo que permita evaluar su evolución temporal. Estudios recientes sobre sistemas instrumentados de secado en laboratorio han demostrado que registrar y controlar temperatura, humedad relativa y peso de la muestra de forma regular mejora la confiabilidad y repetibilidad del proceso (Ademiluyi et al., 2020).

Por estas razones, se requiere un sistema de secado con capacidad de monitoreo integral y control automático de temperatura, que reduzca la variabilidad del proceso y genere información precisa para la caracterización de biomateriales. Esta necesidad está respaldada por el uso de sistemas automatizados de control industrial, que permiten reducir desperdicios, mejorar la eficiencia energética y asegurar la calidad uniforme del producto.

1.3 Justificación del problema

El desarrollo de un sistema de secado con control de temperatura y registro en tiempo real de variables críticas responde a necesidades tanto académicas como prácticas. En el ámbito científico, disponer de datos confiables y en tiempo real sobre el comportamiento de biomateriales bajo condiciones controladas permite validar modelos de transferencia de calor y de masa, así como evaluar la eficiencia de distintas configuraciones.

Desde la perspectiva productiva, la implementación de sistemas con sensorización distribuida y control automático contribuye a mejorar la reproducibilidad, optimizar el consumo energético y asegurar una mayor calidad del producto final. Esto es especialmente relevante en la agricultura (granos, frutas, vegetales), la bioenergía (biomasa lignocelulósica), la industria farmacéutica (secado de compuestos sensibles) y los laboratorios químicos y biomédicos (muestras que requieren condiciones precisas de humedad y temperatura).

El sistema propuesto se diferencia de métodos tradicionales por integrar:

- Sensado distribuido (temperatura global y humedad en cada tubo).
- Monitoreo de peso en tiempo real mediante balanzas individuales.
- Visualización de datos y trazabilidad del proceso.
- Control PID de la temperatura, con actuación sobre la resistencia mediante relé de estado sólido.
- Criterio objetivo de finalización del proceso basado en la estabilización de la masa (pendiente de ajuste según calibración de las balanzas).

Estas características permiten convertir al sistema no solo en una herramienta práctica para el secado, sino también en un recurso didáctico y de investigación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de secado por difusión con control de temperatura, capaz de registrar en tiempo real las variables críticas del proceso (peso, humedad y temperatura) para la caracterización del comportamiento de biomateriales durante el secado.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de monitoreo del estado del peso para la configuración óptima del secado de biomateriales en distintas áreas de aplicación.
- Implementar la cámara de secado incorporando sensores de temperatura, humedad y peso.
- Elaborar un sistema de control que mantenga la temperatura de secado en un valor de referencia dado por el usuario.
- Evaluar el desempeño del sistema mediante pruebas experimentales con biomasa sólida.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Procesos de secado de biomasa

1.5.1.1 Fundamentos del secado

El secado de biomasa consiste en eliminar contenido de humedad a través de la transferencia de calor, lo cual permite reducir peso, mejorar propiedades de almacenamiento y conservación, así como optimizar aplicaciones energéticas e industriales (Hany Elmesiry & El-Khawaga, 2022).

Este proceso implica una transferencia acoplada de calor y masa; el calor facilita la evaporación, mientras que el transporte de vapor fuera de la materia depende de gradientes térmicos y de concentración (Khan, 2022).

Factores que influyen en el secado:

- La temperatura elevada acelera la evaporación y difusión interna, aunque a temperaturas extremas puede generarse una costra superficial (case hardening), que inhibe la salida de humedad interna (Cai et al., 2023).
- Humedad relativa y flujo de aire: una baja humedad ambiental y un flujo constante favorecen la evaporación desde la superficie y mantienen una buena tasa de deshidratación (Rashid et al., 2022).

- La presión tiene menor presencia en secado convencional de biomasa, salvo en técnicas como secado al vacío o con microondas.

1.5.1.2 Aplicaciones del secado

Usos en la industria alimentaria, bioenergía y materiales

- En bioenergía, secar residuos o biomasa antes de su uso como combustible mejora la eficiencia térmica y disminuye pérdidas durante almacenamiento (Havlík et al., 2022).
- En la industria alimentaria, se emplean técnicas como secado por microondas o infrarrojo para conservar productos agrícolas, ajustando tiempos y calidad de manera eficiente (Hany Elmesiry & El-Khawaga, 2022).
- En materiales, la biomasa seca se utiliza en fabricación de bioplásticos, tableros y productos compuestos, donde la humedad controlada es clave.

Impacto del control preciso de humedad

Controlar con precisión la humedad en el producto final reduce el consumo energético innecesario y mejora la calidad del producto, evitando sobre-secado y garantizando estabilidad del proceso (Havlík et al., 2022).

1.5.1.3 Etapas del secado

Período de velocidad constante

Este periodo ocurre al inicio, cuando la humedad superficial se evapora sin limitaciones internas, resultando en una tasa de secado relativamente constante.

Período de velocidad decreciente

Posteriormente, la tasa de secado disminuye porque la humedad restante está ligada dentro de la biomasa y su movilidad es menor, por lo que la difusión interna es el factor limitante del proceso (Hany Elmesiry & El-Khawaga, 2022).

Efecto de la temperatura en la cinética de secado

Temperaturas mayores no solo aceleran la evaporación sino que reducen el contenido crítico de humedad, facilitando la remoción de vapor, aunque también pueden comprometer propiedades físicas si se emplean temperaturas excesivas.

1.5.1.4 Control de flujo de aire y energía eficiente

La variabilidad en el flujo o temperatura puede generar ineficiencias energéticas, extendiendo los tiempos de secado y provocando calidad final inconsistente (Weigler et al., 2016). Por ejemplo, se ha demostrado que el control dinámico del flujo de aire, ajustado mediante sistemas embebidos en secadores de grano, puede lograr ahorros energéticos del 5% al 14 % en cebada y avena respectivamente (Jokiniemi et al., 2014).

1.5.2 Medición de masa en sistemas de secado

1.5.2.1 Principios de galga extensiométricas

Las galgas extensiométricas son sensores resistivos que varían su resistencia eléctrica en función de la deformación mecánica que experimentan; se utilizan para medir fuerzas, presiones, tensiones o peso. La deformación levemente altera la geometría y propiedades eléctricas del material, generando un cambio en la resistencia eléctrica que permite cuantificar la deformación. Este principio apela al efecto piezorresistivo (Ștefănescu, 2011)

El cambio de resistencia ΔR en respuesta a la deformación ε está relacionado mediante el factor de galga (gauge factor, GF), como se muestra en la ecuación 1.1:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

Este factor incorpora tanto el efecto geométrico como el efecto piezorresistivo del material (Thomas et al., 1982) .

Las cuatro galgas o resistencias vinculadas forman un puente de Wheatstone, lo que permite detectar pequeñas variaciones en resistencia mediante la comparación diferencial. Esta configuración mejora sensibilidad y rechazo al ruido térmico.

1.5.2.2 Galga tipo barra/viga

Las galgas extensiométricas pueden montarse en una barra o viga metálica que flexiona ante una carga. La deformación resultante se mide mediante las galgas y se traduce en señal eléctrica proporcional al peso aplicado, típicamente en celdas de carga tipo barra/biela (Írsel, 2021).

Criterios de selección: sensibilidad, linealidad, capacidad de carga

- Sensibilidad (factor de galga): indica cuán grande es la variación de resistencia ante una microdeformación ($GF \approx 2$ para galgas metálicas) .
- Linealidad: crucial para que la salida eléctrica escale proporcionalmente con la carga aplicada.
- Capacidad de carga: la viga y galga deben soportar el rango de peso esperado sin deformación plástica o fallo mecánico.

1.5.2.3 Conversión de señal

El HX711 es un circuito integrado comúnmente utilizado para leer celdas de carga basadas en galgas extensiométricas. Consiste en un amplificador de instrumentación y un convertidor A/D de 24 bits que permite medir las pequeñas señales provenientes del puente Wheatstone y comunicarlas digitalmente a un microcontrolador.

Gracias a su alta resolución y ganancia ajustable, el HX711 es ideal para captar variaciones mínimas en peso. La calibración se lleva a cabo aplicando una carga conocida, ajustando factores en software para convertir la lectura digital en unidades físicas (gramos o kilogramos) (U, S.,2025).

1.5.2.4 Errores y compensaciones

Las variaciones de temperatura afectan la resistencia de las galgas y pueden generar errores de lectura. Esto se compensa con galgas autocompensadas, puentes completos, galgas dummy o incluyendo un resistor de compensación térmica. Asimismo, ciertas aleaciones como el constantán tienen coeficientes térmicos bajos, pero pueden presentar deriva a temperaturas por encima de los 65 °C.

La histéresis ocurre cuando tras aplicación y remoción de la carga la galga no regresa exactamente a su valor base, afectando precisión y reproducibilidad. Esto se debe a deformaciones plásticas o adhesión imperfecta.

Las señales de galgas son muy pequeñas (mV), por lo que son susceptibles a ruido de campos electromagnéticos o interferencia eléctrica. Se recomienda usar cables trenzados apantallados, amplificadores de frecuencia portadora o filtrado adecuado (Vishay Tech Notes, 2010).

1.5.3 Medición de humedad y temperatura

1.5.3.1 Sensores de temperatura

El DS18B20 es un sensor digital de temperatura que utiliza el protocolo OneWire, lo que significa que transmite datos sobre un solo hilo de comunicación además de tierra, simplificando su implementación en sistemas embebidos (Elyounsi et al., 2021). Tiene un rango operativo que va desde -55 °C hasta +125 °C y proporciona una salida digital directamente interpretable por microcontroladores (A. Elyounsi et al., 2021).

Una de las principales ventajas del protocolo OneWire es su capacidad para conectar múltiples sensores en paralelo usando un solo pin de datos del microcontrolador, reduciendo así la complejidad del cableado y facilitando la agregación de múltiples puntos de medición (Elyounsi et al., 2021).

El DS18B20 proporciona una precisión típica de ± 0.5 °C entre -10 °C y +85 °C, con resoluciones configurables que varían de 9 a 12 bits (0.5 °C a 0.0625 °C) (A. Elyounsi et al., 2021). Además, se ha demostrado que tras un proceso de calibración adecuado, su precisión puede mejorar

significativamente. En un estudio de calibración con cámara térmica y termómetro estándar, el sensor presentó una incertidumbre de hasta 0.65 °C a 10 °C, aunque mantuvo incertidumbre aceptable (≤ 0.20 °C) en los puntos de 20 °C, 30 °C y 40 °C (Permana et al., 2021).

1.5.3.2 Importancia de controlar la humedad

La humedad en la biomasa influye directamente en su densidad y masa, incidiendo notablemente en su valor energético y propiedades de almacenamiento. En varios residuos lignocelulósicos de Malasia, se encontró una relación lineal muy fuerte ($R^2 > 0.9$) entre humedad y densidad, lo que permite estimar la humedad con alta precisión basándose en medidas de densidad (Moni et al., 2016).

El comportamiento higroscópico de la madera está determinado por interacciones entre agua y estructuras celulares. En la llamada zona sobre-higroscópica (muy alta humedad), el agua se acumula principalmente por condensación capilar en espacios amplios, mientras que en la zona higroscópica (humedad moderada), el agua está ligada por enlaces de hidrógeno en las paredes celulares. Esto afecta propiedades físicas como la estabilidad dimensional y la degradación microbiana (Fredriksson, 2019).

1.5.3.3 Integración de datos

Debido a su salida digital y protocolo OneWire, el DS18B20 se integra fácilmente con microcontroladores como Arduino o ESP32 para registrar temperaturas en la cámara de secado. Su diseño permite conectar múltiples sensores en paralelo, lo que es útil para monitoreo en distintas zonas sin necesidad de canales dedicados.

Aunque el DS18B20 es adecuado para aplicaciones generales, su precisión puede ser insuficiente para estándares meteorológicos estrictos, especialmente a bajas temperaturas, si no está calibrado. Por ejemplo, no cumple el requisito WMO (± 0.3 °C) a 10 °C sin calibración adecuada (Permana et al., 2021). Además, su resolución máxima de 0.0625 °C puede ser limitada en aplicaciones que requieran una precisión superior.

1.5.4 Control de temperatura en cámara de secado

1.5.4.1 Fundamento del control PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ajusta su salida en función del error entre el valor deseado (setpoint) y el valor real (proceso), combinando tres acciones: proporcional, integral y derivativa. Su fórmula clásica se muestra en la ecuación 1.2, donde K_p , K_i y K_d son las ganancias proporcional, integral y derivativa, respectivamente.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Respuesta proporcional, integral y derivativa:

- La acción proporcional reduce el error actual de manera lineal.
- La integral corrige errores acumulados, eliminando errores en estado estable pero pudiendo provocar sobreimpulso.
- La derivativa anticipa la tendencia del error y mejora la estabilidad y el tiempo de asentamiento.

El método Ziegler–Nichols es un enfoque heurístico donde primero se eliminan las acciones integral y derivativa, se incrementa K_p hasta que el sistema comienza a oscilar. El valor crítico K_u (ganancia última) y el período de oscilación T_u se usan luego para calcular K_p , K_i y K_d según tablas establecidas (Astrom, 2009).

1.5.4.2 Implementación del PID en microcontroladores

El ESP32 ha sido utilizado como herramienta didáctica para adquisición de señales, procesamiento y despliegue del control PID en aplicaciones biotecnológicas, demostrando su capacidad para control en tiempo real (Márquez-Vera et al., 2023)

Implementar un controlador digital con microcontrolador como el ESP32 permite ajustes flexibles (por software), incorporación de filtros digitales, registro de datos y conectividad para supervisión remota o ajuste dinámico (beneficios clave sobre los controladores análogos tradicionales).

1.5.5 Limitaciones de los métodos tradicionales

El secado al sol, históricamente uno de los métodos más utilizados por su bajo costo, presenta múltiples limitaciones. Al depender de las condiciones ambientales, se expone a variabilidad en temperatura, humedad relativa y radiación solar, lo que dificulta lograr resultados reproducibles (Mohammed et al., 2020). Además, la exposición directa a contaminantes ambientales y la ausencia de control preciso sobre variables críticas conducen a productos con humedad no uniforme, deterioro en la calidad sensorial y mayores tiempos de proceso (Mak et al., 2020).

Estas limitaciones evidencian la necesidad de implementar estrategias tecnológicas que permitan un monitoreo y control continuo de parámetros clave, reduciendo la dependencia de factores externos e incrementando la eficiencia energética del sistema (Ademiluyi et al., 2020).

1.5.6 Avances tecnológicos en sistemas de secado

En las últimas décadas, se han desarrollado sistemas híbridos que combinan energía solar y biomasa, logrando mayor eficiencia térmica y reducción de la dependencia climática (Elwakeel et al., 2025). Además, la incorporación de módulos de almacenamiento térmico ha permitido extender el proceso de secado incluso en condiciones de baja irradiación (Wang et al., 2024).

En cuanto al control automatizado, se ha integrado el uso de controladores electrónicos PID, que permiten regular con precisión la temperatura y la velocidad de secado, logrando productos homogéneos y mayor reproducibilidad experimental (Yang et al., 2023). Más recientemente, se han explorado técnicas avanzadas como el Model Predictive Control (MPC) y sistemas de control adaptativo, los cuales ofrecen mejor desempeño en procesos no lineales y en dinámicas térmicas complejas. Sin embargo, su aplicación práctica está limitada por la mayor demanda de procesamiento computacional y la complejidad de implementación (Liu, 2022).

1.5.7 Componentes tecnológicos del sistema propuesto

- Sensor de temperatura DS18B20: dispositivo digital de alta precisión, adecuado para monitoreo continuo en procesos de secado.
- Sensor de humedad SHT31: permite medir humedad relativa cerca de la muestra, variable crítica para evaluar el proceso.
- Balanzas electrónicas: registran la pérdida de masa de cada tubo de biomasa, indicador directo del progreso del secado.
- Relé de estado sólido (SSR-40DA): controla la potencia de la resistencia de calentamiento, garantizando conmutación rápida y duradera.
- Teclado matricial 4×4 con PCF8575: interfaz de entrada que permite al usuario definir el valor de referencia de temperatura.
- Pantalla LCD 16×2 con interfaz I2C: interfaz de salida que muestra al usuario la temperatura medida y el setpoint.
- Microcontrolador (ESP32 o similar): ejecuta el algoritmo PID, adquiere datos de sensores y controla los actuadores.

Capítulo 2

2.1 Metodología

2.1.1 Diseño del sistema

El sistema desarrollado corresponde a una cámara de secado por difusión con aire forzado y control automático de temperatura. Su diseño busca integrar en una sola plataforma la capacidad de monitoreo en tiempo real de las variables críticas del proceso (masa, humedad y temperatura), junto con la regulación de la temperatura mediante un controlador PID implementado en un microcontrolador.

La cámara de secado se compone de dos secciones principales: una precámara de calentamiento y una cámara principal de secado.

En la precámara se ubica una resistencia helicoidal aletada tipo “U”, alimentada a 220 VAC, con una corriente nominal aproximada de 9 A. El aire es impulsado hacia esta resistencia mediante un motor de aspiradora invertido (220 VAC, 3,5 A), que asegura un flujo constante de aire. El contacto entre el aire frío y la resistencia genera el aumento de temperatura requerido, y posteriormente el flujo es conducido hacia la cámara principal a través de una malla metálica que contribuye a uniformizar la corriente de aire y evitar la entrada de partículas sólidas.

La cámara principal consiste en una estructura cúbica que aloja seis tubos de PVC de entre 4 y 5 pulgadas de diámetro y aproximadamente 40 cm de altura, cada uno cerrado en la base. En el interior de dichos tubos se colocan las muestras de biomasa (ejemplo: trozos de madera). La base de la cámara cuenta con orificios de 11 a 15 cm de diámetro que permiten que cada tubo atraviese la estructura y se apoye en una balanza independiente ubicada en la parte externa. De esta manera, es posible registrar en continuo la variación de peso de cada muestra sin interrumpir el proceso.

El aire caliente proveniente de la precámara circula alrededor de los tubos y atraviesa la biomasa, para luego salir al exterior a través de una segunda malla situada en el extremo opuesto de la cámara. Esta disposición favorece un flujo de aire relativamente uniforme y reduce pérdidas por fuga.

En la parte superior central de la cámara principal se encuentra instalado un sensor de temperatura DS18B20, que actúa como variable de proceso (PV) para el lazo de control de temperatura. Adicionalmente, cada tubo incorpora un sensor de humedad SHT31, ubicado lo más cerca posible de la biomasa, lo que permite caracterizar las condiciones microclimáticas durante el secado.

El diseño contempla también un módulo de interfaz hombre-máquina (HMI) compuesto por un teclado matricial 4x4 con expensor PCF8575 y una pantalla LCD 16x2 con interfaz I2C. El teclado permite al usuario ingresar el valor de referencia (setpoint, SV) de la temperatura de secado, mientras que la pantalla muestra en tiempo real el valor actual de temperatura (PV) y el SV configurado.

El control de la temperatura se logra mediante la modulación de potencia de la resistencia, empleando un relé de estado sólido SSR-40DA controlado por el microcontrolador (ESP32). El algoritmo PID ajusta de forma dinámica la salida para minimizar el error entre PV y SV.

En conjunto, este diseño asegura que las muestras de biomasa puedan ser sometidas a un secado controlado y que, al mismo tiempo, se disponga de datos confiables sobre la evolución de peso, humedad y temperatura durante el proceso, elementos indispensables para la caracterización experimental del comportamiento de los biomateriales.

2.1.2 Instrumentación y componentes

Para garantizar el monitoreo continuo y el control preciso de la cámara de secado, se seleccionaron sensores y actuadores de bajo costo y fácil integración con sistemas embebidos. La elección de cada dispositivo respondió a criterios de precisión, compatibilidad electrónica y disponibilidad comercial.

En la Tabla 2.1 se detallan los principales componentes del sistema, junto con sus especificaciones y función dentro del diseño:

Tabla 2.1

Componentes principales del sistema de secado

Componente	Modelo / Especificación	Función
Microcontrolador	ESP32 (WiFi + ADC integrado)	Adquisición de datos de sensores, ejecución del algoritmo PID, control de actuadores, interfaz con el usuario.
Sensor de temperatura	DS18B20, digital, rango -55 a 125 °C, ± 0.5 °C	Medición de la temperatura de la cámara principal (PV del control).
Sensores de humedad	SHT31, digital I2C, ± 2 % HR	Monitoreo de humedad relativa en cada tubo de biomasa.
Sensores de peso	Celdas de carga tipo galga extensiométrica, 0–5 kg aprox.	Registro en tiempo real de la variación de masa de cada muestra.
Módulo de lectura de peso	HX711, ADC de 24 bits	Conversión de la señal analógica de las galgas a señal digital.
Actuador	Relé de estado sólido SSR-40DA	Modulación de la potencia de la resistencia de calefacción (220 VAC).
Elemento calefactor	Resistencia helicoidal aletada tipo “U”, 220 VAC, 9 A	Generación de aire caliente en la precámara.
Motor ventilador	Motor de aspiradora invertido, 220 VAC, 3.5 A	Flujo de aire forzado hacia la cámara principal.
Interfaz de entrada	Teclado matricial 4×4 con expensor PCF8575 (I2C)	Configuración del setpoint de temperatura.
Interfaz de salida	Pantalla LCD 16×2 con módulo I2C	Visualización del setpoint (SV) y la temperatura actual (PV).
Estructura física	Cámara principal de acero inoxidable, tubos de PVC de 4–5”, h=40 cm	Contención de la biomasa y circulación del aire de secado.

Protección eléctrica	Fusibles, breaker, contactor, protecciones térmicas	Seguridad del sistema frente a sobrecorrientes y fallos eléctricos.
----------------------	--	--

Explicación de los componentes

- Microcontrolador (ESP32): actúa como el núcleo del sistema, adquiriendo los datos de los sensores, procesándolos mediante el algoritmo PID y controlando la salida al SSR. Su conectividad WiFi integrada lo hace idóneo para futuras expansiones hacia registro remoto de datos.
- Sensor DS18B20: se seleccionó por su precisión, facilidad de integración con buses 1-Wire y robustez frente al ruido eléctrico. La variable de temperatura constituye la principal variable de control del proceso.
- Sensores SHT31: ubicados en cada tubo de biomasa, permiten monitorear la humedad relativa de forma localizada, lo cual proporciona información detallada sobre las condiciones microclimáticas que afectan la cinética de secado.
- Celdas de carga + HX711: convierten la variación de peso de las muestras en señales digitales de alta resolución, lo que permite identificar con precisión el momento en que la masa se estabiliza (criterio de fin de secado, pendiente de ajuste por calibración).
- SSR-40DA: dispositivo que permite conmutar cargas de corriente alterna de hasta 40 A, controlado mediante señales de baja tensión (3–32 VDC). Se utiliza para modular la potencia de la resistencia de calefacción según la salida del PID.
- Resistencia helicoidal y motor de aspiradora: conforman el subsistema de acondicionamiento de aire. El motor genera un flujo constante que atraviesa la resistencia, elevando su temperatura antes de ingresar a la cámara principal.

- Interfaz HMI (teclado + LCD): facilita la interacción directa con el usuario para ingresar el setpoint de temperatura y supervisar en tiempo real el estado del sistema.
- Protección eléctrica: implementada para garantizar la seguridad del equipo y del operador, considerando la potencia elevada de la resistencia y el motor.

2.1.3 Componentes para el diseño de la automatización del sistema

2.1.3.1 Lista materiales

Para garantizar la automatización de la cámara de secado, se seleccionaron materiales para la parte AC y DC. La selección de cada dispositivo respondió a criterios de compatibilidad electrónica y disponibilidad comercial, esta lista se detallan en la tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2

Listado de materiales de componentes DC para el tablero

Ítem	Componente DC	Cant.	Descripción	Observaciones
1	DS18B20	1	Sensor de temperatura	Capacidad mayor a 50 grados
2	HX711	1	Módulo de celda de carga	Debe protegerse
3	Cable UTP categoría 6 reforzado	1	10 metros	Debe protegerse con tubo termofundible
4	Galgas extensiométricas tipo botón 1kg	1	Capacidad mayor a 50 grados	Galgas extensiométricas usadas en balanzas de cocina
5	NodeMCU-32 30-pin ESP32 WiFi USB-C + cable USB	1	Donación. ESP32 para el control PID	Debe protegerse
6	Display LDC 16x2	1	Para interacción con el usuario.	Proporcionado por el cliente
7	Tubo termofundible	1	10 metros	Para proteger el cable UTP capacidad mayor a 50 grados

8	SHT31	1	Sensor de humedad	No requiere de un módulo para comunicarse con la ESP32
9	Teclado para Arduino	1	Teclado para interacción con el usuario	
10	PCF8574	1	Módulo para el teclado de Arduino	
11	CJMCU-4CH BSS138 (SparkFun style)	1	Conversor de nivel lógico bidireccional, Para SDA y SCL.	

Tabla 2.3

Listado de materiales de componentes AC para el tablero

Ítem	Componente AC	Cant.	Descripción	Observaciones
1	XB5-AVM3 Piloto verde lum. LED 230VAC	2	Luz indicadora de start	Control
2	XB5-AVM4 Piloto rojo lum. LED 230VAC	2	Luz indicadora de stop	Control
3	XB5-AVM5 Piloto amarillo lum. LED 230VAC	1	Luz indicadora de fallas	Control
4	XB4-BVM6 L/Piloto azul LED 230VAC	2	Luz indicadora del MODO de operación: standby	Control
5	Breaker MG EZ9F56225 2P 25A 230V	1	Protección principal del tablero	
6	Breaker MG EZ9F56206 2P 6A 230V	1	Para la parte de control: botoneras, luces piloto y alimentación DC (fuente DC).	
7	PU1228 Toma doble 15A 127-250V blanco	1	Alimentación para la ESP32, Arduino Mega, Módulo de	Conectado al tomacorriente del tablero

conversión 0-3.3v a 4-20mA y el Convertidor LM2596.				
8	Enchufe 50A P/Gallina 220VAC	1	Para conexión pata de gallina	Vienen sin voltaje son como switch
9	XB4-BA31 Pulsador verde 1NA	2	Botonera de start del tablero	Vienen sin voltaje son como switch
10	XB4-BA42 Pulsador rojo 1NA	2	Botonera de stop del tablero	Vienen sin voltaje son como switch
11	XB4BS8442 Pulsador tipo hongo rojo	1	Botonera de parada de emergencia del tablero	
12	NSYTRV162 Borne gris 16-6AWG conex-tornill	10	De 2 puntos	
13	Terminales T/puntera 14-12A azul 100U	1	Una funda	
14	Terminales T/puntera 18-16A amarillo 100U	1	Una funda	
15	Breaker riel EBAS 2P 16A 6KA	1	Para la resistencia helicoidal aletada de 220VAC	
16	Guardamotor de 2,8-4A SIRIUS INN-SIEMENS	1	Para el motor monofásico de 220VAC	Para alimentar a 1 motor de 3.5A
17	ZZContactor 9A C/BOB 220VAC 1NA+1NC SIRIUS INN-SIEMENS	1	Para la protección de la parte de control	
18	ZZContactor 12A C/BOB 220VAC 1NA+1NC SIRIUS INN-SIEMENS	1	Para el motor monofásico de 220VAC	
19	FOTEK SCR-40 DA	1	FOTEK SCR-40 DA Solid State Module input 3-32VDC output 24-380VAC	Para controlar la resistencia

	Disipador 1F SSR		
20	60X50X50 5-20A XI-50 XURUI	1	Para el ASR-40CA
	Tablero metálico doble		
21	fondo 600x400x200 liviano Beaucoup	1	Tablero de control
22	Canaleta ranurada 2000x33x33 gris CAMSCO	1	Para la organización, protección y guía del cableado dentro del tablero
23	Cable concéntrico THHN 10 AWG 3 HILOS	1	Para la acometida 5 m
24	Switch 3 posiciones de uso industrial	1	Para seleccionar el MODO de operación

2.1.3.2 Planos

Para la automatización del sistema de control de temperatura y el monitoreo de la biomasa a través del tiempo, se diseñaron cuatro planos eléctricos, colocados en la sección de apéndices, que incluyen los esquemáticos de fuerza y control. A continuación, se describen los principales componentes y su funcionamiento en cada uno de ellos.

El apéndice A presenta el esquemático de fuerza principal, donde se incluye un disyuntor general de 2P, 25 A, encargado de proteger todo el sistema, seguido de un disyuntor secundario de 2P, 16 A destinado a la resistencia helicoidal aletada, un disyuntor de 2P, 6 A para la alimentación del motor y un guardamotor de 3P, calibrado en 3,5 A, que protege contra sobrecargas. Este esquema constituye la base de alimentación para los demás subsistemas.

En el apéndice B se detalla el esquemático de fuerza y control del motor. En el circuito de fuerza, la alimentación parte de un disyuntor de 25 A, continúa hacia un guardamotor y luego hacia un contactor de 12 A con bobina de 220 V AC (designado KM1), que conecta la botonera X0 directamente al

motor bifásico de 220 V y 3,5 A. El circuito de control incluye un disyuntor principal de 2P, 25 A y un disyuntor secundario de 2P, 6 A, seguido de una parada de emergencia mediante un pulsador tipo hongo, normalmente cerrado y de color rojo, que detiene el sistema en situaciones críticas. Además, se incorporan los pulsadores de paro (PP1) y de marcha (PM1), que permiten controlar el funcionamiento del motor. Cuando se presiona el PP1, se activa un foco rojo que indica el estado de paro, mientras que al presionar el PM1, un foco verde señala el estado de funcionamiento. Todo el circuito de control concluye cerrando la alimentación hacia la parada de emergencia, los focos indicadores y la bobina del contactor, garantizando una señalización clara del estado del sistema.

El apéndice C describe el esquemático de fuerza y control de la resistencia helicoidal aletada de 2 kW (9 A), la cual puede operar en tres modos diferentes: manual, standby y automático. En el modo manual, la alimentación proviene del disyuntor principal de 25 A y del disyuntor de 16 A, pasando por el selector en modo manual, que conecta en serie los pulsadores de paro (PP2) y marcha (PM2) para controlar la bobina KM2 (220 V AC). En este modo, un foco rojo indica el estado de paro y un foco verde señala la activación de la resistencia, mientras que un foco azul confirma que el sistema está en modo manual. El modo standby utiliza el mismo esquema de alimentación, pero al accionar el selector standby se cierra un circuito a través de contactores normalmente cerrados, encendiendo un foco naranja que indica que la resistencia se encuentra deshabilitada temporalmente. En el modo automático, la alimentación también proviene de los disyuntores de 25 A y 16 A, y el control se realiza mediante un relé de estado sólido (SSR 40DA), gestionado por el microcontrolador, que conmuta la resistencia de forma precisa. Un foco azul señala la activación de este modo, y la configuración de la SSR asegura un control rápido y eficiente, aislando la señal de control de la potencia de la resistencia.

Finalmente, el apéndice D presenta el esquemático de control DC para el modo automático de la resistencia. Este circuito toma la alimentación desde el disyuntor principal de 2P, 25 A y el disyuntor de 2P, 16 A, pasando por el selector automático y una fuente de alimentación DC (110 V AC a 5 V DC, 5 A).

La salida DC alimenta el módulo SP y las entradas de control de la SSR, necesarias para conmutar la resistencia desde el microcontrolador. El neutro cierra el circuito a través de la fuente, el módulo SP y la SSR, asegurando una operación estable y protegida.

2.1.4 Sistema de control de peso y humedad

El sistema desarrollado permite el monitoreo continuo y en tiempo real de la masa y la humedad relativa de las muestras de biomasa durante el proceso de secado. Esta información es esencial para caracterizar la cinética de pérdida de agua, establecer curvas de secado y determinar el punto final del proceso.

Control y monitoreo del peso: Cada tubo de PVC en la cámara de secado se apoya sobre una balanza individual equipada con una celda de carga tipo galga extensiométrica (capacidad aproximada: 0–5 kg), las galgas extensiométricas cambian su resistencia eléctrica cuando se deforman por efecto de la carga aplicada, estas variaciones de resistencia se organizan en un puente de Wheatstone, cuya señal diferencial, en el orden de milivoltios, se amplifica y digitaliza mediante el módulo HX711, que incorpora un convertidor analógico-digital de 24 bits.

La alta resolución del HX711 permite detectar variaciones de masa de pocos gramos, lo que es fundamental para identificar el momento en que la masa de las muestras se estabiliza, criterio principal para definir el final del secado.

Los datos de masa obtenidos se envían al microcontrolador ESP32, que procesa las lecturas, aplica filtros digitales simples (promedios móviles) para minimizar ruido eléctrico y se asocia cada valor a una marca de tiempo. De este modo, es posible trazar curvas masa vs. tiempo para cada tubo, facilitando el análisis posterior de la cinética de secado.

Para garantizar la fiabilidad metrológica, las celdas de carga se calibraron mediante el uso de patrones de peso certificados, siguiendo procedimientos estándar de ajuste lineal. Este proceso permitió

establecer factores de conversión para cada celda, reduciendo errores sistemáticos y asegurando lecturas consistentes entre todos los canales de medición.

Control y monitoreo de la humedad relativa: La humedad relativa (HR) del aire en contacto con la biomasa es un parámetro crítico en la determinación de la tasa de secado. Cada tubo incorpora un sensor digital SHT31, ubicado lo más cerca posible de la superficie de la biomasa, lo que permite medir las condiciones microclimáticas específicas de cada muestra.

Estos sensores proporcionan lecturas digitales vía protocolo I²C, con una precisión típica de ± 2 % HR y una resolución de 0.01 %. La incorporación de sensores independientes en cada tubo posibilita detectar posibles desbalances entre posiciones, asociados a variaciones en el flujo de aire o distribución térmica.

Los valores de HR se adquieren en tiempo real y son transmitidos al microcontrolador ESP32, donde se registran junto con las lecturas de masa. Esto permite correlacionar directamente las condiciones higrotérmicas locales con la pérdida de peso observada.

2.1.5 Sistemas de control de temperatura

El control de la temperatura de la cámara se realiza mediante un algoritmo PID (Proporcional–Integral–Derivativo) implementado en el microcontrolador ESP32. La variable de proceso (PV) corresponde a la temperatura medida por el sensor DS18B20, mientras que la variable de referencia (SV) es ingresada por el usuario a través del teclado matricial 4×4. La señal de error se obtiene como la diferencia entre el setpoint y la temperatura real.

El controlador PID actúa sobre un relé de estado sólido SSR-40DA, que regula la potencia entregada a la resistencia helicoidal de 220 VAC ubicada en la precámara. De este modo, el sistema compensa de manera automática cualquier desviación de la temperatura respecto al valor deseado.

El algoritmo se implementa en forma digital, considerando una frecuencia de muestreo definida por la capacidad de adquisición del microcontrolador y las condiciones dinámicas del proceso. Se establecieron tres parámetros principales:

- Kp (ganancia proporcional): ajusta la intensidad de la respuesta proporcional al error.
- Ki (ganancia integral): compensa errores acumulados en el tiempo, asegurando que la temperatura converja al setpoint.
- Kd (ganancia derivativa): atenúa variaciones rápidas de la señal, reduciendo oscilaciones.

El control se ejecuta en ciclos iterativos:

- i. El ESP32 adquiere el valor de temperatura (PV).
- ii. Calcula el error ($e = SV - PV$).
- iii. Evalúa la acción proporcional, integral y derivativa.
- iv. Genera una señal de control modulada, que activa o desactiva el SSR en intervalos de tiempo determinados (técnica de control por ventana temporal).
- v. El SSR conmuta la resistencia en la red de 220 VAC, aumentando o disminuyendo la potencia de calefacción según lo requerido.

Este esquema garantiza que la temperatura de la cámara se mantenga cercana al setpoint definido, compensando variaciones externas como cambios en el flujo de aire o en la carga de biomasa.

Cabe señalar que, aunque se exploraron en la literatura estrategias de control más avanzadas (como MPC), se optó por el PID debido a su simplicidad de implementación, bajo costo computacional y eficacia comprobada en sistemas térmicos de características similares.

2.1.6 Adquisición y procesamiento de datos

El sistema desarrollado permite la adquisición simultánea de tres variables críticas del proceso de secado: peso, humedad y temperatura. El microcontrolador ESP32 cumple la función de unidad

central de procesamiento, encargándose de leer las señales provenientes de los sensores, procesarlas y almacenarlas en registros temporales que pueden ser posteriormente exportados para análisis.

Masa de la biomasa: Cada tubo de PVC se apoya en una balanza individual equipada con una celda de carga. Las variaciones de peso se convierten en señales eléctricas de muy baja magnitud (mV), que son amplificadas y digitalizadas por el módulo HX711. La resolución de 24 bits del conversor garantiza una alta sensibilidad en la medición de masa. Los valores son enviados al ESP32, que los procesa y los asocia a marcas de tiempo.

Temperatura: El sensor DS18B20, instalado en la parte superior central de la cámara, transmite lecturas digitales de la temperatura interna de la cámara. Esta señal constituye la variable de proceso (PV) del controlador PID y, además, es registrada para análisis comparativo frente al setpoint (SV).

Humedad relativa: Cada tubo incorpora un sensor SHT31, que transmite lecturas digitales vía protocolo I2C. Esto permite monitorear la humedad en la proximidad inmediata de la biomasa, aportando información sobre el microclima en cada unidad de secado.

Los datos adquiridos se procesan en tiempo real de la siguiente manera:

- i. Lectura periódica: el microcontrolador toma lecturas en intervalos definidos (por ejemplo, cada minuto), que corresponden al delta de tiempo Δt entre mediciones.
- ii. Almacenamiento temporal: los valores de peso, temperatura y humedad son almacenados en variables de memoria.
- iii. Visualización en tiempo real: mediante la pantalla LCD 16x2 se muestran los valores actuales de la temperatura (PV) y el setpoint configurado (SV).
- iv. Registro y trazabilidad: los datos pueden transmitirse vía conexión serie a un computador para generar archivos CSV, o almacenarse en memoria local del microcontrolador para su posterior análisis.

- v. Procesamiento posterior: los registros permiten trazar curvas de evolución (masa vs. tiempo, humedad vs. tiempo, temperatura vs. tiempo), identificar el comportamiento dinámico de la biomasa y calcular indicadores de precisión como BIAS y RMSE en el análisis de resultados.

La integración de estas funciones garantiza un seguimiento completo del proceso y genera un conjunto de datos experimentales útiles tanto para la validación del diseño como para futuras investigaciones.

2.1.7 Consideraciones técnicas y de seguridad

El diseño y operación de la cámara de secado requieren la incorporación de medidas técnicas y de seguridad que garanticen tanto la integridad del equipo como la seguridad de los operadores. A continuación, se destacan los aspectos más relevantes:

a) Seguridad eléctrica

- La resistencia helicoidal y el motor de aspiradora trabajan con tensión de red (220 VAC), lo cual implica riesgos de descarga eléctrica. Para mitigar estos riesgos, se incluyeron:
- Fusibles de protección contra sobrecorriente.
- Un breaker termomagnético para cortar la alimentación en caso de falla.
- Conexión a tierra de la estructura metálica.
- El relé de estado sólido (SSR-40DA) se utiliza para la conmutación de la resistencia, evitando el desgaste mecánico y garantizando aislamiento eléctrico entre el microcontrolador (3.3 VDC) y la carga de potencia (220 VAC).

b) Seguridad térmica

- La resistencia de calefacción puede alcanzar temperaturas elevadas; se instaló una malla metálica que reduce el contacto directo con el elemento calefactor y protege contra proyecciones de material incandescente.

- Se estableció un límite de operación de temperatura en 60 °C para prevenir daños a los sensores o a la estructura de PVC.

c) Estabilidad de las mediciones

- Las balanzas externas están sujetas a interferencias ambientales (vibraciones, corrientes de aire). Se recomendó ubicar el sistema en una superficie nivelada y aislada de perturbaciones externas durante los ensayos.
- La calibración de las celdas de carga es indispensable para establecer un criterio cuantitativo de “peso constante”. Mientras esta calibración no se complete, el criterio de estabilización de masa se mantiene en carácter cualitativo.

d) Consideraciones operativas

- La cámara debe operarse en un entorno ventilado para evitar acumulación excesiva de calor en las inmediaciones.
- Los sensores de humedad deben manipularse con precaución, evitando el contacto directo con agua líquida o condensada.
- El microcontrolador y la electrónica de control se ubican en un compartimento aislado para prevenir daños por temperatura o humedad.

e) Limitaciones técnicas actuales

- El sistema no contempla, en esta versión, almacenamiento local de datos en tarjeta SD ni transmisión inalámbrica, aunque el microcontrolador ESP32 ofrece estas capacidades para futuras implementaciones.
- El criterio de finalización del secado por masa requiere aún definir valores umbral precisos tras la calibración metrológica.

2.1.8 Códigos fundamentales

2.1.8.1 Lectura y calibración de balanzas (HX711)

El sistema utiliza celdas de carga para medir la variación de masa en tiempo real. Para procesar la señal analógica generada por las galgas extensiométricas, se integra el módulo HX711, el cual digitaliza la lectura con 24 bits de resolución.

Figura 2.1

Lectura y calibración de balanza (HX711)

```
HX711 scale;
float calibration_factor = 964.395996f; // factor de calibración
float offset_g = 0.0f;

// Inicialización del módulo HX711
scale.begin(PIN_DOUT, PIN_SCK);
scale.set_scale(calibration_factor);

// Tara inicial
if (scale.wait_ready_timeout(2000)){
    scale.tare();
    Serial.println("Tara HX711 realizada.");
} else {
    Serial.println("ADVERTENCIA: HX711 no listo.");
}
```

El código de la figura 2.1 inicializa el módulo HX711, establece el factor de calibración y realiza la tara automática al inicio del sistema. Este proceso asegura que las mediciones comiencen desde un punto de referencia cero, eliminando posibles errores asociados al montaje de las celdas de carga.

Además, el sistema permite ajustar dinámicamente el factor de calibración mediante comandos seriales, lo que facilita la compensación de sesgos detectados durante los ensayos experimentales.

2.1.8.2 Control PID implementado en ESP32

El sistema emplea un controlador PI (Proporcional–Integral) para regular la temperatura de la cámara, implementado directamente en el microcontrolador ESP32. El código de control de la figura 2.2,

ajusta dinámicamente la potencia aplicada a la resistencia calefactora mediante un relé de estado sólido (SSR), asegurando que la temperatura siga el valor de consigna definido por el usuario.

Figura 2.2

Control PID

```
// Parámetros del control
const float Ts = 1.0f;      // [s] periodo de muestreo
float Kc = 2.0f;            // Ganancia proporcional
float Ti = 120.0f;          // Tiempo integral [s]
float Kb = 0.0f;            // Ganancia anti-windup (ajustada en setup)

// Variables de control
float sp_cmd = 45.0f, sp = 25.0f;
float pv = 25.0f, pv_f = 25.0f;
float e = 0.0f, u_unsat = 0.0f, u_sat = 0.0f, Iterm = 0.0f;

// Fragmento dentro de controlStep()
e = sp - pv_f;
u_unsat = Kc * e + Iterm;

if (pv_f >= T_MAX) {
    u_sat = 0;
    Iterm = 0;
} else {
    if (u_unsat > UMAX) u_sat = UMAX;
    else if (u_unsat < UMIN) u_sat = UMIN;
    else u_sat = u_unsat;

    Iterm += Kc * (Ts / Ti) * e + Kb * (u_sat - u_unsat);
}

// Control del relé de estado sólido
driveSSR(u_sat);
```

El controlador compara la temperatura medida (pv) con el valor de consigna (sp) para calcular el error. Posteriormente, la acción proporcional e integral determinan la señal de control (u_sat), la cual regula la potencia aplicada a la resistencia.

Se implementa además un mecanismo anti-windup para evitar saturación en el integrador, lo que mejora la estabilidad del sistema. El resultado es una regulación térmica precisa, con sobreimpulsos controlados y tiempo de establecimiento reducido, como se evidencia en las gráficas experimentales.

2.1.8.3 Registro y transmisión de datos en formato CSV

El sistema registra en tiempo real las variables críticas del proceso y permite su transmisión mediante la interfaz serial en formato CSV. El usuario puede seleccionar el modo de registro deseado mediante comandos específicos.

Figura 2.3

Registro y transmisión de datos

```
// Encabezado CSV según el modo seleccionado
if (!csv_header_sent || last_csv_mode_emitted != csv_mode) {
    if (csv_mode == 3) Serial.println("time_s,temp_C,weight_g");
    if (csv_mode == 4) Serial.println("time_s,temp_C,weight_g,weight_raw_g");
    if (csv_mode == 34) Serial.println("time_s,temp_C,weight_g,humidity_pct");
    if (csv_mode == 8) Serial.println(
        "time_s,temp_C,weight_g,weight_raw_g,humidity_pct,t_amb_C,dew_point_C,abs_humidity_gm3");
    csv_header_sent = true;
    last_csv_mode_emitted = csv_mode;
}

// Registro de datos en cada ciclo de control
Serial.print(millis() / 1000.0f, 3); Serial.print(",");
Serial.print(pv_f, 3); Serial.print(",");
Serial.print(weight_g, 3); Serial.print(",");
Serial.println(weight_raw_g, 3);
```

El código de la figura 2.3 implementa la generación dinámica de encabezados CSV y el registro continuo de datos. Las variables almacenadas incluyen:

- Tiempo en segundos (time_s),
- Temperatura interna (temp_C),
- Peso filtrado (weight_g),
- Peso crudo (weight_raw_g),
- Opcionalmente, humedad relativa, punto de rocío y densidad de vapor.

Esta funcionalidad facilita la integración directa con herramientas externas como python para el análisis posterior, permitiendo trazar curvas de temperatura vs. tiempo y peso vs. tiempo con alta resolución temporal.

2.1.9 Modelo matemático del proceso de secado

2.1.9.1 Fundamentos teóricos

El secado de biomateriales es un proceso de transferencia simultánea de calor y de masa. En el caso de la cámara de secado por difusión, la variable de control es la temperatura del aire (T), mantenida en torno a un valor de referencia (SV) mediante un controlador PID, mientras que las variables dependientes son la masa de la biomasa (m) y la humedad relativa (HR) en cada tubo.

Diversos estudios reportan que, bajo condiciones de temperatura y flujo de aire aproximadamente constantes, la pérdida de masa de la muestra puede modelarse mediante una cinética de primer, descrita en la ecuación 2.1.

$$\frac{dm(t)}{dt} = -k(m(t) - m_{eq}) \quad (2.1)$$

donde:

$m(t)$ = masa de la biomasa en el tiempo (g),

m_{eq} = masa de equilibrio (g),

k = constante de secado dependiente de la temperatura (min^{-1}).

Esta aproximación ha sido ampliamente utilizada en estudios de secado de biomasa y productos agrícolas por su simplicidad y validez empírica (Sadaka & Kalyankar, 2022; Bougayr et al., 2024).

2.1.9.2 Solución del modelo de primer orden

La solución de la ecuación diferencial 2.1, se describe mediante la ecuación 2.2.

$$m(t) = m_{eq} + (m_0 - m_{eq})e^{-kt} \quad (2.2)$$

Esta expresión describe una curva de decaimiento exponencial, donde la masa disminuye rápidamente al inicio y luego tiende asintóticamente a un valor de equilibrio, m_0 es la masa inicial.

En términos experimentales, el secado se considera concluido cuando la variación de masa en el tiempo se aproxima a cero, como lo indica la ecuación 2.3, criterio que corresponde al concepto de “peso constante”.

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \approx 0 \quad (2.3)$$

2.1.9.3 Estimación de parámetros

2.1.9.3.1 Determinación de m_{eq}

El valor de m_{eq} se aproxima mediante el promedio de las últimas mediciones de masa en cada ensayo.

2.1.9.3.2 Ajuste lineal para k

Reordenando la ecuación 2.2, tenemos la ecuación 2.4:

$$\ln(m(t) - m_{eq}) = \ln(m_0 - m_{eq}) - kt \quad (2.4)$$

Lo que permite estimar k ajustando una recta a los datos de $\frac{\ln(m(t)-m_{eq})}{\ln(m_0-m_{eq})}$ vs. tiempo. La pendiente de la recta es -k.

2.1.9.3.3 Validación del ajuste

El modelo ajustado se valida comparando la curva teórica con los datos experimentales y calculando el error cuadrático medio (RMSE), utilizando la ecuación 3.2.

2.1.9.4 Dependencia de la constante con la temperatura

Al repetir ensayos a distintos valores de referencia (SV), se obtienen diferentes constantes de secado (k_{40} , k_{50} , k_{60}). En la literatura, la relación entre k y la temperatura suele describirse mediante una expresión tipo Arrhenius, ecuación 5.5.

$$k(T) = k_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.5)$$

donde:

k_0 : factor pre-exponencial,

E_a : energía de activación aparente (J/mol),

R: constante universal de los gases (8.314 J/mol·K).

T: temperatura de secado en grado K

Al aplicar logaritmos a ambos lados de la ecuación 2.5, se obtiene una relación lineal entre $\ln k$ y $1/T$, cuya pendiente permite estimar E_a , descrita como ecuación 2.6.

$$\ln(k(T)) = \ln(k_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (2.6)$$

Este enfoque es común en estudios de secado industrial y agrícola (Bougayr et al., 2024; Sadaka & Kalyankar, 2022), así como en análisis de difusión en alimentos (Khater et al., 2025).

2.1.9.5 Conclusiones del modelo matemático

- El modelo exponencial de primer orden es adecuado como primera aproximación al proceso de secado en la cámara diseñada.
- La estimación de k a distintos valores de SV permite cuantificar la influencia de la temperatura en la velocidad de secado.
- El enfoque metrológico basado en peso en tiempo real constituye un aporte metodológico, pues permite definir un criterio objetivo de finalización del secado.
- Futuras mejoras pueden considerar modelos de difusión interna (bi-exponenciales) o simulaciones CFD para caracterizar heterogeneidades de flujo

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

En esta sección se redactará los resultados obtenidos del proyecto junto a la discusión de los resultados de la automatización del sistema.

3.1.1 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental seguido en la cámara de secado por difusión se diseñó con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema en condiciones controladas y obtener datos confiables para el análisis del comportamiento de biomateriales durante el secado. A continuación, se describen las etapas principales:

a) Preparación de las muestras

- Se seleccionan trozos de biomasa sólida (ejemplo: madera) de dimensiones similares, con el fin de mantener condiciones homogéneas entre los seis tubos de PVC.
- Cada muestra se coloca dentro de un tubo, previamente identificado y asociado a un sensor de humedad SHT31 y a una balanza individual para el registro del peso inicial.

b) Configuración del sistema

- Se energiza el motor de aspiradora para generar el flujo de aire forzado.
- Se enciende la resistencia helicoidal aletada, que actúa como fuente de calor en la precámara.
- El usuario define el valor de referencia de temperatura (setpoint, SV) a través del teclado matricial 4×4.
- El microcontrolador ESP32 inicia el lazo de control PID, comparando la temperatura medida por el sensor DS18B20 (PV) con el setpoint definido y modulando la potencia de la resistencia mediante el SSR-40DA.

c) Registro de datos

- Se establece un intervalo de muestreo (Δt), configurado en una lectura cada minuto.
- El sistema registra y asocia en una base de datos temporal las siguientes variables:
- Temperatura (PV, °C).
- Humedad relativa por cada tubo (HR, %).
- Peso por cada tubo (g).
- Los datos pueden ser visualizados en tiempo real en la pantalla LCD y transmitidos en formato digital hacia un computador para su almacenamiento y posterior análisis.

d) Criterio de finalización del proceso

- El proceso de secado se considera finalizado cuando la variación de peso en el tiempo ($\Delta m/\Delta t$) se aproxima a cero, indicando estabilización de la masa.
- Dado que las balanzas aún requieren calibración fina, este criterio se mantiene como pendiente de ajuste, pero conceptualmente representa el indicador más objetivo para definir el fin del secado.

e) Repetición del ensayo

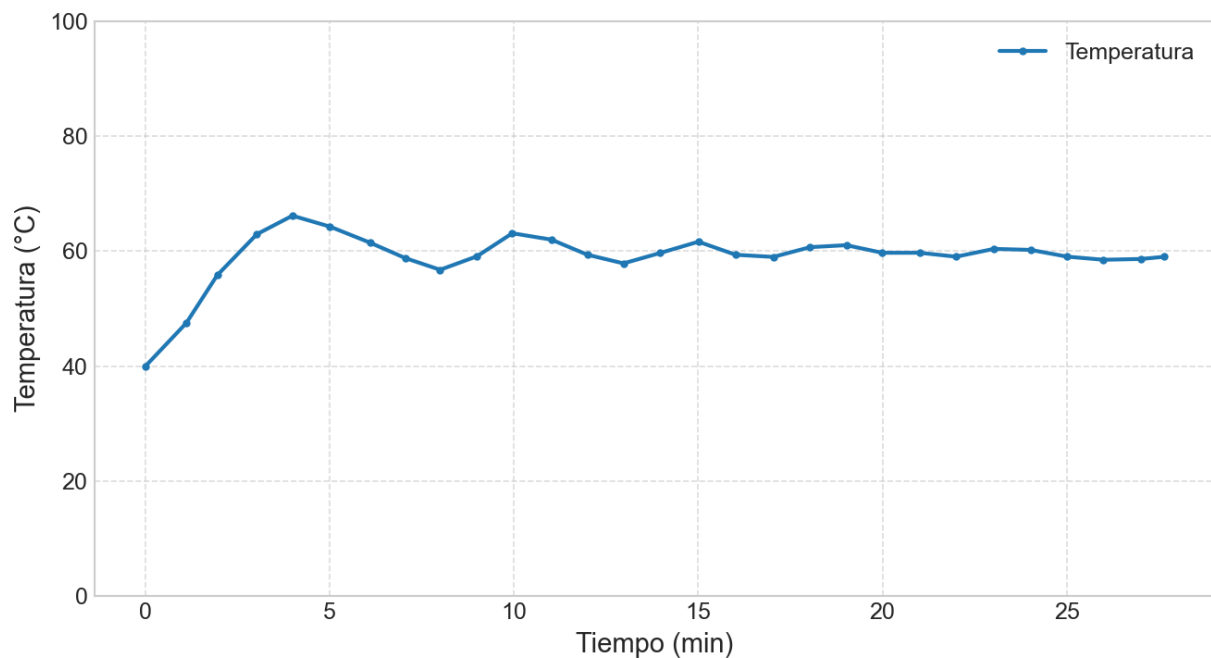
- Se realizan pruebas con diferentes valores de temperatura de referencia (ej. 40 °C, 50 °C, 60 °C), a fin de evaluar la sensibilidad del sistema y comparar la cinética de secado bajo distintas condiciones de operación.
- Para cada ensayo se registran todas las variables desde el inicio hasta la finalización, generando series de datos que posteriormente son analizadas en el capítulo de resultados.

3.1.2 Resultados experimentales

La Figura 3.1 muestra la evolución de la temperatura registrada en la cámara de secado durante todo el ensayo experimental. Los datos reflejan con claridad la respuesta dinámica del sistema bajo la acción del control PID implementado para mantener estable la temperatura deseada.

Figura 3.1

Evolución de la temperatura en función del tiempo



En la fase inicial (0–5 minutos), la temperatura presenta un aumento rápido y sostenido, partiendo desde aproximadamente 40 °C hasta alcanzar un máximo cercano a 66 °C. Este comportamiento refleja la alta eficiencia de la etapa de calentamiento, en la que el sistema suministra la máxima potencia disponible para aproximarse rápidamente a la consigna. La respuesta inicial es inmediata y sin retardos perceptibles, lo que evidencia que la sintonización del controlador PID es adecuada para lograr un tiempo de establecimiento reducido.

Posteriormente, entre los 5 y 10 minutos, se observa una ligera disminución de la temperatura seguida de una serie de oscilaciones moderadas, con variaciones de aproximadamente ± 5 °C respecto a la consigna establecida (~ 60 °C). Estas fluctuaciones son consecuencia directa de la acción del controlador PID, que alterna incrementos y reducciones de potencia para compensar los desvíos entre la temperatura medida y el valor objetivo. La presencia de estas oscilaciones indica que, aunque el sistema responde correctamente, podría beneficiarse de un ajuste fino del parámetro proporcional (K_p) para reducir la amplitud de los sobreimpulsos.

Finalmente, a partir de los 15 minutos, la temperatura ingresa en una fase de estabilización térmica, manteniéndose cercana a los 60 °C con oscilaciones mínimas. En esta etapa, los términos integral (K_i) y derivativo (K_d) del controlador actúan eficazmente para corregir el error acumulado y amortiguar cambios abruptos. El sistema alcanza un equilibrio térmico estable, evidenciando un control confiable y predecible capaz de mantener la temperatura deseada durante todo el proceso.

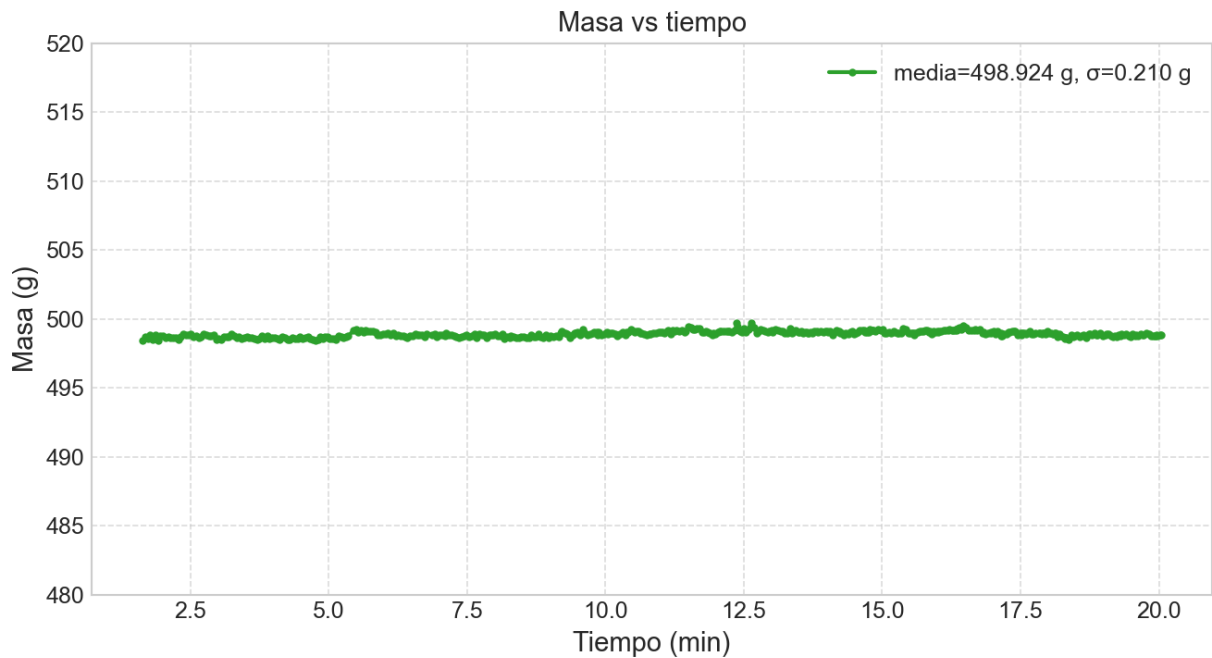
La Figura 3.2 muestra la evolución del peso registrado durante un intervalo de 20 minutos de monitoreo continuo. Se eligió representar únicamente esta ventana temporal porque, al no observarse variaciones significativas en el resto de la prueba, este segmento resulta representativo del comportamiento general y estable del sistema. A lo largo de este período, el peso promedio registrado fue de 498.924 g, con una desviación estándar de apenas 0.210 g, lo que evidencia una alta estabilidad en las mediciones. Estas fluctuaciones mínimas demuestran que, una vez alcanzada la fase de estabilización del sistema de adquisición, las lecturas obtenidas mediante las celdas de carga y el módulo HX711 son consistentes, precisas y confiables.

Las pequeñas variaciones presentes pueden explicarse por dos factores principales:

- Interacción indirecta con el control PID: las oscilaciones térmicas observadas en la Figura 3.1 (± 5 °C en los primeros tiempos) pueden generar ligeros cambios en la señal de peso, debido a la dinámica del sistema.
- Sensibilidad del módulo HX711 al ruido eléctrico: la conmutación del relé de estado sólido (SSR) y el funcionamiento del ventilador pueden introducir interferencias mínimas en la adquisición de datos.

Figura 3.2

Evolución del peso en función del tiempo



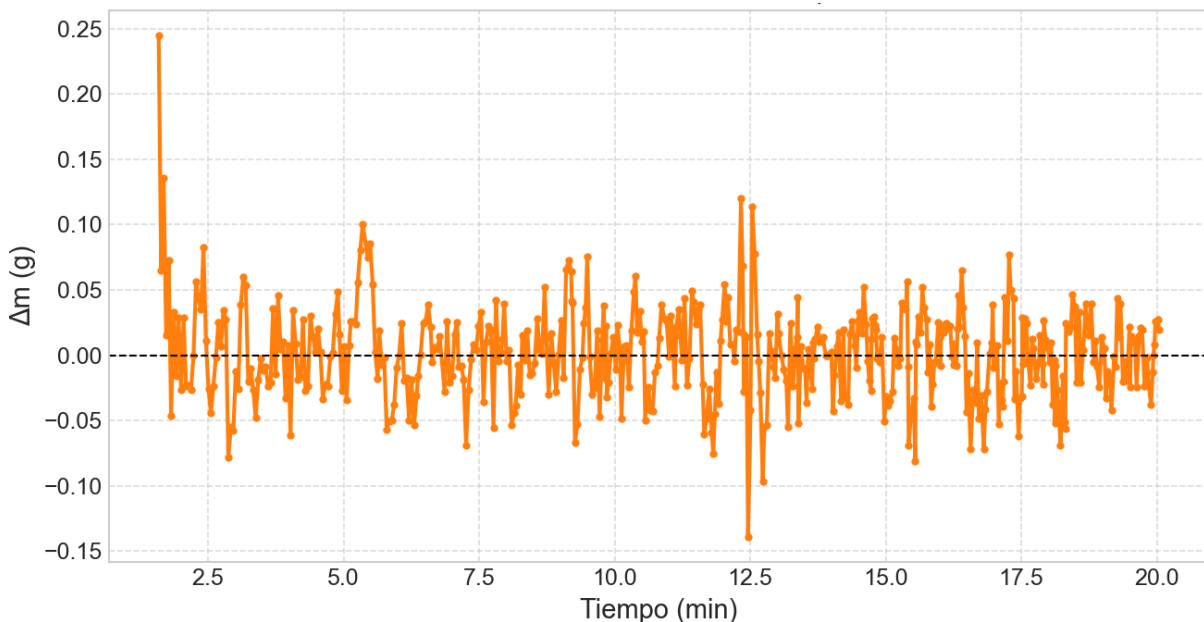
La baja dispersión en torno a la media confirma que el sistema de adquisición de masa posee un desempeño robusto y estable, incluso bajo la influencia de perturbaciones térmicas y eléctricas. Esto asegura que los registros obtenidos son altamente confiables y adecuados para el análisis experimental.

La Figura 3.3 representa la variación de la masa entre mediciones consecutivas (Δm) a lo largo del tiempo, calculada para evaluar la resolución dinámica del sistema de adquisición. Los resultados

muestran que la mayoría de los cambios se mantienen en un rango reducido de aproximadamente ± 0.1 g, lo que confirma que el sistema puede detectar variaciones muy pequeñas de forma consistente.

Figura 3.3

Variación de la masa Δm en función del tiempo.



Se identifican picos esporádicos fuera de este rango, probablemente asociados a ruido eléctrico residual generado por la conmutación del relé de estado sólido (SSR), así como a microoscilaciones mecánicas inducidas por el funcionamiento del ventilador y la circulación del flujo de aire. Esta alta resolución en la detección de variaciones de masa demuestra que el sistema es sensible, preciso y confiable, características fundamentales para la evaluación dinámica de procesos de secado en tiempo real.

3.1.3 Análisis de desempeño

a) Sensibilidad instrumental

El análisis de la señal de peso permitió identificar oscilaciones moderadas en las lecturas, especialmente durante la fase intermedia del proceso (entre los 5 y 10 minutos). Si bien las celdas de carga no están en contacto directo con el flujo de aire caliente, se determinó que las

variaciones de temperatura en la cámara (aproximadamente $\pm 5^\circ\text{C}$, ver Figura 3.1 de temperatura vs. tiempo) generan efectos indirectos sobre la estabilidad de la señal. Además, se evidenció que el módulo HX711 es sensible a interferencias eléctricas provenientes de la conmutación del relé de estado sólido (SSR) y del motor del ventilador, lo que provoca pequeñas fluctuaciones en la lectura.

A partir del análisis estadístico de las lecturas, se establecieron rangos de operación estables para el sistema de medición. Donde la temperatura se mantiene próxima a la consigna de 60°C y el control PID alcanza un régimen estacionario, además se registró que la variación de peso se reduce considerablemente, con oscilaciones inferiores a $\pm 0.2\text{ g}$ respecto a la media.

b) Cálculo de indicadores de error

- ◇ BIAS (sesgo): Indica si el sistema sobreestima (BIAS positivo) o subestima (BIAS negativo).

Donde $X_{teórico}$ corresponde al peso patrón (ej. 500 g), tal como se muestra en la ecuación 3.1.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{medido\ i} - X_{teórico}) \quad (3.1)$$

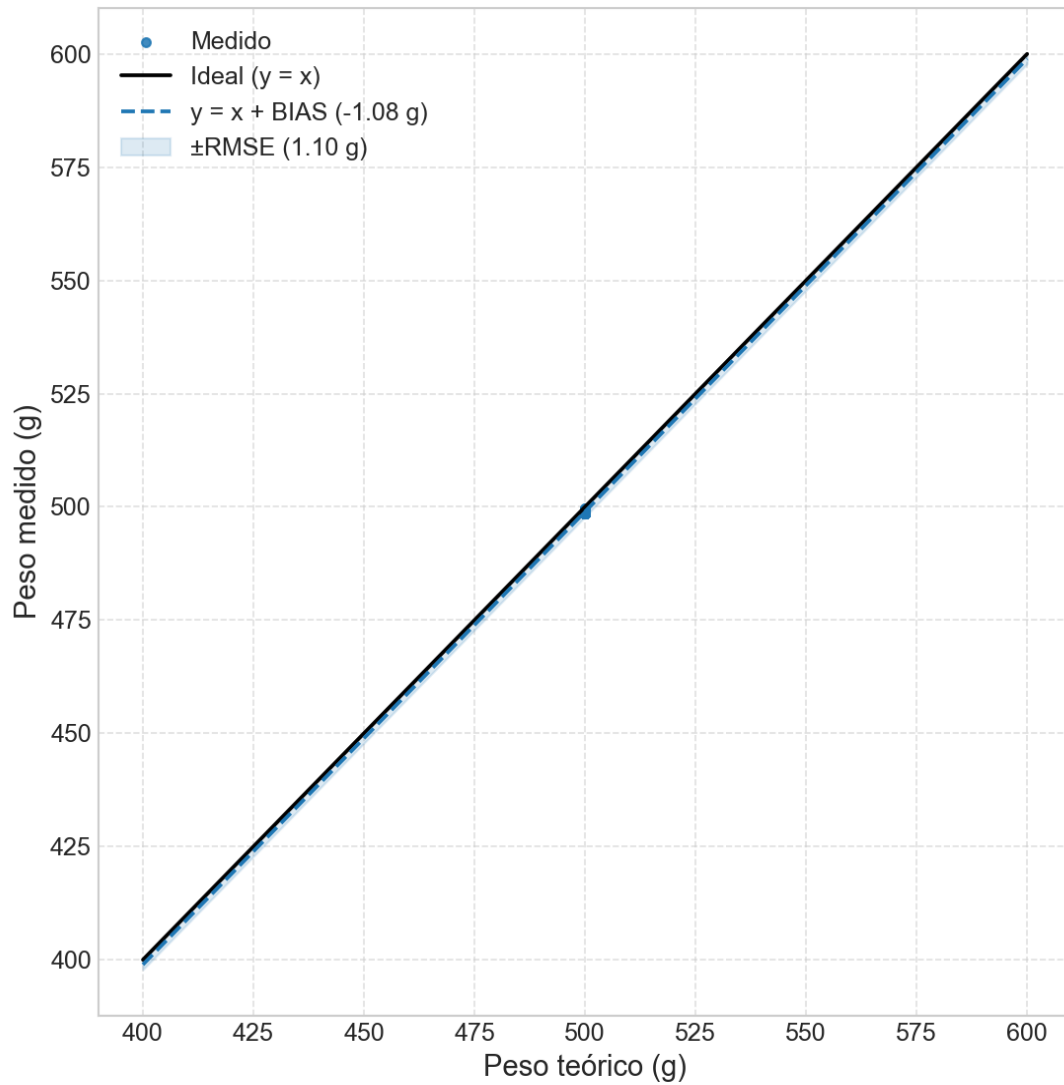
- ◇ RMSE (Root Mean Square Error): Evalúa la precisión global de las lecturas respecto al valor patrón, mediante la ecuación 3.2. Valores bajos de RMSE indican estabilidad y confiabilidad.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{medido\ i} - X_{teórico})^2} \quad (3.2)$$

La Figura 3.4 ilustra la relación entre el peso medido y el peso real, permitiendo evaluar la precisión y la exactitud del sistema de adquisición de datos basado en celdas de carga y el conversor HX711. La línea negra sólida representa la condición ideal ($y = x$), en la cual los valores medidos coincidirían exactamente con los valores reales, reflejando un sistema perfectamente calibrado y sin errores sistemáticos.

Figura 3.4

Gráfico de desempeño



Sin embargo, la línea azul discontinua ($y = x + \text{BIAS}$) evidencia la existencia de un sesgo sistemático. El valor calculado de $\text{BIAS} = -1.076 \text{ g}$ indica que el sistema subestima ligeramente el peso real, reportando en promedio aproximadamente 1.08 g por debajo del valor nominal. Por ejemplo, para un patrón teórico de 500 g, el sistema registra un promedio de 498.92 g, lo que confirma que el error absoluto es mínimo y fácilmente corregible mediante calibración.

La banda sombreada representa el intervalo definido por el $RMSE = 1.097\text{ g}$, el cual cuantifica la dispersión global de las mediciones respecto a los valores teóricos. Un RMSE tan bajo confirma que las lecturas del sistema son altamente estables y presentan muy poca variabilidad entre mediciones consecutivas.

La baja magnitud de estos indicadores revela que el sistema de adquisición proporciona datos precisos y consistentes, adecuados para experimentos que requieren monitoreo continuo.

Además, el comportamiento lineal observado entre las mediciones y la referencia demuestra que el sistema responde de manera proporcional y repetible a los cambios en el peso real.

c) Discusión de resultados

El análisis global del sistema demuestra que la cámara mantuvo condiciones homogéneas durante el proceso, con un control térmico estable y bien regulado mediante el PID. Las oscilaciones observadas en las lecturas de peso coinciden con las fases de ajuste dinámico del controlador, evidenciando que la variabilidad instrumental está parcialmente relacionada con las oscilaciones de temperatura.

Las celdas de carga demostraron ser herramientas eficaces para registrar variaciones de masa en tiempo real, aunque su desempeño puede verse influenciado por ruido eléctrico y perturbaciones transitorias en el sistema. Con base en el análisis del BIAS y el RMSE, se identificaron rangos de operación seguros para obtener lecturas confiables: una vez estabilizada la temperatura (aprox. $\geq 10\text{ min}$), el sistema alcanza un equilibrio térmico y electrónico que reduce significativamente la dispersión de datos.

Finalmente, los resultados indican que, aunque el sistema es adecuado para monitoreo experimental continuo, puede optimizarse mediante la recalibración multipunto del factor de conversión y la implementación de filtros digitales que reduzcan el impacto del ruido. Estas

mejoras permitirían obtener un desempeño metrológico más robusto, aumentando la precisión absoluta de las lecturas sin comprometer la estabilidad general del proceso.

3.1.4 Discusión comparativa con antecedentes

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos de secadores híbridos y solares que reportan reducción significativa del tiempo de secado y mejor control de calidad al incorporar sistemas de control automático

A diferencia de los métodos tradicionales (secado al sol), el sistema propuesto ofrece trazabilidad de variables y criterio objetivo de finalización.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y Recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

Del desarrollo e implementación de la cámara de secado por difusión con control automático de temperatura y registro en tiempo real de variables críticas, se concluye lo siguiente:

- i. El prototipo diseñado logró integrar exitosamente el control de temperatura mediante un algoritmo PID implementado en el ESP32 con la adquisición en tiempo real de datos de peso, temperatura y humedad relativa. Esta integración convierte al sistema en una plataforma experimental robusta, útil para la caracterización dinámica de biomateriales y para fines educativos e investigativos.
- ii. El controlador PID mantuvo la temperatura de la cámara cercana al setpoint definido por el usuario, compensando de forma efectiva las perturbaciones externas asociadas al flujo de aire forzado y a la carga térmica interna. El análisis de las curvas de temperatura registradas muestra que, tras un tiempo de establecimiento aproximado de 6 minutos, el sistema alcanzó una condición estable con oscilaciones controladas en un margen de aproximadamente $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ alrededor de la consigna. Estos resultados confirman la eficiencia y estabilidad del control implementado.
- iii. Las celdas de carga demostraron ser adecuadas para la medición continua de masa, alcanzando una media de 498,924 g y una desviación estándar de 0,210 g, evidenciando un sistema estable y repetible. Los indicadores estadísticos mostraron un BIAS = -1,076 g y un RMSE = 1,097 g, lo que indica que el sistema subestima ligeramente el peso real y mantiene una dispersión muy baja respecto al valor nominal de 500 g. Esto confirma una alta precisión y confiabilidad en la adquisición de datos.

4.1.2 Recomendaciones

- i. Completar la calibración multipunto de las celdas de carga para reducir el BIAS (-1,076 g) y optimizar aún más el RMSE (1,097 g). Esto permitirá definir con mayor precisión el criterio de “peso constante” y establecer umbrales objetivos para la finalización automática del proceso.
- ii. Reducir los efectos térmicos y eléctricos, aunque las celdas de carga no están en contacto directo con el flujo de aire caliente, las pruebas evidenciaron pequeñas oscilaciones en las lecturas debido a ruido eléctrico y a variaciones en la temperatura ambiental. Para mitigar estos efectos, se recomienda:
 - Implementar algoritmos de filtrado digital (media móvil, filtros exponenciales o Kalman) para suavizar la señal.
 - Evaluar el uso de celdas de carga con compensación térmica incorporada o módulos HX711 de alta precisión con mejor apantallamiento frente a interferencias.
- iii. Se recomienda incorporar almacenamiento local mediante tarjetas SD o la transmisión inalámbrica de datos (WiFi/Bluetooth), aprovechando las capacidades nativas del ESP32. Esto aumentaría la trazabilidad del proceso y permitiría el acceso remoto a los registros experimentales, optimizando la integración con herramientas de análisis externas como MATLAB, Python o Excel.
- iv. Reforzar las medidas de protección eléctrica mediante el uso de fusibles adicionales, aislamiento de componentes de potencia y la implementación de sensores redundantes de sobretemperatura. Estas mejoras son especialmente relevantes en escenarios donde el prototipo se escale a mayores capacidades de secado, incrementando las demandas energéticas y los riesgos asociados.
- v. Validación con biomateriales, se recomienda ampliar los ensayos experimentales a muestras de distinta naturaleza (como subproductos agroindustriales, biomasa lignocelulósica y productos

alimenticios) lo que permitirá validar la versatilidad del sistema y comparar las cinéticas de secado bajo diferentes condiciones físicas. Esto generaría información valiosa para optimizar parámetros operativos y validar la robustez del prototipo en aplicaciones reales.

- vi. Implementar técnicas de control avanzadas, si bien el control PID demostró ser eficiente y estable (oscilaciones térmicas de aproximadamente $\pm 1,5$ °C), futuros desarrollos podrían evaluar controladores predictivos basados en modelos (MPC) o controladores adaptativos. Estas estrategias mejorarían la respuesta dinámica del sistema, reduciendo aún más los sobreimpulsos y ajustando automáticamente los parámetros de control ante condiciones no lineales o cambios abruptos en la carga térmica.

Referencias

- Yu, P., Zhu, W., Shen, C., Qiao, Y., Zhang, W., Zhu, Y., Gong, J., & Cai, J. (2025). Current Status of Grain Drying Technology and Equipment Development: A Review. *Foods*, 14(14), 2426.
<https://doi.org/10.3390/foods14142426>
- Mak, J., Landry, H., Grieger, L., Agnew, J., Krigstin, S., Helmeste, C., Wetzel, S., Madrali, S., & Volpé, S. (2020). An Assessment of Ambient and Heated Forced Air Drying Pre-treatments for Enhancing the Quality of Various Forest Biomass Feedstocks. *Frontiers in Energy Research*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00007>
- Núñez Vega, A.-M., Sturm, B., & Hofacker, W. (2016). Simulation of the convective drying process with automatic control of surface temperature. *Journal of Food Engineering*, 170, 16–23.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.033>
- Mohammed, S., Edna, M., & Siraj, K. (2020). The effect of traditional and improved solar drying methods on the sensory quality and nutritional composition of fruits: A case of mangoes and pineapples. *Heliyon*, 6(6), e04163. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04163>
- Yang, T., Zheng, X., Xiao, H., Shan, C., Yao, X., Li, Y., & Zhang, J. (2023). Drying Temperature Precision Control System Based on Improved Neural Network PID Controller and Variable-Temperature Drying Experiment of Cantaloupe Slices. *Plants*, 12(12), 2257.
<https://doi.org/10.3390/plants12122257>
- Elwakeel, A. E., El-Mesery, H. S., Elbeltagi, A., Salem, A., Sabry, A., Saleh, D. I., Moustapha, M. E., Abu-Taha, H. L., & Elkot, W. F. (2025). Development, drying characteristics, and environmental

- analysis of a PV operated automatic solar dryer for drying date. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1531601>
- Wang, Y., Xu, P., Zhang, Z., Yang, J., Song, J., Li, X., & He, Q. (2024). Control Optimization for Heat Source Temperature of Vacuum Belt Drying System Based on Fuzzy Control and Integral Control. *Energies*, 17(15), 3824. <https://doi.org/10.3390/en17153824>
- Djuraev, K., & Uvayzov, S. (2023). Synthesis of a digital PID controller to control the temperature in the agricultural products drying chamber. *E3S Web of Conferences*, 390, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339003002>
- Liu, Z., Xu, Y., Han, F., Zhang, Y., Wang, G., Wu, Z., & Wu, W. (2022). Control Method for Continuous Grain Drying Based on Equivalent Accumulated Temperature Mechanism and Artificial Intelligence. *Foods*, 11(6), 834. <https://doi.org/10.3390/foods11060834>
- Ajiboye, A. T., Yusuf, A. O., & Odewole, M. M. (2020). Development of an Instrumentation System for a Laboratory Model Food Product Dryer. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 5(1). <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v5i1.474>
- Petković, M., Lukyanov, A., Đurović, I., & Miletić, N. (2025). A Novel Method for Analyzing the Kinetics of Convective/IR Bread Drying (CIRD) with Sensor Technology. *Applied Sciences*, 15(9), 4964. <https://doi.org/10.3390/app15094964>
- Bougayr, E. H., Moussaoui, H., Bahammou, Y., Lakhal, E. K., & Idlimam, R. (2024). Experimental study of solar drying kinetics and evaluation of activation energy of *Eriobotrya japonica* fruits. *Journal of Food Process Engineering*, 47(8). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14719>

- Sadaka, S., & Kalyankar, V. (2022). Determination of the Drying Kinetics Modeling and Activation Energy of Medium-Grain and Long-Grain Rough Rice under Isothermal Conditions. *Open Journal of Applied Sciences*, 12(05), 822–844. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.125056>
- Khater, ES.G., Bahnasawy, A.H., Oraith, A.A.T. et al. Comparative analysis of drying kinetics, diffusivity, and thermodynamic properties of hybrid solar and oven dryers for Egyptian sweet marjoram. *Sci Rep* 15, 30368 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14663-z>
- Cai, J., Zhu, L., Wei, Q., Huang, D., Luo, M., & Tang, X. (2023). Drying kinetics of a single biomass particle using Fick's second law of diffusion. *Processes*, 11(4), 984. <https://doi.org/10.3390/pr11040984>
- Hany Elmesiry, H. S., & El-Khawaga, S. E. (2022). Drying process on biomass: Evaluation of the drying performance and energy analysis of different dryers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, Article 101953. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101953>
- Havlík, J., Dlouhý, T., & Pitel', J. (2022). Drying biomass with a high water content - The influence of the final degree of drying on the sizing of indirect dryers. *Processes*, 10(4), 739. <https://doi.org/10.3390/pr10040739>
- Khan, M. I. H., Batuwatta-Gamage, C. P., Karim, M. A., & Gu, Y. (2022). Fundamental Understanding of Heat and Mass Transfer Processes for Physics-Informed Machine Learning-Based Drying Modelling. *Energies*, 15(24), 9347. <https://doi.org/10.3390/en15249347>
- Jokiniemi, H. T., & Ahokas, J. M. (2014). Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering*, 121, 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>

Weigler, F., Scaar, H., Franke, G., & Mellmann, J. (2017). Optimization of mixed flow dryers to increase energy efficiency. *Drying Technology*, 35(8), 985–993.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1230627>

Rashid, M. T., Liu, K., Jatoi, M. A., Safdar, B., Lv, D., & Li, Q. (2022). Energy efficient drying technologies for sweet potatoes: Operating and drying mechanism, quality-related attributes. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1040314>

Thomas, G., Lewis Buck, N., & Marangoni Beckwith, R. D. (1982). Gauge factor and measurement of strain. *En Mechanical Measurements*. Addison-Wesley Publishing Co.

U, S. (2025). Weight Measurement using Strain Gauge and Arduino. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 13(5), 324–328.

<https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.70169>

Ştefănescu, D. M. (2011). Strain gauges and Wheatstone bridges — Basic instrumentation and new applications for electrical measurement of non-electrical quantities. In 2011 8th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/SSD.2011.5767428>

İRSEL, G. (2021). Research on electrical strain gages and experimental stress analysis: Case study for a full wheatstone bridge. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 783–792.

<https://doi.org/10.24012/dumf.1051434>

Vishay Micro-Measurements. (2010). Noise control in strain gage measurements (Tech Note TN-501-2). Vishay.

Elyounsi, A., & Kalashnikov, A. N. (2021). Evaluating Suitability of a DS18B20 Temperature Sensor for Use in an Accurate Air Temperature Distribution Measurement Network. In The 8th International Electronic Conference on Sensors and Applications (p. 56). International Electronic Conference on Sensors and Applications. MDPI. <https://doi.org/10.3390/ecsa-8-11277>

Permana, A. N., Wibawa, I. M. S., & Putra, I. K. (2021). DS18B20 sensor calibration compared with fluke hart scientific standard sensor. International Journal of Physics & Mathematics, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.31295/ijpm.v4n1.1225>

Moni, M. N. Z., Sulaiman, S. A., Raja, Y. S., Karunamurthy, K., Inayat, M., & Bou-Rabee, M. A. (2016). Investigation of the relationship between moisture content and density of selected Malaysian biomass. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 10(2), 2111–2125. <https://doi.org/10.15282/jmes.10.2.2016.15.0199>

Fredriksson, M. (2019). On wood–water interactions in the over-hygroscopic moisture range: Mechanisms, methods and influence of wood modification. Forests, 10(9), 779. <https://doi.org/10.3390/f10090779>

Astrom, K.J.; Hagglund, T. Control PID Avanzado, 1st ed.; PEARSON EDUCACIÓN, S.A.: Madrid, Spain, 2009; ISBN 978-84-8322-511-0

Márquez-Vera, M. A., Martínez-Quezada, M., Calderón-Suárez, R., Rodríguez, A., & Ortega-Mendoza, R. M. (2023). Microcontrollers programming for control and automation in undergraduate biotechnology engineering education. Digital Chemical Engineering, 9, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100122>

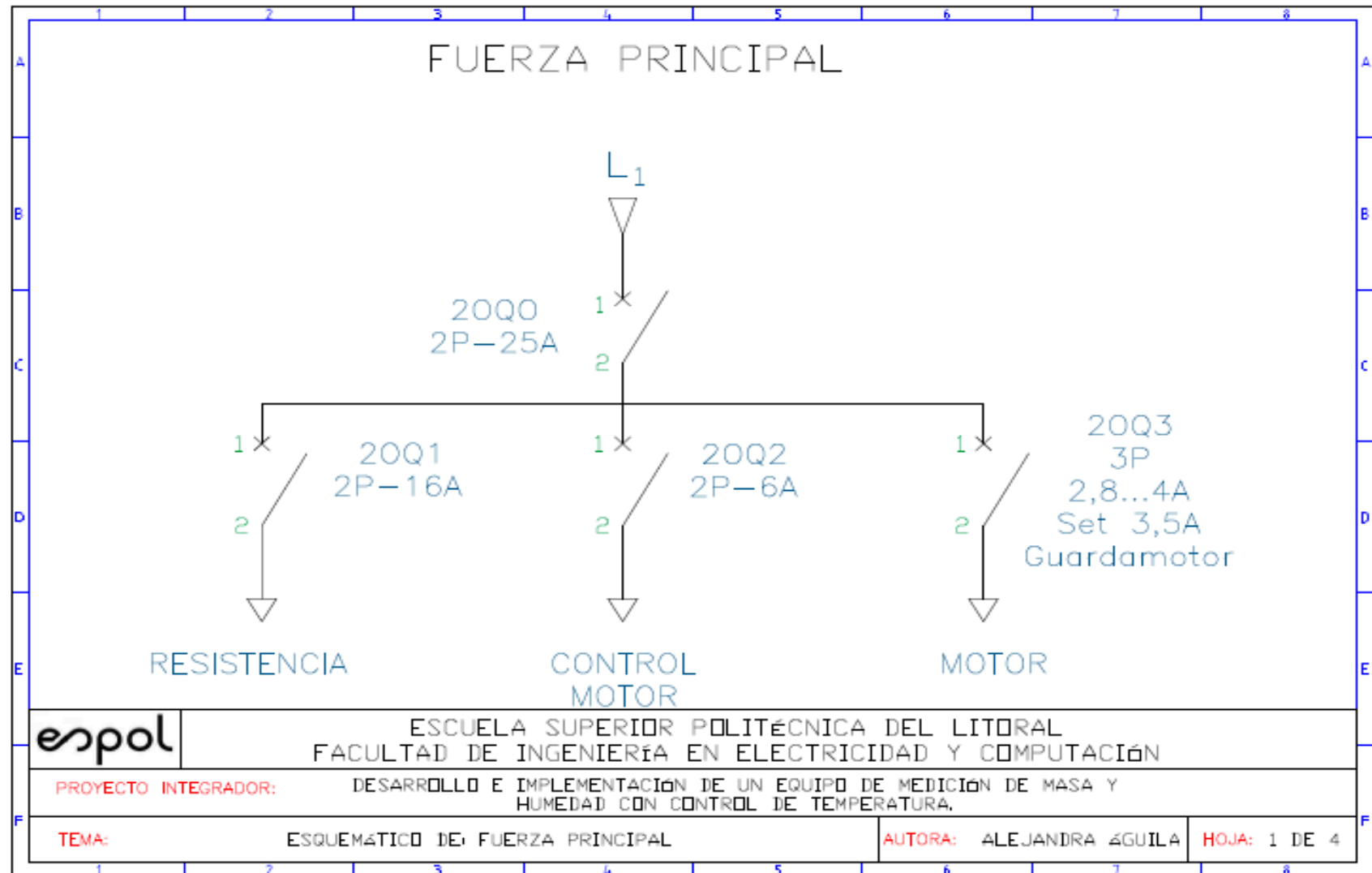
Matamoros, M., Gómez-Blanco, J. C., Sánchez, Á. J., Mancha, E., Marcos, A. C., Carrasco-Amador, J. P., & Pagador, J. B. (2020). Temperature and Humidity PID Controller for a Bioprinter Atmospheric Enclosure System. *Micromachines*, 11(11), 999. <https://doi.org/10.3390/mi11110999>

Velázquez, B., Peralta, J., Delgado, E., & Reinoso, J. (2025). Mass transfer measuring device (Patente ES2969662B2). Oficina Española de Patentes y Marcas. <https://patents.google.com/patent/ES2969662B2>

APÉNDICE A

Plano 1

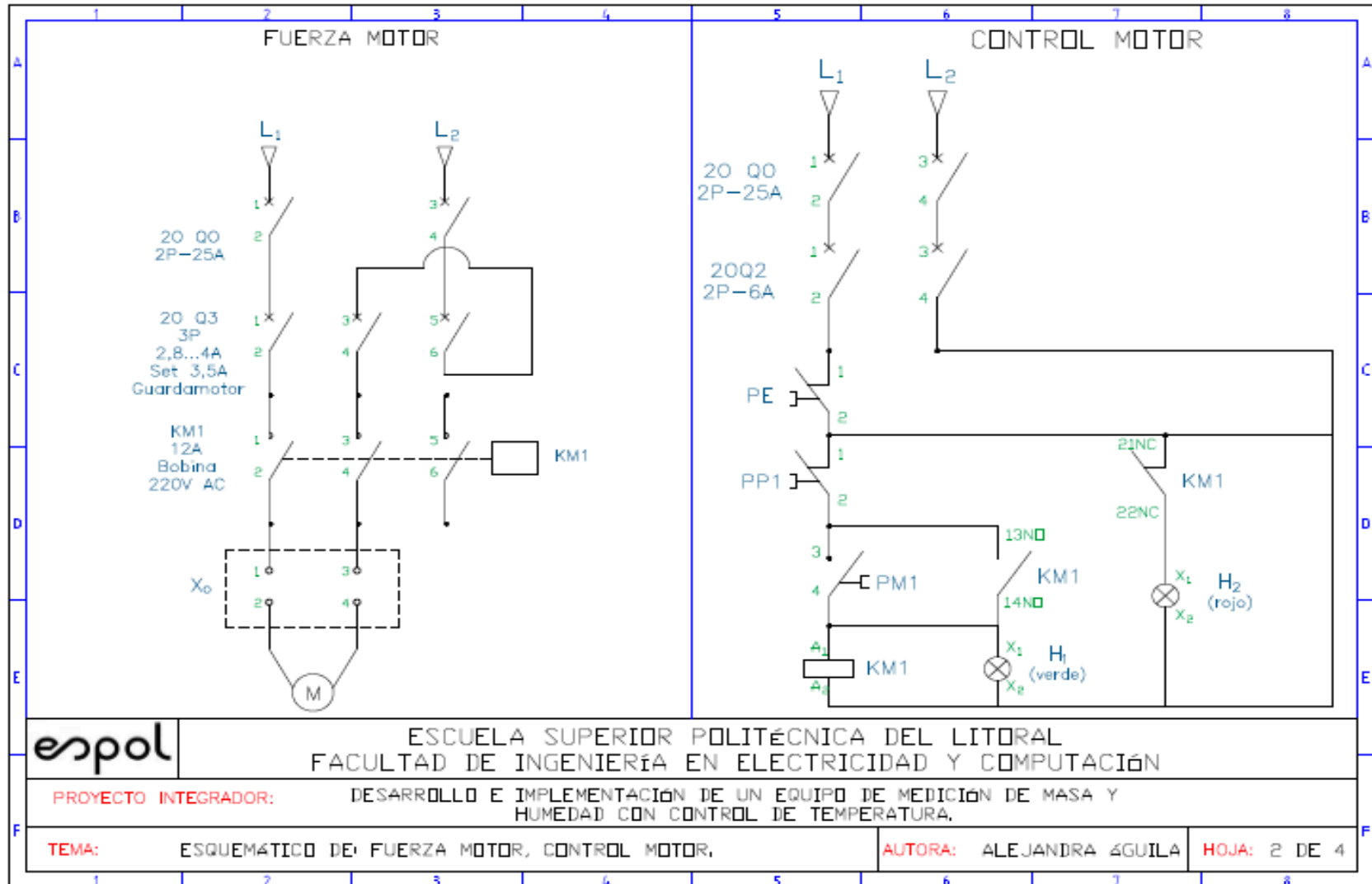
Esquemático de fuerza principal



APÉNDICE B

Plano 2

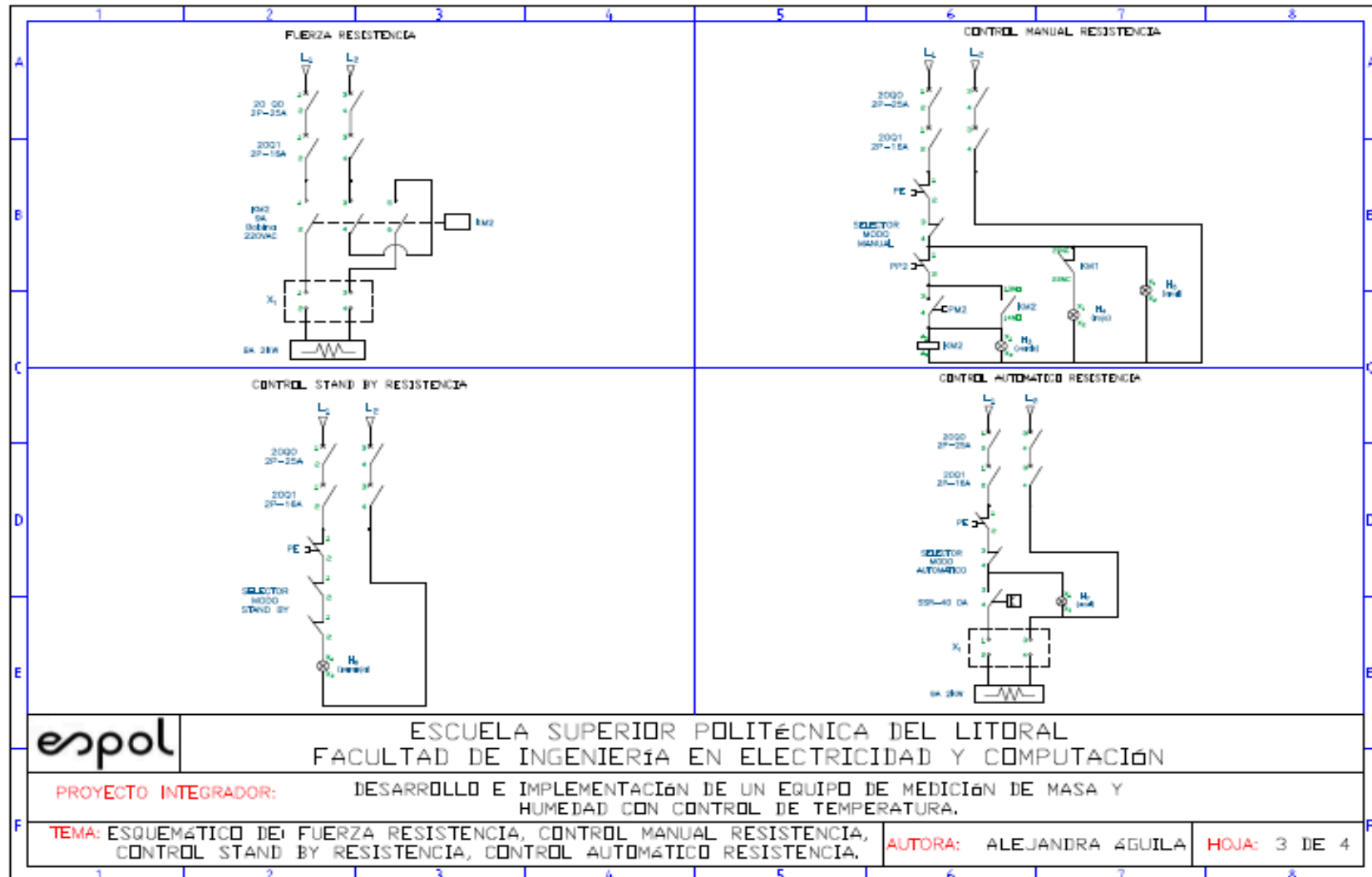
Esquemático de fuerza y control del motor



APÉNDICE C

Plano 3

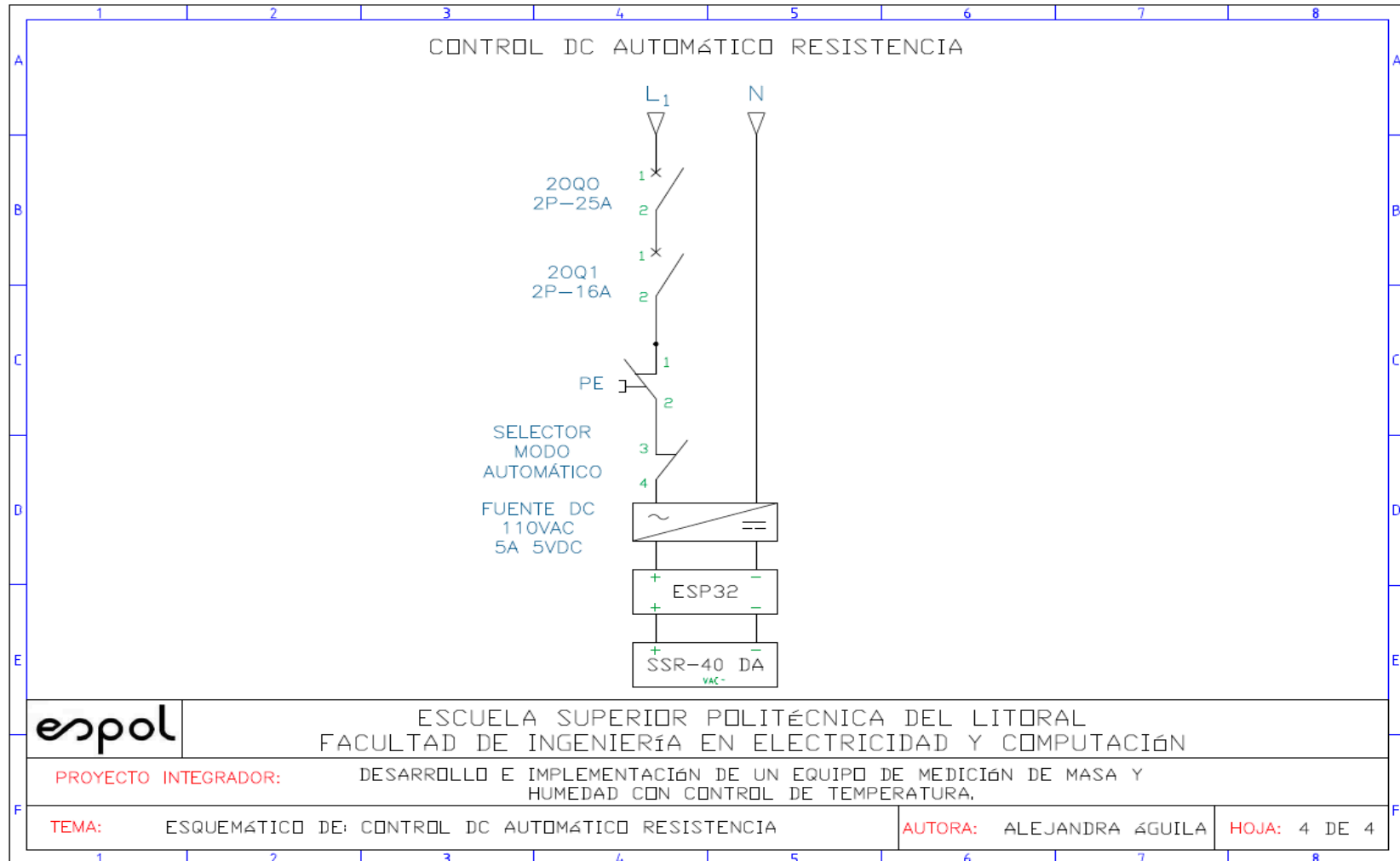
Esquemático de fuerza y control de la resistencia helicoidal



APÉNDICE D

Plano 4

Esquemático de control DC para el modo automático de la resistencia



APÉNDICE E

Manual de Operación

1. Introducción

Este manual describe los procedimientos de operación, seguridad y mantenimiento para la Cámara de Secado por Difusión. El equipo fue desarrollado en el marco de un proyecto de tesis y responde a la necesidad de disponer de un sistema confiable, automatizado y capaz de registrar en tiempo real las variables críticas del proceso de secado de biomateriales.

2. Descripción del Sistema

La cámara de secado está compuesta por los siguientes elementos principales:

- Cámara principal fabricada en PVC/acero inoxidable.
- Precámara de calentamiento con resistencias de aletas de 2 kW.
- Motor extractor de aire (caudal: 0.791 m³/s, tensión 220 V).
- Sensores:
 - DS18B20 para temperatura (precisión ± 0.5 °C).
 - SHT31 para humedad relativa y T° ambiente.
 - Galgas extensiométricas con HX711 para pesaje individual (precisión ± 0.2 g).
- Controlador ESP32 con algoritmo PID.
- Relé de estado sólido (SSR) para el control de potencia.
- Interfaz de usuario: LCD/PC con salida CSV.

3. Requisitos de Seguridad

- Utilizar guantes y gafas de seguridad.
- Conectar únicamente a red eléctrica protegida con breaker.
- No introducir biomateriales inflamables o solventes.
- No superar cargas de 500 g por tubo.
- No abrir la cámara durante el funcionamiento.
- Revisar tierra física y cableado antes de iniciar.

4. Procedimiento de Operación

4.1 Preparación

1. Verificar limpieza interna y externa del sistema.
2. Revisar conexiones eléctricas y funcionamiento de sensores.
3. Colocar biomaterial en tubos de secado.
4. Calibrar balanzas con masa patrón de 500 g.

5. Encender el panel eléctrico general.

4.2 Puesta en Marcha

1. Configurar setpoint de temperatura en el controlador PID.
2. Activar motor de flujo de aire.
3. Encender resistencias a través del SSR.
4. Confirmar lectura de sensores en interfaz.
5. Registrar condiciones iniciales: T°, HR, peso.

4.3 Monitoreo

- El sistema registra datos en CSV en tiempo real.
- Mantener la temperatura dentro de ± 2 °C del setpoint.
- Observar la disminución progresiva de humedad.
- Verificar reducción de peso de biomaterial.
- Confirmar estabilización cuando variación de peso < 1 % en 10 min.

4.4 Finalización

- Apagar resistencias.
- Mantener motor 3–5 minutos para enfriamiento.
- Apagar sistema general.
- Retirar biomaterial seco.
- Registrar condiciones finales en bitácora.

5. Mantenimiento Preventivo

Actividad	Frecuencia	Responsable
Limpieza interna y externa	Después de cada uso	Operador
Calibración de balanzas con masas patrón	Mensual	Supervisor
Revisión de cableado y conexiones	Cada 50 h de uso	Técnico
Inspección de resistencias	Cada 3 meses	Mantenimiento
Verificación de filtros del motor	Semestral	Mantenimiento

6. Resolución de Problemas

- No calienta → Revisar SSR, resistencia, breaker.
- PID no estabiliza → Revisar parámetros Kp, Ki, Kd.
- Lecturas inestables de peso → Recalibrar HX711 o revisar montaje de galgas.
- Sensores no reportan → Revisar cableado OneWire/I2C.
- Sobre calentamiento → Verificar ventilación y setpoint.

7. Registro de Operaciones

fecha	Operador	Biomaterial	Setpoint (°C)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Tiempo total (h)	Observaciones	Firma