



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA

**SISTEMA DE CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-
DERIVATIVO EN UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

Presenta:

DAVID LOPEZ RUIZ

Bajo la dirección de:

IRINEO L. LÓPEZ CRUZ, Ph.D.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025

**SISTEMA DE CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO EN UN
SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO**

Tesis realizada por **C. DAVID LOPEZ RUIZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____

Ph.D. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

ASESOR: _____

Ph.D. JOSÉ OLAF VALENCIA ISLAS

ASESOR: _____

DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

CONTENIDO

CONTENIDO	iii
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
ABREVIATURAS USADAS	xi
DEDICATORIAS	xii
AGRADECIMIENTOS	xiii
DATOS BIBLIOGRÁFICOS	xiv
RESUMEN GENERAL	xv
GENERAL <i>ABSTRACT</i>	xvi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo General	18
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Estructura de la tesis	19
2. REVISIÓN DE LITERATURA	21
2.1 Secado solar	21
2.2 Desperdicio y preservación de alimentos	22
2.3 Los secadores solares	24
2.3.1 Clasificación de los secadores solares	25

2.3.2	Secadores solares tipo Invernadero	28
2.4	Monitoreo de las variables en un secador solar tipo invernadero	30
2.5	Secado solar de Jitomate	32
2.6	Control del ambiente en un secador solar	35
2.6.1	Estrategias de control en secadores solares	35
2.7	Características del control PID	40
2.7.1	Sistema de control PID en tiempo continuo	41
2.7.2	Sistema de control PID en tiempo discreto	42
2.7.3	Métodos de Implementación	44
2.7.4	Técnicas de sintonización de Parámetros	46
2.8	Literatura citada	48
3.	DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA BALANZA PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL DEL PESO DE MUESTRAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	56
3.1	Resumen	56
3.2	Abstract	57
3.3	Introducción	58
3.4	Materiales y Métodos	61
3.4.1	Celda de Carga	61
3.4.2	Balanza digital para medición en tiempo real	61
3.4.3	Calibración	62
3.4.4	Experimentos de secado	63
3.4.5	Contenido de humedad y razón de humedad	63

3.4.6	Análisis estadístico: pruebas de media	64
3.5	Resultados y discusión	65
3.5.1	Diseño de la balanza digital.....	65
3.5.2	Calibración de la balanza digital (con respecto a la temperatura) 67	
3.5.3	Evaluación de la balanza digital	67
3.5.4	Análisis estadístico	71
3.6	Conclusiones	72
3.7	Agradecimientos	73
3.8	Literatura citada	74
4.	CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO.....	76
4.1	Resumen	76
4.2	Abstract	77
4.3	Introducción	78
4.4	Materiales y Métodos.....	80
4.4.1	Descripción del SSSTI.....	80
4.4.2	Experimentos de secado y recolección de datos.....	82
4.4.3	Obtención de la función de transferencia	84
4.4.4	Diseño del controlador y su implementación	86
4.5	Resultados y discusión	88
4.5.1	Funciones de transferencia y diseño de los controladores en MATLAB 88	
4.5.2	Estrategias de Control	92

4.5.3	Comparación de las estrategias de control	97
4.6	Conclusiones	98
4.7	Agradecimientos	99
4.8	Literatura citada	100
5.	CONCLUSIONES GENERALES	102

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3-1. Materiales usados en la construcción de la balanza digital.	62
Cuadro 3-2. Medias, varianzas y número de observaciones en experimentos de peso medido y balanza construida a distintas temperaturas.	71
Cuadro 3-3. Comparación de medias entre la balanza comercial y la construida mediante prueba t pareada.	72
Cuadro 4-1. Sensores dentro y fuera del SSSTI.	83
Cuadro 4-2. Desempeño de los modelos y parámetros obtenidos del controlador PID.	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Clasificación general de los secadores solares (Fuente: Elaboración propia con base a información tomada de Janjai & Bala, (2012)).....	27
Figura 2-2. Diagrama de sistema de control PID convencional en lazo cerrado (Fuente: Elaboración propia).....	41
Figura 3-1. Dimensiones y características de la celda de carga Flintec (modelo: PA1). Extraído de hoja de datos del fabricante	61
Figura 3-2. Diagrama de Conexión de los módulos con Arduino uno.	66
Figura 3-3. Proceso de construcción de la carcasa. (a) diseño CAD del modelo, (b) impresión 3D con filamento ABS.	66
Figura 3-4. Puntos de la calibración por temperatura obtenidos de la balanza.	67
Figura 3-5. Temperaturas de la celda de carga de la balanza construida en los experimentos de secado a 4 diferentes temperaturas.	68
Figura 3-6. Pesos registrados en la balanza construida y tomados manualmente en los 4 experimentos.....	69
Figura 3-7. Contenido de Humedad del jitomate.....	70
Figura 3-8. Razón de Humedad del jitomate.	70
Figura 4-1. Diagrama del SSSTI	81
Figura 4-2. Caracterización de los extractores presentes en el SSSTI.....	82
Figura 4-3. Jitomate durante los experimentos de secado	84
Figura 4-4. Proceso de obtención de la función de transferencia de primer orden con retardo.....	86
Figura 4-5. Obtención de parámetros del controlador PID usando PID Tuner en MATLAB (versión 2024).	87
Figura 4-6. Diagrama de un sistema de control automático en lazo cerrado para la temperatura del aire (o temperatura del producto) de un SSSTI con un controlador PID	88

Figura 4-7. Comportamiento de la temperatura del aire, temperatura del producto, humedad relativa y radiación solar dentro del SSSTI durante los experimentos de secado de jitomate	89
Figura 4-8. Comportamiento de la temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar fuera del SSSTI durante los experimentos de deshidratado de jitomate	89
Figura 4-9. Curvas de secado del producto durante los experimentos de deshidratado de jitomate	90
Figura 4-10. Simulación de la función de transferencia y controlador PID diseñado para la temperatura del aire	91
Figura 4-11. Simulación de la función de transferencia y controlador PID diseñado para la temperatura del producto	91
Figura 4-12. Comportamiento de la temperatura del aire, temperatura del producto, radiación solar y señal de controlador PID dentro del SSSTI durante la estrategia de control de la temperatura del aire	93
Figura 4-13. Comportamiento de la temperatura de aire, temperatura del producto, radiación solar y señal de controlador PID en el SSSTI durante la estrategia de control basada en la temperatura del producto	94
Figura 4-14 Comportamiento de la temperatura del aire, temperatura del producto y radiación solar en el SSSTI durante la estrategia de control ON/OFF de la temperatura del aire	95
Figura 4-15. Comportamiento de la temperatura del piso, temperatura de la cubierta, Humedad relativa y radiación solar en el SSSTI durante tres días en que se implementaron las estrategias de control	96
Figura 4-16. Comportamiento de la temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar fuera del SSSTI durante la implementación de las estrategias de control.	96

Figura 4-17. Curvas de secado durante la implementación de las estrategias de control	97
Figura 4-18. Evaluación de estrategias de control: tiempo de encendido de los extractores, consumo energético, costos y flujo de aire	98

ABREVIATURAS USADAS

SSSTI:	Sistema secador solar tipo invernadero
GTSDS:	Greenhouse-type solar drying system
PID:	Proportional-Integral-Derivative
PSO:	Particle Swarm Optimization
FAO:	Organization of the United Nations for Food and Agriculture
UV:	Ultravioleta
CPH:	Cocoa Pod Husk
SEC:	Specific Energy Consumption
RGB:	Red-Green-Blue
CFD:	Computational Fluid Dynamics
ANN:	Artificial Neural Network
LCA:	Life Cycle Assessment
INN:	Intelligent Neural Network
MPC:	Model Predictive Control
N4SID:	Numerical Subspace State Space System Identification
DRL:	Deep Reinforcement Learning
IoT:	Internet of Things
DSPs:	Digital Signal Processors
PLC:	Programmable Logic Controller
FPGA:	Field Programmable Gate Array
GA:	Genetic Algorithm
GWO:	Grey Wolf Optimizer
NM:	Método de Nelder–Mead
DC:	Direct current
ABS:	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
CD:	Convective Drying
MD:	Microwave drying
MR:	Moisture ratio
LCD:	Liquid-crystal display
Hp:	Horse Power
FOPDT:	First Order Plus Dead Time
Kg:	Kilogramo
kWh:	Kilowatt-hora
SEC	Specific Energy Consumption

DEDICATORIAS

A mis padres, Samuel y Leonor

A mis abuelos, Casiano y Guadalupe

A mis hermanos, Armando, Rigoberto y Vanessa

A Montserrat por todo su apoyo y cariño

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por brindarme la oportunidad de continuar con mi desarrollo académico y profesional.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por otorgarme la beca que me permitió culminar mis estudios de maestría.

A mi director, Dr. Irineo Lopez Cruz por sus consejos y apoyo para el desarrollo de este trabajo. Al Dr. José Olaf Valencia Islas, por su constante guía y paciencia durante la investigación. Al Dr. Agustín Ruiz García, por el asesoramiento brindado. A mis profesores de la maestría por el conocimiento brindado.

A mis amigos Toño y Luis por su apoyo durante la restauración del secador y durante toda la maestría.

A mis amigos y también compañeros de grupo y de todo el posgrado.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre:	David Lopez Ruiz
Fecha de nacimiento	08 de Julio de 1999
Lugar de nacimiento	Santo Domingo Narro, Oaxaca
Correo electrónico	davidlpzr23@gmail.com
CURP	LORD990708HOCZV09
Profesión	Ingeniero Mecánico Agrícola
Cédula profesional	13723686

Desarrollo académico

Preparatoria	Preparatoria Agrícola Chapingo
Licenciatura	Ingeniero Mecánico Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

SISTEMA DE CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO EN UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

El sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) representa una alternativa sustentable para la deshidratación óptima de productos agrícolas, debido a que aprovecha la energía solar, permite controlar tanto la temperatura del aire como del producto y protege el material de la intemperie y agentes contaminantes. Sin embargo, sin un sistema de control apropiado, el aire dentro del SSSTI puede alcanzar temperaturas superiores a 60 °C, lo que puede representar un riesgo de salud para la supervisión directa del operador y afectar negativamente la calidad final del producto. Por lo anterior, la presente investigación integra el diseño y evaluación de dos desarrollos tecnológicos orientados a mejorar la eficiencia y seguridad del secado solar: un dispositivo de medición continua de peso del producto y un sistema de control automático Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Para la medición en tiempo real del peso del producto durante el proceso de secado, se construyó una balanza electrónica utilizando una celda de carga PA1 y un amplificador HX711. La calibración de la balanza permitió obtener una ecuación lineal que corrigió la variación del sensor por efecto térmico. En los experimentos realizados de deshidratado de jitomate con temperaturas que varían entre 40 °C y 70 °C, la balanza construida mostró alta precisión y una correlación casi perfecta ($R = 0.99$) con respecto a una balanza comercial, aunque se detectó diferencia significativa a 60 °C. Además, se diseñaron y evaluaron tres estrategias de control: controlador PID de la temperatura del aire, controlador PID basado la temperatura del producto del producto y un controlador ON/OFF de la temperatura del aire. Para el diseño de los controladores se obtuvieron funciones de transferencia de primer orden con retardo mediante un procedimiento de identificación de sistemas que usó un algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO). Los resultados experimentales mostraron que el control PID del producto permite reducir el tiempo de secado, el consumo energético y la oscilación térmica, manteniendo la temperatura del producto por debajo de 55 °C.

Palabras clave: secado solar, controlador PID, jitomate, contenido de humedad, identificación de sistemas, temperatura

GENERAL ABSTRACT

PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROL SYSTEM FOR A GREENHOUSE-TYPE SOLAR DRYER

The greenhouse-type solar drying system (GTSDS) represents a sustainable alternative for the optimal dehydration of agricultural products, as it takes advantage of solar energy, allows the air or product temperature and protects the material from external weather conditions and pollutants. However, without an appropriate control system, air temperature inside the GTSDS may reach values above 60 °C, which may pose a health risk for direct human supervision and may affect negatively the final quality of the product. Therefore, the present research integrates the design and evaluation of two technological developments aimed at improving the efficiency and safety of solar drying: a device for continuously measuring the weight of the product and a Proportional-Integral-Derivative (PID) automatic control system. For real-time measurement of product weight during the drying process, an electronic scale was built using a PA1 load cell and an HX711 amplifier. The calibration of the balance allowed us to obtain a linear equation that corrected the sensor variation due to thermal effects. In the experiments carried out on tomato dehydration with temperatures between 40 °C and 70 °C, the constructed balance showed high precision and an almost perfect correlation ($R = 0.99$) with respect to a commercial balance, although a significant difference was detected at 60 °C. In addition, three control strategies were designed and evaluated: PID air controller for air temperature, PID controller based on product temperature, and an ON/OFF controller for air temperature. For the design of the controllers, first-order plus dead time transfer functions were obtained through a system identification procedure that used a particle swarm optimization (PSO) algorithm. Experimental results showed that PID control of the product allows for a reduction in drying time, energy consumption, and thermal oscillation, while maintaining the product temperature below 55 °C.

Keywords: solar dryer, PID control, tomato, moisture content, system identification, temperature

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

La seguridad alimentaria se ha convertido en uno de los retos urgentes de nuestro tiempo. El crecimiento acelerado de la población mundial, que podría superar los 9 mil millones hacia 2050, plantea la necesidad de incrementar la producción de alimentos en proporciones nunca vistas. Sin embargo, una mayor producción no es condición suficiente para que el hambre desaparezca. La distribución desigual de excedentes, el consumo excesivo en ciertos países y el desperdicio de millones de toneladas de alimentos cada año muestran que el problema es, tanto de eficiencia, como de racionalidad y justicia a su acceso (Daszkiewicz, 2022).

A esta presión demográfica se suman los impactos ambientales y sociales de los sistemas agrícolas actuales. La expansión de tierras de cultivo y el uso intensivo de recursos han contribuido a la pérdida de biodiversidad y al cambio climático. Al mismo tiempo, la ganadería ocupa gran parte de las tierras agrícolas, pero aporta una fracción limitada de las calorías globales, lo que evidencia un dilema de sostenibilidad. Frente a este panorama, se ha planteado la necesidad de innovaciones científicas que fortalezcan la resiliencia de los sistemas productivos y de transiciones hacia dietas más sostenibles, capaces de mejorar la salud humana sin sobrepasar los límites planetarios (Nature Communications, 2024).

El problema, sin embargo, no se reduce a la producción o al consumo. Las políticas públicas juegan un papel decisivo en la manera en que los alimentos se producen, distribuyen y consumen. En regiones como África Subsahariana y Asia del Sur, la inseguridad alimentaria persiste no solo por factores externos como conflictos o crisis económicas, sino también por la brecha entre el diseño de políticas y su implementación efectiva (Mumah, Hong, & Chen, 2025). Mientras que en países de altos ingresos las estrategias suelen traducirse en resultados

tangibles, en los de bajos ingresos los marcos normativos existen, pero rara vez logran ejecutarse con eficacia (Mumah, Hong, & Chen, 2025)

En este contexto, la seguridad alimentaria debe entenderse como un fenómeno multidimensional que involucra disponibilidad, acceso, utilización y estabilidad. No basta con producir más alimentos: es necesario garantizar que lleguen a quienes los necesitan, que sean nutritivos y seguros, y que los sistemas que los sostienen sean resilientes frente a crisis ambientales, económicas y sociales. Solo mediante un enfoque integral que combine producción sostenible, innovación científica, políticas efectivas y justicia social será posible avanzar hacia un mundo sin hambre (Daszkiewicz, 2022; Nature Communications, 2024; Mumah, Hong & Chen, 2025; Otekunrin, 2024).

En este escenario, la mejora de las tecnologías de conservación postcosecha para los productos agrícolas se vuelve fundamental para reducir pérdidas y asegurar el aprovechamiento eficiente de los alimentos producidos. El secado o deshidratado solar, particularmente en sistemas tipo invernadero, surge como una alternativa sostenible para prolongar la vida útil de productos agrícolas como el jitomate. A pesar de ello, su eficiencia depende del control adecuado de las condiciones térmicas durante el proceso. Así, el desarrollo e implementación de estrategias de control automatizado, como las evaluadas en este trabajo, no solo optimizan el uso de la energía disponible y disminuyen el riesgo de deterioro del producto, sino que también contribuyen a fortalecer la resiliencia de las cadenas alimentarias a pequeña y mediana escala. De esta manera, la mejora del secado solar no solo se vincula con avances tecnológicos, sino también con una respuesta concreta a la necesidad de reducir pérdidas poscosecha y apoyar la seguridad alimentaria en contextos rurales y de producción descentralizada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Comparar el desempeño de tres estrategias de control aplicadas a un secador solar tipo invernadero (controlador PID de temperatura del aire, controlador PID basado en la temperatura del producto y controlador ON/OFF de temperatura del

aire) con el propósito de regular la temperatura del aire durante el proceso de secado y mejorar la eficiencia térmica del sistema.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar, construir y evaluar un dispositivo de medición continua de peso, basado en una celda de carga y electrónica de adquisición de datos, capaz de operar dentro del secador solar tipo invernadero.
- Obtener el modelo de la función de transferencia para la temperatura del aire y temperatura del producto en el sistema secador solar tipo invernadero mediante la identificación de funciones de transferencia de primer orden con retardo usando un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO).
- Diseñar y ajustar tres estrategias de control (PID de la temperatura del aire, PID basado en la temperatura del producto y ON/OFF del aire) a partir de los modelos identificados.
- Evaluar experimentalmente el desempeño de las estrategias de control, comparando tiempo de secado, estabilidad térmica, operación de extractores y consumo energético.

1.3 Estructura de la tesis

El presente trabajo está dividido en 4 capítulos: 1) Introducción general, 2) Revisión de literatura, 3) Diseño, construcción y evaluación de una balanza para el monitoreo en tiempo real del peso de muestras para la estimación del contenido de humedad, 4) Control Proporcional-Integral-Derivativo de un Secador Solar Tipo Invernadero.

En el segundo capítulo se hace una revisión de literatura sobre el secado y los secadores solares, mostrando la importancia del desperdicio de alimentos a nivel mundial. Al igual se muestra la importancia que tiene el mejorar las mediciones (monitoreo) de las variables dentro de un secador solar que permita un control eficiente de este sistema.

En el tercer capítulo se presentan los resultados del diseño, construcción y evaluación de una balanza electrónica capaz de operar bajo las condiciones internas del secador solar tipo invernadero en tiempo real. Este dispositivo fue desarrollado para el monitoreo continuo del peso del producto durante el proceso de deshidratación, destacando la relevancia de contar con sistemas automatizados que reduzcan la exposición del operador a temperaturas elevadas durante periodos prolongados.

En el último capítulo se presentan los resultados del diseño y evaluación de tres estrategias de control (sistemas de control) basadas en la temperatura del aire y temperatura del producto. El sistema de control PID constituye la estrategia principal del estudio y se contrasta con un controlador simple tipo encendido-apagado (ON/OFF), evaluando diferentes características centradas en el tiempo de secado y los costos operativos

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Secado solar

Gran parte de los alimentos que se consumen actualmente necesitan algún tipo de conservación para minimizar o detener por completo el deterioro que se da a causa de los microbios, al mismo tiempo que se busca retener las propiedades nutricionales el mayor tiempo posible (Jangam, 2011). El secado solar se ha utilizado desde hace mucho tiempo para la conservación de alimentos y productos agrícolas, realizándose principalmente al aire libre. Sin embargo, dado que dicho método es relativamente lento, pueden ocurrir pérdidas considerables (VijayaVenkataRaman, Iniyan, & Ranko, 2012). Los métodos más tradicionales de secado consisten en colocar los productos agrícolas sobre una superficie como tierra u hormigón expuestos al sol, lo que los hace vulnerables a la contaminación por suciedad, polvo, plagas de insectos, aves y roedores (Janjai & Bala, 2012). Con el avance del desarrollo industrial surgió el deshidratado mecánico artificial; no obstante, este proceso presenta una elevada demanda energética y altos costos operativos, lo que incrementa el precio final del producto. En este contexto, el deshidratado solar se plantea como una alternativa viable y sostenible para superar las limitaciones tanto del secado natural como del secado mecánico (VijayaVenkataRaman, Iniyan, & Ranko, 2012).

Mujumdar (2014) define el secado como el proceso de eliminación térmica de sustancias volátiles (humedad) para así obtener un producto sólido, este proceso ocurre principalmente en dos pasos:

- Transferencia de energía en forma de calor del entorno circundante para evaporar la humedad superficial del solido

- Transferencia de la humedad de la parte interna al exterior del sólido y su posterior evaporación debido al paso anterior

La velocidad de secado depende de la velocidad en que ocurren ambos procesos. La transferencia de energía en forma de calor del aire circundante al sólido húmedo se da por convección, conducción y radiación o alguna mezcla de los tres.

Por su parte Prakash & Kumar (2017) definen el deshidratado como el proceso de remoción de humedad excesiva de un producto hasta un nivel de humedad deseado para su almacenamiento durante un periodo de tiempo. Esto para prolongar la vida útil, mejorar la calidad y reducir el volumen del producto, por lo que se obtienen menores costos de empaque y transporte. También Janjai & Bala (2012) definen el secado como la técnica de preservación de productos agrícolas más antigua. Básicamente el deshidratado consiste simplemente en evaporar el agua del material a secar, colocándolo en un ambiente donde la temperatura del aire aumente al mismo tiempo que disminuye la humedad relativa y permita la circulación del aire (Sharma, Sharma, & Garg, 1991).

2.2 Desperdicio y preservación de alimentos

El desequilibrio entre el crecimiento demográfico y la disponibilidad de alimentos se ha agudizado. Weffort & Lamounier (2024) destacan la problemática de la “hambre oculta”, o “carencia silenciosa” de micronutrientes esenciales, que se vincula estrechamente con el desequilibrio global entre el crecimiento demográfico y la disponibilidad de alimentos. Aunque muchas personas logran cubrir sus necesidades calóricas diarias, la insuficiencia cualitativa en la dieta se traduce en deficiencias de hierro, vitamina A, vitamina D y zinc, particularmente en la infancia, comprometiendo el desarrollo físico y cognitivo. Este fenómeno se inserta en un contexto más amplio en el que cerca del 15% de la población mundial padece desnutrición, reflejando que el aumento poblacional y la limitada oferta de alimentos nutritivos intensifican la inseguridad alimentaria. Así esta problemática es una manifestación concreta de la tensión estructural entre la

demanda creciente de alimentos y la capacidad de los sistemas productivos para garantizar calidad nutricional suficiente.

Frente a este desafío, además de incrementar la producción y mejorar la distribución de alimentos, resulta crucial reducir las pérdidas que ocurren a lo largo de la cadena de suministro: durante la producción, la cosecha, la postcosecha y la comercialización (VijayaVenkataRaman et al., 2012). No obstante, en muchos países en desarrollo, el secado al sol o a cielo abierto sigue siendo el método predominante para la conservación de alimentos. Esta práctica, aunque ampliamente utilizada, conlleva importantes desventajas, como la contaminación por polvo, la infestación por insectos, roedores y otros animales, lo que genera pérdidas significativas y limita la seguridad alimentaria (El-Sebaï & Shalaby, 2012).

Una gran variedad de productos alimenticios, como cereales, productos marinos, cárnicos, frutas y verduras, se conservan mediante procesos de secado. Estos productos presentan un amplio rango de contenidos de humedad, que varían desde aproximadamente un 25–35 % en los cereales hasta más del 90 % en frutas y verduras. El límite de humedad para evitar el crecimiento microbiano se determina en función de la actividad del agua. Asimismo, las etapas de preprocesamiento y posprocesamiento desempeñan un papel fundamental al reducir la carga de secado y mejorar la calidad final del producto (Jangam, 2011). De acuerdo con la base de datos de pérdidas y desperdicio de alimentos de la FAO, las mayores pérdidas se dan durante la etapa de postcosecha, con una mediana aproximada del 20 %, seguida por las fases de consumo doméstico y exportación, las cuales muestran una amplia variabilidad y valores que pueden superar el 30 % según el tipo de producto y la región analizada (FAO, 2025).

De acuerdo con Ramaprasad & Kashyap (2024), es fundamental establecer una distinción conceptual entre el desperdicio y la pérdida de alimentos dentro de la cadena de suministro. Dichos autores definen la pérdida de alimentos como la reducción en la cantidad o la calidad de los alimentos comestibles que ocurre predominantemente en las etapas de producción, postcosecha, almacenamiento

y transporte, que precede al consumidor final. Este proceso implica que el alimento, aunque sufre mermas, aún conserva un valor potencial que puede ser recuperado, por ejemplo, para la alimentación de animales. Por otro lado, el desperdicio de alimentos se refiere a los productos que son descartados en las etapas finales de la cadena, como la distribución minorista, los servicios de comida y los hogares, esto después de que se han agotado las opciones de consumo y recuperación, destinándose finalmente a su disposición final, ya sea en forma de residuos activos o inertes que son absorbidos por el medio ambiente.

2.3 Los secadores solares

Un secador solar es un dispositivo diseñado para reducir el contenido de humedad de productos agrícolas mediante el aprovechamiento de la energía solar, facilitando la conservación, mejora de calidad y reducción de pérdidas en postcosecha (El-Sebaili & Shalaby, 2012). El uso de secadores solares ha demostrado ser una alternativa eficiente y ecológica frente al secado tradicional al aire libre, al proteger los productos contra contaminación por polvo, insectos y demás animales, así como frente a condiciones climáticas adversas (Janjai & Bala, 2012). En un secador solar las variables como el aire, la temperatura de secado, la humedad y velocidad del aire se pueden controlar mediante diversos componentes como sopladores, ventiladores, extractores, colectores solares de aire, etc. Por lo tanto, se pueden lograr condiciones de secado idóneas para una variedad de productos logrando una mejor calidad (Kong et al., 2024).

Algunos secadores solares utilizados en la agricultura para el secado de alimentos se emplean también en procesos de secado industrial, ya que no solo ahorran energía, sino también ahorran tiempo, ocupan menos espacio, mejoran la calidad del producto, hacen que el proceso sea más eficiente y protegen el medio ambiente. Además, el secado solar puede utilizarse durante todo el proceso de secado o simplemente para complementar sistemas de secado artificiales, reduciendo así la cantidad de combustible necesario (VijayaVenkataRaman, Iniyan, & Ranko, 2012). Sin embargo, la intermitencia de la radiación solar plantea desafíos para el rendimiento y la fiabilidad constante de

los sistemas de secado solar (Goel, et al., 2024). Esta variabilidad requiere soluciones de almacenamiento de energía térmica que puedan capturar, almacenar y redistribuir eficazmente la energía solar durante los períodos de radiación solar reducida o ausente. La integración de mecanismos de almacenamiento de energía es fundamental para mitigar las discontinuidades temporales de la energía solar, garantizando procesos de secado continuos y estables que cumplan con rigurosos estándares industriales y agrícolas (Odoi-Yorke, et al., 2025).

2.3.1 Clasificación de los secadores solares

Existen diversas clasificaciones de los secadores solares según el autor que se consulte. Furlan et al. (1983) (citado por El-Sebaili & Shalaby, 2012) clasificó los secadores solares en 4 categorías generales según el mecanismo en que la energía usada para eliminar la humedad llega al producto:

- Secadores naturales a sol abierto
- Secadores solares directos
- Secadores solares indirectos
- Secadores solares mixtos

Así también, El-Mesery et al., (2022) clasificó a los secadores solares como:

- Secadores solares directos
- Secadores solares indirectos
- Secadores solares mixtos
- Secadores solares tipo invernadero
- Secadores solares híbridos
- Secadores solares con sistemas de almacenamiento de energía

Al igual, Bala (1998) clasificó a los secadores solares como activos y pasivos. Los secadores pasivos son los que usan solamente energía de fuentes renovables. Estos a su vez se dividen en secadores pasivos directos, secadores pasivos indirectos y secadores pasivos mixtos. Los secadores solares activos usan una fuente no renovable de calor complementaria o auxiliar, por ejemplo,

para accionar un ventilador. Janjai & Bala (2012) hacen una clasificación general de los secadores solares por el tipo de convección (Figura 2-1):

- Secadores solares por convección natural
- Secadores solares por convección forzada

Secadores solares directos

El secador solar directo es uno de los sistemas más simples y antiguos de aprovechamiento de la energía solar para la deshidratación de productos agrícolas. Este secador también se conoce como cabina de secado. En este tipo de dispositivo, el producto se coloca dentro de una cámara cerrada con cubierta transparente (vidrio, policarbonato o película plástica), de manera que la radiación solar incide directamente sobre el producto (El-Sebaili & Shalaby, 2012, Kong et al., 2024). El principio de funcionamiento se basa en el efecto invernadero: la radiación de onda corta atraviesa la cubierta, es absorbida por el producto y las superficies internas, y posteriormente reemitida como radiación de onda larga que queda atrapada, lo que incrementa la temperatura interna y favorece la evaporación de la humedad (Kong et al., 2024; Kumar et al., 2006).

Además, parte de la radiación solar que incide sobre la cubierta de vidrio se refleja a la atmósfera y el resto se transmite al interior de la cabina. Al igual dentro de la cámara se producen pérdidas por convección y evaporación debido al cultivo calentado (Sharma et al., 2009).

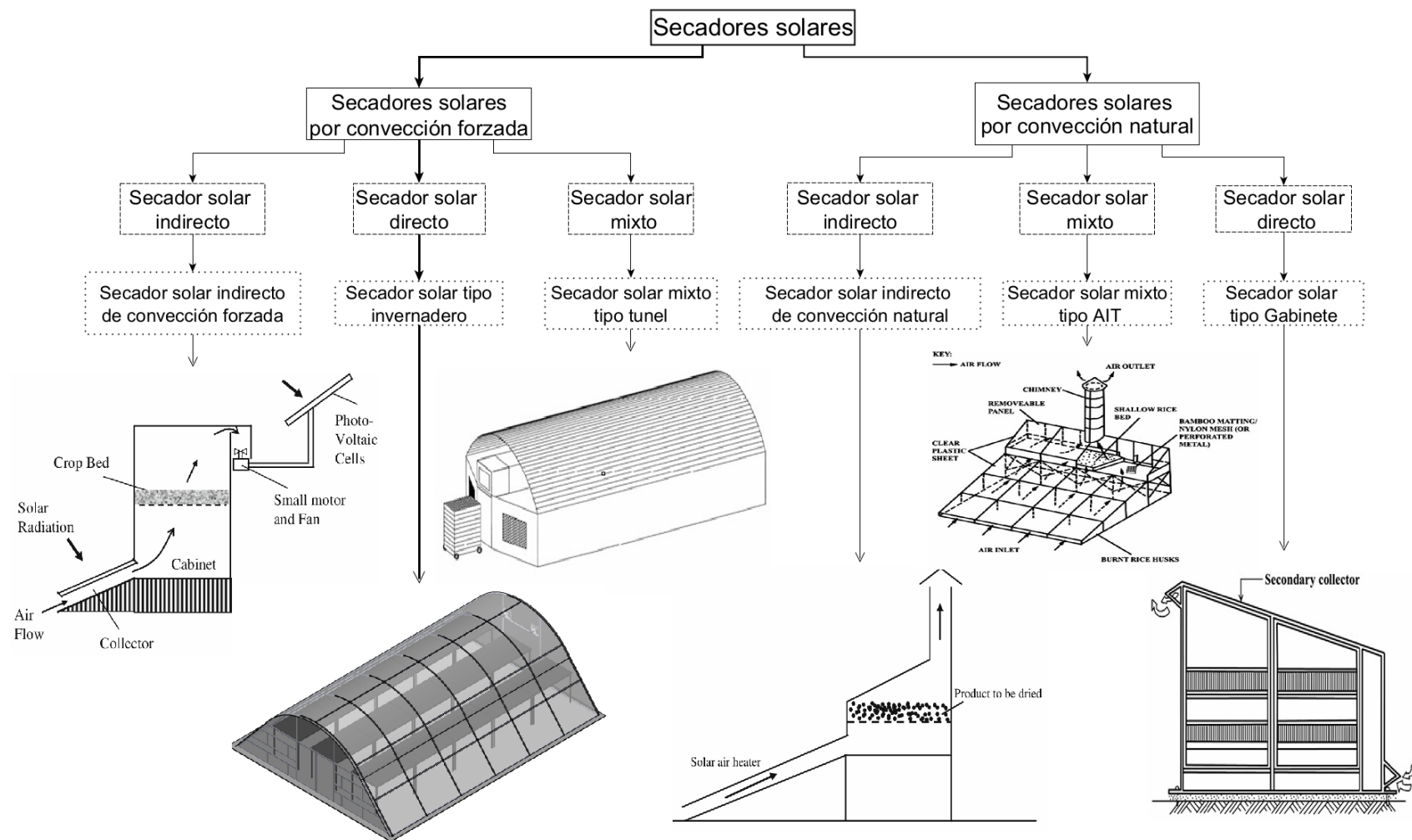


Figura 2-1. Clasificación general de los secadores solares (Fuente: Elaboración propia con base a información tomada de Janjai & Bala, (2012))

Secadores solares indirectos

Un secador solar indirecto es un dispositivo en el cual el producto no se encuentra expuesto directamente a la radiación solar, sino que el aire se calienta previamente en un colector solar y luego se conduce a la cámara de cado. El aire trasporta el calor y no la radiación solar. Esto permite un mayor control de la temperatura y evita problemas de decoloración, agrietamiento o deterioro de la calidad superficial de los alimentos (Sharma et al., 2009; El-Sebaili & Shalaby, 2012). Una de sus principales características es la separación entre el colector solar y la cámara de secado, lo que posibilita un diseño más flexible y uso de materiales absorbentes selectivos o sistemas de almacenamiento térmico. (Patil & Gawande, 2016). También es conocido como secador solar de armario y es el sistema de secado solar más utilizado (Kidane et al., 2025).

Secadores solares Mixtos

Los secadores solares mixtos son una combinación entre secadores solares directos y secadores solares indirectos (Ramadhani et al., 2025). El proceso de secado se realiza mediante el método convectivo por el paso del aire precalentado desde el calentador solar o los colectores y la exposición directa a la radiación solar (Srinivasan & Muthukumar, 2021). Los secadores solares mixtos pueden aumentar la eficiencia de la tasa de deshidratado gracias al aumento de la temperatura y el caudal del aire (El-Mesery et al., 2022).

2.3.2 Secadores solares tipo Invernadero

El efecto invernadero es el papel que ejerce la atmosfera al aislar y calentar la superficie terrestre, ya que la atmosfera permite en gran parte el traspaso de la radiación solar entrante, calentando la superficie terrestre al absorber parte de esta radiación (de onda corta). A su vez la superficie de la tierra emite parte de esta energía de vuelta al exterior en forma de radiación infrarroja (de onda larga) que es absorbida por gases atmosféricos como el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y vapor de agua. Estos gases luego vuelven a emitir la radiación infrarroja que de nuevo golpea la tierra y es esta interacción lo que se conoce

como efecto invernadero, que mantiene un rango de temperatura que permite la vida en la Tierra (Kumar et al., 2006).

En un sistema de secado solar directo el producto se coloca dentro de una cámara con cubierta transparente, por lo que la radiación solar incide directamente sobre el producto, permitiendo el proceso de secado. En un sistema de secado mixto el volumen de aire dentro de la cubierta y el piso se convierte en la cámara de secado, calentando el aire dentro y elevando su temperatura. Al mismo tiempo la cubierta al ser transparente permite que una parte de la radiación solar incida directamente sobre el producto (Patil & Gawande, 2016).

Un secador solar tipo invernadero es una estructura cerrada con cubierta transparente (vidrio, policarbonato o polietileno estabilizado UV) que aprovecha el efecto invernadero para incrementar la temperatura del aire en su interior y facilitar la evaporación de la humedad de los productos agrícolas. En este sistema, la radiación solar de onda corta atraviesa la cubierta, calienta tanto el producto como las superficies internas, y se transforma en radiación de onda larga que queda atrapada, elevando la temperatura de la cámara. Los invernaderos para secado usualmente tienen un piso de concreto y usan extractores que provocan un flujo de aire forzado y sirven para extraer el aire saturado de humedad y con alta temperatura. En su interior se colocan bandejas o estantes que permiten distribuir los productos, lo que posibilita secar grandes volúmenes de manera más higiénica y controlada que en el secado al sol abierto (Kumar et al., 2006; Sharma et al., 2009; Janjai & Bala, 2012). Janjai & Bala (2012) documentan prototipos en Tailandia y otros países del sudeste asiático para el secado de distintas frutas tropicales. En los modelos de convección forzada incorporan ventiladores alimentados con paneles fotovoltaicos, lo que mejora la extracción del aire húmedo y la uniformidad del secado.

Un secador solar tipo invernadero entra en la categoría de secado solar directo y secado solar mixto (Prakash & Kumar, 2014). Kumar et al. (2006) clasificó a los sistemas de invernaderos como:

- Invernaderos para producción de cultivos

- Invernaderos para secado de cultivos
- Invernaderos como colectores de energía solar

A su vez Prakash & Kumar (2014) clasificaron los secadores solares tipo invernadero según la transferencia de calor al producto en secadores modo pasivo (convección natural) y secadores en modo activo (convección forzada).

2.4 Monitoreo de las variables en un secador solar tipo invernadero

El monitoreo de las variables es esencial para optimizar el proceso de secado y garantizar la calidad del producto final a la vez que se mejora la eficiencia energética. Algunos autores han abordado el desarrollo de sistemas de medición y control en tiempo real, empleando sensores de temperatura, humedad, radiación solar y peso. Así como técnicas de procesamiento de señales y modelos matemáticos.

El uso de sensores para medir la temperatura y humedad relativa del aire ha sido ampliamente documentado. Chen et al. (2014) desarrollaron un sistema basado en el principio de humedad relativa de equilibrio (ERH) para determinar el contenido de humedad en té Oolong (*Camellia sinensis*). Utilizaron sensores Shinyei THT-B121 con sondas de temperatura Pt100 y sensores de humedad de polímero macromolecular, calibrados con soluciones salinas saturadas. La precisión del sistema mejoró significativamente tras la calibración, alcanzando errores de humedad menores a 0.5% en condiciones de humedad relativa inferiores al 70%.

En el caso de productos como la cáscara de cacao (CPH), Sianoun et al. (2023) emplearon sensores de celda de carga con módulos HX-711 para monitorear la pérdida de peso durante el secado en un horno convectivo. Este enfoque permitió evitar interrupciones en el proceso y obtener datos en tiempo real, lo que facilitó el ajuste de modelos matemáticos de difusión de humedad y consumo energético específico. Al igual, Pongsuttiyakorn et al. (2019) propusieron un sistema de pesaje robusto para medir la humedad en tiempo real dentro de un secador térmico. Utilizaron un sensor de carga tipo *strain gauge* con compensación de

temperatura mediante regresión polinómica de tercer orden y filtrado de señal con filtros de media móvil y Kalman. El sistema demostró una tolerancia de ± 0.1 gramos en condiciones de temperatura de hasta 70 °C.

Así también, Richiedei & Trevisani (2018) propusieron filtros basados en conformación de impulsos (Shaper-Based Filters, SBFs) para compensar la respuesta oscilatoria de celdas de carga en sistemas de pesaje dinámico. Estos filtros permiten estimar con precisión el valor de masa antes de que la señal se estabilice, lo cual es crucial en sistemas de secado con pesaje continuo. El monitoreo de variables también permite calcular el consumo energético específico (SEC) del proceso de secado. El SEC se define como la relación entre la energía eléctrica total suministrada y la masa de agua evaporada, considerando el consumo de calefactores, ventiladores, sensores y compresores. Esta métrica es clave para evaluar la viabilidad económica y ambiental de los secadores solares (Sianoun et al., 2023).

El monitoreo de variables visuales como el color también ha sido integrado en sistemas de secado. Zang, et al. (2021) desarrollaron un sistema de detección en tiempo real para dátiles chinos, que combina el pesaje automático y la visión artificial. En este estudio utilizaron una cámara industrial de 14 Megapíxeles y un sistema de iluminación toroidal para capturar imágenes RGB, que luego fueron procesadas mediante técnicas de escala de grises, transformación logarítmica, segmentación automática por umbral y operaciones morfológicas. Los valores de color L^* , a^* , b^* fueron calculados mediante conversión de espacio RGB a CIE-LAB. El sistema mostró errores relativos promedio de 1.4% en humedad y entre 1.5% y 6.3% en parámetros de color.

El modelado computacional también ha sido empleado para analizar el comportamiento de las variables dentro de secadores solares. Kidane et al. (2025) realizaron una revisión sobre el uso de dinámica de fluidos computacional (CFD) en cámaras de secado solar, destacando su utilidad para simular patrones de flujo de aire, distribución de temperatura y humedad. La herramienta CFD permite optimizar el diseño de secadores solares y mejorar la eficiencia térmica

sin la necesidad de prototipos físicos. Además, Sharabiani et al. (2021) desarrollaron modelos basados en redes neuronales artificiales para predecir la razón de humedad de rodajas de manzanas durante el proceso de secado por métodos convectivo y microondas. Los modelos fueron entrenados con datos experimentales obtenidos a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C) y potencias de microondas (90, 180 y 360 W), utilizando como entradas el tiempo de secado y la temperatura o potencia aplicada. Los resultados mostraron que las ANN lograron una alta precisión en la predicción de la razón de humedad, con coeficientes de determinación R^2 de 0.9993 para el secado convectivo y 0.9991 para el secado por microondas. Así mismo, se compararon los modelos ANN con modelos matemáticos clásicos como Midilli et al., Page, Logarithmic y Two-term, encontrando que el modelo de Midilli et al. también ofrecía un excelente ajuste estadístico, pero las ANN superaron en capacidad de generalización y flexibilidad ante variaciones experimentales.

2.5 Secado solar de Jitomate

Herrera et al. (2023) analizaron el efecto de distintos modos de secado solar (directo en invernadero, indirecto continuo e indirecto discontinuo) sobre la cinética de secado, el contenido de fitoquímicos y las propiedades funcionales de rodajas de jitomate saladette. El estudio respondió a la necesidad de comprender cómo la técnica de secado incide en la conservación de compuestos bioactivos y en la capacidad antioxidante del producto final. Para ello, se compararon los tres métodos solares con la liofilización como control, evaluando tiempos de secado, constantes cinéticas, consumo energético y la concentración de compuestos fenólicos, carotenoides y fibra dietaria. Los resultados mostraron que el secado indirecto continuo fue el más rápido (8.5 h), mientras que el indirecto discontinuo resultó más eficiente en términos energéticos. Al igual Azeez et al. (2019) evaluaron cómo la temperatura y el tiempo de secado en horno afectan la actividad antioxidante y el contenido de compuestos bioactivos en rodajas de jitomate. El trabajo se centró en la necesidad de comprender la interacción entre condiciones térmicas y estabilidad de fenoles, flavonoides, licopeno y β -caroteno. Se aplicaron tratamientos a 50, 60 y 70 °C durante intervalos de 30 a 300 minutos,

determinando los compuestos mediante métodos espectrofotométricos y cromatografía. Asimismo, se ajustaron modelos de capa delgada para describir la cinética de secado. Los hallazgos indicaron que la actividad antioxidante y los fenoles aumentaron con la temperatura en los primeros 120 minutos, pero disminuyeron con tiempos prolongados, mientras que los flavonoides y el β -caroteno decrecieron de manera sostenida. El licopeno, en cambio, se incrementó significativamente a partir de los 120 minutos de tratamiento. El modelo de Page fue el que mejor describió el proceso ($R^2=0.998$), y la difusividad efectiva mostró dependencia con la temperatura, confirmando la naturaleza activada del transporte de humedad.

Demiray et al. (2013) abordaron la degradación de licopeno, β -caroteno y ácido ascórbico durante el secado de jitomate por aire caliente, dado que la pérdida de antioxidantes limita la calidad de los productos deshidratados. El producto se secó en un secador solar tipo gabinete a temperaturas de 60 a 100 °C, con flujo de aire constante, y se determinaron los compuestos por HPLC. Los resultados evidenciaron que la degradación de los tres compuestos siguió una cinética de primer orden, con constantes de reacción que aumentaron con la temperatura. Se identificaron rangos críticos de degradación entre 70 y 80 °C para los carotenoides y entre 60 y 70 °C para el ácido ascórbico, lo que resalta la importancia de controlar la temperatura para minimizar pérdidas nutricionales.

En un análisis más amplio, Kushwah, et al. (2025) realizaron un estudio multidimensional que integró cinética de secado, desempeño térmico, calidad, morfología y evaluación de ciclo de vida (LCA) en un sistema de secado solar tipo invernadero. El trabajo respondió a la necesidad de evaluar no solo la eficiencia técnica, sino también el impacto ambiental de estas tecnologías. Se construyó un sistema de 2.44×2.60×1.4 m con ventilación forzada y colectores, y se secaron rodajas de jitomate. Se compararon tres sistemas, sistema de secado solar tipo invernadero (con cubierta de policarbonato), sistema de secado solar de forma parabólica (con cubierta de polietileno) y secado solar a sol abierto. Los resultados mostraron que el sistema tipo invernadero alcanzó 59.5 °C y redujo la

humedad de 81.25% a 11.22% en 10 h, frente a 22% en secado abierto. Se observaron incrementos en difusividad efectiva (+6.45%), coeficiente de masa (+7.07%) y coeficiente de calor (+46.6%) respecto al secado abierto, con una energía de activación menor (35.32 kJ mol⁻¹ frente a 61.54 kJ mol). El modelo de Prakash y Kumar fue el mejor ajuste, y el LCA reveló un menor impacto ambiental del sistema en invernadero frente al parabólico, consolidando su viabilidad técnica y ambiental.

Azam et al. (2020) desarrollaron un secador solar híbrido que integra un invernadero, un colector de aire plano y un sistema fotovoltaico, con el objetivo de ofrecer una alternativa sostenible para pequeños productores. El estudio evaluó el balance térmico, la eficiencia global y el efecto de distintos pretratamientos en jitomates (enteros, en mitades y rodajas, con y sin blanqueo y tratamiento osmótico). Se midieron parámetros energéticos y se ajustaron modelos de capa delgada para describir la cinética. El blanqueo previo aceleró la tasa inicial de secado, y los modelos de Page y Henderson-Pabis describieron adecuadamente la cinética. En comparación con el secado a sol abierto, el sistema híbrido produjo jitomates de mejor calidad, con menor exposición a contaminantes y mayor uniformidad. También Na Abou et al. (2019) realizaron un estudio sobre el efecto de la velocidad del aire sobre la cinética de deshidratación de rodajas de jitomate en un túnel solar forzado. El objetivo fue determinar cómo la variación de 2 a 3 m s⁻¹ influye en la tasa de secado, el tiempo requerido y la difusividad efectiva del agua. Se empleó un método indirecto, registrando la humedad relativa del aire a la entrada y salida del secador, y se ajustaron los modelos de Henderson-Pabis y Page. Los resultados mostraron que el secado se desarrolló en dos fases, constante y decreciente, con un punto crítico más temprano a mayor velocidad de aire. La difusividad efectiva aumentó de 2.918×10^{-9} a 3.921×10^{-9} m² s⁻¹ al pasar de 2 a 3 m s⁻¹, equivalente a un incremento del 25%. El modelo de Page ofreció el mejor ajuste, confirmando que la velocidad del aire es un factor determinante en la eficiencia del proceso.

2.6 Control del ambiente en un secador solar

El control en los secadores solares constituye un elemento esencial para garantizar la eficiencia del proceso de secado y la calidad del producto final, ya que permite mantener estables variables críticas como la temperatura, la humedad relativa y el flujo de aire frente a la variabilidad de las condiciones ambientales. Diversos estudios resaltan que, sin un sistema de control adecuado, los secadores solares presentan fluctuaciones que afectan tanto la velocidad de secado como las propiedades organolépticas y nutricionales de los alimentos (Valencia-Islas et al., 2025; Arifin et al., 2024). La incorporación de sensores, microcontroladores y algoritmos de regulación ha permitido transformar estos sistemas en tecnologías más confiables, capaces de reducir tiempos de operación, optimizar el uso de energía y mejorar la inocuidad de los productos deshidratados (Catania et al., 2020; Nkolokosa, 2023). En este sentido, el control no solo representa un mecanismo de automatización, sino también una vía para hacer más sostenibles y competitivos los secadores solares en aplicaciones agrícolas y agroindustriales.

2.6.1 Estrategias de control en secadores solares

Control Clásico

Encendido/Apagado (ON/OFF)

El control encendido apagado mejor conocido como ON/OFF representa la forma más básica de regulación en secadores solares. Aunque es sencillo y de bajo costo, presenta limitaciones importantes: genera oscilaciones en la temperatura, no se adapta a cambios ambientales y puede comprometer la calidad del producto. No obstante, cuando se implementa tomando como referencia la temperatura del producto en lugar de la del aire, se logran mejores resultados en términos de eficiencia energética y estabilidad del secado (Valencia-Islas et al., 2025).

Valencia-Islas et al. (2025) evaluaron dos variantes de control ON/OFF en un secador solar tipo invernadero para jitomate:

- Basado en la temperatura del aire: los ventiladores se encendían cuando la temperatura del aire superaba los 50 °C y se apagaban al descender por debajo de 40 °C.
- Basado en la temperatura del producto (rebanadas de jitomate): la lógica era similar, pero tomando como referencia la temperatura de la pulpa del jitomate.

Los resultados mostraron que el controlador basado en aire mantenía la temperatura del ambiente dentro del rango, pero la temperatura del producto presentaba alta variabilidad, lo que afectaba la homogeneidad del secado. En contraste, el controlador ON/OFF basado en la temperatura del producto logró mantener las rebanadas más cercanas al valor objetivo (50 °C), aunque con algunos sobrepasos. En términos de consumo energético, el controlador ON/OFF basado en producto fue más eficiente que el basado en aire, ya que redujo el tiempo de operación de los ventiladores.

El principal problema del control por ON/OFF es que no anticipa el comportamiento del sistema, lo que genera oscilaciones alrededor de la temperatura deseada, y que puede afectar la calidad final del producto. Además, al depender de umbrales fijos, el ON/OFF no se adapta bien a condiciones ambientales cambiantes (variaciones de radiación solar, viento, humedad exterior).

Sin embargo, se reconoce que el ON/OFF es económico, fácil de implementar y de bajo costo computacional, lo que lo hace atractivo en contextos rurales o de pequeña escala.

Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

El control Proporcional–Integral–Derivativo (PID) se ha consolidado como una de las estrategias más empleadas en los secadores solares, debido a su simplicidad de implementación y a la capacidad que ofrece para mantener estables las condiciones de operación frente a la variabilidad ambiental. En el trabajo de Arifin et al. (2024), desarrollado en un secador solar híbrido de convección forzada, la incorporación de un controlador PID permitió estabilizar la temperatura de la

cámara alrededor del punto de consigna (60°C), logrando un secado más eficiente de granos de café y cacao en comparación con métodos de secado natural o convección sin control. Los resultados experimentales mostraron que, tras la sintonización de parámetros, el sistema alcanzó una respuesta rápida y con un error en estado estacionario mínimo, lo que se tradujo en una reducción significativa del contenido de agua y en una mayor eficiencia global del proceso.

De manera similar, Herrera-Morales et al. (2022) implementaron un controlador PID electrónico embebido en un microcontrolador Arduino para controlar simultáneamente la temperatura y la humedad relativa en un secador solar hermético destinado a papa precocida. En este caso, el sistema mantuvo de forma estable los valores de consigna de 36.5°C y 33% de humedad relativa, incluso bajo condiciones de nubosidad, gracias a la acción combinada de ventiladores y resistencias auxiliares. Este sistema de control permitió extraer aproximadamente el 73% del agua en un periodo de ocho horas, en contraste con las más de 24 horas requeridas en métodos tradicionales, evidenciando la capacidad del PID para reducir tiempos de operación y garantizar continuidad en el secado.

Yang et al. (2023) propusieron un controlador PID basado en redes neuronales artificiales, denominado INN-PID, aplicado al secado de rodajas de melón en un sistema de aire por impacto. En sus experimentos, el sistema de control PID convencional fue comparado con versiones inteligentes, observándose que el primero presentaba limitaciones frente a la variabilidad del proceso, mientras que el INN-PID logró un control más preciso, con menor sobreimpulso y tiempos de regulación más cortos. Esto permitió implementar estrategias de secado a temperatura variable, mejorando no solo la eficiencia energética, sino también la calidad del producto en términos de color, textura y contenido de vitamina C. Es por esto por lo que el control PID sigue siendo la opción dominante en aplicaciones prácticas. Su bajo costo, facilidad de implementación en plataformas como Arduino o ATmega y su efectividad para mantener condiciones estables lo

convierten en un estándar dentro de la automatización de secadores solares (Nkolokosa, 2023).

Control Avanzado

Control predictivo basado en modelos

El control predictivo basado en modelos (MPC) ha emergido como una alternativa avanzada frente a los métodos tradicionales de regulación en secadores solares, particularmente en los de tipo invernadero. Su principal ventaja radica en la capacidad de anticipar el comportamiento dinámico del sistema y optimizar el uso de los actuadores bajo restricciones operativas. Valencia-Islas et al. (2025) aplicaron esta estrategia en un secador solar tipo invernadero para jitomate, desarrollando un modelo mediante identificación de sistemas (N4SID) que permitió predecir la temperatura de las rebanadas durante el proceso de secado. A partir de este modelo, se implementó un MPC que utilizó la temperatura del producto como variable de referencia, en contraste con los controles ON/OFF basados en aire o en el propio producto. Los resultados mostraron que el MPC mantuvo la temperatura de las rebanadas más cercana al valor objetivo de 50 °C, con menor variabilidad y un consumo energético reducido en comparación con los controles convencionales. Esto evidenció que, al considerar directamente la temperatura del producto, el MPC ofrece un control más robusto y eficiente, garantizando condiciones de secado más homogéneas y de mayor calidad.

La literatura reciente también ha explorado variantes del MPC en contextos más complejos. Chen & You (2025) propusieron un esquema de control predictivo no lineal (NMPC) aplicado a invernaderos, integrando además el aprovechamiento del calor residual proveniente de la minería de criptomonedas. En este caso, el NMPC permitió gestionar simultáneamente las condiciones climáticas internas y la disponibilidad de energía térmica externa, optimizando el proceso de secado bajo criterios de eficiencia energética y rentabilidad económica. Este enfoque demostró que los controladores predictivos pueden adaptarse a escenarios híbridos y multifactoriales, ampliando su aplicabilidad más allá del control climático básico.

Por su parte, Mansour et al. (2025) desarrollaron un marco jerárquico que combina un nivel superior de optimización económica con un nivel inferior de control robusto mediante aprendizaje por refuerzo profundo (DRL). En este esquema, el MPC se emplea en la capa de planificación para generar trayectorias de referencia económicamente óptimas, considerando variaciones en los precios de la energía y en las condiciones ambientales. El controlador de bajo nivel, basado en DRL, se encarga de seguir dichas trayectorias en tiempo real, garantizando estabilidad y adaptabilidad frente a perturbaciones. Este trabajo resalta la versatilidad del MPC como herramienta de planificación estratégica dentro de arquitecturas de control más complejas, donde su integración con técnicas de inteligencia artificial potencia la robustez y escalabilidad del sistema.

En conjunto, los estudios revisados muestran que el MPC representa un avance significativo en el control de secadores solares, al superar las limitaciones de los métodos clásicos como el ON/OFF o incluso el PID. Su capacidad de anticipar el comportamiento del sistema, optimizar el uso de recursos y adaptarse a condiciones dinámicas lo posiciona como una estrategia clave para mejorar la eficiencia energética, la calidad del producto y la sostenibilidad de los procesos de secado en invernaderos solares.

Control inteligente con Internet de las cosas (IoT) y sensores

En los últimos años, la investigación en secadores solares ha comenzado a incorporar estrategias de control inteligente capaces de enfrentar la naturaleza no lineal, incierta y variable del proceso de secado. Una de las aproximaciones más destacadas es la integración de ANN con algoritmos de control PID, lo que permite ajustar los parámetros de control en tiempo real y mejorar la respuesta del sistema frente a perturbaciones externas.

En paralelo, la automatización mediante plataformas de bajo costo y el uso de sensores conectados a la nube han permitido implementar esquemas de monitoreo y control en tiempo real. Catania et al. (2020) diseñaron un sistema inteligente para el secado de hierbas aromáticas basado en Arduino Mega, sensores de peso y humedad, y transmisión de datos vía *Wi-Fi* hacia la

plataforma *ThingSpeak*. Este sistema permitió seguir en tiempo real la evolución de la pérdida de humedad y la tasa de secado, facilitando la toma de decisiones durante el proceso. De manera complementaria, Nkolokosa (2023) en su revisión sobre secadores solares inteligentes destaca que la incorporación de microcontroladores, sensores y tecnologías IoT ha transformado estos equipos en sistemas más flexibles y confiables, capaces de reducir tiempos de operación y mejorar la calidad del producto final.

2.7 Características del control PID

El controlador Proporcional–Integral–Derivativo (PID) es uno de los algoritmos de control más utilizados en la industria debido a su simplicidad, robustez y facilidad de implementación. Su origen se remonta a los sistemas de regulación de motores de vapor en la primera mitad del siglo XX, y desde entonces se ha consolidado como la estrategia de control más empleada en procesos industriales y agrícolas (Zhao, 2025).

En términos generales, el control PID combina tres acciones de control (Figura 2-2):

- Proporcional (P): responde de manera inmediata al error entre la variable de proceso y el valor de referencia. Un aumento en la ganancia proporcional reduce el error, pero un valor excesivo puede inducir inestabilidad y oscilaciones (Ma'arif et al., 2021).
- Integral (I): acumula el error a lo largo del tiempo, eliminando el error en estado estacionario. Sin embargo, un exceso de acción integral puede generar sobreimpulso y oscilaciones prolongadas (Ma'arif et al., 2021).
- Derivativa (D): anticipa la tendencia del error al considerar su tasa de cambio, lo que mejora la estabilidad y reduce el sobreimpulso, aunque puede amplificar el ruido de la señal (Zhou & Zhang, 2020).

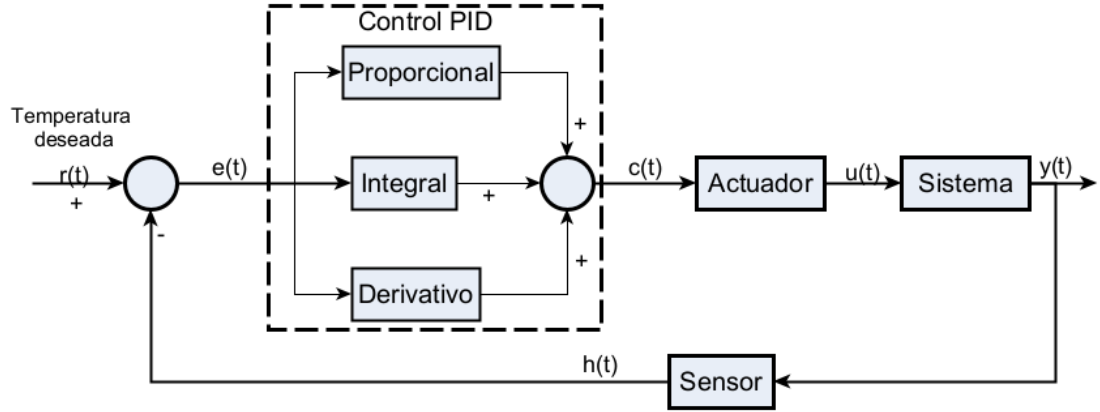


Figura 2-2. Diagrama de sistema de control PID convencional en lazo cerrado (Fuente: Elaboración propia).

2.7.1 Sistema de control PID en tiempo continuo

La ecuación continua de control en el dominio del tiempo es como la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde $u(t)$ es la salida del controlador, $e(t)$ es el error o la diferencia entre el valor deseado y el valor real, K_p , K_i , K_d , son los coeficientes proporcional, integral y derivativo, respectivamente. Al igual:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2)$$

Y

$$K_d = k_p * T_d \quad (3)$$

Donde T_i , T_d son las constantes de tiempo de integración y derivación respectivamente.

Sustituyendo la Ecuación (2) y (3) en la Ecuación (1):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (4)$$

La función de transferencia del controlador PID en el dominio de la frecuencia es (Ogata, 2010):

$$G(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + k_p T_d s \quad (5)$$

O de igual manera:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + k_d s \quad (6)$$

A pesar de su estructura sencilla, el desempeño del PID depende fuertemente de la sintonización de parámetros. Métodos clásicos como Ziegler–Nichols o Cohen–Coon han sido ampliamente utilizados (Maghsadgh, 2016; Akano & Asaolu, 2023), aunque presentan limitaciones en sistemas no lineales o con retardos significativos. Por ello, en aplicaciones recientes se han explorado variantes como el PID fraccional (FOPID), el fuzzy-PID o el PID con redes neuronales artificiales, que buscan mejorar la robustez y adaptabilidad (Edet et al., 2024).

2.7.2 Sistema de control PID en tiempo discreto

El control discreto PID se obtiene al discretizar la Ecuación (4). Mediante la aproximación trapezoidal para el término integral y para la diferencia finita de dos puntos para el término derivativo, se obtiene la expresión siguiente (Catañedo-Giraldo, 2025):

$$\int e(t)dt = \sum_{h=0}^k \left[\frac{e(h) + e(h+1)}{2} \right] T_s \quad (7)$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (8)$$

Donde T_s es el tiempo en el que se va a ejecutar la acción de control discreta, $e(k)$ es el error actual y $e(k-1)$ es el error anterior.

Sustituyendo la Ecuación (5) y (6) en la Ecuación (4):

$$u(k) = K_p[e(k) + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(k) + e(k+1)] + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)]] \quad (9)$$

Y para el instante $k - 1$:

$$\begin{aligned} u(k-1) = & K_p[e(k-1) + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(k-1) + e(k-2)]] \\ & + \frac{T_d}{T_s} [e(k-1) - e(k-2)] \end{aligned} \quad (10)$$

Por lo que:

$$\begin{aligned} & u(k) - u(k-1) \\ = & K_p[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2T_i} \sum_{h=0}^k [e(k) - e(k-2)]] \\ & + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & u(k) - u(k-1) \\ = & K_p[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2T_i} [e(k) + e(k-1)]] \\ & + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & u(k) - u(k-1) \\ = & K_p \left[e(k) \left(1 + \frac{T_s}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) \right. \\ & \left. - e(k-1) \left(1 - \frac{T_s}{2T_i} + 2\frac{T_d}{T_s} \right) + e(k-2) \frac{T_d}{T_s} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Que se escribe como:

$$u(k) = u(k-1) + e(k)q_0 + e(k-1)q_1 + e(k-2)q_2 \quad (14)$$

Donde:

$$q_0 = K_p \left(1 + \frac{T_s}{2T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) \quad (15)$$

$$q_1 = -K_p \left(1 - \frac{T_s}{2T_i} + 2 \frac{T_d}{T_s} \right) \quad (16)$$

$$q_2 = K_p \frac{T_d}{T_s} \quad (17)$$

De igual manera al aplicar la transformada Z y suponiendo condiciones iniciales de cero:

$$U(z) = K_p E(z) + K_i T_s \frac{E(z)}{1 - z^{-1}} + K_d \frac{1}{T_s} (1 - z^{-1}) E(z) \quad (18)$$

Por lo que la función de Transferencia en tiempo discreto $G_z(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)}$:

$$G_c(z) = K_p + K_i \frac{T_s}{1 - z^{-1}} + K_d \frac{(1 - z^{-1})}{T_s} \quad (19)$$

2.7.3 Métodos de Implementación

Implementación analógica y digital

En sus primeras aplicaciones, el PID se realizaba mediante computadores analógicos con amplificadores operacionales, resistencias y capacitores. Estos sistemas ofrecían tiempos de respuesta en el orden de milisegundos, pero carecían de flexibilidad y precisión. Con la llegada de los controladores digitales, el algoritmo se discretizó, permitiendo mayor exactitud y facilidad de ajuste. Los

microprocesadores y DSPs posibilitaron la integración de rutinas de *anti-windup* y compensación *feedforward*, además de interfaces de comunicación industrial (Zhao, 2025).

Microcontroladores y sistemas embebidos

Los microcontroladores de bajo costo como Arduino han sido ampliamente utilizados en aplicaciones educativas e industriales. Ma'arif et al. (2021) implementaron un PID en Arduino Uno para el control de velocidad de un motor DC, mostrando que la forma incremental del algoritmo permite un control estable con recursos computacionales limitados. De manera similar, Zhou & Zhang (2020) desarrollaron un sistema de control de velocidad de motor DC basado en STM32, destacando su mayor capacidad de procesamiento y precisión frente a plataformas más simples. Maghsadghagh (2016) utilizó un PIC18F452 para implementar un PID en el control de nivel de líquidos, demostrando la versatilidad de esta familia de microcontroladores en procesos industriales.

PLCs (Controladores Lógicos Programables)

Los *PLCs* son ampliamente empleados en entornos industriales debido a su robustez y confiabilidad. Zhao (2025) señala que los *PLCs* ofrecen tiempos medios entre fallas superiores a 500,000 horas, lo que los hace idóneos para ambientes hostiles como refinerías o plantas químicas. Sin embargo, su arquitectura cerrada limita la innovación algorítmica, siendo más adecuados para aplicaciones donde la estabilidad y la facilidad de mantenimiento son prioritarias.

FPGAs y hardware reconfigurable

Las *FPGAs* permiten implementar el PID a nivel de hardware, con procesamiento paralelo y latencias en el orden de nanosegundos. Zhao (2025) destaca su uso en aplicaciones de alta velocidad y precisión, como el control de posicionamiento en litografía o en robots industriales de múltiples ejes. Aunque su desarrollo es más costoso y complejo, ofrecen confiabilidad cercana al 99.999% en entornos críticos como el control de satélites.

Hardware inteligente y control adaptativo

La integración de inteligencia artificial en hardware especializado ha dado lugar a controladores PID con autoajuste dinámico. Zhao (2025) describe cómo el acoplamiento de ANN y algoritmos de aprendizaje permite que el PID se adapte en tiempo real a perturbaciones y no linealidades. Ejemplos de estas aplicaciones se encuentran en la agricultura de precisión y en sistemas de energía, donde la adaptabilidad es esencial.

2.7.4 Técnicas de sintonización de Parámetros

La efectividad de un controlador PID depende en gran medida de la correcta selección de sus parámetros K_p , K_i y K_d . Una sintonización inadecuada puede provocar sobreimpulso, oscilaciones prolongadas o errores en estado estacionario. Por ello, la literatura ha desarrollado múltiples estrategias de ajuste, que van desde métodos clásicos hasta enfoques modernos basados en inteligencia artificial y optimización heurística.

Métodos Clásicos de Sintonización

Los métodos tradicionales, como Ziegler–Nichols y Cohen–Coon, han sido ampliamente utilizados en la práctica industrial. Estos procedimientos empíricos permiten obtener parámetros iniciales a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto o cerrado. Maghsadgh (2016) aplicó el método de Ziegler–Nichols en la implementación de un PID con microcontrolador PIC18F452 para el control de nivel de líquidos, destacando su simplicidad, aunque con limitaciones en sistemas con retardos significativos. De manera similar, Akano & Asaolu (2023) emplearon ajustes clásicos en un modelo de invernadero, logrando estabilizar temperatura y humedad en torno a los puntos de consigna.

Ajuste Experimental y Ensayo–Error

En aplicaciones de secado, el ajuste de parámetros se ha realizado mediante ensayo y error. Arifin et al. (2024) reportaron la sintonización de un PID en un secador solar híbrido, probando diferentes combinaciones de K_p , K_i y K_d hasta obtener la respuesta más rápida y estable. Aunque este método carece de rigor

matemático, resulta práctico en sistemas experimentales donde la dinámica es compleja o poco conocida.

Métodos Basados en Optimización Heurística

La literatura reciente ha explorado algoritmos de optimización inspirados en procesos naturales para mejorar la sintonización del PID. El algoritmo genético (GA), el Grey Wolf Optimizer (GWO) y el método de Nelder–Mead (NM) han mostrado resultados superiores en términos de reducción de sobreimpulso y tiempo de establecimiento (El-Saadawi et al., 2020). El-Saadawi et al. (2020) aplicaron FOPID con ajuste mediante GA y GWO en motores DC, demostrando mayor robustez frente a variaciones paramétricas. Zhao (2025) también resalta el uso de metaheurísticas como GA y PSO para superar las limitaciones de los métodos clásicos, especialmente en sistemas multivariables y no lineales.

2.8 Literatura citada

- Akano, T. T., & Asaolu, O. S. (2023). Modelling of a Greenhouse Climatic Conditions Control System with PID Controller for Plant Growth Optimization. *Journal of Engineering and Technology*, 478-482. doi:http://doi.org/10.46792/fuoyejet.v8i4.1144
- Arifin, M. A., Pangaribuan, P., Pramudita, B. A., & Megantoro, P. (2024). Controlling temperature using proportional integral and derivative control algorithm for hybrid forced convection solar dryer. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 239-247. doi:http://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp239-247
- Azam, M. M., Eltawil, M. A., & Amer, B. (2020). Thermal analysis of PV system and solar collector integrated with greenhouse dryer for drying tomatoes. *Energy*, 212(118764). doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118764
- Azeez, L., Adebisi, S. A., Oyedeji, A. O., Adetoro, R. O., & Tijani, K. O. (2019). Bioactive compounds' contents, drying kinetics and mathematical modelling of tomato slices influenced by drying temperatures and time. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 120-126. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2017.03.002
- Bala, B. K. (1998). *Solar drying systems: simulations and optimization*. India: Agrotech Publishing Academy.
- Catania, P., Gaglio, R., Orlando, S., Settanni, L., & Vallone, M. (2020). Design and Implementation of a Smart System to Control Aromatic Herb Dehydration Process. *Agriculture*, 1-19. doi:10.3390/agriculture10080332
- Catañedo-Giraldo, S. A. (2025, Abril 21). *Control Automático Educación*. Retrieved from Controladores PID Discreto: https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controladores-pid-discreto/

- Chen, A., Chen, H.-Y., & Chen, C. (2014). Use of Temperature and Humidity Sensors to Determine Moisture Content of Oolong Tea. *Sensors*, 15593–15609. doi:10.3390/s140815593
- Chen, W.-H., & You, F. (2025). Energy optimization of bitcoin mining integrated greenhouse with model predictive control. *Applied Energy*, 395(126256). doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126256>
- Chew, I. M., Wong, W. K., & Nandong, J. (2022). Optimization Analysis of Nonlinear Process Using Genetic Algorithm. *Journal of Information Science and Engineering*, 909-921. doi:[https://doi.org/10.6688/JISE.202209_38\(5\).0002](https://doi.org/10.6688/JISE.202209_38(5).0002)
- Daszkiewicz, T. (2022). Food Production in the Context of Global Developmental Challenges. *Agriculture*, 12(832). doi: <https://doi.org/10.3390/>
- Demiray, E., Tulek, Y., & Yilmaz, Y. (2013). Degradation kinetics of lycopene, b-carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air drying. *LWT- Food Science and Technology*, 172-176. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2012.06.001>
- Edet, E., Chacón-Vásquez, M., & Onyechoa, E. C. (2024). Application of Fractional-order PID controllers in a Greenhouse Climate Control System. *International Federation of Automatic Control*, 179-184. doi:10.1016/j.ifacol.2024.08.186
- El-Mesery, H. S., El-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112070. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070>
- El-Saadawi, M. M., Gouda, E. A., Elhosseini, M. A., & Essa, S. M. (2020). Fractional Order PID: Microcontroller Implementation. *European Journal of Electrical and Computer Science*, 4(1). doi:<http://dx.doi.org/10.24018/ejece.2020.4.1.170>

- El-Sebaili, A. A., & Shalaby, S. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 37-43. doi:10.1016/j.rser.2011.07.134
- FAO. (2025, Octubre 22). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved from Food Loss and Waste Database: <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/es>
- Goel, V., Dwivedi, A., Mehra, K. S., Pathak, S. K., Tyagi, V. V., Bhattacharyya, S., & Pandey, A. K. (2024). Solar drying systems for Domestic/Industrial Purposes: A State-of-Art review on topical progress and feasibility assessments. *Solar Energy*, 267(112210). doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112210>
- Herrera, M. D., Álvarez-Sánchez, F. I., Ortiz-Rodríguez, N. M., & Flores-Prieto, J. J. (2023). Solar drying modes of saladette tomatoes slices on phytochemicals and functional properties. *Solar Energy*, 262(111903), 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111903>
- Herrera-Morales, J. A., Carbajal-Morán, H., & Almidón-Elescano, Á. (2022). Solar Dryer with Electronic PID Controller for Dry Potato Production. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 223–229. doi: <https://doi.org/10.12912/27197050/143784>
- Jangam, S. V. (2011). An Overview of Recent Developments and Some R&D Challenges Related to Drying of Foods. *Drying Technology*, 1343-1357. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2011.594378>
- Janjai, S., & Bala, B. (2012). Solar Drying Technology. *Springer Science+Business Media*, 4, 16-54.
- Kidane, H., Farkas, I., & Buzás, J. (2025). Mathematical modelling of golden apple drying and performance evaluation of solar drying systems using energy and exergy approach. *Sci Rep*, 15, 7805. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-025-92133-2>

- Kidane, H., Farkas, I., & Buzás, J. (2025). Modeling airflow dynamics in solar drying chambers: a comprehensive review of CFD applications. *Discover Applied Sciences*, 7(444). doi:<https://doi.org/10.1007/s42452-025-06894-6>
- Kong, D., Wang, Y., Li, M., & Liang, J. (2024). A comprehensive review of hybrid solar dryers integrated with auxiliary energy and units for agricultural products. *Energy*, 1-18. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130640>
- Kumar, A., Tiwari, G. N., Kumar, S., & Pandey, M. (2006). Role of greenhouse technology in agricultural engineering. *International Journal of Agricultural Research*, 364-372.
- Kushwah, A., Anand, A., Raj, S., Kumar, A., & Gaur, M. K. (2025). A multidimensional study on tomato drying in greenhouse solar systems: From life cycle impacts on quality characteristics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 293(113867). doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113867>
- Ma'arif, A., Setiawan, N. R., & Rahayu, E. S. (2021). Embedded Control System of DC Motor Using Microcontroller Arduino and PID Algorithm. *IT Journal Research and Development*, 30-42. doi:10.25299/itjrd.2021.vol6(1).6125
- Maghsadgh, A. (2016). Implementation of PID Controller by Microcontroller of PIC (18 Series) and Controlling the Height of Liquid in Sources. *Adv Robot Autom*, 5(156). doi:10.4172/2168-9695.1000156
- Mansour, M., Sathyanarayanan, K. K., Sauerteig, P., & Streif, S. (2025). Adaptive robust greenhouse climate control: Combining deep reinforcement learning and economic optimization. *Smart Agricultural Technology*, 12(101327). doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101327>
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. New York: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/b17208>
- Mumah, E., Hong, Y., & Chen, Y. (2025). Exploring the reality of global food insecurity and policy gaps. *Humanities and social sciences*

communications, 12(1241). doi:<https://doi.org/10.1057/s41599-025-05315-8>

Na Abou, M. M., Madougou, S., & Boukar, M. (2019). Effect of Drying Air Velocity on Drying Kinetics of Tomato Slices in a Forced-Convective Solar Tunnel Dryer. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 64-78. doi:10.4236/jsbs.2019.92005

Nature Communications. (224). Feeding the future global population. *Nat Commun*, 15(222). doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-023-44588-y>

Nkolokosa, D. (2023). The Status Of Smart Solar Dryers: Review. *Journal Of Sustainable Energy*, 24-31.

Odoi-Yorke, F., Eshun Davis, J., Nyarkoh, R., Abeley, A., Agyekum, E. B., Lamptey, F. P., . . . Atepor, L. (2025). A review of research trends, innovations, and future directions in phase change materials for energy storage in solar drying systems: A bibliometric approach. *Journal of Energy Storage*, 118(116233). doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116233>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson Educación.

Otekunrin, O. A. (2024). Assessing the Prevalence and Severity of Global Hunger and Food Insecurity: Recent Dynamics and Sub-Saharan Africa's Burden. *Sustainability*, 16(4877). doi: <https://doi.org/10.3390/su16124877>

Paek, S.-Y., Kong, Y.-S., Pak, S.-H., Kang, J.-S., Yun, J.-S., Kil, H.-I., & Hwang, C.-J. (2024). Robust optimal tuning of a reduced active disturbance rejection controller based on first order plus dead time model approximation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133(108338). doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108338>

Patil, R., & Gawande, R. (2016). A review on solar tunnel greenhouse drying system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 196-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.057>

- Pongsuttiyakorn, T., Sooraksa, P., & Pornchaloempong, P. (2019). Simple Effective and Robust Weight Sensor for Measuring Moisture Content in Food Drying Process. *Sensors and Materials*, 2393–2404. doi: <https://doi.org/10.18494/SAM.2019.2347>
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905-910. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.084>
- Prakash, O., & Kumar, A. (2017). *Solar Drying Technology. Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment*. Singapore: Springer Nature Singapore. doi:DOI 10.1007/978-981-10-3833-4
- Ramadhani, U. H., Ramdhanian, L. N., Iskandar, H., Fudholi, A., & Abimanyu, H. (2025). Review of solar thermal technologies in sustainable animal agriculture farms: Current and potential uses. *Solar Energy*, 291(113374). doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113374>
- Ramaprasad, A., & Kashyap, S. (2024). Food Consumption, Loss, and Waste. *Sustainability*, 4846. doi:10.3390/su16114846
- Richiedei, D., & Trevisani, A. (2018). Shaper-Based Filters for the compensation of the load cell response in dynamic mass measurement. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 281-291. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.049>
- Sharabiani, V. R., Kaveh, M., Abdi, R., Szymanek, M., & Tanaś, W. (2021). Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Sci Rep*.
- Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1185–1210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Sharma, V. K., Sharma, S., & Garg, H. P. (1991). Mathematical modelling and experimental evaluation of a natural convection type solar cabinet dryer.

- Energy Conversion and Management*, 65-73.
doi:[https://doi.org/10.1016/0196-8904\(91\)90106-S](https://doi.org/10.1016/0196-8904(91)90106-S)
- Sianoun, N., Pongyeela, P., Chairerk, C., & Chungsiriporn, J. (2023). Thin Layer Drying Kinetics and Mathematical Modeling of Moisture Diffusivity in Cocoa Pod Husk (CPH). *Engineering Journal*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.4186/ej.2023.27.8.1>
- Srinivasan, G., & Muthukumar, P. (2021). A review on solar greenhouse dryer: Design, thermal modelling, energy, economic and environmental aspects. *Solar Energy*, 3-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.058>
- Valencia-Islas, J. O., Kacira, M., López-Cruz, I. L., Giacomelli, G., Ruiz-García, A., & Li, P. (2025). Toward a modeling and control approach based on the drying product in greenhouses. *Acta Horti*, 31-38. doi:<https://doi.org/10.17660/ActaHorti.2025.1426.5>
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., & Ranko, G. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2652-2670. doi:10.1016/j.rser.2012.01.007
- Weffort, V. R., & Lamounier, J. A. (2024). Hidden hunger - a narrative review. *Journal de Pediatria*, 10-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jped.2023.08.009>
- Yang, T., Zheng, X., Xiao, H., Shan, C., Yao, X., Li, Y., & Zhang, J. (2023). Drying Temperature Precision Control System Based on Improved Neural NetworkPIDController and Variable-Temperature Drying Experiment of Cantaloupe Slices. *Plants*, 12(2257). doi:<https://doi.org/10.3390/plants12122257>
- Zang, Y. z., Yao, X. D., Cao, Y. x., Niu, Y. b., Liu, H., Xiao, H. W., . . . Zhu, R. G. (2021). Real- time detection system for moisture content and color change in jujube slices during drying process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, 15539. doi:<https://doi.org/10.1111/jfpp.15539>

- Zhao, M. (2025). A Review of PID Controller Implementation Methods: From Analog Computers to Digital Systems. *Applied and Computational Engineering*, 60-67. doi:10.54254/2755-2721/2025.CH24656
- Zhou, B., & Zhang, J. (2020). Design of DC Motor PID Control System Based on STM32 Single Chip Microcomputer. *International Core Journal of Engineering*, 62-67. doi:10.6919/ICJE.202007_6(7).0008

3. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA BALANZA PARA EL MONITOREO EN TIEMPO REAL DEL PESO DE MUESTRAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

3.1 Resumen

Durante el proceso de deshidratado en un secador solar tipo invernadero se pueden alcanzar temperaturas superiores a las consideradas como confort térmico ($>60^{\circ}\text{C}$) para humanos. Dado que resulta esencial monitorear, de manera continua, el secado del producto, esta actividad puede representar un riesgo para la salud humana. El objetivo de este estudio fue diseñar, construir y evaluar un dispositivo capaz de medir en tiempo real el peso de muestras del producto dentro de un secador solar y almacenar los datos obtenidos. Para ello se seleccionó una celda de carga modelo PA1 de la marca Flintec, un amplificador ADC modelo HX711 y módulos adicionales para registrar la hora, fecha y temperatura de la celda de carga. La carcasa del dispositivo fue diseñada e impresa en filamento ABS con capacidad de soportar temperaturas de hasta 80°C . Se realizó una calibración en función de la temperatura, obteniéndose una ecuación lineal que describe adecuadamente el comportamiento de la celda de carga. Posteriormente, se efectuaron cuatro experimentos de secado con muestras de jitomate a 40°C , 50°C , 60°C y 70°C para evaluar el desempeño de la balanza. Los resultados muestran que la balanza construida presentó una precisión superior a la de una balanza comercial y una correlación casi perfecta con los datos de referencia ($R = 0.99$). Sin embargo, en el experimento realizado a 60°C la prueba t de Student indicó una diferencia estadísticamente significativa entre ambos sistemas de medición y se requiere de futuros estudios para temperaturas mayores.

Palabras clave: secado solar, celda de carga, balanza, contenido de humedad, jitomate

DESIGN, CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A SCALE FOR REAL-TIME MONITORING OF SAMPLE WEIGHT FOR MOISTURE CONTENT ESTIMATION

3.2 Abstract

During the dehydration process in a greenhouse-type solar dryer, air temperatures higher than those considered as thermal comfort are often reached ($>60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Although continuous monitoring of the product drying is essential, this activity may pose a risk to human health. The objective of this study was to design, construct, and evaluate a device capable of measuring in real time the weight of product samples inside a solar dryer and storing the obtained data. For this purpose, a PA1 load cell from Flintec, an HX711 ADC amplifier, and additional modules for recording time, date, and load-cell temperature were used. The housing of the device was designed and 3D-printed using an ABS filament, capable of withstanding temperatures up to $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperature-dependent calibration was performed, obtaining a linear equation that adequately described the behavior of the load cell. Subsequently, four drying experiments with tomato were conducted at $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ to evaluate the weighting device. The results showed that the constructed balance exhibited higher accuracy than manual measurements acquired with a commercial balance and had an almost perfect correlation with the reference data ($R = 0.99$). However, in the experiment carried out at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the t-test indicated a statistically significant difference between both measurement systems and future research is needed when higher temperatures are involved.

Keywords: solar drying, load cell, balance, moisture content, tomato

3.3 Introducción

El secado solar es la técnica más antigua para preservar productos agrícolas que se ha practicado en todo el mundo. La forma más simple de secado es llamado secado natural, el cual consiste en colocar directamente el producto sobre el suelo o piso de hormigón al sol abierto durante varios días. Durante este proceso, el producto puede estar expuesto a diversos tipos de contaminación como lo son polvo y plagas, así como pérdidas por aves y animales (Prakash & Kumar, 2014).

El deshidratado se define como el proceso térmico de eliminación de sustancias volátiles para obtener un producto sólido. Durante el proceso de secado térmico, se transfiere energía principalmente en forma de calor del entorno o ambiente para evaporar el contenido de la humedad superficial del sólido, por lo que el contenido de la humedad interna se transfiere a la superficie evaporándose igualmente. La transferencia de energía del entorno circundante al sólido ocurre por radiación y convección o alguna mezcla de estos. El proceso de eliminación de la humedad superficial depende de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo del aire, así como la presión del medio y área expuesta del sólido. El proceso de transferencia del contenido la humedad interna a la superficie depende principalmente de la estructura física del sólido, la temperatura y su contenido de humedad (Mujumdar, 2014).

Un secador solar tipo invernadero se puede clasificar como un sistema de secado directo o mixto. En un sistema de secado directo el producto se coloca dentro de una cámara con cubierta transparente, por lo que la radiación solar incide directamente sobre el producto, permitiendo el proceso de secado. Por el contrario, en un sistema de secado indirecto el producto se coloca en una cámara de secado cerrada y oscura, en donde se hace circular aire el cual se calienta con un colector solar. Un sistema de secado mixto combina los sistemas anteriores (Prakash & Kumar, 2017). El volumen de aire dentro de la cubierta y el piso se convierte en la cámara de secado, calentando el aire dentro y elevando su temperatura. Al mismo tiempo la cubierta al ser transparente permite que una parte de la radiación solar incida directamente sobre el producto. Los

invernaderos para secado usualmente usan extractores que provocan un flujo de aire forzado y sirven para extraer el aire saturado de humedad y con altas temperaturas.

Trabajar en un secador solar tipo invernadero de escala industrial permite además de deshidratar grandes volúmenes de producto, que los operadores puedan introducirse con facilidad para realizar labores de limpieza, colocación y extracción del producto a secar, monitoreo del secado, etc. En el proceso de deshidratado dentro un secador solar tipo invernadero se deben realizar manualmente casi todas las labores. Una parte muy importante al realizar experimentos para evaluar la calidad del proceso de secado, como determinar cinéticas de secado, es la medición de manera continua del peso de muestras sobre el producto para estimar su contenido de humedad. Dado que esta etapa ocurre durante el transcurso del día cada cierto intervalo de tiempo, se vuelve una actividad agotadora e incluso peligrosa debido a las altas temperaturas que se pueden alcanzar dentro del secador. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-015-STPS-2001, tales condiciones térmicas elevadas representan un factor de riesgo laboral que debe evaluarse y controlarse ya que la exposición prolongada puede ocasionar agotamiento térmico golpes de calor (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2001). Es por eso que se han considerado distintos métodos para el monitoreo automático del peso del producto a deshidratar como una medida directa del contenido de humedad.

Es posible encontrar en la literatura diversos dispositivos para medir el peso durante el proceso de secado. Pramono et al. (2022) monitorearon el contenido de humedad de *Moringa oleifera* en tiempo real con el peso medido con una celda de carga, dentro de un secador solar tipo invernadero. Los resultados comparados con un medidor de humedad gravimétrico de la marca Metter Toledo modelo HB43-S fueron un R^2 y MAE de 0.9815 y 3.78% respectivamente. Al igual Pongsuttiyakorn et al. (2021) usaron una celda de carga de bajo costo para medir el contenido de humedad de la piña en un secador tipo cabina a una temperatura de 70 °C, usando un filtro pasa bajas y otro de Kalman. Catania et al. (2020)

diseñaron un sistema de monitoreo y control en tiempo real para el proceso de secado de hierbas aromáticas. Su diseño se basa en placas Arduino Mega 2560 con ayuda de nueve celdas de carga Siemens 7MH5102-1PD00 y un sensor de temperatura y humedad DHT22, usados en un secador industrial.

Zang et al. (2021) diseñaron un algoritmo de filtrado de datos de onda y un programa de detección de contenido de humedad en tiempo real. Se estudió la tecnología clave del procesamiento de imágenes, incluyendo la adquisición, el almacenamiento, la lectura, la escala de grises, el realce, la operación morfológica, la restauración y el algoritmo de conversión para obtener los valores de luminosidad (L^*), rojez (a^*) y amarillez (b^*). El error relativo promedio del contenido de humedad y los valores de L^* , a^* y b^* entre la detección manual y la del sistema fue del 1.4 %, 1.7 %, 6.3 % y 3.9 %, respectivamente. Por su parte Sharabiani et al. (2021) utilizaron redes neuronales artificiales para analizar y evaluar dos métodos de secado diferentes para la deshidratación de manzana: secado convectivo (CD) y secado por microondas (MD). Según los resultados de la ANN, los mejores valores de R^2 para la predicción de MR en CD y MD fueron de 0.9993 y 0.9991, respectivamente. Gapusan et al. (2024) desarrollaron un sensor de humedad multiproducto basado en características no destructivas. El sistema aprovecha la visión artificial y el aprendizaje automático para predecir con precisión el contenido de humedad en hojas frescas de guayaba, guanábana y lagundi (*Vitex negundo*). El modelo alcanzó un R^2 de 0.9412, con un error cuadrático medio (RMSE) de 1.2059 % y un error absoluto medio (MAE) de 0.8583 %.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar, construir y evaluar un dispositivo para monitorear el peso de muestras para estimar el contenido de humedad del producto durante el proceso de secado, capaz de soportar condiciones de alta temperatura y humedad en el aire.

3.4 Materiales y Métodos

3.4.1 Celda de Carga

La celda de carga utilizada fue el modelo PA1 de la marca Flintec de máximo 3 Kg. Es una celda de carga de un solo punto diseñada para ser usada en plataformas pequeñas (Figura 3-1). Está construida en aluminio con una protección IP67, con un rango de operación (RO) de -20 a 65°C. El error combinado y error por fluencia es de $\pm 0.10 \% \cdot RO$ en ambos casos. El error por fluencia es importante ya que indica la variación de la señal de salida cuando se mantiene una carga constante durante un periodo de tiempo (30 minutos). El error de carga no centrada es de $0.16 \% \cdot RO \cdot cm^{-1}$.

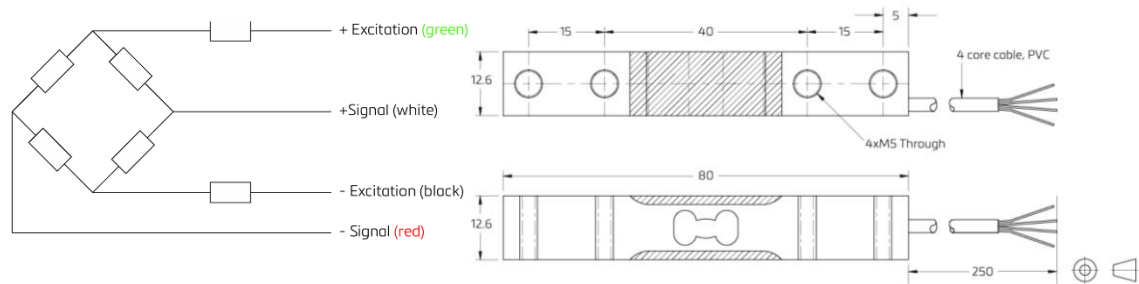


Figura 3-1. Dimensiones y características de la celda de carga Flintec (modelo: PA1). Extraído de hoja de datos del fabricante

3.4.2 Balanza digital para medición en tiempo real

La balanza contempla la celda de carga, el microcontrolador, un termopar, una pantalla LCD y demás módulos para obtener la fecha y hora y así guardar los datos (Cuadro 3-1).

Cuadro 3-1. Materiales usados en la construcción de la balanza digital.

Nombre	Descripción
Placa de desarrollo Arduino uno (modelo: R3)	Microcontrolador ATMEGA 328P encargado de adquirir y procesar las señales de los sensores de la balanza
Módulo de reloj RTC (modelo: DS3231)	Módulo que proporciona la fecha y hora
Módulo lector de tarjeta microSD (modelo: MLM606182025)	Módulo encargado de guardar los datos de la celda de carga, fecha y hora en una tarjeta microSD
Pantalla LCD 16x2 Convertidor ADC (modelo: HX711 ADC)	Módulo encargado de la visualización de los datos Amplificador y convertidor ADC de 24 bits
Termopar (tipo k)	Encargado de proporcionar la temperatura en grados Celsius con una precisión de $\pm 4^{\circ}\text{C}$, con un error combinado de $\pm 3^{\circ}\text{C}$
Convertidor digital MAX6675	Convertidor digital para termopares tipo k con compensación de unión fría y salida SPI

3.4.3 Calibración

La Ecuación (1) para calcular la masa usando una celda de carga es:

$$M = \frac{S - S_0}{F} \quad (20)$$

Donde M es la masa (gramos), S es la señal de la celda de carga (valor digital o mV), S_0 es la señal de la celda sin carga (valor digital o mV) y F es el factor de conversión para mejorar la precisión (adimensional).

Una vez construida la balanza se realizó un experimento para realizar una calibración por temperatura debido a la desviación de la medición por el incremento en la temperatura. Dicho experimento se realizó colocando una masa patrón de 500 gramos en la balanza para posteriormente medir los valores “crudos” entregados por la celda de carga y el módulo HX711, a temperaturas que oscilaron entre 7.5°C y 70°C , utilizando un termopar tipo K para el registro térmico. Con los datos obtenidos se construyó un gráfico que relaciona la señal de la celda de carga con la temperatura, al cual se ajustó una línea de tendencia mediante regresión lineal. Este ajuste permitió calcular el coeficiente de

determinación (R^2), mostrando el grado de correlación y la precisión del modelo empleado para compensar el efecto térmico sobre la medición del peso.

3.4.4 Experimentos de secado

Evaluación de la balanza

Se realizaron 4 experimentos a diferentes temperaturas (40°C, 50°C, 60°C y 70°C) en un horno eléctrico marca Felisa modelo FE-291AD, que tiene una resolución y precisión de 1°C y que opera con un sensor de temperatura Pt-100. Se colocaron rodajas de 5 mm de espesor de jitomate en una charola dentro de un horno precalentado a la temperatura deseada y se registraron los datos de hora, peso de la muestra y temperatura de la celda de carga en la memoria microSD. Cada 15 minutos se realizó el pesaje de la muestra con una báscula de precisión marca Velab modelo VE-1000, que tiene una capacidad de 1000 gramos, una legibilidad y repetibilidad de ± 0.01 gramos y que funciona con una galga extensiométrica. Los experimentos terminaron cuando el peso de la muestra era constante.

3.4.5 Contenido de humedad y razón de humedad

El método para estimar el contenido de humedad en el experimento fue el método gravimétrico. El método gravimétrico es una técnica de laboratorio estándar que es ampliamente utilizado en una gran variedad de industrias (alimenticia, construcción, textiles, agricultura y química). El contenido de humedad se calcula con base en los pesos inicial y final de la muestra, asumiendo que toda la pérdida de peso se debe a la eliminación de agua e ignorando la pérdida de otros compuestos volátiles. (Zambrano, Dutta, G. Mercer, & L. MacLean, 2019). Las condiciones de preparación y secado (p. ej., tiempo, temperatura, tipo de horno, humedad y presión) influyen en la eficiencia de la eliminación de la humedad, y el tiempo de deshidratado resultante necesario para completar una prueba puede variar de horas a días (Bradley, 2010).

El contenido de humedad se calculó con la Ecuación (2):

$$Mt = \frac{W_t - W_s}{W_s} * 100 \quad (21)$$

Donde Mt es el contenido de humedad (%), W_t es el peso total de la muestra en cada intervalo de tiempo (gramos), W_s es el peso sólido de la muestra (gramos) (Pongsuttiyakorn et al., 2021).

La razón de humedad se calculó con la siguiente Ecuación (3):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (22)$$

Donde MR es la razón de humedad (decimal), M_t es el contenido de humedad en cada intervalo de tiempo (%), M_e es el contenido de humedad de equilibrio (%), M_0 es el contenido de humedad inicial (%) (Sharabiani et al., 2021).

3.4.6 Análisis estadístico: pruebas de media

Se realizó un análisis de medias usando la prueba t para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos muestras emparejadas. En este caso para comparar los datos obtenidos de la balanza construida con los de la balanza comercial a través de la medición manual de las muestras.

Sean $(X_{11}, X_{21}), (X_{12}, X_{22}), \dots, (X_{1n}, X_{2n})$ un conjunto de n pares de observaciones, donde asumimos que:

- La media y varianza de la población representada por X_1 son μ_1 y σ_1^2 .
- La media y varianza de la población representada por X_2 son μ_2 y σ_2^2 .

Definimos las diferencias entre cada par de observaciones como:

$$D_j = X_{1j} - X_{2j}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Se asume que las diferencias D_j siguen una distribución normal con media:

$$\mu D = E(X_1 - X_2) = E(X_1) - E(X_2) = \mu_1 - \mu_2 \quad (5)$$

Y varianza σ_D^2 .

Por lo tanto, para probar la hipótesis de la diferencia entre μ_1 y μ_2 puede realizarse mediante una prueba t de una muestra aplicada a μ_D . En concreto:

Probar $H_0: \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0$ contra $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0$ es equivalente a:

$$H_0 : \mu_D = \Delta_0$$

$$H_1 : \mu_D \neq \Delta_0$$

El estadístico T se calcula como:

$$T_0 = \frac{\bar{D} - \Delta_0}{S_D / \sqrt{n}} \quad (6)$$

Donde $\bar{D}$ es la media de las diferencias, S_D es la desviación estándar de las diferencias y n el número de pares (Montgomery & Runger, 2006)

Las hipótesis nula y alternativa son las siguientes:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$; No hay diferencia significativa entre las medias de peso registradas por las dos balanzas.

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$; Existe una diferencia significativa entre las medias de peso registradas por las dos balanzas.

Se usó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Diseño de la balanza digital

Diagrama de conexión

A la celda de carga se le agregó un amplificador HX711 utilizando la banda de 128 Hz. Los datos de masa se muestran en una pantalla LCD de 16x2 en unidades de gramos, también se pueden guardar en una tarjeta microSD (Figura 3-2).

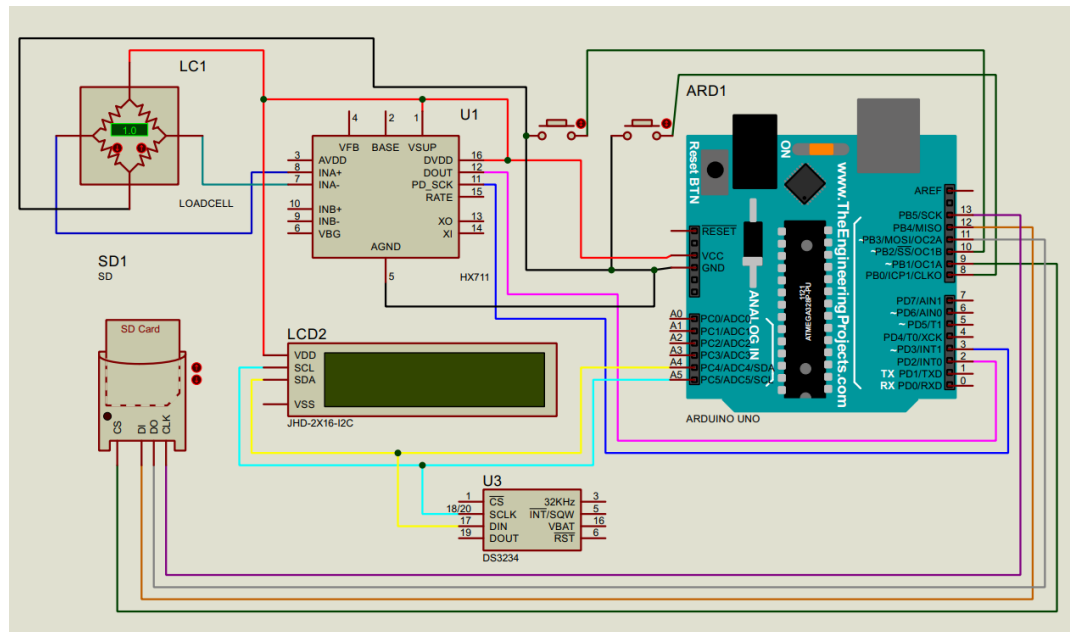


Figura 3-2. Diagrama de Conexión de los módulos con Arduino uno.

Proceso de construcción

Una vez diseñado el circuito, se diseñó una carcasa que cubriera los componentes electrónicos en un programa de diseño CAD (Figura 3-3a). Posteriormente se imprimió el prototipo con plástico ABS (resistente a altas temperaturas) en una impresora 3D (Figura 3-3b).



(a)



(b)

Figura 3-3. Proceso de construcción de la carcasa. (a) diseño CAD del modelo, (b) impresión 3D con filamento ABS.

3.5.2 Calibración de la balanza digital (con respecto a la temperatura)

Los puntos obtenidos al realizar la calibración de la balanza describen una tendencia casi lineal (Figura 3-4), por lo que se ajustó la ecuación de regresión lineal simple con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9807$. Dicha ecuación lineal se utilizó posteriormente para corregir las lecturas de la celda de carga.

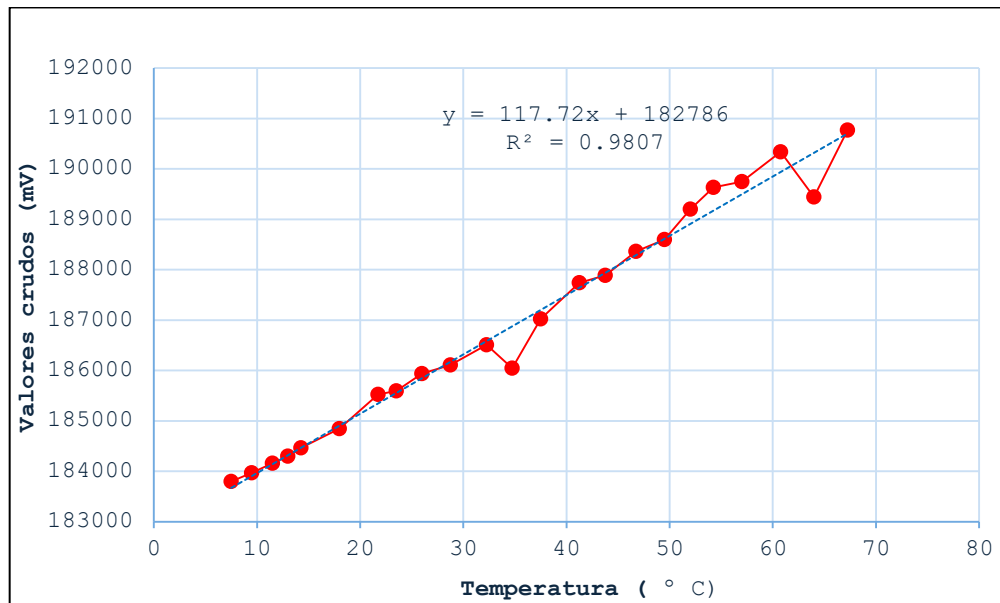


Figura 3-4. Puntos de la calibración por temperatura obtenidos de la balanza.

3.5.3 Evaluación de la balanza digital

Los experimentos realizados fueron a las siguientes temperaturas:

- Experimento 1: 40°C
- Experimento 2: 50°C
- Experimento 3: 60°C
- Experimento 4: 70°C

Se registraron las temperaturas de la celda de carga en los experimentos (Figura 3-5). Se observa que la temperatura está 3 a 5 grados Celsius por debajo de la temperatura del aire dentro del horno, esto debido a la capa aislante de la carcasa de plástico poroso.

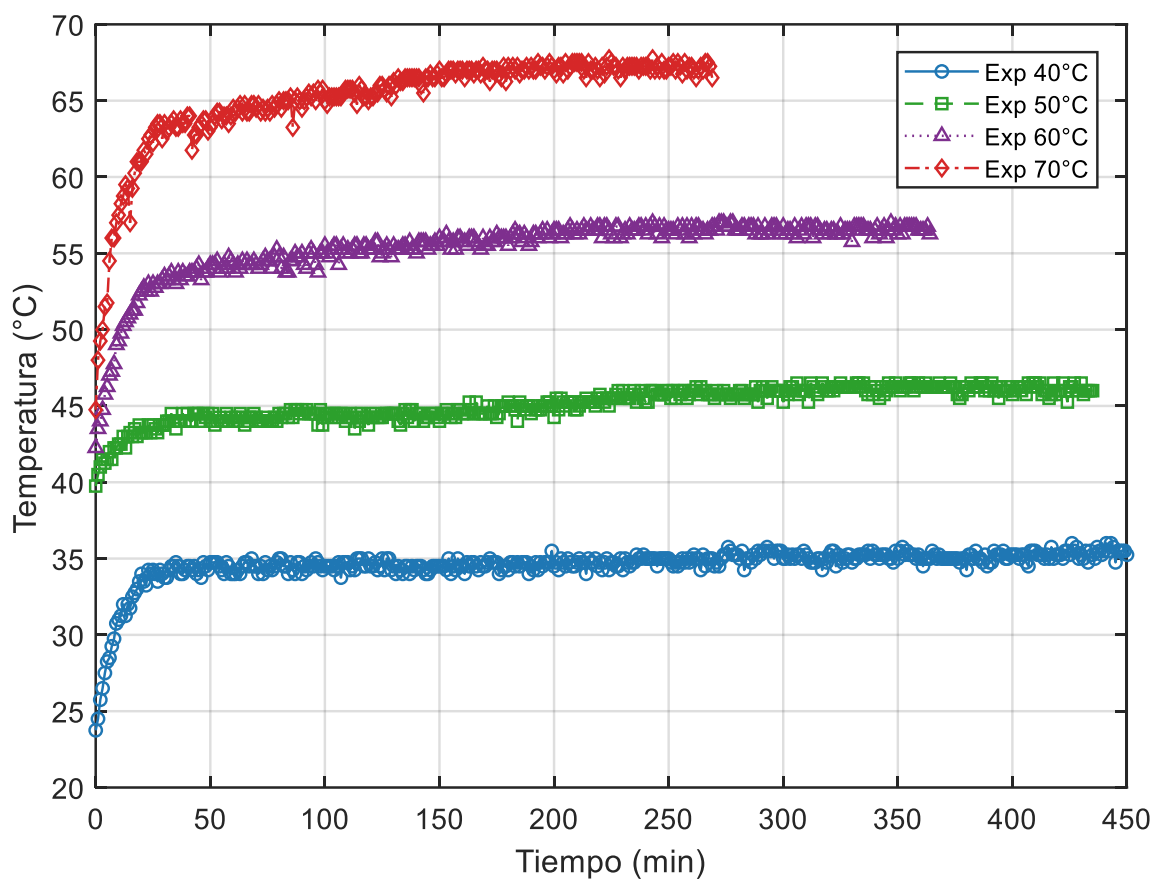


Figura 3-5. Temperaturas de la celda de carga de la balanza construida en los experimentos de secado a 4 diferentes temperaturas.

La balanza construida sigue correctamente los datos registrados manualmente, sin embargo, al final de cada experimento cuando el producto pierde gran parte del agua, la balanza construida tiene más ruido que cuando el peso es grande al inicio (Figura 3-6).

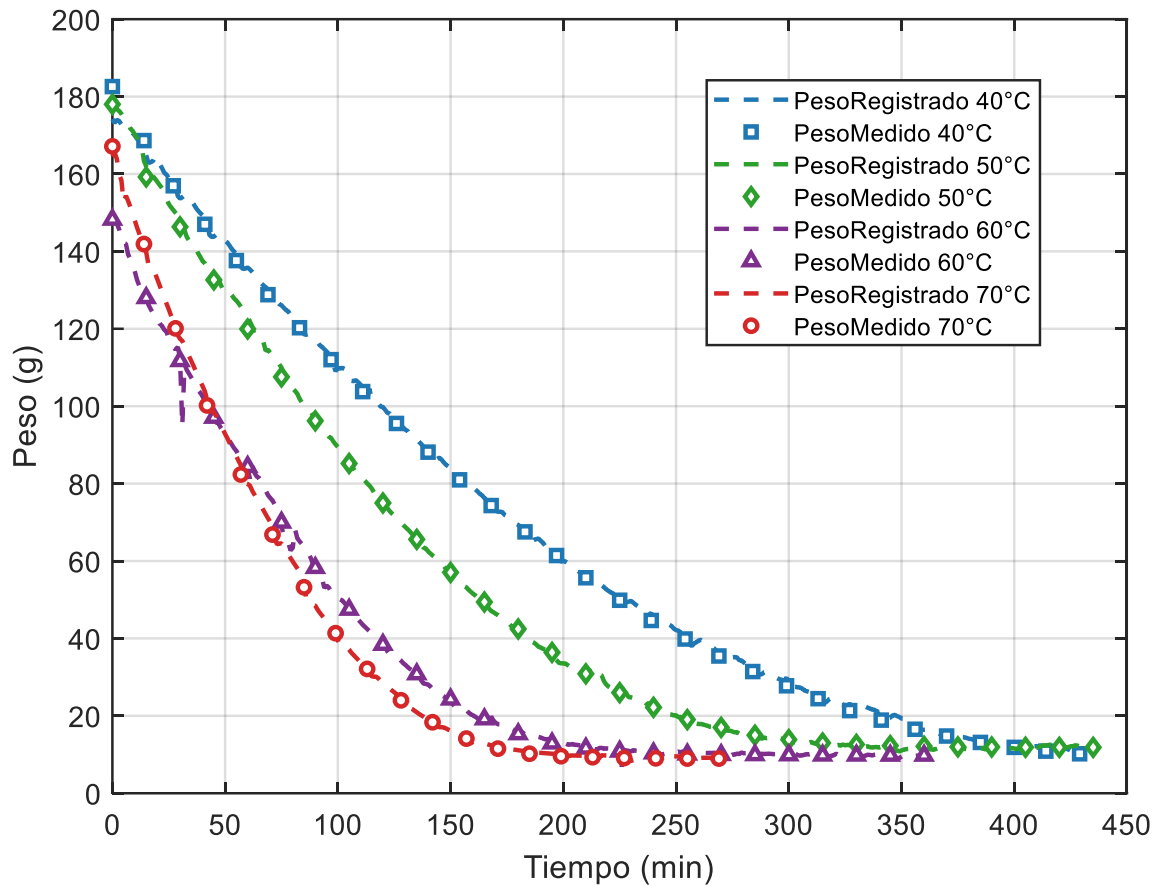


Figura 3-6. Pesos registrados en la balanza construida y tomados manualmente en los 4 experimentos.

A pesar de que los pesos de las muestras coinciden en ambas balanzas (Figura 3-6), se observa que el cálculo del contenido de humedad y razón de humedad varían en gran medida sobre todo al final de los experimentos (Figura 3-7 y Figura 3-8), siendo el experimento 2 (50°C) y el experimento 3 (60°C) los que más se diferencian de las muestras realizadas manualmente. Dado que al final el ruido de la celda de carga varia hacia arriba como hacia abajo del contenido de humedad de equilibrio, se pueden ver puntos por debajo de cero (Figura 3-8) correspondiente a la razón de humedad. Dicho ruido se podría suavizar con ayuda de un filtro de datos como el de Kalman.

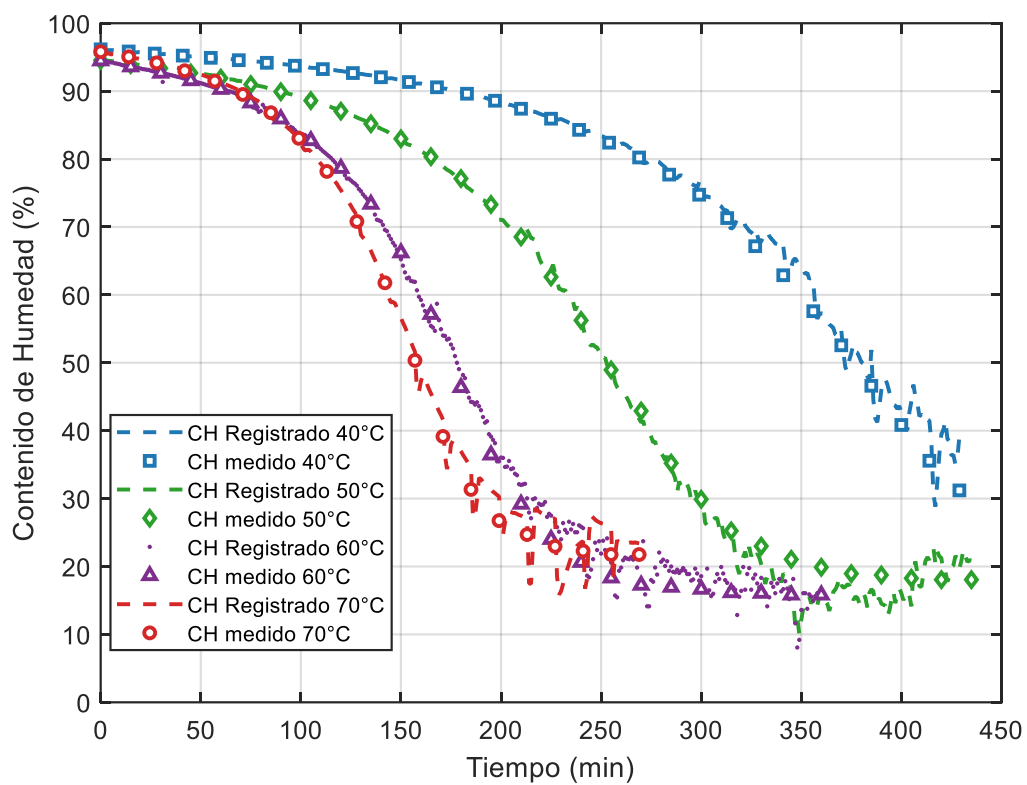


Figura 3-7. Contenido de Humedad del jitomate.

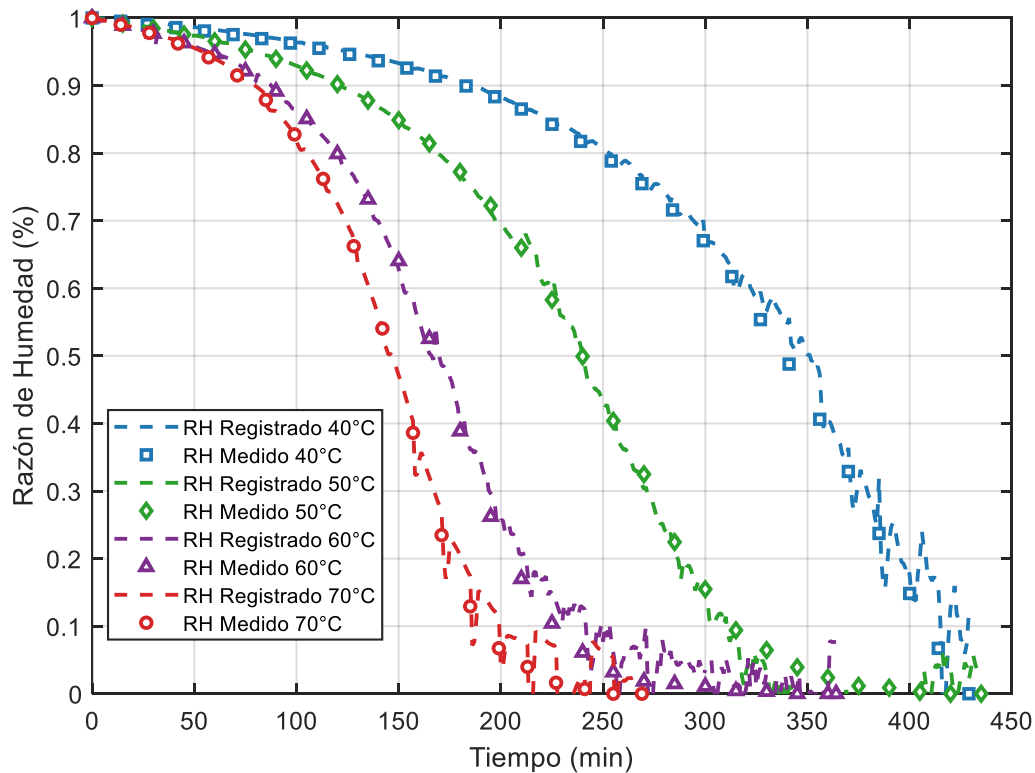


Figura 3-8. Razón de Humedad del jitomate.

3.5.4 Análisis estadístico

Las medias en general en todos los experimentos no difieren mucho entre ambas balanzas (Cuadro 3-2). La balanza construida presentó una mayor precisión en los primeros tres experimentos de 40 °C, 50 °C y 60 °C, pero en el último de 70 °C esta precisión se redujo con respecto a las mediciones obtenidas con la balanza VELAB. El número de observaciones fue disminuyendo a medida que se aumentaba la temperatura debido a la reducción en el tiempo de secado.

Cuadro 3-2. Medias, varianzas y número de observaciones en experimentos de peso medido y balanza construida a distintas temperaturas.

Experimentos	Media	Varianza	Número de observaciones
Experimento a 40°C			
Peso Medido	69.43	2794.18	31
Peso de la balanza construida	69.81	2711.89	31
Experimento a 50°C			
Peso Medido	53.76	2698.77	30
Peso de la balanza construida	53.48	2620.22	30
Experimento a 60°C			
Peso Medido	39.90	1795.67	25
Peso de la balanza construida	40.06	1794.84	25
Experimento a 70°C			
Peso Medido	47.19	2464.92	20
Peso de la balanza construida	46.91	2483.61	20

La diferencia promedio entre las dos balanzas en gramos es muy pequeña y fluctúa 1.75 gramos en la prueba a 40°C siendo la más alta y 0.28 gramos a 30°C siendo la más baja, y dado que es positiva, la balanza construida tiende a dar valores mayores que la comercial (Cuadro 3-3). La precisión relativa de la balanza construida se mantuvo entre 0.69% y 2.52%, lo que indica una alta precisión. El coeficiente de Pearson muestra una correlación casi perfecta en todos los experimentos, por lo que la balanza construida sigue muy de cerca los valores de referencia con la balanza comercial con una R y una R² de 0.99, siendo ligeramente superior que los resultados obtenidos por Pramono et al. (2022). Se observa que en tres de las cuatro pruebas no hay una diferencia significativa

entre las dos balanzas, siendo la prueba a 60°C donde si existe una diferencia significativa ($t = -2.87$, $p = 0.01 < 0.05$) (Cuadro 3-3).

Cuadro 3-3. Comparación de medias entre la balanza comercial y la construida mediante prueba t pareada.

Parámetro	Exp1 40°C	Exp2 50°C	Exp3 60°C	Exp4 70°C
Bias	0.38	0.27	0.17	0.27
SD	1.75	1.09	0.28	0.98
CV	2.52	1.99	0.69	2.01
R	0.99	0.99	0.99	0.99
Grados de libertad	30	29	24	19
Estadístico t	-1.21	1.41	-2.87	1.26
P($T \leq t$) una cola	0.12	0.08	0.00	0.11
Valor crítico de t (una cola)	1.69	1.69	1.71	1.73
P($T \leq t$) dos colas	0.23	0.17	0.01	0.22
Valor crítico de t (dos colas)	2.04	2.05	2.06	2.09

3.6 Conclusiones

Se diseñó y construyó una balanza digital capaz de guardar los datos del peso, temperatura, fecha y hora en una memoria externa para su posterior análisis de los datos. Esto con la intención de desarrollar un prototipo capaz de soportar las condiciones de temperatura y humedad dentro de un secador solar tipo invernadero. El prototipo desarrollado soportó las altas temperaturas sin llegar a la deformación del material a la temperatura de 70 °C. La calibración de la balanza por temperatura sigue una tendencia casi lineal, por lo que con la ecuación obtenida se realizó una corrección en tiempo real de las medidas dadas por la celda de carga.

A través de la evaluación con comparación de medias se acepta la hipótesis nula para el Experimento 1 (40°C), el Experimento 2 (50°C) y para el Experimento 4 (70°C), por lo que la prueba t no detectó una diferencia estadísticamente significativa entre sus medias. Para el experimento 3 (60°C) se rechaza la hipótesis nula.

Para mayores temperaturas, se requiere de más experimentación para evaluar el comportamiento de la balanza digital. Este dispositivo mejora las condiciones para desarrollar experimentos reduciendo la exposición de los trabajadores a condiciones fuera del confort humano.

3.7 Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento para llevar a cabo los experimentos y al posgrado IAUIA por facilitar el acceso al secador solar tipo invernadero. A la SECIHTI por la beca otorgada durante el desarrollo del programa de maestría.

3.8 Literatura citada

- Bradley, R. L. (2010). Moisture and Total Solids Analysis. In S. Nielsen, *Food Analysis* (pp. 85-104). doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1478-1_6
- Catania, P., Gaglio, R., Orlando, S., Settanni, L., & Vallone, M. (2020). Design and Implementation of a Smart System to Control Aromatic Herb Dehydration Process. *Agriculture*, 10(8), 332. doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture10080332>
- Gapusan, N. A., Gumapac, E., Quinia, S. M., Reyes, A. F., Santos, L., Castaño, J. D., . . . Balila, E. (2024). Design and Development of a Non-Destructive Feature-Based Multi-Commodity Moisture Content Sensor System Using Machine Learning and Computer Vision. *2024 3rd International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, 1-7. doi:10.1109/ICONAT61936.2024.10774723
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2006). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. New York: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/b17208>
- Pongsuttiyakorn, T., Sooraksa, P., & Pornchaloempong, P. (2021). Surface Temperature Limit as Food Quality Control in Automatic Learning Model for Drying Process. *2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, 150-153. doi:10.1109/ICEAST52143.2021.9426256
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905-910. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.084>

- Prakash, O., & Kumar, A. (2017). *Solar Drying Technology. Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment*. Singapore: Springer Nature Singapore. doi:DOI 10.1007/978-981-10-3833-4
- Pramono, E. K., Taufan, A., Novrinaldi, Putra, S. A., Karim, M. A., Haryanto, A., & Kuala, S. I. (2022). Performance Tests of Loadcell as Real-Time Moisture Content Sensor: Case Study Moringa Oleifera Leaves Drying. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1024, 1-10. doi:10.1088/1755-1315/1024/1/012018
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2001). *NOM-015-STPS-2001, Condiciones térmicas elevadas o abatidas – Condiciones de seguridad e higiene*. México: Diario Oficial de la Federación. Obtenido de https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=728016
- Sharabiani, V. R., Kaveh, M., Abdi, R., Szymanek, M., & Tanaś, W. (2021). Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. *Scientific Reports*, 11(9155), 1-12. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-021-88270-z>
- Zambrano, M. V., Dutta, B., G. Mercer, D., & L. MacLean, H. (2019). Assessment of moisture content measurement methods of dried food. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 484-496. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.006>.
- Zang, Y. z., Yao, X. D., Cao, Y. x., Niu, Y. b., Liu, H., Xiao, H. W., . . . Zhu, R. G. (2021). Real- time detection system for moisture content and color change in jujube slices during drying process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45, e15539. doi:<https://doi.org/10.1111/jfpp.15539>

4. CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO DE UN SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO

4.1 Resumen

El deshidratado de productos agrícolas en un sistema secador solar tipo invernadero (SSSTI) permite procesar cantidades industriales de producto, incrementando la escala de operación, pero manteniendo aislado el producto de la intemperie y contaminación. Sin embargo, es fundamental mantener la temperatura del material por debajo de un valor crítico para preservar compuestos bioactivos sin sacrificar tiempo de secado o calidad del producto. El objetivo de este estudio fue evaluar dos estrategias de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y una estrategia de control encendido-apagado (ON/OFF) de deshidratado de jitomate en un SSSTI. Un controlador PID para la temperatura del aire, un controlador PID basado en la temperatura del producto y un controlador ON/OFF de la temperatura del aire. Para ello, se realizaron dos experimentos de secado con el fin de obtener las funciones de transferencia de la temperatura del aire y temperatura del producto. Se llevó a cabo un proceso de identificación del sistema mediante el algoritmo de optimización enjambres de partículas (PSO, particle swarm optimization), ajustando modelos de primer orden con retardo. Para el diseño de los controladores se usó la herramienta PID Tuner de MATLAB y, en tres experimentos adicionales, se evaluó su desempeño. Los resultados mostraron que el controlador PID es superior al controlador ON/OFF ya que permitió una reducción del tiempo de secado del producto y del tiempo de operación de los extractores. Por lo tanto, es una alternativa más económica. Además, presentó menor sobre elongación y oscilación alrededor de la temperatura de referencia, manteniendo estabilidad bajo condiciones de nubosidad ligera (perturbación). Tanto la temperatura del aire como la del producto se mantuvieron por debajo de 55 °C con su respectivo control al encender ambos extractores. Se recomienda contrastar estos resultados con métodos de control más avanzados y robustos (como control en espacio de estados y control inteligente), adecuados para sistemas altamente no lineales como el SSSTI.

Palabras clave: secado solar, invernadero, jitomate, control PID

PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE CONTROL OF A GREENHOUSE-TYPE SOLAR DRYER

4.2 Abstract

The dehydration of agricultural products in a greenhouse-type solar drying system (GTSDS) allows the processing of industrial-scale quantities of product, increasing the scale of operation, while keeping the product isolated from environmental exposure and contamination. However, it is essential to keep the material temperature below critical thresholds to preserve bioactive compounds and desirable physical properties of the product. The objective of this study was to evaluate two Proportional-Integral-Derivative (PID) control strategies and an ON/OFF control strategy for tomato dehydration in a GTSDS. A PID controller for air temperature, a PID controller based on product temperature, and an ON/OFF controller for air temperature. To achieve this, two drying experiments were conducted to obtain the transfer functions of air temperature and product temperature. A system identification process was performed using the particle swarm optimization (PSO) algorithm, fitting first-order models with delay. The PID Tuner tool in MATLAB was used for the design of the controllers, and their performance was evaluated during three additional experiments. The results showed that the PID controller is superior to the ON/OFF controller as it allowed a reduction in product drying time and fans operating time. Therefore, it is a more economical alternative. Furthermore, it exhibited less overshoot and oscillation around the reference temperature, maintaining stability under light cloud cover conditions (disturbances). Both air and product temperatures were kept below 55 °C with their respective control configurations when both exhaust fans were turned on. Future work should compare these results with more advanced and robust control techniques (such as state-space control and intelligent control), suitable for highly nonlinear systems such as the GTSDS.

Keywords: solar drying, greenhouse, tomato, PID control

4.3 Introducción

El deshidratado solar se ha utilizado desde hace mucho tiempo para la conservación de alimentos y productos agrícolas, realizándose principalmente al aire libre. (VijayaVenkataRaman et al., 2012). Los métodos más tradicionales de secado consisten en colocar los productos agrícolas sobre una superficie como tierra u hormigón expuestos al sol. Pero esto provoca que los productos sean vulnerables a la contaminación por suciedad, polvo, plagas de insectos, aves y roedores (Janjai & Bala, 2012). De acuerdo con la base de datos de pérdidas y desperdicio de alimentos de la FAO (2025), las mayores pérdidas se dan durante la etapa de postcosecha, con una mediana aproximada del 20%. Las fases de consumo doméstico y exportación muestran una amplia variabilidad y valores que pueden superar el 30% según el tipo de producto y la región analizada (FAO, 2025).

Mujumdar (2014) define el secado como el proceso de eliminación térmica de sustancias volátiles, principalmente humedad, con el fin de obtener un producto sólido. Este proceso ocurre en dos etapas fundamentales: primero, la transferencia de energía en forma de calor desde el entorno circundante para evaporar la humedad superficial del sólido. Segundo, la transferencia de la humedad interna hacia la superficie y su posterior evaporación como consecuencia del paso anterior. La velocidad de secado depende directamente de la rapidez con que se desarrollen ambos procesos. Por su parte Prakash & Kumar (2017) definen el secado o deshidratado como el proceso de remoción de humedad excesiva de un producto hasta un nivel deseado para su almacenamiento durante un periodo de tiempo.

Un secador solar es un dispositivo diseñado para reducir el contenido de humedad de productos agrícolas mediante el aprovechamiento de la energía solar, facilitando la conservación, mejora de calidad y reducción de pérdidas en postcosecha (El-Sebaï & Shalaby, 2012). Un secador solar tipo invernadero es una estructura cerrada con cubierta transparente (vidrio, policarbonato o polietileno estabilizado UV). Aprovecha el efecto invernadero para incrementar la

temperatura del aire en su interior y facilitar la evaporación de la humedad de los productos agrícolas. En este sistema, la radiación solar de onda corta atraviesa la cubierta, calienta tanto el producto como las superficies internas, y se transforma en radiación de onda larga que queda atrapada, elevando la temperatura del volumen de aire. Los invernaderos para secado usualmente tienen un piso de concreto y usan extractores que provocan un flujo de aire forzado y sirven para extraer el aire saturado de humedad y con alta temperatura. En su interior se colocan bandejas o estantes que permiten distribuir los productos, lo que posibilita secar grandes volúmenes de manera más higiénica y controlada que en el secado al sol abierto (Kumar et al., 2006; Sharma et al., 2009; Janjai & Bala, 2012).

Herrera et al. (2023) evaluaron tres modos de secado solar en rodajas de jitomate saladette; directo en invernadero, indirecto continuo e indirecto discontinuo comparándolos con la liofilización, y analizaron su efecto en la cinética, el consumo energético y la conservación de compuestos bioactivos; encontraron que el secado indirecto continuo fue el más rápido (8.5 h), mientras que el indirecto discontinuo destacó por su mayor eficiencia energética.

El control en los secadores solares constituye un elemento esencial para garantizar la eficiencia del proceso de secado y la calidad del producto final. Permite mantener estables variables críticas como la temperatura, la humedad relativa y el flujo de aire frente a la variabilidad de las condiciones ambientales. Diversos estudios resaltan que, sin un sistema de control adecuado, los secadores solares presentan fluctuaciones que afectan tanto la velocidad de secado como las propiedades organolépticas y nutricionales de los alimentos (Valencia-Islas et al., 2025; Arifin et al., 2024).

En la literatura reciente se han propuesto diversas estrategias de optimización para mejorar la sintonización de controladores en procesos industriales complejos. Paek et al. (2024) desarrollaron una regla robusta de ajuste óptimo para el controlador de rechazo activo de perturbaciones reducido (RADRC). Estos investigadores usaron un modelo de primer orden con tiempo muerto

(FOPDT) y resolvieron el problema de optimización mediante un algoritmo híbrido PSO-DE, lo que permitió mejorar la estabilidad y la robustez frente a perturbaciones. Por su parte, Chew et al. (2022) analizaron el desempeño de un proceso no lineal utilizando algoritmos genéticos (GA), comparándolos con PSO y métodos clásicos de sintonización. Demostraron que GA ofrece un mejor compromiso entre control servo y regulatorio en distintos niveles de operación. Ambos trabajos evidencian la relevancia de los métodos metaheurísticos como herramientas eficaces para la optimización de parámetros de control en sistemas dinámicos no lineales.

El control encendido apagado mejor conocido como ON/OFF representa la forma más básica de regulación en secadores solares. Aunque es sencillo de implementar, presenta limitaciones importantes: genera oscilaciones en la temperatura, no se adapta a cambios ambientales y puede comprometer la calidad del producto. No obstante, cuando se implementa tomando como referencia la temperatura del producto en lugar de la del aire, se logran mejores resultados en términos de eficiencia energética y estabilidad del secado (Valencia-Islas et al., 2025).

Por lo antes argumentado el objetivo de este estudio fue evaluar tres estrategias de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de deshidratado de jitomate en un SSSTI. Un controlador PID para la temperatura del aire, un controlador PID basado en la temperatura del producto y un controlador ON/OFF de la temperatura del aire, comparando las temperaturas máximas, tiempo de secado y costos de operación.

4.4 Materiales y Métodos

4.4.1 Descripción del SSSTI

El secador solar tipo invernadero (SSSTI) se ubica dentro de las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, México (19°29' N, 98°53' W, a 2250 msnm). El secador está orientado de Norte a Sur, con medidas en la base de concreto de 9 x 12m y una altura máxima de 3.4 metros, obteniendo un área del piso de 108 metros cuadrados y un volumen teórico de 240 metros cúbicos. La estructura

está fabricada en acero galvanizado y la cubierta en policarbonato celular de 6 milímetros de espesor con una transmisividad aproximada del 70%. El secador cuenta con cuatro entradas de aire en la parte frontal dando un área total de 2.5 m² y dos salidas de aire impulsadas por dos extractores en la parte trasera con un área de 0.42 m². Cada extractor cuenta con un motor monofásico de 0.5 Hp (373 W). En el interior del secador se encuentran 18 mesas de secado, dando un área útil de secado de 48.6 m² (Figura 4-1).

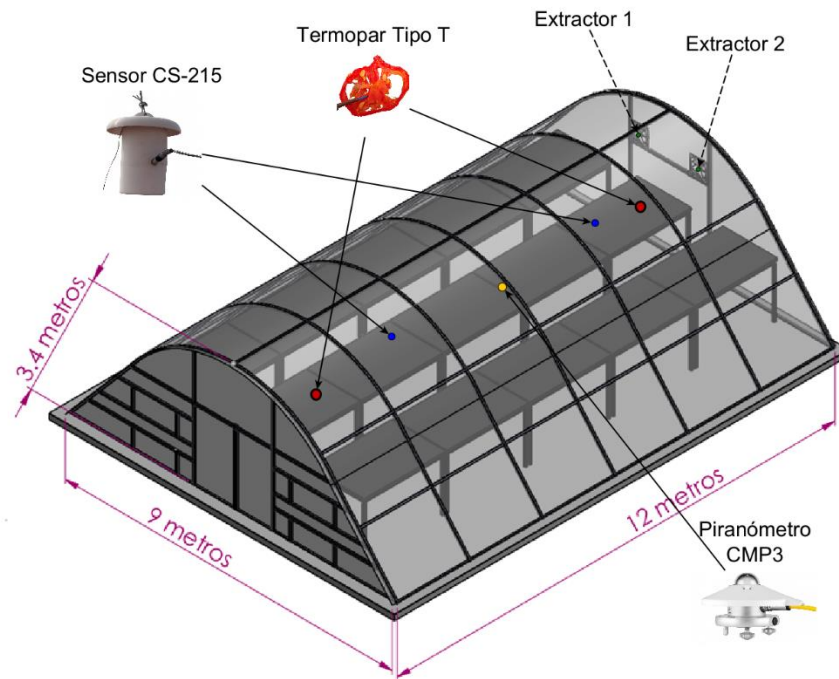


Figura 4-1. Diagrama del SSSTI

Caracterización de los extractores

Con el fin de controlar las revoluciones de los extractores, se realizó su caracterización en términos del flujo de aire y consumo eléctrico. Esto se logró al variar las revoluciones de cada motor desde el 55% al 100% con el fin no dañar los componentes internos del motor al trabajar a bajas revoluciones. Al igual para cada grafico se dibujó la línea de tendencia (Figura 4-2).

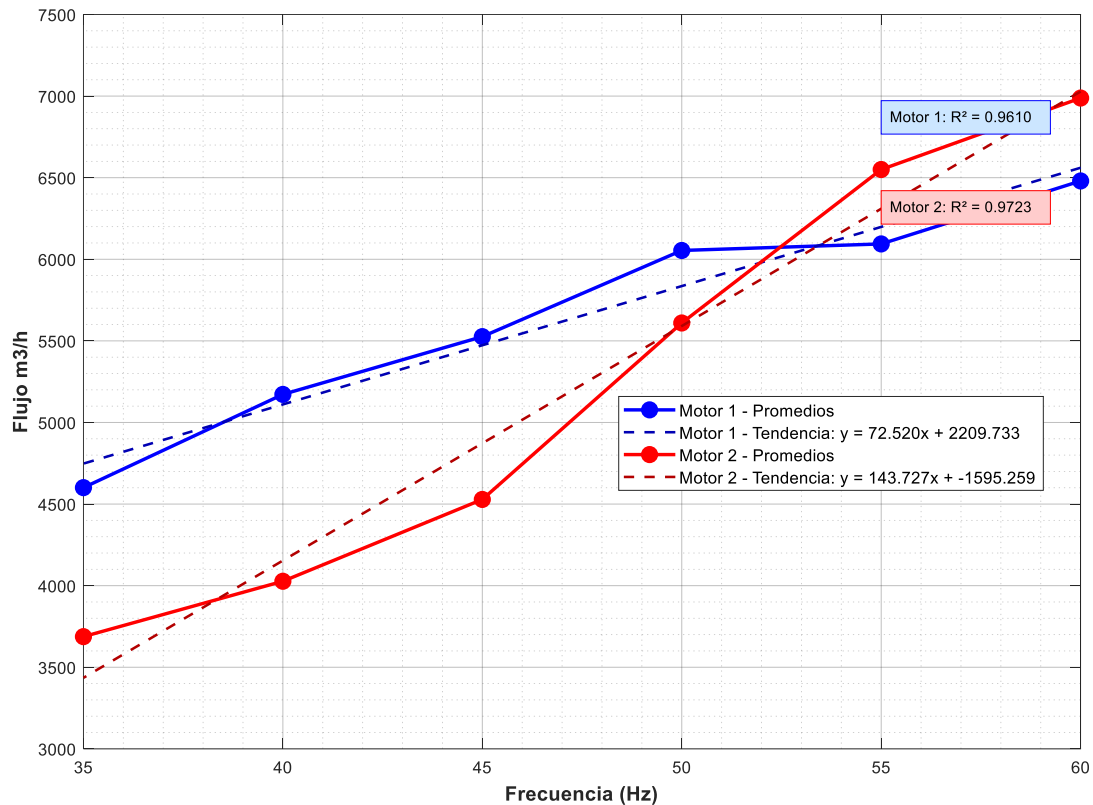


Figura 4-2. Caracterización de los extractores presentes en el SSSTI

4.4.2 Experimentos de secado y recolección de datos

Colecta de Datos y ubicación de los sensores

Para medir la temperatura interna del producto se utilizaron dos termopares tipo T insertadas en el centro de las rodajas de jitomate. Para las variables dentro del secador, se usaron dos sensores CS-215 (Campbell, Sci, USA) para la temperatura y humedad relativa del aire, colocados a una altura de 1.3 metros. Un piranómetro CMP3 se usó para medir la radiación solar (Figura 4-1). En el caso de las variables externas se tomaron los datos registrados por una estación meteorológica ubicada a 30 metros del secador, la temperatura y humedad relativa fueron medidos con un HMP60 y la radiación solar con un piranómetro SP-212-L (Cuadro 4-1).

Cuadro 4-1. Sensores dentro y fuera del SSSTI

Dentro del secador			
Sensores	Precisión	Resolución	Rango
CS-215L	±0.3°C (a 25°C) ±0.4°C (5° a 40°C) ±0.9°C (-40° a +70°C)	0.01°C	-40° a +70°C
	±2% (10% a 90%) a 25°C ±4% (0% a 100%) a 25°C	0.03% RH	0 a 100% RH (-20° a +60°C)
CMP3-L	24 a 32 $\mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^{-2}$	0-2000 W m^{-2}	300 a 2800 nm
Termopar tipo T	±0.6°C	0.02	-250°C y 400°C
Fuera del secador			
HMP60	De +10 a +30 °C ±0.5 °C	0.01°C	-40 a +60 °C
	De 0 a +40 °C ±3 %RH (0–90 %RH) ±5 %RH (90–100 %RH)	0.03% RH	0-100%
SP-212-L	± 5%	0.001 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	0 a 1250 W m^{-2}

Se realizaron 2 experimentos para obtener la función de transferencia del modelo por el método de la respuesta al escalón. El primer experimento se realizó el día 27 de febrero del 2025, para obtener la función de transferencia de la temperatura del aire. El segundo experimento se llevó a cabo el día 2 de marzo de 2025, para la temperatura del producto. En ambos casos se utilizaron 90 kilogramos de jitomate saladette adquiridos a productores del municipio Texcoco, México. La estrategia de control para estos dos experimentos fue que al alcanzar la temperatura del aire/producto los 50 °C se encienden ambos extractores al 100% de su capacidad y se apagaban hasta que el error fuera igual a 0.1 °C durante al menos 3 minutos. Este proceso duró todo el tiempo de secado del producto y se registraron las variables cada 2 segundos (Figura 4-3).



Figura 4-3. Jitomate durante los experimentos de secado

Una vez obtenido el diseño del controlador PID, se realizaron 2 experimentos para su implementación. El primer experimento se realizó el día 19 de agosto de 2025, para controlar la temperatura del aire. El segundo experimento se llevó a cabo el día 20 de agosto de 2025, para la temperatura del producto. En ambos casos se usaron 50 kg de jitomate saladette. Se realizó un tercer experimento con un controlador ON/OFF de la temperatura del aire en un rango entre 45 y 50 °C, con encendido de los extractores al 100% de su capacidad y se deshidrataron 40 kilogramos de jitomate.

Para todos los experimentos se cortó el jitomate en rodajas de 5mm de espesor y se midieron las temperaturas internas con 2 termopares tipo T insertadas en las rodajas. Todos los experimentos se iniciaron en la mañana (entre las 7 y 8 am) y finalizaban hasta que el peso del producto fuera constante, por lo que tenían una duración entre 9 y 10 horas. Durante todos los experimentos se midió manualmente el peso del producto de 4 muestras cada 15 minutos con una balanza digital marca Velab modelo VE-1000 con una exactitud de ± 0.1 g y también una balanza digital de construcción propia registró el peso de una muestra cada minuto durante todo el proceso de secado.

4.4.3 Obtención de la función de transferencia

Partiendo de un sistema de primer orden:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p u(t - \theta) \quad (23)$$

Aplicando transformada de Laplace con condiciones iniciales cero ($y(0) = 0$) a la Ecuación (1):

$$\tau s Y(s) + Y(s) = K_p U(s) e^{-\theta s} \quad (24)$$

Factorizando

$$Y(s)(\tau s + 1) = K_p U(s) e^{-\theta s} \quad (25)$$

Por definición de la función de transferencia entre la entrada y la salida:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (26)$$

O bien:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (27)$$

Donde K_p es la ganancia estática, θ es el tiempo de retardo y τ es la constante de tiempo.

Una vez obtenidos los datos de cada experimento se identificó la duración de cada curva de caída de temperatura, para luego promediar en una sola curva que representa la dinámica de todo el día. La identificación de la función de transferencia de primer orden con retardo (FOPDT) se realizó mediante el

algoritmo de optimización enjambres de partículas (PSO, particle swarm optimization) programado en Python (Figura 4-4). El modelo por estimar consideró tres parámetros: la ganancia estática K_p , la constante de tiempo τ y el tiempo muerto θ , los cuales fueron ajustados para minimizar el error cuadrático medio entre la señal experimental y la respuesta simulada del modelo. Se empleó un enjambre de 1000 partículas, con inicialización aleatoria dentro de los rangos físicamente factibles: $K_p \in [0,1]$, $\tau \in [0,500]$, $\theta \in [0,90]$ s. El algoritmo utilizó un esquema PSO con factor de constricción, calculado a partir de coeficientes cognitivo y social $c_1=c_2=2.05$, lo que permitió balancear la exploración global y la convergencia hacia soluciones estables. Adicionalmente, se implementó una inercia decreciente desde 0.9 hasta 0.4 a lo largo de 1000 iteraciones, con el fin de favorecer la exploración en las primeras generaciones y la explotación en etapas finales. El resultado fue la obtención de un conjunto óptimo de parámetros que reproduce adecuadamente la dinámica observada en el sistema real.

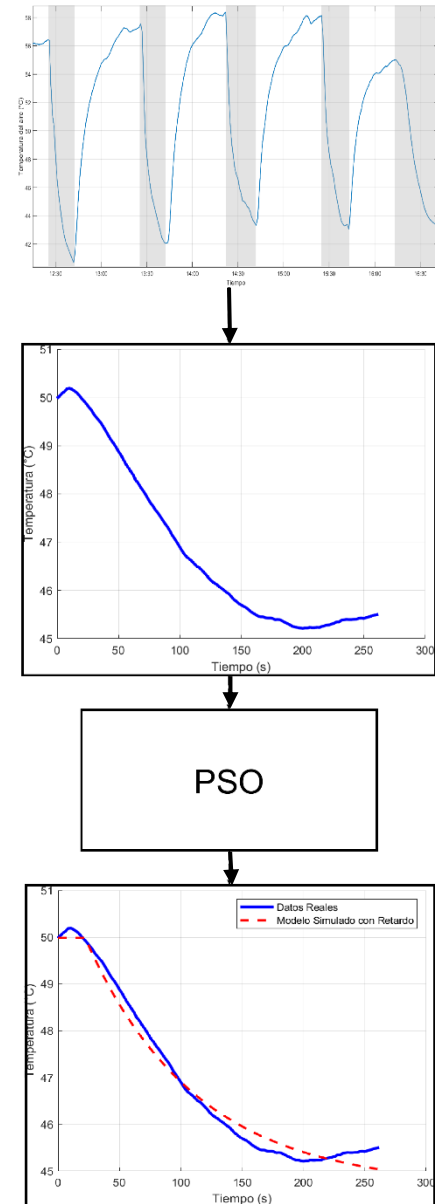


Figura 4-4. Proceso de obtención de la función de transferencia de primer orden con retardo

4.4.4 Diseño del controlador y su implementación

Una vez obtenido el modelo se utilizó la herramienta de PID Tuner de Matlab para diseñar el controlador PID en el dominio del tiempo al variar el tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio (Figura 4-5). Los parámetros ganancia proporcional (K_p), constante tiempo integral (τ_i) y constante tiempo diferencial

(τ_d) que se cargaron en un algoritmo dentro de un Arduino uno para su implementación en el SSSTI.

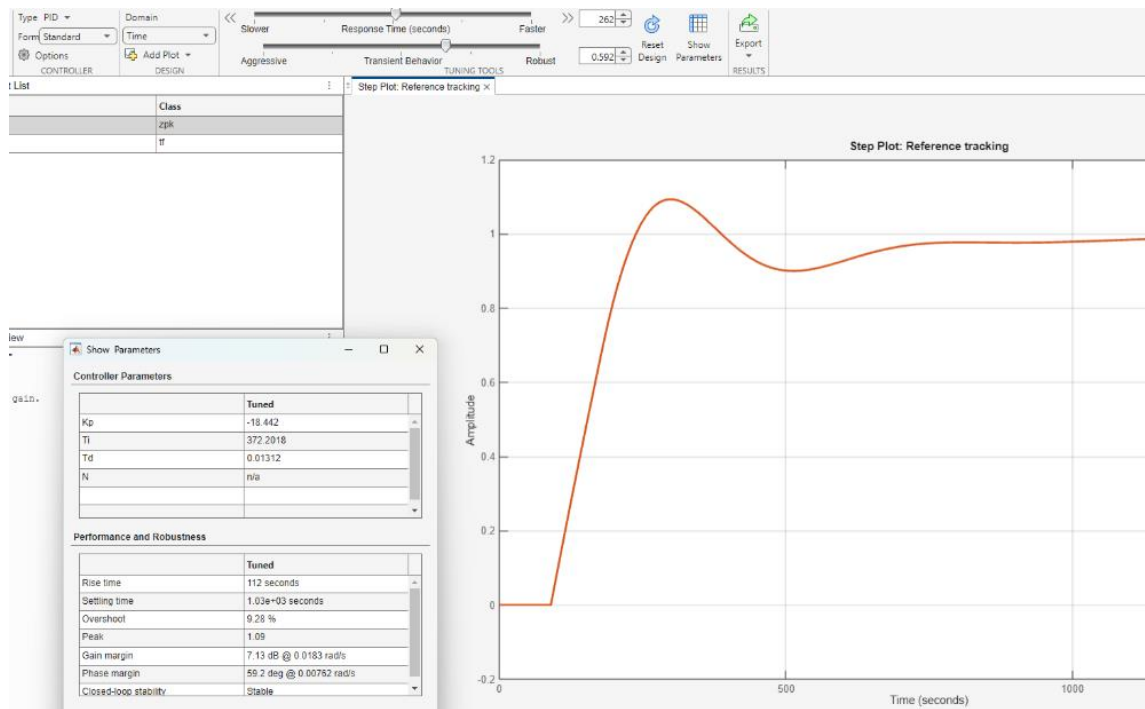


Figura 4-5. Obtención de parámetros del controlador PID usando PID Tuner en MATLAB (versión 2024).

La operación de un controlador PID aplicado a un SSSTI es el siguiente. El controlador compara la temperatura objetivo con la temperatura real medida por los sensores para obtener un error, y a partir de éste ajusta la velocidad de los extractores, regulando así la ventilación y la temperatura interna del secador. El proceso está influenciado por condiciones ambientales externas, como la radiación solar, que actúan como perturbaciones. La temperatura resultante retorna nuevamente al controlador, formando un sistema de control en lazo cerrado que busca mantener la temperatura deseada durante el secado del producto (Figura 4-6).

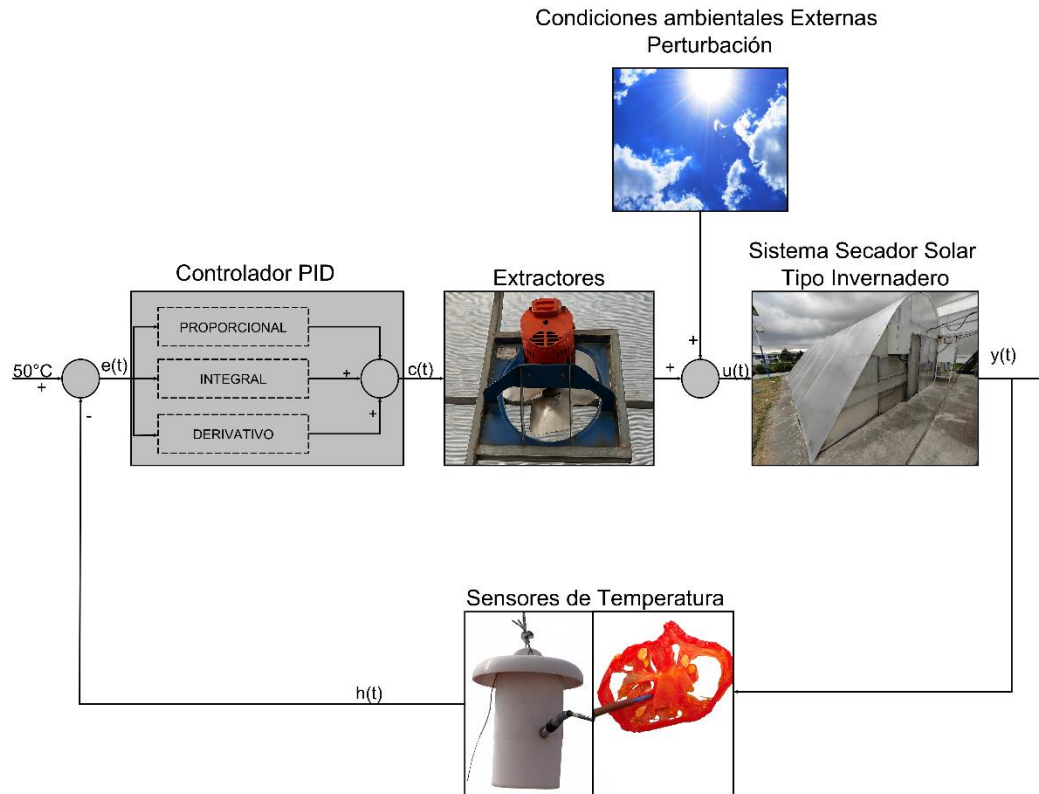


Figura 4-6. Diagrama de un sistema de control automático en lazo cerrado para la temperatura del aire (o temperatura del producto) de un SSSTI con un controlador PID

4.5 Resultados y discusión

4.5.1 Funciones de transferencia y diseño de los controladores en MATLAB

Durante los experimentos de secado para la obtención de la función de transferencia la temperatura del aire se redujo hasta 10 grados al encender ambos extractores, mientras que, para obtener la función de transferencia del producto, la temperatura se reducía en 5 grados en promedio (Figura 4-7). Al igual se observa la variación de la temperatura y humedad del aire al encender y apagar los extractores. En ambos experimentos se alcanzaron temperaturas del aire cercanas a 50 °C, pero durante el segundo experimento se observó perturbación en la radiación al final del experimento, seguramente ocasionado por la presencia de nubes (Figura 4-8).

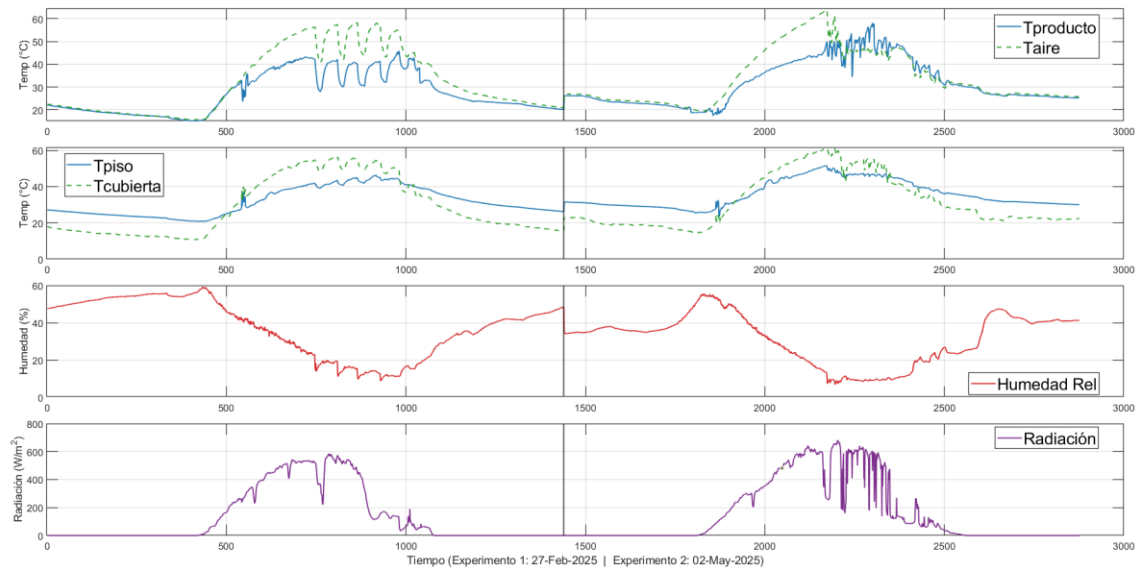


Figura 4-7. Comportamiento de la temperatura del aire, temperatura del producto, humedad relativa y radiación solar dentro del SSSTI durante los experimentos de secado de jitomate

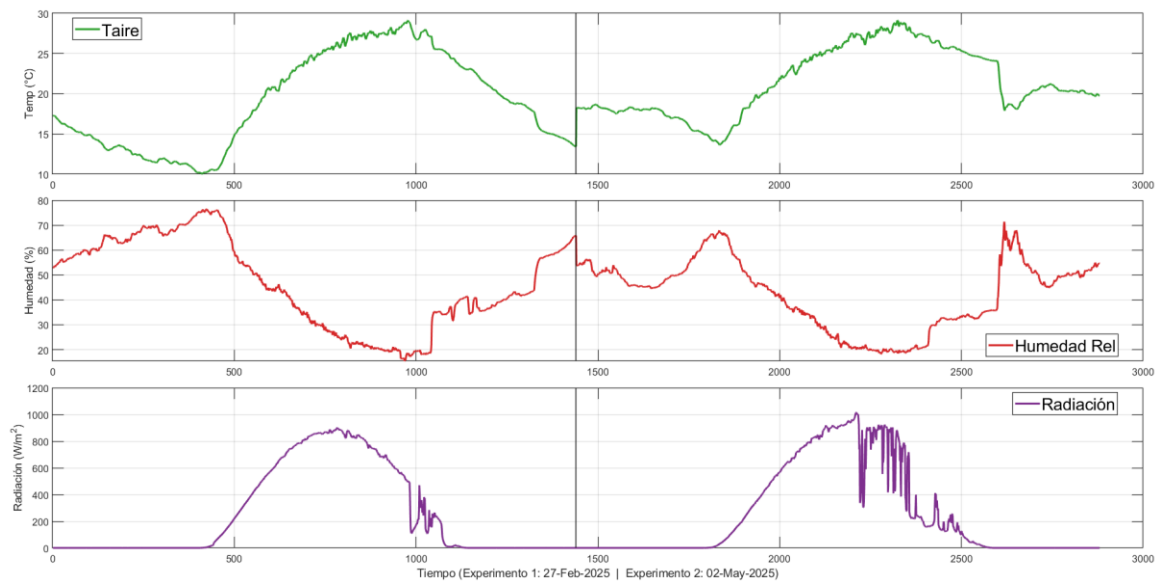


Figura 4-8. Comportamiento de la temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar fuera del SSSTI durante los experimentos de deshidratado de jitomate

Al analizar las curvas de secado se observa que el primer experimento donde se controló la temperatura del aire, el proceso de secado del jitomate fue más lento en comparación con el experimento en que se controló basándose en la temperatura del producto (Figura 4-9).

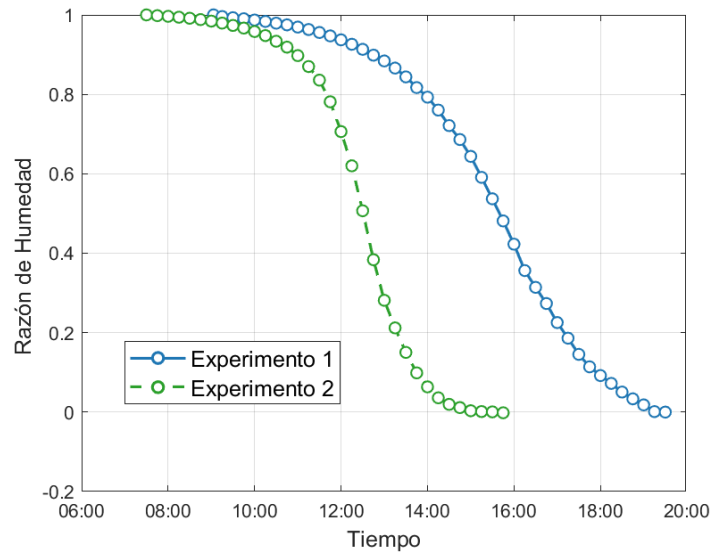


Figura 4-9. Curvas de secado del producto durante los experimentos de deshidratado de jitomate

La función de transferencia de la temperatura del aire de un sistema con retardo de primer orden obtenida con el algoritmo de optimización por enjambres de partículas (PSO) con un número de partículas de 1000 es el siguiente:

$$G(S) = \frac{-0.1091e^{-60s}}{97.2339s + 1} \quad (28)$$

Mientras que para la temperatura del producto es el siguiente:

$$G(S) = \frac{-0.0886e^{-90.411s}}{20s + 1} \quad (29)$$

Al comparar las mediciones de la temperatura del aire contra la simulación del modelo se observa que, al encender los extractores la temperatura alcanza a subir 0.8 °C para luego comenzar a bajar (Figura 4-10). La simulación de la función de transferencia para la temperatura del producto muestra que el tiempo

de retraso es menor que la función de transferencia para la temperatura del aire (Figura 4-11).

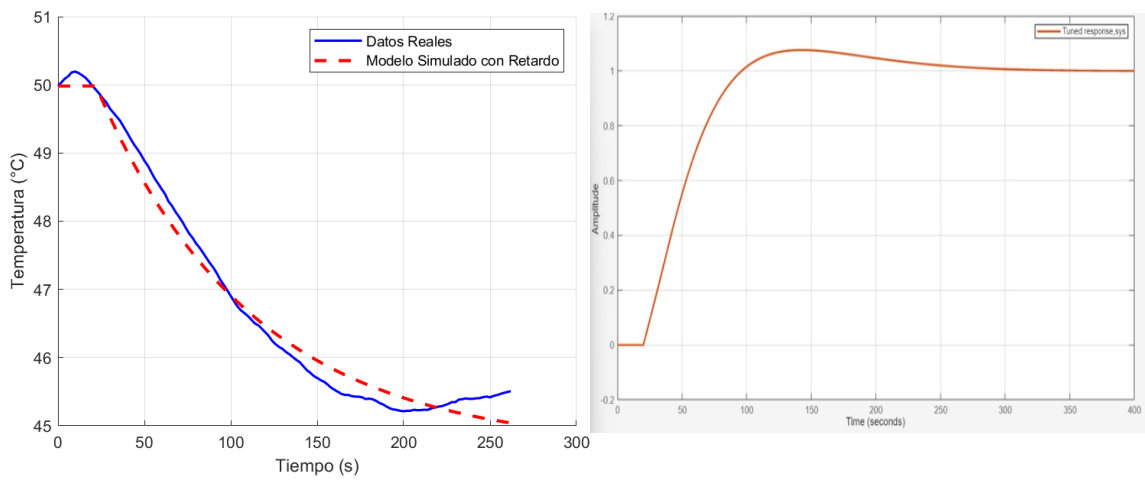


Figura 4-10. Simulación de la función de transferencia y controlador PID diseñado para la temperatura del aire

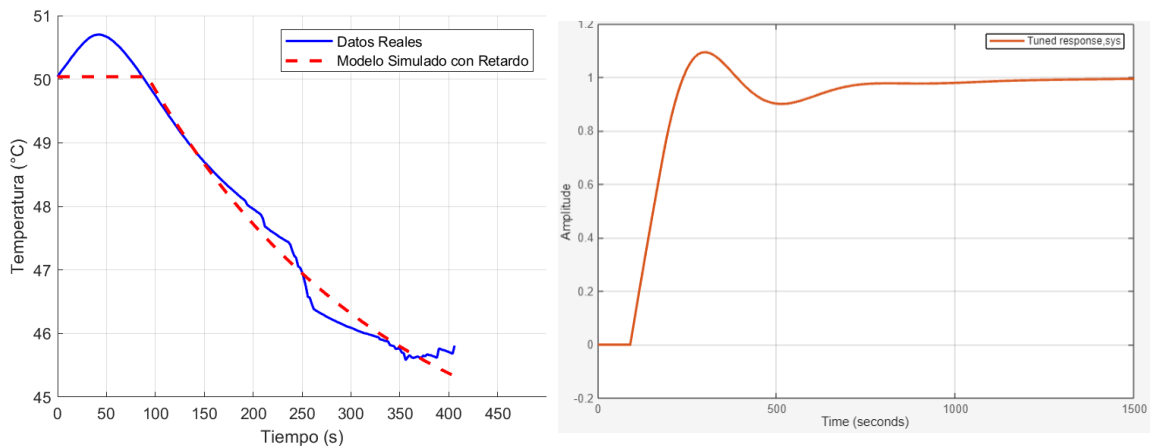


Figura 4-11. Simulación de la función de transferencia y controlador PID diseñado para la temperatura del producto

Los valores de MSE, RMSE y MAE fueron pequeños en ambos modelos (Cuadro 4-2). Esto indica una buena precisión y bajo error promedio entre los valores simulados y experimentales. El coeficiente de determinación (R^2) fue alto para ambos modelos (0.9776 para el aire y 0.9837 para el producto), lo que refleja una excelente capacidad de predicción del comportamiento térmico. En cuanto al controlador PID, se observa que los valores de K_p , τ_i y τ_d difieren entre el aire y el producto, siendo el sistema del producto más sensible (menor τ_i y τ_d), lo que

sugiere una respuesta más rápida y ajustada a los cambios de temperatura durante el secado (Cuadro 4-2).

Cuadro 4-2. Desempeño de los modelos y parámetros obtenidos del controlador PID

	Modelo del aire	Modelo del producto
MSE	0.0731	0.0477
RMSE	0.2704	0.2183
MAE	0.21	0.1934
R ²	0.9776	0.9837
	Controlador PID del aire	Controlador PID del producto
K_p	-18.442	-18.3732
τ_i	372.2018	66.9728
τ_d	0.01312	0.005076

4.5.2 Estrategias de Control

Controlador PID del aire

Durante la evaluación de la estrategia de control PID para la temperatura del aire, el extractor se encendió 2.5 horas antes que la estrategia de control para la temperatura del producto. En este experimento se encendieron ambos extractores, pero la variación en la radiación solar no permitió que durara mucho tiempo encendidos, llegando a apagar incluso los extractores durante ciertos intervalos de tiempo. La temperatura máxima del aire dentro del secador fue de 52.6 °C, mientras que la temperatura máxima del producto fue de 62.5 °C, superando por mucho la temperatura del aire al final del experimento (Figura 4-12).

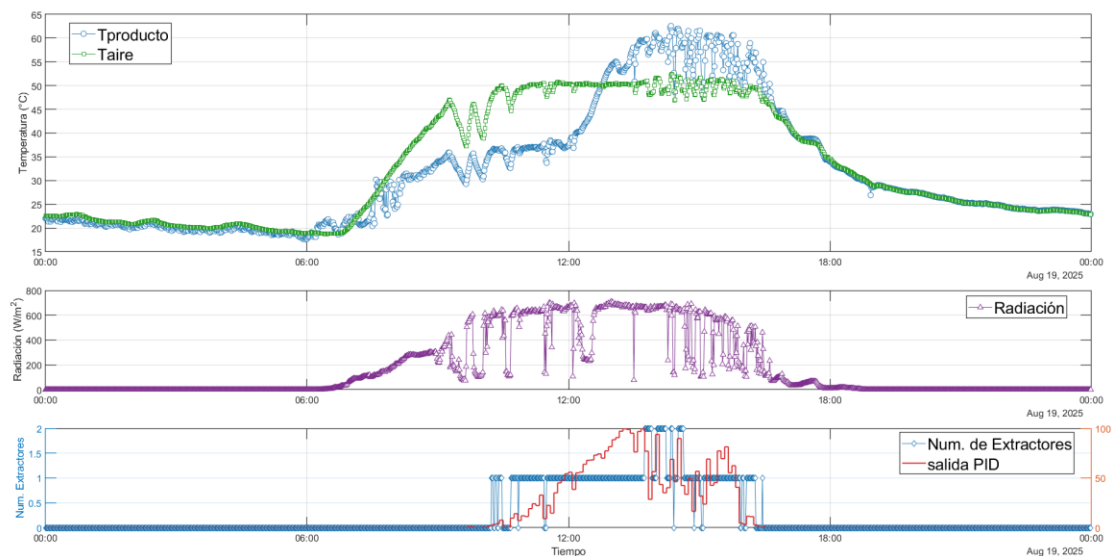


Figura 4-12. Comportamiento de la temperatura del aire, temperatura del producto, radiación solar y señal de controlador PID dentro del SSSTI durante la estrategia de control de la temperatura del aire

Controlador PID del producto

En este caso el controlador PID envió una señal de salida hasta las 11:20 horas cuando la temperatura del producto comenzó a subir rápidamente. Sin embargo, inmediatamente la radiación solar disminuyó, por lo que la temperatura no alcanzó a llegar a 50°C. La temperatura del producto alcanzó los 50 °C a las 12:50 horas, permitiendo que durante este tiempo el aire se calentara y guardara más energía. También, con esta estrategia hubo momentos en que ambos extractores trabajaron al mismo tiempo, pero al igual la variación en la radiación solar no permitió que durara mucho tiempo (Figura 4-13).

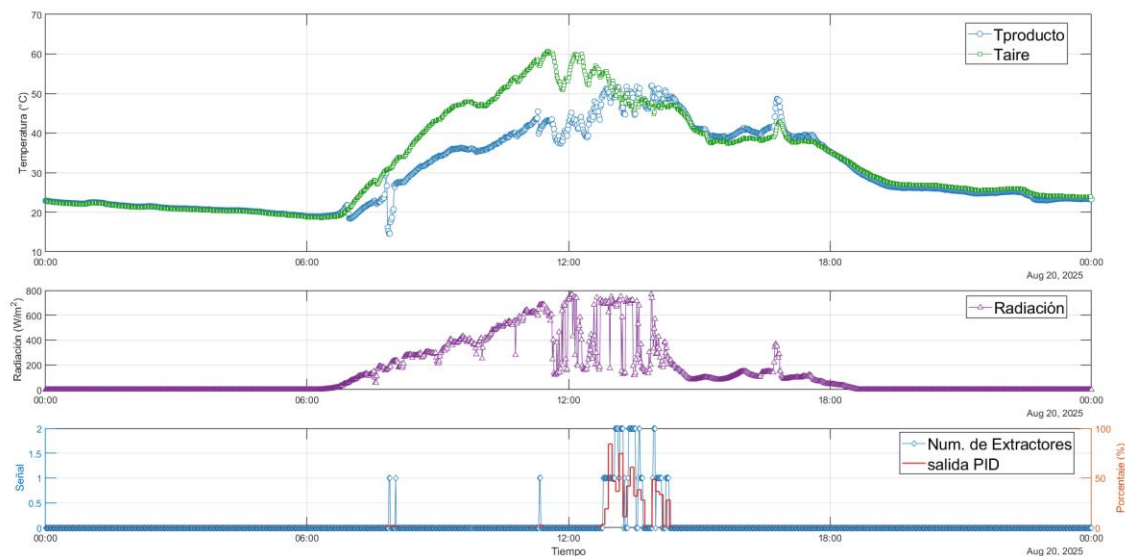


Figura 4-13. Comportamiento de la temperatura de aire, temperatura del producto, radiación solar y señal de controlador PID en el SSSTI durante la estrategia de control basada en la temperatura del producto

Control ON/OFF de la temperatura del aire

En esta estrategia de control la temperatura del aire alcanzó los 50°C a las 9:53 horas, pero posteriormente se redujo considerablemente debido a que la radiación disminuyó por un tiempo. A las 11:05 horas la temperatura subió lo suficiente para continuar con el control ON/OFF hasta que la radiación solar disminuyó. La temperatura máxima del producto fue de 64 °C. De manera similar a la estrategia de control de aire, en un inicio la temperatura del producto se mantiene ligeramente inferior a la del aire debido a la transferencia de calor hacia la masa húmeda del material en secado, pero la temperatura del producto superó los 50 °C al final del experimento debido a la pérdida considerable de agua. (Figura 4-14).

El método de control ON/OFF mostró la dinámica típica de este tipo de regulación: una oscilación continua alrededor del setpoint, producida por los ciclos repetidos de encendido y apagado del actuador. Este patrón genera una trayectoria térmica en forma de zigzag, que puede aumentar el estrés térmico sobre el producto y reducir la eficiencia del proceso, especialmente en sistemas con alta inercia térmica como los SSSTI.

En los tres experimentos realizados se obtuvieron temperaturas del piso y cubierta similares, entre 45 y 50 °C. La humedad relativa se comportó de igual manera en los tres días, disminuyendo considerablemente cerca del mediodía y aumentando nuevamente en la tarde, similar a la humedad del aire exterior (Figura 4-16). La radiación solar registrada en la estación meteorológica varió durante los tres días debido a la nubosidad presente, pero durante la estrategia de control del producto disminuyó considerablemente después del mediodía (Figura 4-15).

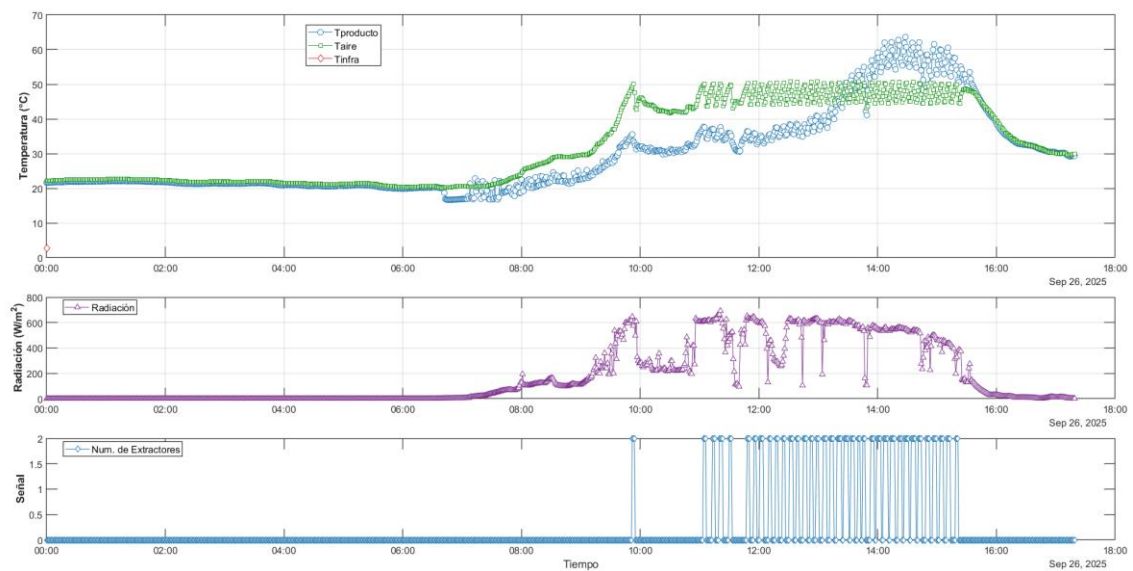


Figura 4-14 Comportamiento de la temperatura del aire, temperatura del producto y radiación solar en el SSSTI durante la estrategia de control ON/OFF de la temperatura del aire

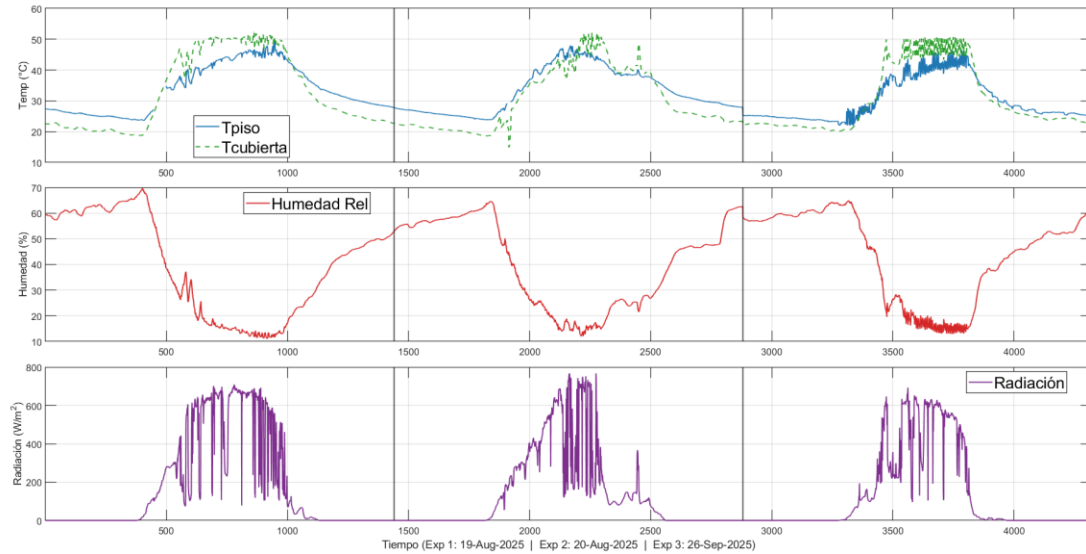


Figura 4-15. Comportamiento de la temperatura del piso, temperatura de la cubierta, Humedad relativa y radiación solar en el SSSTI durante tres días en que se implementaron las estrategias de control

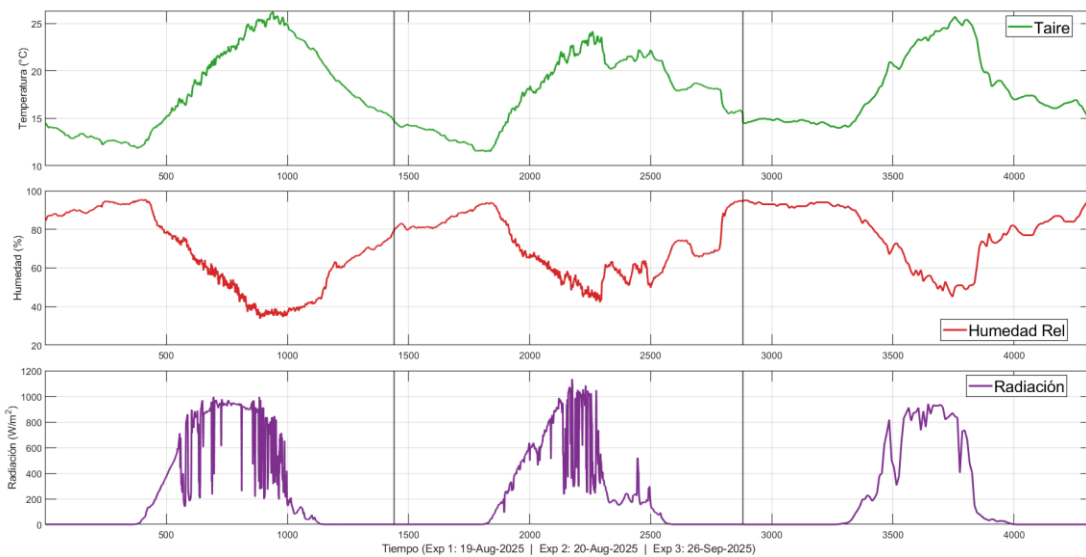


Figura 4-16. Comportamiento de la temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar fuera del SSSTI durante la implementación de las estrategias de control.

Al comparar las curvas de razón de humedad para determinar la pérdida de humedad, se observó que la estrategia de control basada en la temperatura del producto fue la más rápida, seguida de la estrategia de control basada en la temperatura del aire, siendo la más lenta la estrategia basada en encendido y

apagado (Figura 4-17). Aunque también se deben considerar los factores externos, principalmente la radiación solar.

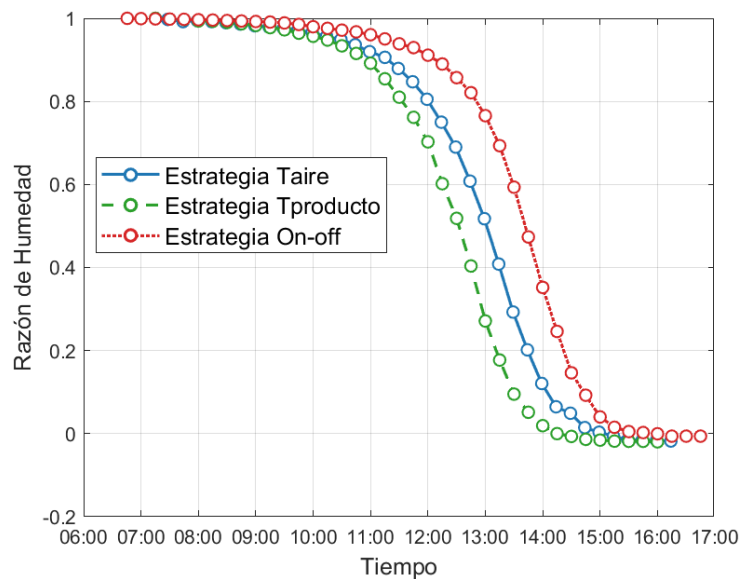


Figura 4-17. Curvas de secado durante la implementación de las estrategias de control

4.5.3 Comparación de las estrategias de control

Se evaluó el desempeño de tres estrategias de control: controlador PID aplicado a la temperatura del aire, controlador PID basado en la temperatura del producto y ON/OFF aplicado a la temperatura del aire, en términos de tiempo de secado, consumo de energía, costo operativo y flujo de aire. Se observa que la estrategia de control PID del aire presenta el mayor tiempo de encendido de los extractores (369 minutos), junto con el más alto consumo energético (≈ 3.2 kWh), costos mayores ($\approx \$3.8$ MXN) y un flujo de aire elevado ($\approx 3.5 \times 10^4$ m³ h⁻¹). Esto indica un proceso menos eficiente en consumo, pero con gran capacidad de ventilación. En contraste, el controlador PID basado en la temperatura del producto muestra los valores más bajos en todas las variables, reflejando un control más eficiente al reducir el tiempo, el gasto energético y los costos asociados, aunque con un flujo de aire menor. El controlador ON/OFF se ubica en una posición intermedia, con valores moderados de tiempo, consumo y costo (Figura 4-18). Con esta estrategia, la temperatura del producto subió por arriba de 50 °C durante 2 horas, pero con la estrategia de control PID del aire, el tiempo que duró arriba de 50°C

fue de aproximadamente 4.5 horas (con temperaturas máximas del producto similares), lo que pudo comprometer la calidad del producto por más tiempo.

Si calculamos el costo energético de los extractores en operación por cada kilogramo de jitomate seco, para el control PID del aire se usaron 0.06597 kWh, 0.01713 kWh se usaron para el control PID basado en la temperatura del producto y 0.06101kWh para el control ON/OFF del aire. En conjunto, los resultados sugieren que el controlador PID basado en la temperatura del producto optimiza la eficiencia del secado al equilibrar velocidad, energía y costos operativos.

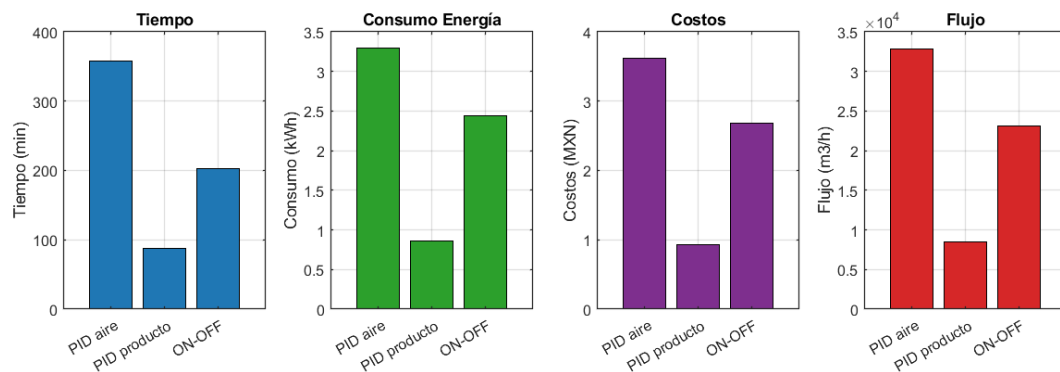


Figura 4-18. Evaluación de estrategias de control: tiempo de encendido de los extractores, consumo energético, costos y flujo de aire

4.6 Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que controlar usando datos de la temperatura del producto en lugar de la temperatura del aire, reduce el consumo de energía eléctrica y por lo tanto los costos de operación de los extractores. Al igual demuestra que el controlador PID mantiene las temperaturas dentro del SSSTI más estables que al usar un sistema de encendido y apagado (ON/OFF), por lo que la temperatura interna del producto se puede mantener por debajo de 50 °C incluso al final del secado al encender el segundo extractor.

El secador solar tipo invernadero al ser un sistema altamente no lineal tiene muchas perturbaciones que afectan el clima interno del secador, pero en días despejados, el controlador PID puede mantener estables las temperaturas como se demuestra en la estrategia de control basada en la temperatura del aire (Figura

4-12). Es por esto por lo que se sugiere comparar con otros métodos de control, considerando desde técnicas de control adaptativo y por modos deslizantes hasta estrategias de control predictivo y basado en inteligencia artificial, evaluando no solo su desempeño frente a las perturbaciones meteorológicas externas, sino también los requerimientos de poder de cálculo y los costos de implementación asociados a cada estrategia.

4.7 Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento para llevar a cabo los experimentos y al posgrado IAUIA por facilitar el acceso al secador solar tipo invernadero. A la SECIHTI por la beca otorgada durante el desarrollo del programa de maestría.

4.8 Literatura citada

- Arifin, M. A., Pangaribuan, P., Pramudita, B. A., & Megantoro, P. (2024). Controlling temperature using proportional integral and derivative control algorithm for hybrid forced convection solar dryer. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 239-247. doi:10.11591/ijece.v14i1.pp239-247
- Chew, I. M., Wong, W. K., & Nandong, J. (2022). Optimization Analysis of Nonlinear Process Using Genetic Algorithm. *Journal of Information Science and Engineering*, 909-921. doi:https://doi.org/10.6688/JISE.202209_38(5).0002
- El-Sebaili, A. A., & Shalaby, S. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 37-43. doi:10.1016/j.rser.2011.07.134
- FAO. (2025, Octubre 22). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved from Food Loss and Waste Database: <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/es>
- Herrera, M. D., Álvarez-Sánchez, F. I., Ortiz-Rodríguez, N. M., & Flores-Prieto, J. J. (2023). Solar drying modes of saladette tomatoes slices on phytochemicals and functional properties. *Solar Energy*, 262(111903), 1-10. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111903
- Janjai, S., & Bala, B. (2012). Solar Drying Technology. *Springer Science+Business Media*, 4, 16-54.
- Kumar, A., Tiwari, G. N., Kumar, S., & Pandey, M. (2006). Role of greenhouse technology in agricultural engineering. *International Journal of Agricultural Research*, 364-372.

- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. New York: CRC Press.
doi:<https://doi.org/10.1201/b17208>
- Paek, S.-Y., Kong, Y.-S., Pak, S.-H., Kang, J.-S., Yun, J.-S., Kil, H.-I., & Hwang, C.-J. (2024). Robust optimal tuning of a reduced active disturbance rejection controller based on first order plus dead time model approximation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133(108338). doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108338>
- Prakash, O., & Kumar, A. (2017). *Solar Drying Technology. Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment*. Singapore: Springer Nature Singapore. doi:DOI 10.1007/978-981-10-3833-4
- Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1185–1210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Valencia-Islas, J. O., Kacira, M., López-Cruz, I. L., Giacomelli, G., Ruiz-García, A., & Li, P. (2025). Toward a modeling and control approach based on the drying product in greenhouses. *Acta Horti*, 31-38. doi:<https://doi.org/10.17660/ActaHorti.2025.1426.5>
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., & Ranko, G. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2652-2670. doi:10.1016/j.rser.2012.01.007

5. CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías en energías renovables como lo es la energía solar y en específico en sistemas de secado solar. En el primer artículo se obtuvo un dispositivo para el monitoreo del peso del producto capaz de soportar altas temperaturas, pero manteniendo la precisión. Esto con la finalidad de evitar la exposición prolongada a altas temperaturas por parte de los operarios del secador. Sin embargo, al ser un solo dispositivo no es suficiente para considerarse una representación completa de todo el producto dentro del secador. Es por esto por lo que se recomienda realizar una red de dispositivos interconectados que monitoree el peso del producto en diferentes puntos dentro del secador.

En la segunda etapa se implementó un sistema de control automático para un secador solar tipo invernadero. Si bien el control PID es ampliamente utilizado en la industria, su aplicación en sistemas de secado solar tipo invernadero ha sido poco explorada. En este estudio, su implementación permitió regular la temperatura mediante la variación de las revoluciones de uno o dos extractores, logrando una disminución del consumo energético y una reducción significativa de las oscilaciones térmicas. Los resultados obtenidos constituyen un aporte relevante para el diseño de estrategias de control eficientes en sistemas de secado solar. No obstante, es necesario contrastar este tipo de control con métodos más avanzados, como los controladores ubicados en la trayectoria de realimentación del sistema de control en lazo cerrado. también es necesario comparar los controladores PID contra enfoques avanzados de control de sistemas como aquellos basados en modelos predictivos, con el fin de mejorar la estabilidad del sistema y la calidad del secado bajo condiciones ambientales variables.

Los resultados del presente trabajo sientan las bases para futuros desarrollos orientados al control multivariable, la integración de sistemas de supervisión remota y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático en el modelado y regulación de procesos de secado solar.