



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE
ZACAPOAXTLA**

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Optimización de una secadora híbrida solar-eléctrica utilizando algoritmos de control inteligentes

Presentado por:

Ing. Elpidio Guerra León

Asesor Interno:

M.C. Ángel Vergara Betancourt

Zacapoaxtla, Puebla.



AGRADECIMIENTOS

En este solemne instante de mi vida académica, elevo mis palabras en gratitud a quienes han sido pilares en el camino que hoy culmina.

En primer lugar, agradezco profundamente al INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ZACAPOAXTLA, noble institución que me abrió sus puertas y me forjó con el conocimiento y disciplina necesarios para afrontar los desafíos de la ciencia y de la vida. A sus aulas, sus pasillos y su historia, debo parte de lo que hoy soy.

A mis maestros y asesores, guardianes de la sabiduría, que con paciencia y firmeza sembraron en mí no solo conocimientos técnicos, sino también la convicción de que el esfuerzo y la constancia son el camino a la victoria. Entre ellos, Extiendo un gran reconocimiento especial al Maestro ángel Vergara Betancourt, cuya guía y dedicación dejaron huella imborrable en mi formación.

Con mayor reverencia, mi corazón se inclina hacia mis padres. Ellos han sido mi fortaleza en las horas oscuras, mi refugio en los momentos de duda y la luz que nunca se apaga. A través de su sacrificio, su ejemplo y su amor inquebrantable, aprendí que ningún triunfo tiene valor si no se comparte con la familia. A mis hermanos, compañeros de vida, agradezco su aliento y su fe en mí, que me sostuvieron cuando las fuerzas parecían flaquear.

Y finalmente, me agradezco a mí mismo. Porque en los días de cansancio, cuando el peso parecía insostenible, no cedí a la derrota. Porque comprendí que la perseverancia no es un deber, sino un honor.

Este logro no es únicamente mío: pertenece a cada persona que me acompañó en la travesía. Que al leer estas palabras, todos se reconozcan como parte esencial de esta victoria.

Índice

Tabla de figuras	8
Resumen.....	10
Capítulo I.....	11
1. Planteamiento del problema de investigación	11
1.2 Objetivos	14
1.3 Justificación	14
1.4 Hipótesis.....	15
1.5 Metodología de investigación	16
Capítulo II Marco Teórico	16
2.1 Principios de la energía solar y su aplicación en deshidratadoras.	19
2.1.1 Las secadoras solares:.....	19
2.1.2 Secadoras híbridas	22
2.1.3 Secador solar de biomasa	22
2.1.4 Horno de Cylon	22
2.2 Sistemas automatizados de deshidratación	22
2.2.1 Deshidratadora de plantas medicinales	23
2.2.2 Maquina deshidratadora de vegetales.	23
2.2.3 Diseño de un algoritmo de control basado en lógica difuso aplicado a un secador rotatorio de alimentos.....	23
2.2.4 Efecto del invernadero sobre el secado de cultivos condiciones naturales y convección forzada II. Modelo térmico y validación experimental.....	23
Capítulo III sistemas de control	24
3.1 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	25
3.1.1 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN	25
3.1.2 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN.....	26

3.2 sistema de control clásico	28
3.2.1 Sistema de control de lazo abierto	28
3.2.2 Sistema de control de lazo cerrado	28
3.2.3 Elementos básicos de un sistema de control	29
3.2.4 Controlador PID	29
3.3 sistemas de control inteligentes.....	33
3.3.1 sistemas expertos.....	34
3.3.2 Control robusto	34
3.3.3 PID inteligentes (i-PID)	35
3.3.4 Redes neuronales.....	35
3.3.5 Machine learning	36
3.3.6 lógica difusa	36
3.4 PID Inteligente (i-PID)	37
Capítulo IV Métodos.....	39
4.1 Secadoras solares y control inteligente	39
4.2 Construcción e instrumentación de una secadora solar híbrida para el secado de frutos.	41
4.3 desarrollo de un sistema de control para el monitoreo y regulación de las variables críticas del proceso de secado.....	45
4.3.1 cámara de secado	47
4.3.2 Fuentes de calor.....	47
4.4 Instrumentación	47
4.4.1 sensor DHT22	47
4.4.2 Sensor de temperatura analógico LM35.....	48
4.4.3 Extractor <i>de aire</i> de 2”.....	49
4.4.4 REX – C 100 Controlador de temperatura PID	49

4.4.5 Arduino	50
4.4.6 softwares	51
Capítulo V Diseño, desarrollo e implementación del sistema de control en la secadora.....	51
5.1 Identificación del sistema, para aplicar control PID	52
5.1.1 Simulación de la función de transferencia del sistema.	55
5.1.2 Diseño e implementación de un sistema de control PID.....	58
5.1.3 Aplicación del PID al sistema real.....	60
5.2 Aplicación de i-PID	61
Capítulo VI Análisis y discusión de resultados	65
6.1 Aplicación de control PID	65
6.2 Comparación del PID clásico vs el i-PID	66
6.3 Análisis de respuesta del sistema ante una perturbación.....	68
6.3.1 Aplicación de filtro pasa-bajas al controlador i-PID.....	69
6.4 Respuestas a las preguntas de investigación.....	71
6.5 Impacto social y ambiental.....	72
Conclusión	73
Referencias.....	75

Tabla de figuras

Figura 1: Categorías de nubosidad en Tlatlauquitepec, Pue. [5].	13
Figura 2: Elementos de una secadora solar convencional.	20
Figura 3: Tipos de secado solar.	21
Figura 4: Mapa conceptual de Identificación de sistemas 14.	25
Figura 5: Sistemas de segundo orden [14].	27
Figura 6: Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden bajo diferentes condiciones de amortiguamiento [15].	27
Figura 7: Sistema de control de lazo abierto.	28
Figura 8: Sistema de control de lazo cerrado.	29
Figura 9: Diagrama de bloques de un controlador proporcional.	30
Figura 10: Diagrama de bloques de un controlador integral.	31
Figura 11: Diagrama de bloques de un controlador Proporcional derivativo	32
Figura 12: Diagrama de bloques de un sistema de control PID	33
Figura 13: Diagrama de bloques de una planta donde se puede aplicar el control robusto	35
Figura 14: Comparación de una neurona biológica con una neurona artificial [18].	35
Figura 15 Ejemplo de diseño de un sistema de control difuso	37
Figura 16: Secadora solar de madera [24].	40
Figura 17: Dimensiones de paredes en relación con la región del país [24].	42
Figura 18: Regionalización del país para encontrar los muros de la secadora [24].	42
Figura 19: Arreglo electrónico de los sensores de humedad y temperatura y conexión a Arduino.	43
Figura 20: Bosquejo de la deshidratadora híbrida.	43
Figura 21: Diagrama del abanico y extractor de humedad.	44
Figura 22: Circuito de potencial del controlador PID.	45
Figura 23: Sensor DHT22.	48
Figura 24: REX-C100 Controlador de temperatura PID.	49
Figura 25: Arduino one.	50
Figura 26: Implementación de un sistema de control.	52
Figura 27: Muestro de temperatura y humedad.	53
Figura 28: Gráfica de la temperatura de la cámara de secado.	54

Figura 29: Contextualización de variables para su simulación.....	55
Figura 30: Diagrama de bloques del sistema a controlar.....	56
Figura 31: Simulación de la función de transferencia en XCOS.....	56
Figura 32: Sistema real vs Sistema simulado.	57
Figura 33: Implementación del control PID.	58
Figura 34: Respuesta del sistema al aplicar el PID.....	59
Figura 35: Respuesta del sistema con los nuevos valores PID.	60
Figura 36: Comparación de información real vs simulación.	61
Figura 37: Comparación de las señales de respuesta del PID y i-PID.....	63
Figura 38: Sintonización de valores PID con el método heurístico.....	64
Figura 39: PID clásico con Datos reales.	65
Figura 40: Comparación de respuesta de simulación PID clásico vs Inteligente.	67
Figura 41: Respuesta de ambos controladores ante una perturbación.	68
Figura 42: Respuesta del i-PID al aplicar el filtro pasa bajas.	70

Resumen

Este trabajo de tesis aborda la problemática de desperdicio de alimentos agro-comestibles en México, haciendo énfasis en las comunidades rurales productoras de verduras y frutas, principalmente de manzana, ya que debido a que no se cumple con los estándares de calidad comercial hay un desaprovechamiento considerable de la fruta. Como una alternativa de solución, se propone la implementación de algoritmos de control inteligente en una deshidratadora híbrida solar-eléctrica como solución tecnológica que permita optimizar el proceso de secado, reducir desperdicios y generar valor agregado a dichos productos.

La investigación se sustenta en tres preguntas clave relacionadas con la eficiencia en el uso de recursos naturales, la adopción tecnológica en entornos rurales y la influencia de los algoritmos de control inteligente en la reducción de mermas. El sistema utiliza un controlador PID clásico para evaluar el comportamiento dinámico del proceso, y posteriormente un PID inteligente (i-PID), capaz de compensar perturbaciones y condiciones no modeladas.

El trabajo se desarrolla en la localidad de Gómez Poniente, Tlatlauquitepec, Pue. Donde el clima es templado tenemos condiciones de nubosidad y la limitación de radiación solar, hacen inviable una deshidratadora solar. Por dicha razón, se realiza la propuesta híbrida y se plantea como una alternativa sustentable y adaptable, que contribuya al desarrollo económico local, a la economía circular, y al fortalecimiento del sector agrícola en regiones marginadas.

1. Planteamiento del problema de investigación

A lo largo de la historia la humedad se ha enfrentados a distintos problemas con respecto al manejo y uso de los productos Agro comestibles dada a su naturaleza perecedera. En el cazo particular México, de acuerdo con datos del gobierno federal, actualmente se desperdicia alrededor del 37 % de la producción agropecuaria, el 54% de frutas y verduras, y el 49% en la cosecha de manzanas [1].

En la región nororiental del estado de Puebla, el desperdicio de alimentos es una problemática que requiere ser abordada para garantizar la igualdad alimentaria de la población. De acuerdo con (CITAR) la monopolización del sector primario. condiciona al agricultor a vender sus productos a bajos precios. Esta situación genera un escenario el cual productor prefiere no comercializar sus productos propiciando al desperdicio y mal aprovechamiento de estos.

Instituciones gubernamentales, educativas e internacionales han propuesto alternativas para enfrentar el problema. Un ejemplo es la Secretaría de agricultura y Desarrollo Rural con el “Programa Sectorial Derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024” [2], y el TecNM con “La Agenda Estratégica para la Autosuficiencia Alimentaria y el Rescate del Campo Mexicano” [3], cuyo objetivo es la gestión del conocimiento basada en una estructura organizativa para garantizar el acceso a la tecnología en el sector agroalimentario, alineado con los objetivos de Desarrollo Sostenible de la FAO, por citar un objetivo “hambre cero” [4].

Este trabajo de tesis se enfoca en investigar y proponer mecanismos de control eficientes que garanticen el proceso optimo de deshidratación de frutas en secadoras híbridas eléctrico-solares para reducir el desperdicio de manzana sumando un valor agregado para su comercialización y promoviendo la economía circular en comunidades rurales.

Del cuál se plantean las siguientes preguntas de investigación. Estas interrogantes guían el estudio y permiten evaluar la viabilidad del sistema de control de secadoras híbridas solar-eléctricas:

1. ¿Es posible hacer eficiente el uso de recursos naturales usando sistemas de control?
2. ¿el uso de tecnologías es favorable para los sistemas agro-comestibles de la región y contribuye al desarrollo de cultivos sostenibles?
3. ¿Cómo influye la implementación de sistemas de control en la reducción de desperdicios de manzanas en comunidades rurales?

La deshidratación de frutas es una técnica esencial para la conservación de alimentos, especialmente en comunidades rurales donde el acceso a la tecnología y los mercados puede ser limitado. Sin embargo, los métodos tradicionales de secado presentan diversas desventajas, tiempos prolongados de deshidratación y una alta dependencia de las condiciones ambientales al ser estas variables. Además, el uso de fuentes de energía no renovables, como la leña o el gas, contribuye a la degradación ambiental y eleva los costos operativos de los fruticultores.

La meta de este trabajo es implementar un sistema de control en una deshidratadora híbridas solar-eléctricas, como propuesta de solución innovadora que optimiza el proceso de secado de las frutas. Este sistema utiliza un control PID clásico para conocer la respuesta y funcionamiento del sistema, así como la obtención de datos experimentales para la implementación de un PID inteligente.

El PID inteligente (i-PID), tiene todas las características de un controlador PID clásico, incorporando una función adicional que permite compensar los efectos de perturbaciones y dinámicas no modeladas. De este modo, a través de una identificación local de entrada y salida, el sistema logra una compensación “inteligente” de todas las perturbaciones que puedan afectar el proceso. Cabe aclarar que uso de la palabra “inteligente” en este proyecto no está relacionado con métodos de control avanzados basados en inteligencia artificial.

En México, muchas comunidades rurales dependen de la agricultura como principal fuente de ingresos, enfrentados desafíos como la pobreza, falta de infraestructura energética y a los efectos del cambio climático. Por ejemplo, en la localidad de Gómez Poniente, Tlatlauquitepec, Pue. (Contexto experimental), donde existe un desperdicio de Manzana considerable o simplemente no se le puede dar un valor agregado por no cumplir con los estándares de “Manzana de primera” para ser vendida a un buen precio. Debido a esta situación muchos locales prefieren no comercializar sus frutas y abandonarlas en sus huertos.

La implementación de secadoras híbridas con un sistema de control puede propiciar a un impacto transformador en la inclusión social y desarrollo regional al proporcionar tecnología sustentable asequible a las comunidades para su integración a cadenas productivas. Además de fomentar la preservación de productos tradicionales al mejorar las técnicas de secado. A su vez, la instalación, mantenimiento y operación de esta infraestructura podría ser una fuente de empleo, promoviendo el desarrollo económico.

Se realiza con el fin de contribuir a la economía circular; modelo que busca minimizar el desperdicio, maximizar el uso de recursos naturales y promover la sostenibilidad. Al no depender al 100% de una energía convencional. Se prolongará la vida de los productos y valor comercial. Sin embargo, las horas sol en Tlatlauquitepec (con coordenadas 19°51'05"N 97°29'46"O / 19.851388888889, -97.496111111111) (ver figura 1) no son las suficientes como para mantener la temperatura crítica de deshidratación de manera continua en una secadora solar convencional [5], y debido también a que la cosecha de manzana se realiza a mediados de julio hasta el mes de agosto.

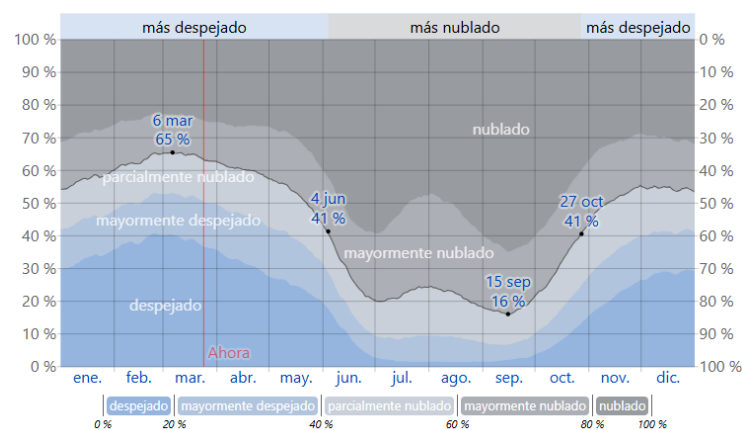


Figura 1: Categorías de nubosidad en Tlatlauquitepec, Pue. [5].

La optimización de secadoras híbridas solar-eléctricas mediante sistemas de control representa una estrategia clave para mejorar la eficiencia en el deshidratado de frutas en zonas rurales. Más allá del impacto económico social, estos sistemas promueven la económica circular, reducen la huella ecológica y fortalecen la sostenibilidad de sector agrícola. Este proyecto se alinea a la Secretaría de agricultura y Desarrollo Rural con el “Programa Sectorial Derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024” [2], y el TecNM con “La Agenda Estratégica para la Autosuficiencia Alimentaria y el Rescate del Campo Mexicano” [3], y a los objetivos de Desarrollo Sostenible de la FAO.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Optimizar el proceso de deshidratación en una secadora híbrida solar-eléctrica utilizando algoritmos de control inteligentes para secar productos agro-comestibles.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Construir una secadora híbrida como prototipo para el secado de frutos.
2. Caracterizar las variables críticas de secado en el prototipo de secadora híbrida solar-eléctrica.
3. Desarrollar un sistema de instrumentación y control (hardware) para el monitoreo y regulación de variables críticas en el proceso de secado.
4. Analizar e implementar algoritmos de control inteligente para la regulación de variables críticas y la optimización del proceso de secado en una secadora híbrida solar-eléctrica.
5. Evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones de operación específicas.

1.3 Justificación

El desperdicio de alimentos es un problema significativo en muchas regiones del País, particularmente en comunidades rurales donde la comercialización de productos frescos se enfrenta a múltiples desafíos. En el caso de la manzana no logra venderse debido a los altos estándares comerciales. Provocando pérdidas económicas y ambientales considerables. La deshidratación de frutas surge como una alternativa viable para prolongar la vida del producto y agregar valor a la producción local.

Sin embargo. En regiones como Tlatlauquitepec, Puebla. Las condiciones climáticas limitan la eficiencia de los métodos tradiciones de secado solar, ya que la cantidad de horas sol es insuficientes para garantizar un proceso continuo. Para lograr un secado eficiente antes de que las manzanas lleguen a perecer, es necesario optimizar el sistema convencional mediante la implementación de una fuente de energía híbrida solar-eléctrico.

Este proyecto busca desarrollar una secadora híbrida solar-eléctrica equipada con un sistema de control, Primero se aplicará un control basado en un controlador PID clásico y después algoritmos de control “inteligentes” para considerar los factores no modelados. La automatización permitirá regular y mantener las variables críticas de secado en condiciones óptimas, priorizando el uso de

energía solar y recurriendo a la electricidad solo cuando sea estrictamente necesario. De este modo, se minimiza el impacto ambiental y la huella de carbono.

Además de sus beneficios tecnológicos ambientales, la implementación de una deshidratadora híbrida se alinea con los principios de las economías solidarias, que promueven la cooperación, equidad y la sostenibilidad dentro de las comunidades. La introducción de esta tecnología en zonas rurales podría fomentar el trabajo colaborativo mediante la creación de redes de productores que compartan conocimientos y recursos.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el proyecto contribuye a la reducción del desperdicio de alimentos Agro-comestibles y al aprovechamiento eficiente de los recursos naturales, promoviendo un modelo de economía circular. Al reducir la dependencia de combustibles tradicionales y optimiza el uso de energías verdes.

La generación de productos deshidratados con valor agregado generar nuevas oportunidades de mercado para los productores locales, fortaleciendo su autonomía económica y mejorando su calidad de vida. La integración de secadoras híbridas con sistemas de control en las cadenas productivas rurales representa un paso hacia un modelo más justo, eficiente y sostenible para la producción agrícola del país.

1.4 Hipótesis

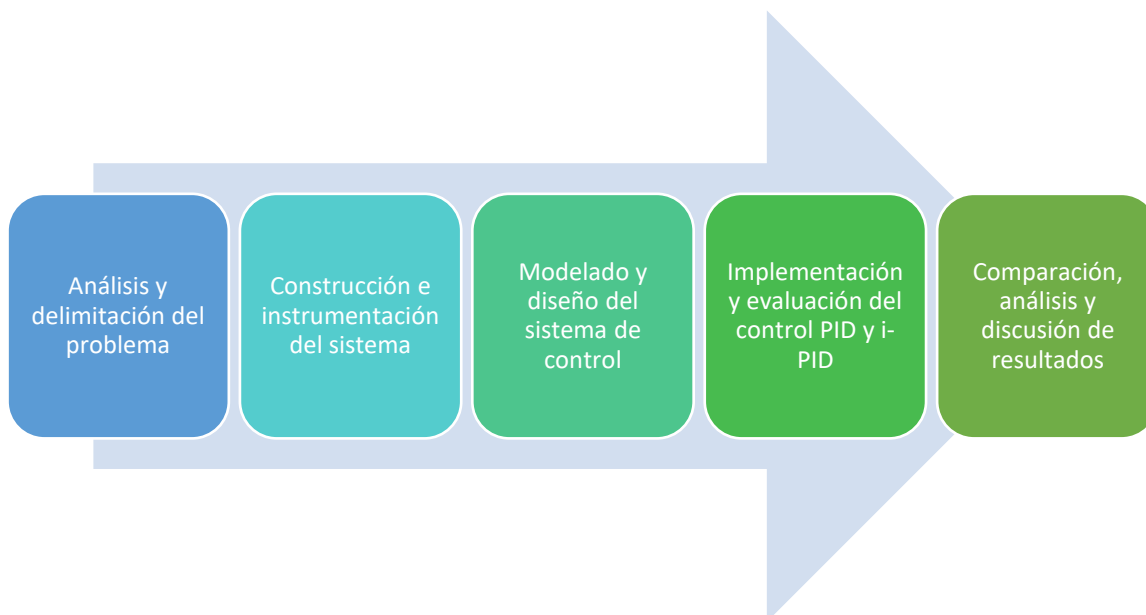
La aplicación de un control PID y un algoritmo de control inteligente en una secadora híbrida logrará una optimización en tiempo de secado, debido a las regulaciones que realice el algoritmo para regular las variables críticas de secado de manera eficiente, al mantener una temperatura constante de 80 °C 24/7 en la cámara de secado al regular las fuentes de energía (solar-eléctrica).

1.4.1 Hipótesis nula

La aplicación de un control PID y un algoritmo de control inteligente en una secadora híbrida **NO** permite una mejora en la optimización en tiempo de secado, debido a las regulaciones que realice el algoritmo para las variables críticas de secado de manera eficiente, al mantener una temperatura constante de 80°C 24/7 en la cámara de secado al regular las fuentes de energía (solar-léctrica).

1.5 Metodología de investigación

Los pasos generales para seguir para realizar el proyecto se presentan en el siguiente esquema:



Capítulo II Marco Teórico

El enfoque de sistemas alimentarios propuestos por la FAO (2019) considera a toda la cadena de valor, desde la producción hasta el consumo, incluyendo los aspectos socioeconómicos y ambientales que influyen en el acceso y la calidad de los alimentos. En este contexto, uno de los principales desafíos en enfrenta México es la reducción del desperdicio alimentario, así como la inclusión de pequeños productores y la generación de valor agregado en zonas rurales.

En la producción de manzana, una práctica común es clasificarla en dos categorías: Manzana de primera calidad y manzana para ripio (con poco valor comercial). Mientras que la primera cumple con criterios visuales, de tamaño y sanidad para su comercialización directa, la segunda es descarta o vendida a bajo costo a la industrial para la elaboración de jugos y otros derivados [6]. Sin embargo, esta clasificación no siempre considera el potencial nutricional y tecnológico de la manzana de ripio, la cual puede deteriorarse durante el manejo postcosecha y perder completamente su valor.

La valorización de este subproducto mediante su deshidratación controlada representa una estrategia de conservación eficiente y sustentable, alineada con los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS), particularmente el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables). La deshidratación permite reducir el contenido de humedad, disminuir el peso y aumentar la vida útil del alimento, facilitando su almacenamiento, transporte y comercialización. Este proceso contribuye a reducir el desperdicio, aumentar la rentabilidad para los productores y generar alimentos funcionales o ingredientes para otros fines.

Existen diversos métodos de deshidratación, desde técnicas tradicionales como el secado solar directo hasta tecnologías más avanzadas como secadoras híbridas solar-eléctricas, las cuales permiten una mayor eficiencia energética y control del proceso. En este trabajo se plantea la utilización de una secadora híbrida solar-eléctrica, equipada con un sistema de control de temperatura PID y, posteriormente, se realizaron simulaciones con un controlado inteligente. Buscando en ambas situaciones mantener condiciones óptimas dentro de la cámara de secado, mejorar la calidad del producto final y aprovechar una fuente de energía renovable.

Esta estrategia, además de mejorar la sostenibilidad del sistema de alimentario, tiene una fuerte componente social: promueve el aprovechamiento de productos subvalorados, fortalece las economías rurales e impulsa procesos de innovación accesibles para pequeños y medianos productores.

Una manera de preservar los productos agro-comestibles es deshidratándolos. Cuando se realiza el corte de manzana, se realiza la selección de manzana de primera y manzana para ripio (con poco valor comercial). La primera consiste en que la manzana debe tener buena presentación visual, tamaño, color y no tenga manchas en la capa externa del hipanto, madurez y libre de enfermedades o plagas. Y toda manzana que no cumpla con estos requisitos (A excepción de la madurez y libre de plagas) van a ripio.

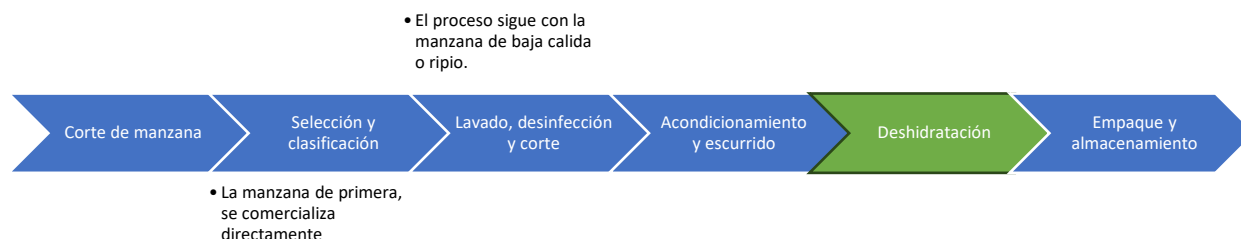
Incluso el cuidado durante la trazabilidad de ambos productos es distinto. Mientras que la manzana de primera es cortada y seleccionada con cuidado es empaquetada en rejas de madera y cuidando su traslado hasta su venta al público. Mientras que después de la selección la manzana de ripio es embolsada en costales y en su traslado es golpeada hasta llegar a empresas como Jumex [6]. Por lo cual se podría recuperar la manzana de ripio justo después de su selección, para evitar que tenga machucaduras y así iniciar el proceso de deshidratación.

Existen diferentes métodos de deshidratación, como la deshidratación solar directa e indirecta de sol o utilizando secadoras eléctricas e incluso secadoras híbridas que utilizan diferentes fuentes de energía.

El proceso de deshidratación consiste en extraer el excedente de humedad de las manzanas al aumentar la temperatura a la que están expuestas para así reducir su peso y poder conservarlas.

En este trabajo se llevará el proceso de deshidratación utilizando una secadora híbrida eléctrico-solar indirecta utilizando un sistema de control PID y después un PID inteligente para mantener la temperatura dentro de la cámara de secado.

El siguiente diagrama describe el proceso de deshidratación que se llevará con la manzana. Para preservar la manzana de ripio y darle un valor agregado se opta por secarlas.



El enfoque de sistemas alimentarios y su relevancia para el desarrollo sostenible en México

El análisis del sistema alimentario ha evolucionado desde una visión centrada en la producción agrícola hacia una perspectiva integral que considera todos los elementos, actores y procesos involucrados en la cadena alimentaria. Según la FAO (2019), el sistema alimentario incluye no solo la producción, transformación y distribución de alimentos, sino también los contextos físico, económico, político y sociocultural que condiciona las decisiones de consumo, acceso y preparación de los alimentos. Esta perspectiva sistemática permite identificar las interacciones entre áreas rurales urbanas, y cómo estas influyen en la disponibilidad, calidad y sostenibilidad de los alimentos.

En México, este enfoque resulta particularmente útil para comprender los desafíos relacionados con la pobreza, la inseguridad alimentaria y la malnutrición. El país experimenta una transición alimentaria y nutricional marcada por una creciente demanda de alimentos procesados, cárnicos y lácteos, en detrimento del consumo de leguminosas, cereales y vegetales. Esta transformación ha

contribuido a la coexistencia de desnutrición crónica en poblaciones rurales e indígenas con altos niveles de sobre pesos y obesidad en zonas urbanas, generando un perfil epidemiológico complejo caracterizado por enfermedades no transmisibles como diabetes y enfermedades cardiovasculares (fao 2019).

El sistema alimentario mexicano también revela profundas desigualdades estructurales. Las zonas rurales, donde se concentra la producción de alimentos, presentan mayores índices la pobreza (60% en 2016) y carencia alimentaria, especialmente entre niños, mujeres e indígenas. Estas condiciones limitan el acceso a dietas nutritivas diversificadas. Además, el mercado alimentario interno esta dominado por grandes comercializadores, excluyendo a pequeños productores que enfrentan obstáculos como la falta de transporte, información y organización para la venta de sus productos (FAO, 2019).

Frente a este panorama, se vuelve fundamental replantear las políticas públicas desde un enfoque territorial e inclusivo, que permita integrar acciones sociales, productivas, de salud y nutrición en los diferentes niveles del sistema alimentario. Esto incluye fortalecer los derechos agrarios de las mujeres rurales e indígenas, apoyar la agricultura familiar, y fomentar hábitos alimentarios saludables a través de intervenciones multisectoriales que favorezcan la sostenibilidad y la equidad en la alimentación.

2.1 Principios de la energía solar y su aplicación en deshidratadoras.

La humedad daña a los alimentos debido a que es un medio de proliferación de microorganismos, hongos e insectos. Es por ello que la deshidratación de los productos agro-comestibles es muy importante para la preservación de los alimentos al retirarles la humedad que poseen, prolongando más el tiempo de vida comestible a ser perecederos. De ahí la importancia de las secadoras de frutos. Aunque existen varios tipos de secadoras como eléctricas, solares o híbridas, en este trabajo solo se abordarán las secadoras híbridas.

Como se muestra a continuación.

2.1.1 Las secadoras solares: Una de las ventajas de una secadora solar con respecto al secado a cielo abierto es la presencia de una temperatura mayor en la cabina con respecto a la temperatura ambiente, reduciendo el tiempo de secado además que se pueden controlar las variables que

intervienen en el proceso de secado, garantizando de esta manera una mayor calidad del producto final. Debido a que los productos están en el interior del gabinete se cuenta con protección contra insectos y polvo además se previene la presencia de moho gracias a una alta temperatura en la deshidratadora [7].

Las secadoras solares están conformadas por cuatro elementos [7], como se muestra en la figura 2.

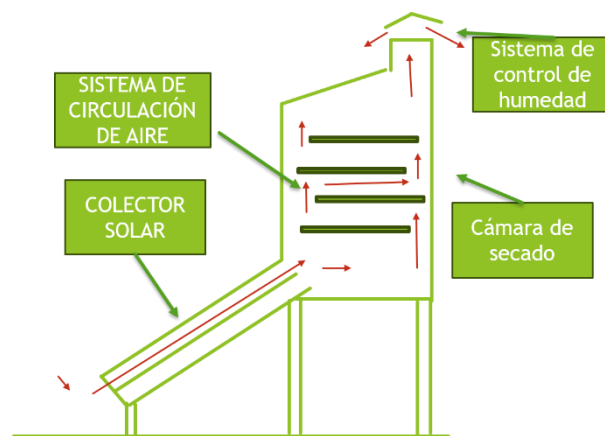


Figura 2: Elementos de una secadora solar convencional.

Colector solar: elemento donde se capta la energía o radiación solar para calentar el aire del interior de la cámara, para reducir la humedad de los frutos. Compuesto por tres partes, la primera es el recubrimiento de vidrio cuya función es dejar pasar la radiación solar y producir un efecto invernadero. El segundo es la superficie de absorción de radiación solar donde hay un intercambio de calor al aire, y la tercera es una zona de circulación de aire que es un espacio de 10 centímetros entre el recubrimiento y la superficie de absorción solar, para permitir la circulación a la cámara.

Cámara de secado: elemento principal de la secadora donde se colocan las estibas de los frutos a deshidratar.

Sistema de control de humedad: permite la regulación de la temperatura dentro de la secadora, y la liberación del excedente de humedad relativa en el aire. Esta liberación se dará conforme el proceso lo requiera.

Sistema de circulación de aire: hace circular el aire caliente dentro del gabinete entre las camas de los frutos, arrastrando la humedad que estos poseen. El objetivo del sistema es que el aire caliente se distribuya uniformemente por toda la cámara.

- **Tipos de convección del aire:** El aire que circula dentro del gabinete de secado puede ser de dos maneras, por convección natural o forzada. La primera el aire al ser calentado por el colector solar este se hace más ligero y asciende creando corrientes de aire seco que extrae la humedad de los frutos a secar. Mientras que en la convección forzada se hace circular el aire hacia la cámara con ayuda de un ventilador para la extracción de humedad de los frutos.

Sin embargo, para lograr el objetivo de secado de frutos con el principio de funcionamiento de una deshidratadora solar hay tres métodos de secado [7], ver la figura 3:

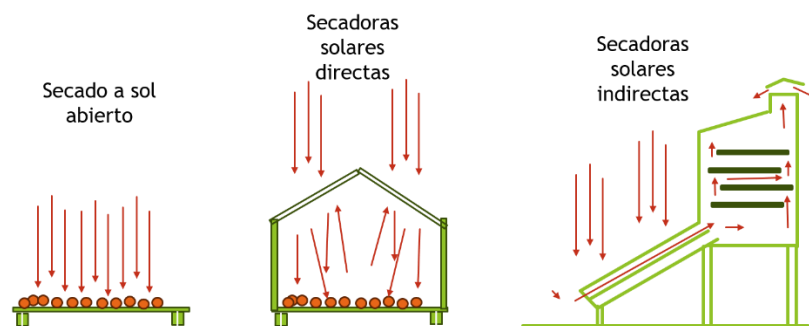


Figura 3: Tipos de secado solar.

Secado a sol abierto (Open Sun Drying): Parte de la energía solar es reflejada y otra absorbida por la superficie dependiendo del color de las frutas. La radiación absorbida es transformada en energía térmica aumentando la temperatura del fruto desprendiendo así la humedad que estos poseen.

Secadoras solares directas (Direct Solar Drying): Este sistema posee la cámara de secado y el colector solar unidos, la radiación solar llega directamente a la zona de los frutos. Un sistema económico con convección natural del aire.

Secadoras solares indirectas (Indirect Solar Drying): Estos sistemas tienen el colector y la cámara de manera independiente, la cámara encapsula los frutos del sol. Y el aire es calentado por el colector, para después pasar al gabinete.

2.1.2 Secadoras híbridas:

Estas secadoras también tienen integrados los mismos elementos que las secadoras solares, es decir, cuentan con un colector, una cámara deshidratadora. Sin embargo, un punto a favor de estos sistemas es que se les puede integrar sistemas de energía de complemento ya sea eléctricos o la quema de combustibles, haciéndolos así sistemas híbridos [8]. Haciendo este tipo de secadoras más complejas en su funcionamiento, Teniendo la posibilidad de implementar sistemas auxiliares que optimicen su funcionamiento como lo son los sistemas de control y/o algoritmos de control inteligentes.

2.1.3 Secador solar de biomasa

Debido a que el secado de frutos, principalmente el de manzana requiere de mucha energía, se evalúan diferentes maneras de deshidratación con un impacto ambiental mínimo. Siendo la biomasa una fuente de energía renovable.

McDowell propuso un diseño donde considera que el área de secado de frutas este debajo del techo solar, ingresando el aire por debajo de la bandeja.

2.1.4 Horno de Cylon

Secador de biomasa a fuego directo, debajo de la plataforma de secado hay un quemador protegido únicamente por un techo de dos aguas.

2.2 Sistemas automatizados de deshidratación

En los últimos años surgió la necesidad de automatizar los procesos de secado, debido a que gran parte de estos procesos existe un operador encargado de supervisar el adecuado funcionamiento de las secadoras testeando periódicamente la humedad de los frutos de salida. En donde se debía medir la humedad de los frutos y tomar a consideración la cantidad de agua que estos mismos poseen. Ya que al contar con demasiada agua se debe prolongar el tiempo de secado y en caso contrario, reducir el tiempo de descarga del lote de frutos ya que al tener menos agua y pasar más tiempo se puede sobre secar el producto, volviéndose quebradizo o perder su valor nutricional, por ejemplo, la vitamina C puede degradarse al ser sensible al calor [9].

Existen diferentes proyectos que presentan sus alternativas de control teniendo un funcionamiento adecuado a sus necesidades. Cuyo funcionamiento es monitorear la humedad dato indispensable para el microprocesador encargado de administrar la rutina de deshidratación. Los siguientes subtemas son ejemplos de sistemas de control aplicado en deshidratadoras.

2.2.1 Deshidratadora de plantas medicinales

Disco dispositivo fue creado con el propósito de conservar las propiedades del Té de limón, Cumpliendo su objetivo al aplicarse un sistema de control de automatización de la escotilla. Dispositivo que regula el flujo de salida de humedad relativa [10].

2.2.2 Maquina deshidratadora de vegetales.

El objetivo principal del secado de verduras es el de conservar sus propiedades nutricionales para que puedan ser ingeridos por los seres humanos. El funcionamiento es el circulamiento continuo del aire a través de un sistema de control controlando la temperatura y el tiempo manteniéndolas estables durante un proceso de deshidratación [11].

2.2.3 Diseño de un algoritmo de control basado en lógica difuso aplicado a un secador rotatorio de alimentos

Para la realización de este proyecto se analizaron diferentes tipos de control, un modelo empírico, control clásico proporcional integral y aplicaciones de lógica difusa para regular las variables de secado críticos de un secador de tambor rotatorio dentro de los parámetros pertinentes para obtener frutos deshidratados [12].

2.2.4 Efecto del invernadero sobre el secado de cultivos condiciones naturales y convección forzada II. Modelo térmico y validación experimental

El tema anterior es el título de un artículo que presenta modelos matemáticos donde analiza el comportamiento térmico de cultivos a un secado directo [13]. Así como el análisis dentro de un invernadero tanto aplicando inducción natural o forzada. Buscando predecir las temperaturas del

cultivo, la temperatura interna del invernadero y la humedad. La evaporación fue calculada sobre la base de energía solar. Intensidad y temperatura ambiente.

El artículo propone una ecuación (1) que muestra el comportamiento del aire del invernadero con inducción de aire forzada dada por [13].

$$T_r = \frac{I_{effR} + hcA_c T_c + 0.016(R_1 T_c + R_2 - \gamma_r R_2) + H_g I_{effG} + [0.33NV + \sum U_i A_i + (UA)_{g\infty}] T_a}{hcA_c + 0.016hc\gamma_r R_1 + (UA)_{g\infty} + 0.33NV + \sum U_i A_i} \dots\dots(1)$$

T_r , Es la temperatura del aire en el cuarto

T_c , Es la temperatura del fruto

Capítulo III sistemas de control

Los sistemas de control están conformados por una variedad de elementos conectados entre sí lo cual permite regular o gobernar una planta o proceso [14].

Ejemplos en donde se puede encontrar sistemas de control van desde sistemas eléctricos, neumáticos, mecánicos, etc. Cada uno de ellos funciona de tal manera que un sistema de control pueda ajustar el funcionamiento para poder mantener un estado de un sistema, ya sea su presión, velocidad, temperatura, etc.

A pesar de que los sistemas puedan ser controlados de manera automática o manual, debe tener al menos 3 elementos base.

- Una variable, elementos a controlar.
- Actuador, elemento que ejecuta una acción, por ejemplo, elevar la temperatura.
- Set point o punto de referencia, referencia a alcanzar.

Para realizar la identificación de sistemas existen tres métodos curva de reacción, respuesta de frecuencia y método de mínimos cuadrados.

La curva de reacción es muy utilizada por la industria de procesos para determinar la ganancia, la constante de tiempo y el retardo de un sistema sobre amortiguado (comportamiento común en procesos de nivel, temperatura, flujo y presión) [14]..

3.1 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Para poder aplicar un sistema de control es fundamental conocer las características dinámicas de un proceso. Teniendo como alternativa la propuesta de un modelo matemático lineal o no lineal del proceso pudiendo ser muy complejo y complicado para su obtención de una función de transferencia y comprobación.

Por ello la identificación de sistemas consiste en determinar el modelo dinámico de un sistema a través de la experimentación a partir de la observación y medir la respuesta ante señales manipuladas de entrada al proceso. A continuación, se presenta un mapa conceptual sobre los tres métodos para la identificación de sistemas.

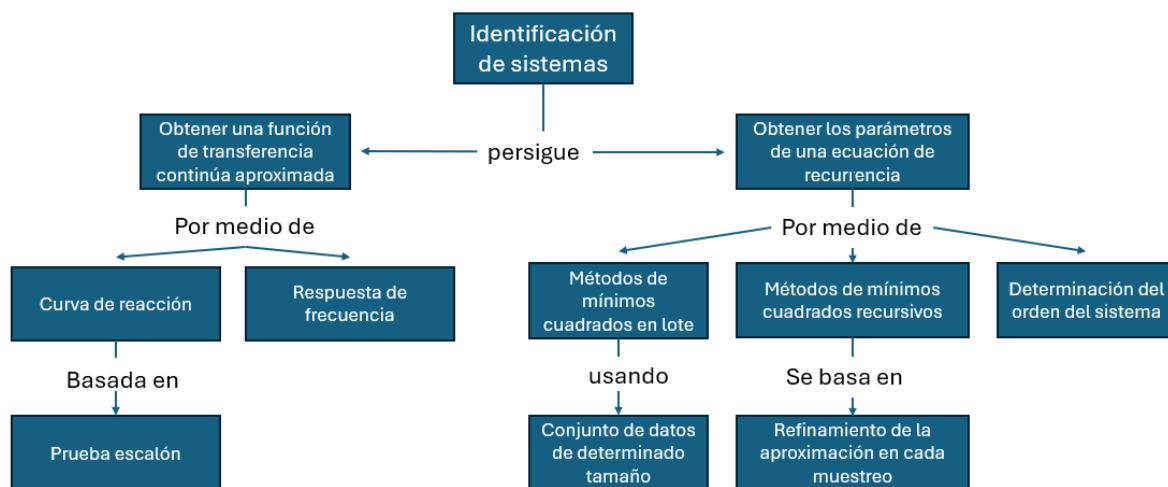


Figura 4: Mapa conceptual de Identificación de sistemas [14].

3.1.1 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

El propósito es ajustar una función de transferencia de primer orden a la respuesta de un sistema real cuando la entrada es un escalón. Si dicha señal escalón, tiene un comportamiento exponencial, indica ser un sistema de primer orden teniendo la siguiente función de transferencia es de primer grado en función de “s” [14].

$$G(s) = \frac{K}{\alpha s + 1} \dots \dots (2)$$

K = Valor de la ganancia del sistema

α = *Es la constante del tiempo en el que se alcanza el 63.2 por ciento de la ganancia*

3.1.2 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

Si al tener de entrada una señal escalón la respuesta del sistema presenta oscilaciones o retardo en la señal de salida [14]., indica que el sistema es de segundo orden dado por la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \dots\dots\dots (3)$$

ω_0 , *frecuencia natural del sistema*

ζ *Describe el comportameinto de las oscilaciones y define los polo del sistema*

Dicho sistema podría tener tres posibles respuestas, tal como se observa en el siguiente figura.

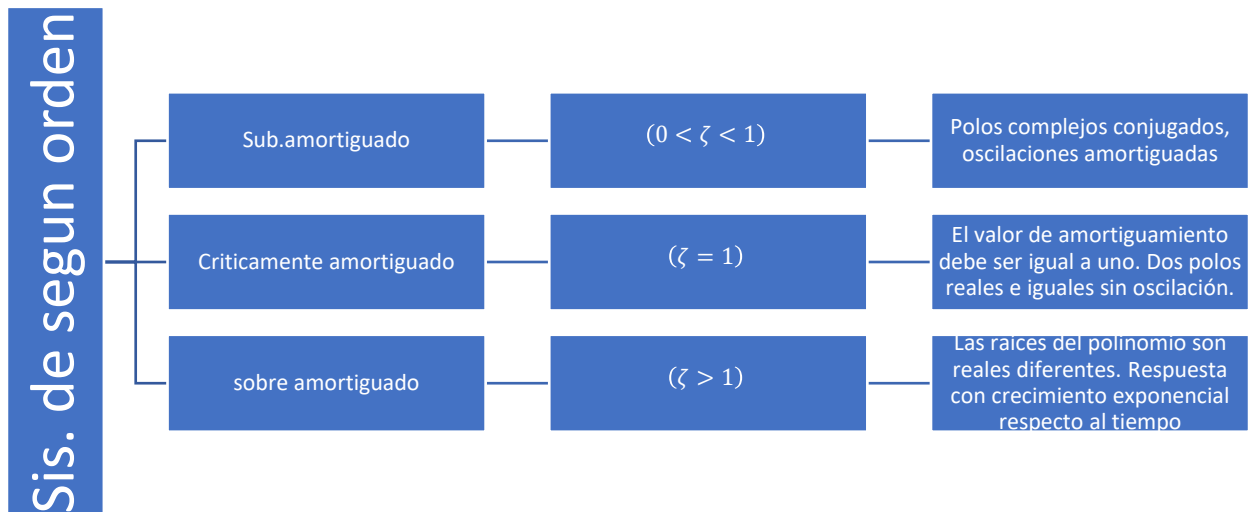


Figura 5: Sistemas de segundo orden [14].

Dichos comportamientos de las señales de respuesta se muestran en la siguiente figura.

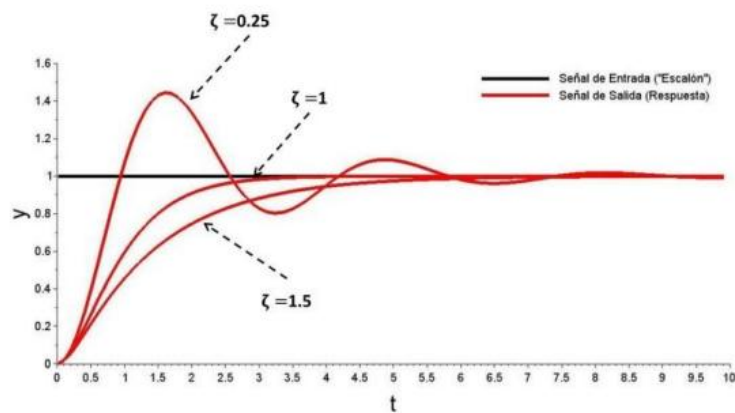


Figura 6: Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden bajo diferentes condiciones de amortiguamiento [15].

3.2 sistema de control clásico

Se podría catalogar las dos principales actividades que abordan los sistemas de control: una que conduce a la modificación del mundo (conductivas) y otras actividades de procesamiento de información con un grado de abstracción (cognoscitivas) [16].

El control clásico realiza principalmente un tratamiento de información numérico y actuación sobre el mundo y no en actividades cognoscitivas de alto nivel de abstracción, los sistemas de control clásico son el de lazo abierto y el de lazo cerrado:

3.2.1 Sistema de control de lazo abierto

La señal de salida del proceso no afecta a la acción de control, al no tener un parámetro para leer dicha señal o que tenga una retroalimentación para realizar una comparación con la señal de entrada. Es decir, la entrada de referencia tiene una condición de operación fija, dependiendo solo de calibración. En la figura 7 se puede observar la naturaleza de este sistema.

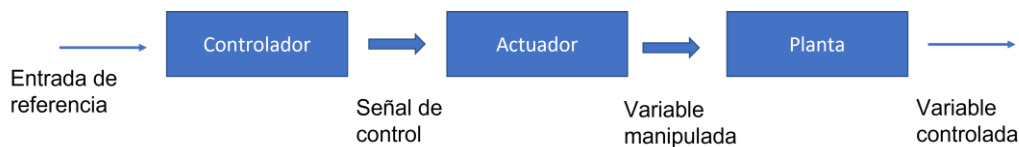


Figura 7: Sistema de control de lazo abierto.

3.2.2 Sistema de control de lazo cerrado

Estos sistemas tienen una retroalimentación, donde se realiza una comparación de la señal de salida con la señal de entrada, y la diferencia (señal de error) entra al controlador para ser compensada y tener la salida deseada. Una de las ventajas de este sistema es que el sistema es insensible a perturbaciones externas e internas en los parámetros del sistema. En la figura ocho se puede observar el funcionamiento del sistema.

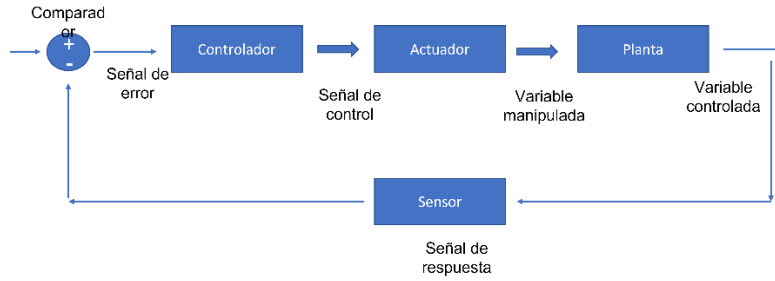


Figura 8: Sistema de control de lazo cerrado

3.2.3 Elementos básicos de un sistema de control

- **Comparador:** Realiza una comparación de variables entre la señal obtenida y la señal deseada, dando como resultado una señal de error.

$$\text{señal de error} = \text{señal de referencia} - \text{señal de valor medio}$$
- **Controlador:** Realiza su accionamiento al recibir la señal de error, tomando la decisión de que señales enviar para activar diferentes interruptores.
- **Elemento de actuación:** Produce un cambio en el proceso con el propósito de realizar modificaciones y/o correcciones en la condición modificada. Proporcionando la energía para realizar la acción de control.
- **Proceso:** Es la actividad que se desea controlar, al medir una variable esta es información que es utilizada para poder tomar una decisión acerca del proceso, para realizar una acción de control.
- **Elemento de medición:** Produce una señal eléctrica con respecto de una variable física de interés en el proceso de control.

Existen varios tipos de controladores que se clasifican de acuerdo con su naturaleza de acción, de acuerdo con el funcionamiento de la planta y a las condiciones operacionales.

3.2.4 Controlador PID

Un controlador PID está conformado por tres acciones de control más que son el proporcional, integral y derivativo. Para entender el funcionamiento del controlador PID se explicará primero el funcionamiento de cada acción de control [14].

Acción del control proporcional: El controlador proporcional desarrolla una señal proporcional al error, actuando como un amplificador reduciendo la diferencia de la señal de entrada con respecto a la señal de salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = k_p e(t) \dots \dots (4)$$

Siendo k_p la ganancia proporcional. Siendo en esencia un amplificador de ganancia ajustable. La siguiente figura representa el diagrama de bloques de controlador proporcional.

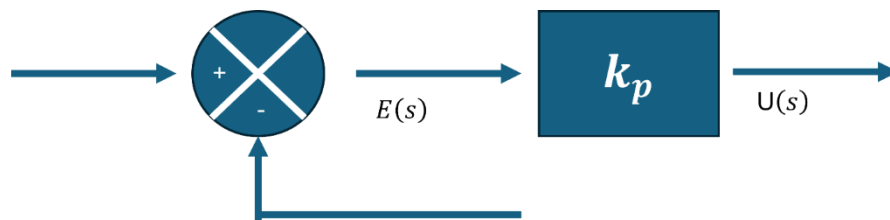


Figura 9: Diagrama de bloques de un controlador proporcional.

Acción del control integral: cuando se emplea una acción de control integral, la señal de control se modifica a una velocidad proporcional a la señal de error. Lo cual nos da una respuesta de error más grande, la señal de control incrementa rápidamente, y si es pequeña, la señal de control incrementa lentamente.

En un controlador con acción de control integral, el valor de la salida de controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$. Por lo tanto:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \dots \dots (5)$$

En donde k_i es una constante ajustable. La función de transferencia de k_i es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_p}{s} \dots \dots (6)$$

En ocasiones la acción de control integral se denomina control de reajuste o reset. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques de un controlador integral.

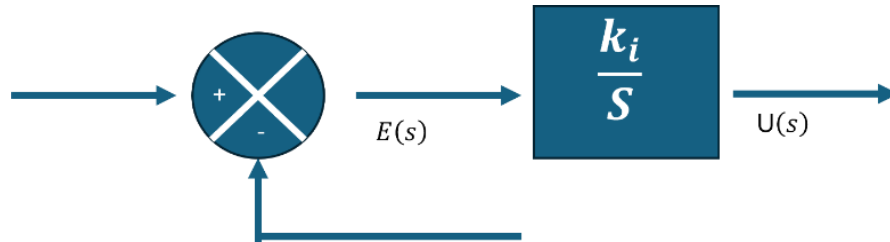


Figura 10: Diagrama de bloques de un controlador integral.

Acción del control proporcional derivativo. Dicha acción proporciona una señal de control proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. Debido a que no se genera una señal de salida a menos que se registren cambios. La acción de control proporcional derivativo está dada por.

$$u(t) = k_p e(t) + K_P T_{(P)} \frac{de(t)}{dt} \dots \dots \dots (7)$$

Cuya función de transferencia es.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \dots \dots \dots (8)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional, mientras que T_d es una constante denominada tiempo derivativo, son ajustables. La acción de control derivativo, también llamado control de velocidad ocurre cuando la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error.

El T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. Del cual su ventaja es ser preventivo y su desventaja es amplificar ruido y provoca saturación en el actuador. La siguiente figura representa el diagrama de bloques de este controlador.

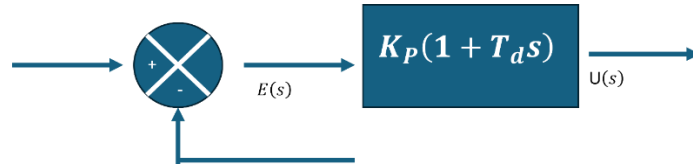


Figura 11: Diagrama de bloques de un controlador Proporcional derivativo

Acción del control proporcional integral: Un controlador proporcional por sí solo es incapaz de neutralizar una carga en el sistema sin ningún error en estado estable de la salida. Un controlador integral puede proporcionar un error cero, la respuesta puede ser lenta. Este controlador está dado por.

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \dots\dots\dots (9)$$

Donde K_i regula la ganancia de integrador y K_p ajusta el integrador y la ganancia proporcional.

Sistema de control PID, Proporcional, integral y derivativo:

El más utilizado, debido a que proporciona una respuesta rápida, estabilidad del sistema y un error bajo.

Siendo la combinación de una acción de control proporcional, integral y derivativa. Esta mezcla tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de este controlador está dada por:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (10)$$

Su función de transferencia esta expresada como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \dots\dots\dots (11)$$

Donde k_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. La siguiente figura es la representación del sistema de control PID en diagrama de bloques.

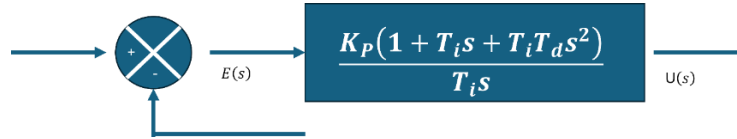


Figura 12: Diagrama de bloques de un sistema de control PID.

Sin embargo, en muchas situaciones se tiene que añadir a estos sistemas de control la supervisión del ser humano. El termino control inteligente se utiliza para hacer referencia a un control en el que las actividades cognoscitivas tienen especial importancia. Los derivados de las situaciones incomprensibles, por lo cual, la unidad de control avanzado se basa en el siguiente principio “dado el estado actual... ¿Qué acciones hay que tomar para lograr el objetivo deseado?”. Reflejando el principio de toma de decisiones basado en el estado, en técnicas como: control óptico, control predictivo basado en modelo, Lógica difusa/sistemas inteligentes y control adaptativa. Este tipo de control no se relaciona, sino que predice y planifica acciones futuras con base al estado de un sistema, considerado restricciones y objetivos.

3.3 sistemas de control inteligentes.

Hablar de control inteligente tomamos por hecho la inclusión de varias herramientas tecnológicas para la resolución de problemas aparentemente inabordables.

Mientras que el control clásico realiza un tratamiento de información en un nivel numérico del cual no aparece en actividades cognoscitivas con un alto nivel de abstracción. El por ello que este tipo de situaciones se necesita la supervisión de un ser humano, para dar respuesta a problemas con comportamientos impredecibles.

Por lo cual el control inteligente es el resultado de control automático, IA, y sistemas informáticos, en el siguiente tema se presentan algunos ejemplos de control avanzado además del fundamento teórico del i-PID.

3.3.1 sistemas expertos

La base del conocimiento de los sistemas expertos se obtiene de la experiencia de un experto humano, el responsable de un proceso a controlar. Reconociendo dos tipos de información reglas referentes a la interpretación del estado del proceso y reglas para la determinación de las actuaciones. Clasificándose en grupos o meta reglas.

3.3.2 Control robusto

La robustez de un controlador hace referencia a su tolerancia e insensibilidad frente a incertidumbres que pueden presentarse durante la operación del proceso. Este tipo de controladores son ideales para plantas con dinámicas desconocidas o sometidas a perturbaciones no modeladas. Para diseñar un sistema de control robusto implica cuantificar las incertidumbres asociadas a errores en e modelo del proceso, los cuales pueden surgir por el comportamiento no lineales o variaciones en el tiempo. Por lo tanto, el objetivo es garantizar que el sistema opere dentro de los parámetros deseados, a pesar de estas incertidumbres.

Uno de los mayores desafíos en el diseño de sistemas de control es formular una ley de control general que mantenga el efecto de las incertidumbres dentro de un margen de error aceptable. Por ello, un sistema de control robusto debe ser capaz de gestionar dichas variaciones sin comprometer el rendimiento ni la estabilidad del proceso.

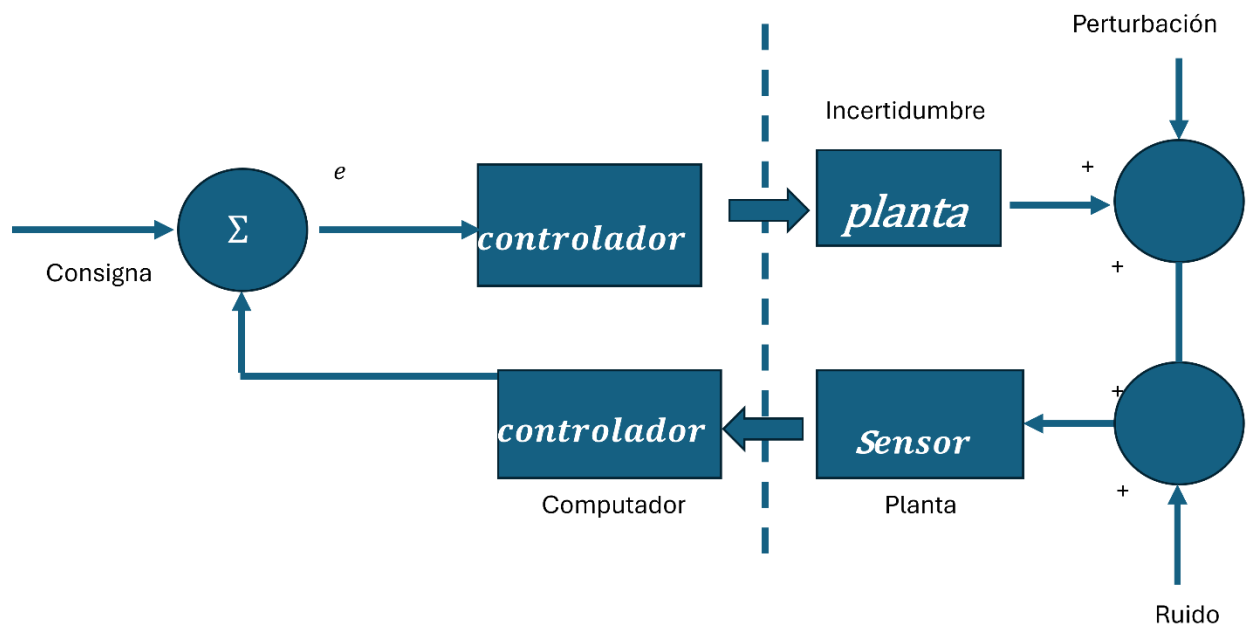


Figura 13: Diagrama de bloques de una planta donde se puede aplicar el control robusto

3.3.3 PID inteligentes (i-PID)

Tiene las mismas cualidades que un sistema de control PID, mejorando uno de sus puntos débiles incorporando un término “inteligente” para: la pérdida de prestaciones en presencia de términos no-lineales o de dinámicas no modeladas [17].

3.3.4 Redes neuronales

Las redes neuronales artificiales están inspiradas por las redes orgánicas del cerebro (ver *figura 1*), pero trasladados a una computadora, si bien no es una analogía perfecta, lo cierto es que hay neuronas, activaciones y muchas interconexiones [18].

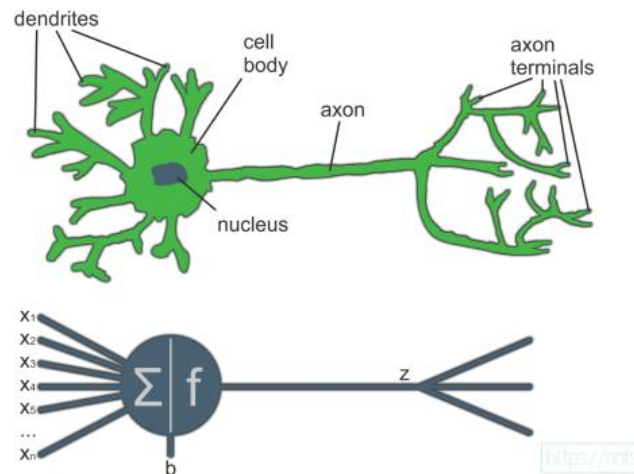


Figura 14: Comparación de una neurona biológica con una neurona artificial [18].

Una neurona por si sola puede no tener mucha utilidad, pero la interconexión de varias neuronas produce relaciones y resultados que superan con frecuencia cualquier otro método de aprendizaje automático.

Un sistema de control utilizando redes neuronales consiste en un control supervisado y que la red aprende un conjunto de entradas y salidas deseadas, siendo así un sistema dinámico. En un tratamiento de la información.

Las redes neuronales en los sistemas de control tienen la capacidad de aprender, por lo que el parámetro de entrada y la salida esperada junto con la salida real del sistema ante una entrada

dada, la red neuronal sería capaz de modificar sus parámetros aprendiendo de la planta para conseguir un sistema confiable.

3.3.5 Machine learning

El aprendizaje automático (Machine learning), es un sistema de control que se realiza en tiempo real. Por lo cual al utilizar machine learning en un proceso este podría calcular las velocidades ideales para optimizar la producción de un bien y ser energéticamente eficiente, al calcular y regular los valores del PID óptimos [19]. Es capaz de pronosticar mediante un mantenimiento predictivo futuras averías o ciclos de vida de los componentes del sistema [20].

3.3.6 lógica difusa

Técnica de control basado en reglas para manejar la imprecisión, siendo una alternativa al control predictivo, adaptativo y otras técnicas de incertidumbre.

La lógica difusa aplica estrategias de control expresadas en términos lingüísticos para los operadores de proceso [21]. Se podría decir que hace mucho más humano el control. Podríamos hacer la analogía de programación avanzada. Es un sistema de control de ‘‘alto nivel’’.

Cuando se desconoce el cual será el comportamiento de un sistema a ciertas entradas, función de transferencia. El sistema puede ser descrito utilizando reglas de sentido común, dictadas por un experto de la planta.

El método de lógica difusa emplea un modelo lingüístico representado en funciones de membresía, y aplicando reglas de los conjuntos para determinar el grado de pertenencia de cada uno de los valores al valor estipulado.

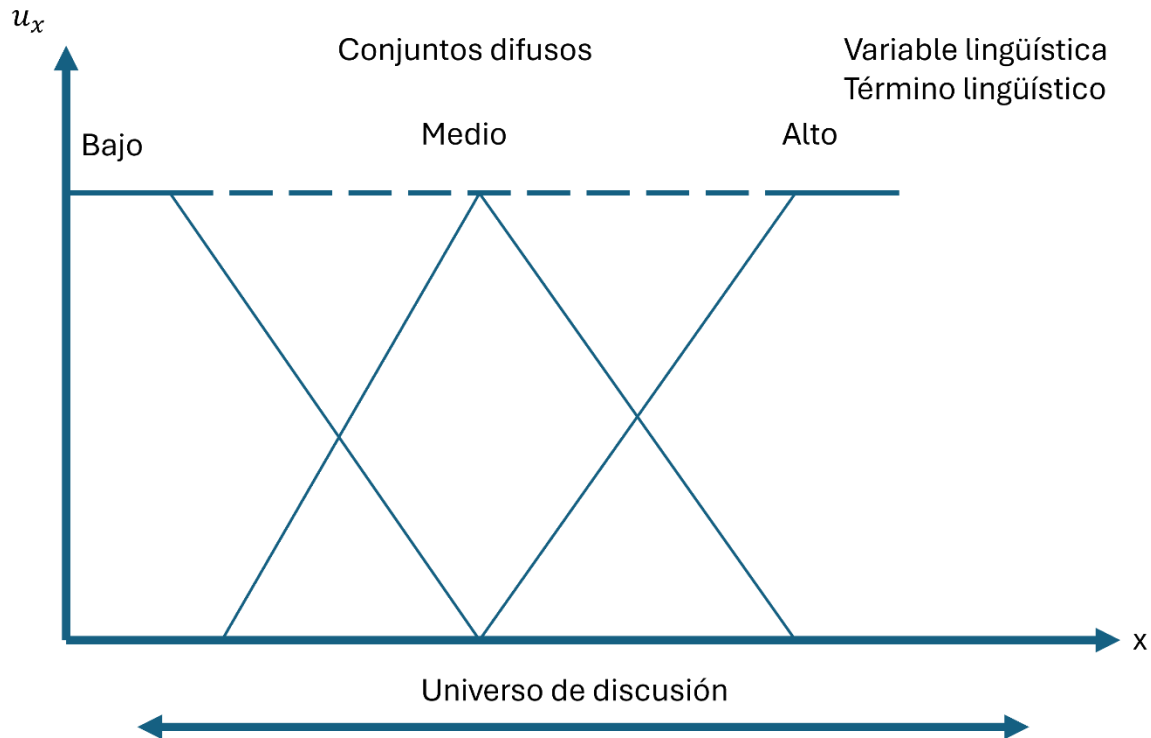


Figura 15 Ejemplo de diseño de un sistema de control difuso

En el siguiente subtema se profundizará más sobre el control PID inteligente, que será el método de estudio para su aplicación en el proyecto.

3.4 PID Inteligente (i-PID)

La confianza que la industria le tiene al control clásico PID se ve reflejado en la utilización del mismo en sistemas que por su naturaleza deben tener un control en procesos. Y esto se debe a la complejidad para encontrar modelos matemáticos que describan el proceso a controlar. Además, la complejidad matemática subyacente a algunos algoritmos avanzados de control genera importantes reticencias en la industrial.

La propuesta de solución de este problema la propone Fliess and Join, 2008a [22], en la cual sustituye el modelo matemático por ecuaciones diferenciales ultra-locales y fenomenológicas relacionado de una manera genérica entradas y salidas, válidas en pequeños lapsos de tiempo. La ventaja de esta filosofía de control es que se conservan todas las cualidades de la estructura de un PID, agregando la palabra “inteligente” para compensar los efectos de las dinámicas no modeladas del sistema.

3.4.1 Teoría del control i-PID

Un sistema no-lineal de dimensión finita está dado por:

$$\Phi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(l)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(k)}) = 0, l, k \in \mathbb{N} \dots\dots (12)$$

Donde Φ es una función que se puede derivar con respecto a sus argumentos

$$\exists \mu, 0 < \mu \leq l, \frac{\partial \Phi}{\partial y^{(\mu)}} \neq 0 \dots\dots (13)$$

El teorema de la función implícita permite reescribir la ecuación como:

$$y^{(\mu)} = Y(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(\mu-1)}, y^{(\mu+1)}, \dots, y^{(l)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(k)}) \dots\dots (14)$$

Donde, si se hace el cambio de variable de $Y = F + \alpha u$ tenemos:

$$y^{(\mu)} = F + \alpha u \dots\dots (15)$$

Siendo $\alpha \in \mathbb{R}$ y $\mu \in \mathbb{N}$ dos parámetros constantes que no necesariamente son dependientes de una magnitud física, y que para realizar una elección se considera que:

- μ es un valor entero (generalmente 1 o 2), que representa el orden del sistema, pero no necesariamente.
- α debe permitir que F y αu sean del mismo orden de magnitud.

El termino F , representa a un identificador no-lineal de tipo caja negra [23], se obtiene en función del valor de la entrada en el instante precedente $u(t_k)$ y de la estimación de una μ – ésima derivada de la salida $[y^\mu(t_k)]_e$:

$$F(T_k) = [y^\mu(t_k)]_e - \alpha u(t_{k-1}) \dots\dots (16)$$

Dicha función compensará todas las perturbaciones o dinámicas no modeladas en el sistema siendo difíciles de identificar de manera individual en tiempo real.

3.5 Instrumentación

La instrumentación es un elemento fundamental en los procesos, ya que permite la medición, supervisión y registro de las variables críticas que intervienen en el comportamiento de un sistema físico. La función principal es proporcionar al sistema de control la información sobre el estado actual del proceso, a través de los sensores, transductores y transmisores, que captan variables como temperatura, presión, caudal, nivel o humedad, etc.

Estas señales, generalmente de tipo analógico y digital, son procesadas y enviadas al controlador, el cual, con base a una estrategia determinada, genera señales de salida que permiten modificar el comportamiento del proceso mediante actuadores como válvulas, motores o resistencias de calor. De esta manera, la instrumentación actúa como el nexo entre el mundo físico y el sistema de control, asegurando que las decisiones de control se basen en datos precisos.

En el contexto de procesos industriales o de laboratorio, como en el caso de una secadora híbrida solar-eléctrica, la instrumentación incluye sensores de temperatura, humedad relativa, y otros dispositivos que permiten caracterizar el estado del sistema en tiempo real. Esta información resulta primordial para implementar algoritmos de control que optimicen el desempeño del proceso frente a variaciones externas o internas.

Capítulo IV Métodos

4.1 Secadoras solares y control inteligente

Para la realización del proyecto se analizaron diferentes fuentes bibliográficas donde se describían la elaboración de secadoras solares e híbridas. Pero algo en común que tienen estos sistemas es que ya sea por convección natural o convección forzada del aire caliente, el flujo de este es unidireccional. Al funcionar de esta manera se perderá calor constantemente en la secadora

y no se podría utilizar 24/7, ya que en días nublados o en la noche el sistema se enfriaría su interior al no incidir radiación solar sobre el colector.

Por lo cual se adaptará una secadora solar de madera agregando dentro de la cámara de secado el sistema eléctrico (ver figura 16) [24] ya que dicho diseño implementa unos ventiladores que hacen que el aire caliente circule siempre dentro de la caja y solo cuando los sensores registren una humedad relativa alta en el interior de la cámara será extraída el excedente de humedad activando extractores de aire húmedo. Pero al estar reciclando el aire caliente se conservará la temperatura más tiempo, utilizando menos el sistema eléctrico.

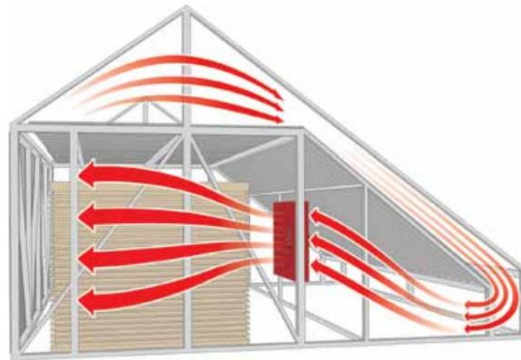


Figura 16: Secadora solar de madera [24].

Para el control y monitoreo de las variables críticas de secado se implementan diferentes tipos de control, desde sistemas clásicos hasta sistemas más complejos que van desde inteligencia artificial, machine learning y lógica difusa. El primer sistema de control inteligente tiene muchas aplicaciones en estimación y optimización en tiempos de deshidratación de un proceso [25], teniendo muchas ventajas tales como: la disminución del tiempo del cálculo para regular las variables críticas de secado y un incremento en la estabilidad y precisión al mantener el setpoint dentro de la secadora.

El control con Machine learning tiene la ventaja de poder abordar problemas no lineales además de su facilidad en capacitación e implementación [26], donde se utiliza el algoritmo random forest para estimar la calidad de aire, en especial la humedad relativa.

El control con lógica difusa se implementó en una secadora híbrida solar-eléctrica [8] donde se implementó el uso de energía solar y eléctrica por separado. El sistema difuso permitió predecir la temperatura de secado al instante con una gran reducción en tiempo de simulación.

4.2 Construcción e instrumentación de una secadora solar híbrida para el secado de frutos.

Para la realización del prototipo de la secadora se utilizó como base el de una secadora de madera. Ya que el diseño considera una forma óptima de captar el calor. Además de que se redujeron las dimensiones para economizar el proyecto. Considerando las siguientes partes esenciales para el correcto funcionamiento de la deshidratadora.

La parte principal es el colector solar donde se obtendrá la energía que caliente el interior de la cámara, para evaporizar la humedad de los productos agro-comestibles. Está a su vez está conformado por una cubierta de vidrio que estará en la parte externa que permitirá entrar la radiación y a la vez hacer un efecto invernadero al no permitir que escape el calor. Un espacio entre la superficie de absorción y el colector para el libre flujo del aire caliente por convección forzada a la cámara de secado donde estarán los frutos.

También se tiene que considerar el sistema de control de humedad que ayudará a regular la temperatura interna y permita la salida de aire, a como el proceso de secado lo demande.

Un factor muy importante es la orientación del colector, con orientación al sur y que este tenga un ángulo igual a la latitud del lugar más diez grados. Esto ayudará a obtener la mayor captación de energía solar tanto en verano e invierno [27] [28]. En el caso de Gómez poniente, Tlatlauquitepec, Pue. Tiene una latitud norte de:

$$LN = 19^{\circ}46'35 + 10^{\circ} = 29^{\circ}46'35 \approx 30^{\circ} \dots\dots\dots(17)$$

O también para obtener este ángulo de inclinación se construirá el muro norte más alto con respecto al muro sur. Utilizando la tabla siguiente donde se proporciona las dimensiones y regiones del país.

Región	Altura de la pared sur en metros	Altura de la pared norte en metros
A	2.5	5.10
B	2.5	4.92
C	2.5	4.76
D	2.5	4.60
E	2.5	4.44
F	2.5	4.26
G	2.5	4.16
H	2.5	4.02
I	2.5	3.89

Figura 17: Dimensiones de paredes en relación con la región del país [24].



Figura 18: Regionalización del país para encontrar los muros de la secadora [24].

Las variables críticas de secado son las que se tienen que considerar para una mayor optimización, como clave es la humedad relativa dentro del gabinete y la temperatura exterior y la interior. Principalmente la energía solar que será la que nos dé pauta para que entre en funcionamiento la fuente de energía eléctrica siempre y cuando está sea necesaria. La siguiente imagen muestra el arreglo electrónico de los sensores.

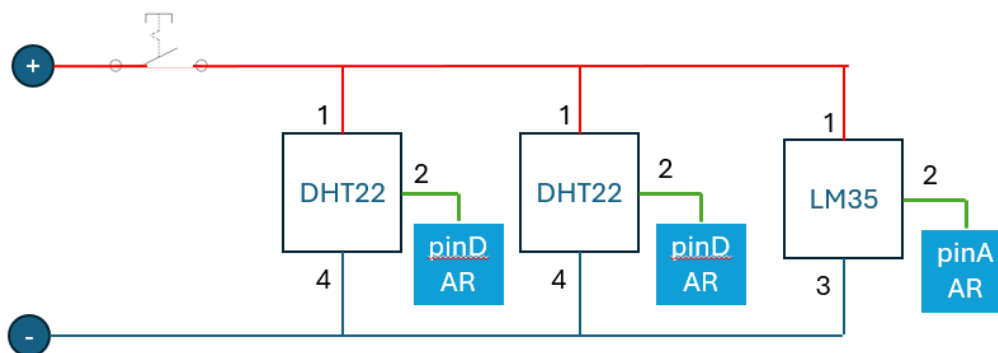


Figura 19: Arreglo electrónico de los sensores de humedad y temperatura y conexión a Arduino.

La imagen anterior muestra como es el arreglo general de la fuente de alimentación de 20 V CD de los sensores de humedad y temperatura y sus pines de información conectados a Arduino para la recolección de datos.

Para el diseño del colector estará cubierto por una placa de vidrio de 6 mm de espesor, se utilizará una placa ondulada de zinc [29] con 120 cm de largo y 80 cm de ancho teniendo una superficie de 9600 cm^2 expuesta a la radiación solar. Donde se calentará el aire para después con ayuda de ventiladores se realice la convección forzada al interior de la cámara de secado. Con dichas dimensiones se colocará de tal manera para que tenga una pendiente de 30° de acuerdo con lo calculado.

En la siguiente imagen se muestra un bosquejo de cómo es el prototipo de la deshidratadora, cabe mencionar que el bosquejo está bajo posibles cambios:

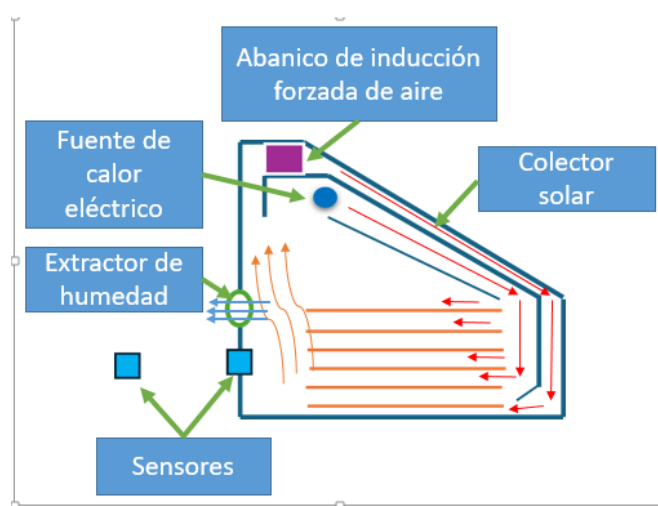


Figura 20: Bosquejo de la deshidratadora híbrida.

En la imagen anterior se puede observar el diseño y la distribución tanto de la secadora como de la instrumentación, contando con dos sensores de humedad y temperatura (cuadros de color azul claro) para testear datos internos y externos de la deshidratadora. Un ventilador (cuadro de color morado) que hace la convección forzada del aire caliente del colector solar a la cámara de secado, y dentro de la misma el sistema eléctrico que es una pistola de calor (figura circular) misma que produce expulsa calor haciendo que el aire caliente circule, esto es para la compensación de la temperatura faltante en la deshidratación en días con pocas horas sol. Y un extractor del excedente de humedad (circulo color verde). En la siguiente figura 21, se observa el diagrama muestra las conexiones del abanico y extractor con respecto a los pines de salida de Arduino.

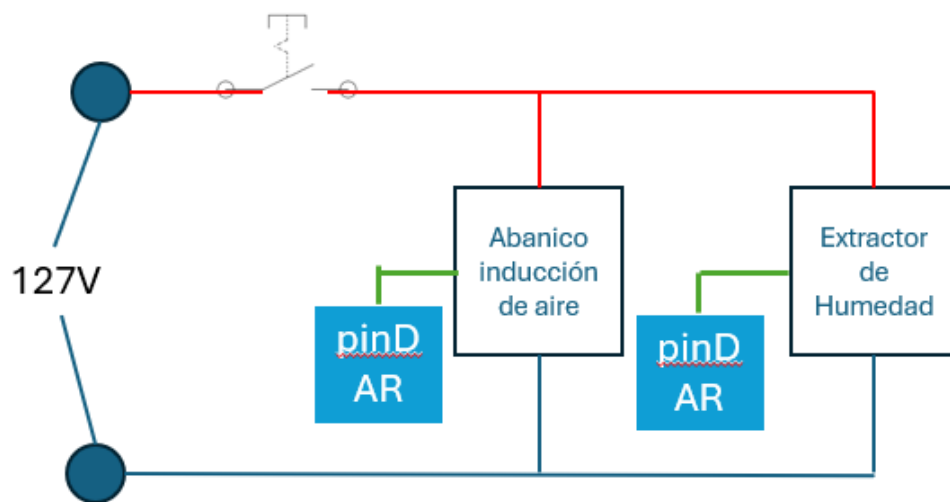


Figura 21: Diagrama del abanico y extractor de humedad.

Mientras que las líneas naranjas (figura 19) representan el acomodo de las charolas de manzana dentro de la cámara de secado. Cabe mencionar que el acomodo de los extractores de humedad, así como del sensor interno se basa con respecto a la secadora de madera [24] respecto a un diseño a escala 1:5. La siguiente figura 21 muestra el arreglo de potencia y el controlador PID de la deshidratadora híbrida.

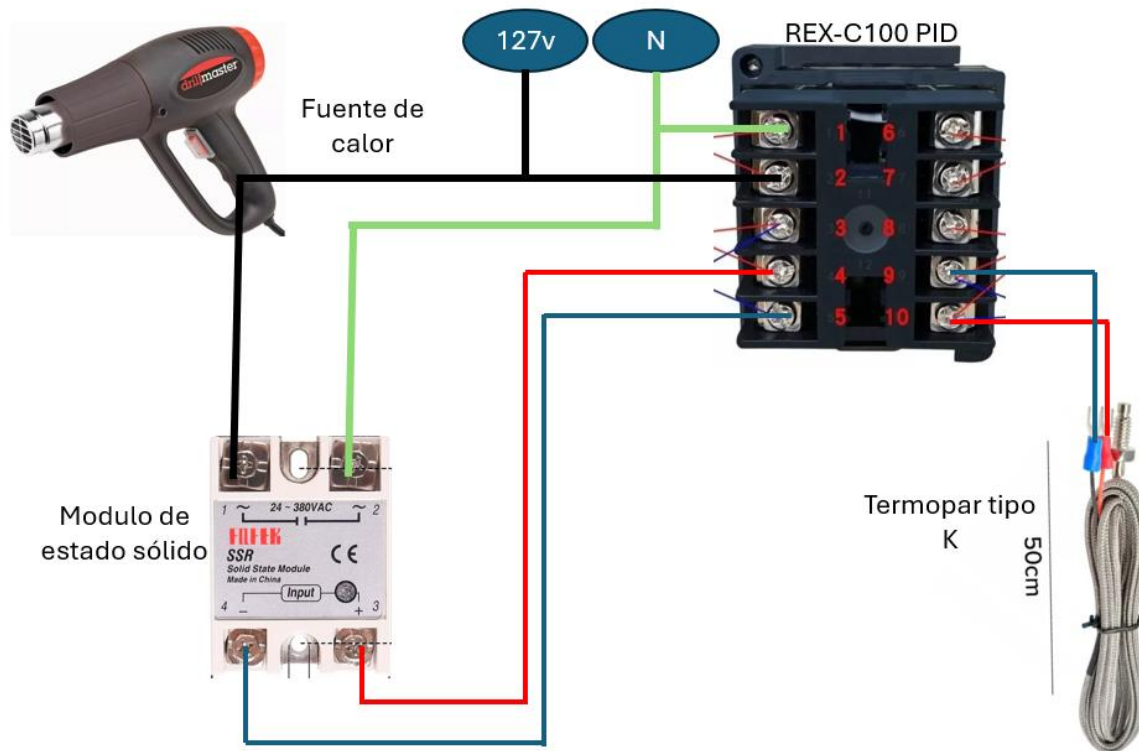


Figura 22: Circuito de potencial del controlador PID.

En el siguiente tema se abordará más el desarrollo del sistema de control.

4.3 desarrollo de un sistema de control para el monitoreo y regulación de las variables críticas del proceso de secado.

El diseño del prototipo se realizó considerando las características mencionadas en los temas anteriores. Cabe mencionar que en el interior de la secadora se diseñó para tener un tiro o pulmón que impide que el calor regrese al colector solar y así mantener el calor en la cámara de secado, mientras que al otro extremo de la cámara hay conexiones que llevan al ventilador para realizar la convección forzada de aire por el colector solar y reingresarlo y nuevamente calentar el aire a la cámara de secado.

El sistema que es utilizado para la deshidratación de manzana utiliza energía solar capturado por un colector solar. Se busca que el prototipo sea lo más hermético para evitar perturbaciones

externas y a su vez exista una recirculación del mismo aire que es calentando por el colector solar constantemente hasta alcanzar la temperatura ideal de deshidratación. Solo cuando exista un aumento de humedad dentro del sistema se activará un extractor. Y a pesar de ello la temperatura de secado se debe mantener de acuerdo al setpoint.

Una deshidratadora solar es un sistema que depende de la radiación solar para su propósito, por lo cual es ajustada por el contexto climático y se deben considerar los siguientes puntos para su diseño.

Puntos para considerar que afectarían el rendimiento de la secadora solar.

- Horas solares, La cantidad de calor que se pueda generar dependerá de la intensidad y el tiempo de exposición.
- Diseño y propiedades de los materiales, el aislamiento térmico y absorción afectarán el rendimiento de la secadora.

El punto uno se puede trabajar incluyendo una fuente de calor eléctrica que ayude al sistema a conservar la temperatura del setpoint, resultado así en nuestra propuesta de proyecto de desarrollar una secadora híbrida eléctrico-solar.

Sin embargo, también hay factores a considerar para la utilización de una fuente de calor eléctrica, que son.

- Capacidad calorífica de la fuente de calor, esta está ajustada a la potencia el cual determinará el calor que pueda introducir en la cámara de secado.
- El tamaño de la cámara de secado, el tiempo de calentado de aire dependerá del volumen de la caja.

Por lo tanto, nuestro sistema está conformado por dos elementos importantes.

1. Fuentes de energía térmica.
2. Cámara de secado.

Descripción real de cada elemento de la secadora solar.

4.3.1 cámara de secado

En la parte superior o de elevación se encuentra un abanico que realiza la convección forzada del aire de la parte superior a la parte inferior para introducir el aire caliente a la cámara de secado, el aire puede circular libremente hasta alcanzar la parte superior donde se encuentra el abanico para nuevamente realizar la convección forzada del mismo. Durante esta etapa se monitorea la temperatura y humedad del sistema. Cuando el sistema tenga una carga y el aire este recirculando continuamente, este aumentara el porcentaje de humedad relativa.

4.3.2 Fuentes de calor

La energía solar se obtiene de un colector solar, con un ángulo de inclinación de 30° , y cuya parte donde tiene la elevación está orientada hacia el norte para mayor captación de energía solar. Cuenta con un abanico para realizar la convección forzada de aire a la cámara de secado. Al garantizar el calentamiento del aire en la cámara para así alcanzar el setpoint.

Mientras que la fuente de calor eléctrico se activará siempre y cuando se detecte una menor incidencia de calor natural dentro de nuestro sistema. Así prioriza la utilización de la energía verde.

4.4 Instrumentación

La temperatura y humedad relativa son los parámetros críticos que influyen en el sistema, y el presente trabajo se enfocará solo en estas variables lo cuales requieren ser monitoreadas. De allí la importancia de la implementación de un sistema de control.

Clave fundamental para el sistema de control son los sensores que representan la transducción de variables físicas a eléctricas y así el sistema conozca su entorno y momento para regular la entrada de energía eléctrica.

Para la medición de temperatura y humedad relativa tanto interior y exterior se utilizará

4.4.1 sensor DHT22

Por las siguientes características que se adecuan a los fines del proyecto:

- Voltaje de Operación: 3V - 6V DC.h
- Rango de medición de temperatura: -40°C a 80°C .
- Precisión de medición de temperatura: $<\pm 0.5^\circ\text{C}$.

- Resolución Temperatura: 0.1°C.
- Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH.
- Precisión de medición de humedad: 2% RH.
- Resolución Humedad: 0.1%RH.
- Tiempo de sensado: 2s.

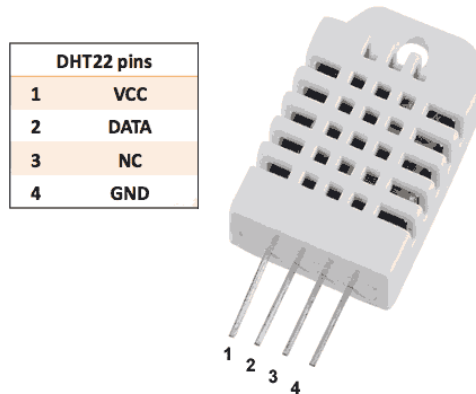


Figura 23: Sensor DHT22.

4.4.2 Sensor de temperatura analógico LM35

Es un sensor que puede ser utilizado con microcontroladores, teniendo un rango de medición de -55°C hasta 150°C. Proporcionando una señal de salida línea analógica con una pendiente de 10mV/°C con una precisión de 0.5°C. Características adicionales del sensor:

- Voltaje de alimentación: 4V-30V (5V recomendado)
- Rango de sensado: -55°C hasta +150°C.
- Precisión en el rango de -10°C hasta +85°C: $\pm 0.5^\circ\text{C}$
- Pendiente: 10mV/°C
- Consumo energético: 60 μA
- Pines: +VCC, V señal, GND

Debido a que la humedad relativa es una variable para controlar que se estará acumulando dentro de la cámara de secado, se debe extraer con un extractor de humedad. Y el que se utilizará en el proyecto es

4.4.3 Extractor *de aire* de 2"

Que cuenta con las siguientes características:

- Ducto de 2".
- Potencia de 17 W
- Tensión nominal de 110V
- Corriente de 0.15A.
- Flujo de aire $64 \frac{m^3}{H}$

4.4.4 REX – C 100 Controlador de temperatura PID

Permite monitorear y controlar temperaturas en un rango de 0° a 400°, utiliza algoritmos PID siendo preciso y sin variaciones, del cual cuenta con las siguientes características:

- Precisión de medición: +-5 %
- Error de compensación de unión fría: +- 2%
- Periodo de muestreo: 0.5 segundos.
- Resistencia de insolación: >500mohms
- Fuerza dieléctrica: 1500 VAC/min
- Temperatura de trabajo: 0-50°
- Humedad: 3-85% RH



Figura 24: REX-C100 Controlador de temperatura PID.

4.4.5 Arduino

Microcontrolador que por su código open source, y fácil programación se utilizará para monitorear la temperatura tanto exterior e interior del prototipo para recolectar datos y poder realizar la identificación de sistema a controlar.

Especificaciones:

- Microcontrolador: ATmega328
- Chip de Comunicación: CH340P.

Para su funcionamiento es necesario instalar el Driver CH340. Si no se instala, la USB no encontrará la placa.

- Tensión de Operación: 5V
- Pinos de entrada/salida: 14 (de los cuales 6 pueden ser PWM)
- Pinos de entrada analógica: 6
- Corriente DC por pin I/O: 40mA
- Corriente DC para pin 3.3V: 50mA
- Memoria Flash: 32KB (de los cuales 0.5KB son usados por el Bootloader)
- SRAM: 2KB - EEPROM: 1KB
- Velocidad del Clock: 16MHz



Figura 25: Arduino one.

4.4.6 softwares

Los softwares que se utilizaron son Spyder y Scilab:

Spyder es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para Python, diseñado para la computación científica e ingeniería. Ofrece herramientas de depuración, exploración de variables y compatibilidad con librerías como NumPy, SciPy y Matplotlib, Haciendo de spyder una opción ideal para análisis de datos y simulaciones.

Scilab es un software open source para el cálculo numérico, utilizado en simulación, modelado y análisis matemático. Ofrece un lenguaje de programación similar al de MATLAB y cuenta con herramientas avanzadas para álgebra lineal, optimización y procesamiento de señales, siendo una alternativa eficiente para la resolución de problemas de ingeniería.

Capítulo V Diseño, desarrollo e implementación del sistema de control en la secadora.

Para el desarrollo del sistema de control de la deshidratadora se abordará en dos etapas. En la primera, se implementará un control PID clásico para regular la temperatura de la fuente de poder eléctrica dentro de la cámara de secado. La aplicación de este control permitirá ajustar la potencia del sistema eléctrico para mantener las variables críticas de deshidratación de la manzana.

Sin embargo, es importante destacar que el sistema opera con una fuente de energía híbrida solar-eléctrica. En donde la contribución térmica por parte del colector solar es variable y depende directamente de las condiciones climáticas, lo que impide su regulación mediante un control PID convencional. Para abordar estas fluctuaciones, se implementará un control i-PID.

Un control PID inteligente, considera todos los atributos del control clásico, agregando la palabra “inteligente” que incorpora estrategias adaptativas para optimizar su desempeño en sistemas dinámicos y no lineales que no fueron modelados en el sistema. A diferencia de un PID clásico, en donde las ganancias; proporcional, integral y derivativa son fijas, el i-PID ajusta estos parámetros en tiempo real, lo que permite mejorar la respuesta del sistema. En algunos casos, este tipo de control puede utilizar algoritmos basados en inteligencia artificial, lógica difusa o machine learning. Sin embargo, este proyecto se centrará en su capacidad adaptativa mediante la identificación local de la entrada y la salida.

Y en el contexto de la secadora híbrida, se comparará la respuesta del PID clásico vs i-PID para analizar la mejor respuesta de control ante las variaciones térmicas generadas por la energía solar. La siguiente figura muestra un esquema representativo de este proceso.

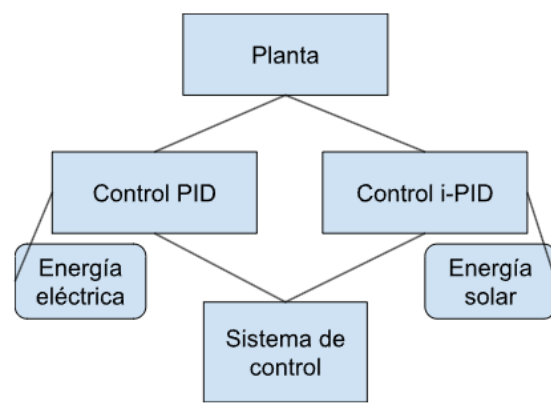


Figura 26: Implementación de un sistema de control.

5.1 Identificación del sistema, para aplicar control PID

Al momento de realizar una investigación o estudio es necesario conocer las características dinámicas del proceso al que se le implementará un sistema de control. Por lo cual el planteamiento matemático del proceso, para conocer su naturaleza si es lineal o no lineal. Mientras que en el primer caso se obtiene una función de transferencia. Por cual se realizó la obtención e identificación del sistema a partir de un muestreo de temperaturas. Variable de interés en este proyecto.

En la siguiente gráfica se muestra los resultados obtenidos al medir temperatura y humedad dentro de la cámara de secado, tanto el interior y exterior, con el fin de conocer a que sistema pertenece nuestra secadora, ya sea de primer orden o segundo.

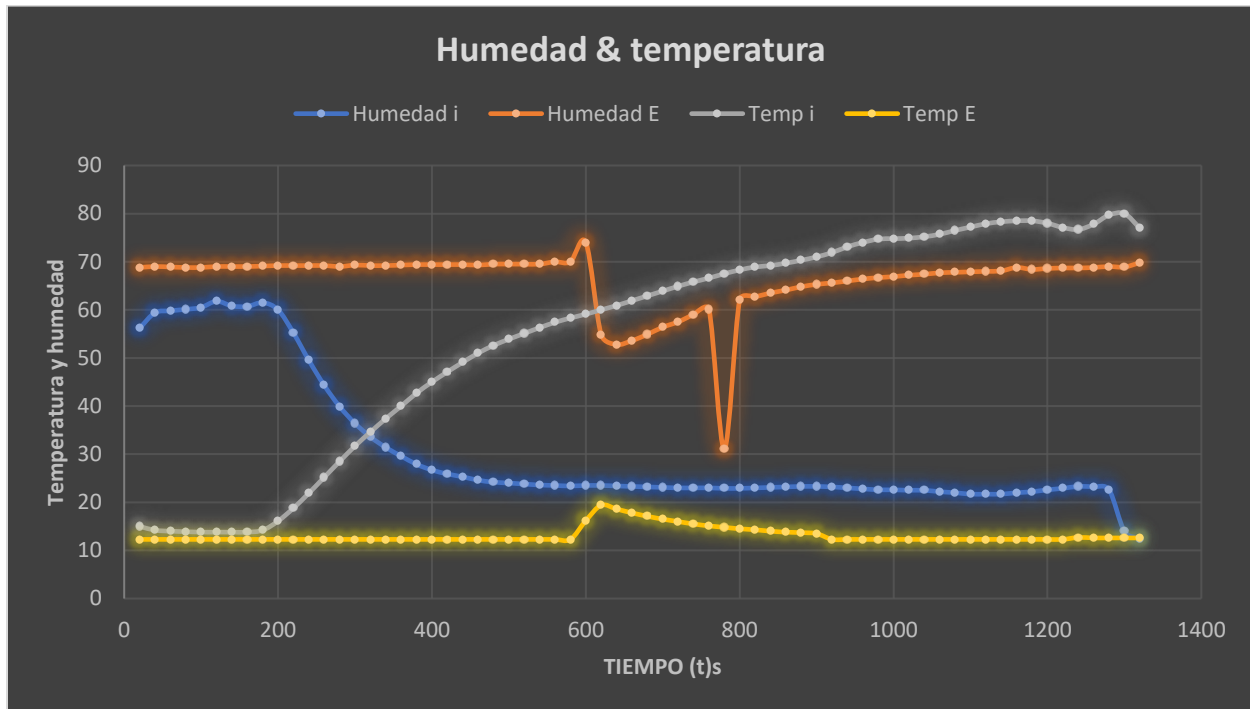


Figura 27: Muestra de temperatura y humedad.

Como se puede observar en la gráfica se muestran los datos de temperatura tanto interna como externa. En el caso de la humedad externa se logra apreciar una perturbación debido a la manipulación del sensor para la verificación del correcto funcionamiento.

De dicha grafica nos importa el comportamiento de la temperatura y humedad interna, como se observa en la siguiente gráfica.

Respuesta del sistema con 180s de retardo y crecimiento hacia 78.3

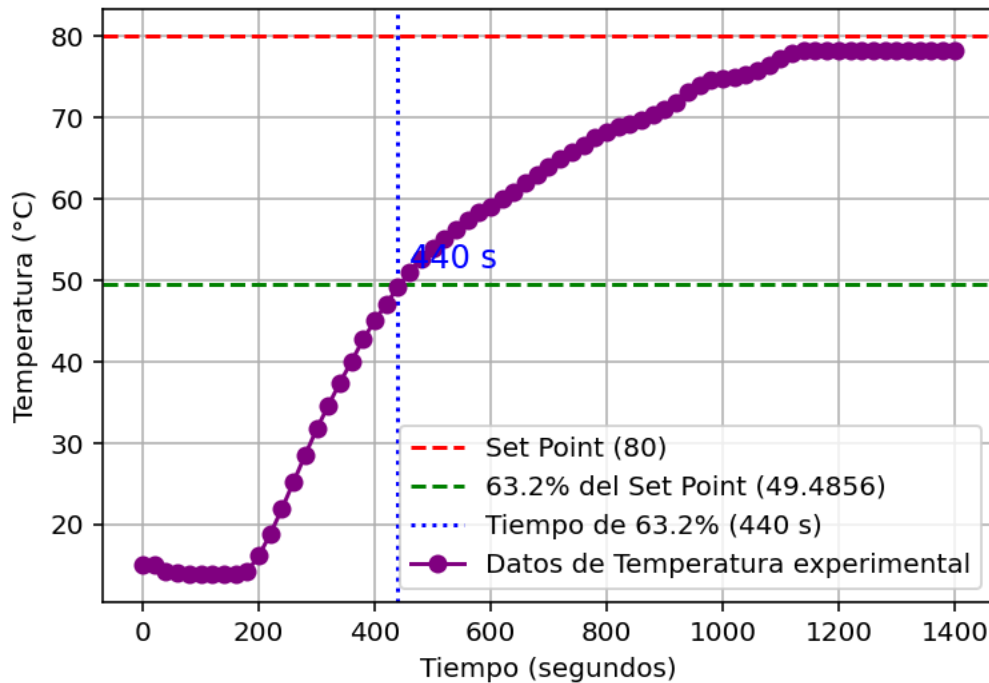


Figura 28: Gráfica de la temperatura de la cámara de secado.

Donde se puede observar que el comportamiento de la temperatura interna de un sistema de primer orden con retraso. Ya que la respuesta obtenida presenta un retardo con respecto al momento en donde se indica el set point de 80 grados, temperatura ideal para la deshidratación de manzana. Con esta información se puede calcular la función de transferencia con la siguiente expresión matemática.

$$G(S) = \frac{K e^{-t_d s}}{\tau s + 1} \quad \text{con retardo}$$

$$k = \frac{78.3}{80} = 0.98125 \quad \text{ganancia estática del proceso}$$

$$t_d = 180 \quad \text{tiempo de retardo}$$

$$\tau = 260 \quad \text{constante de tiempo}$$

Misma que se realizó el cálculo de las variables, así como considerando que el tiempo es en segundos. Al conocer la función de transferencia de nuestro sistema de primer orden podemos simularlo, para dicho propósito se utilizó el software Scilab.

$$G(S) = \frac{0.98125e^{-180s}}{260s + 1}$$

5.1.1 Simulación de la función de transferencia del sistema.

Declaración de variables para su simulación en Xcos Scilab.

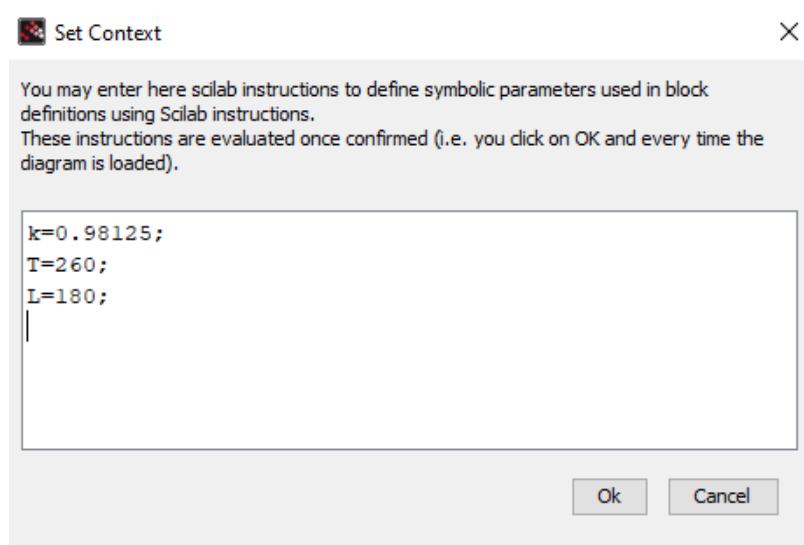


Figura 29: Contextualización de variables para su simulación.

Elaboración del diagrama de bloques para conocer la respuesta de la función de transferencia.

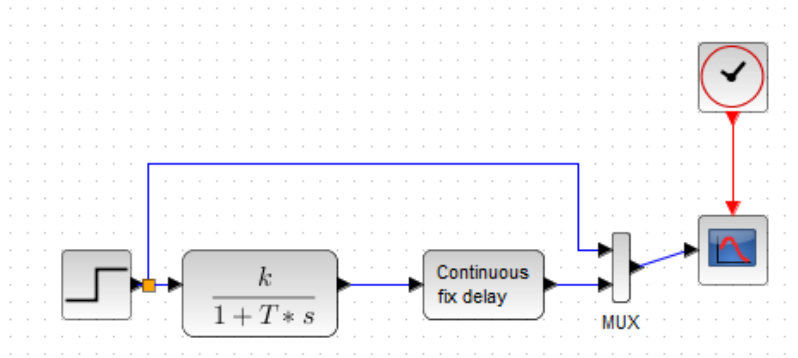


Figura 30: Diagrama de bloques del sistema a controlar.

En las siguientes figuras 30 y 31 se muestra el resultado de la simulación y así como una comparativa con la gráfica de donde se obtuvo la función de transferencia utilizando Python para tener una visualización de ambas gráficas.

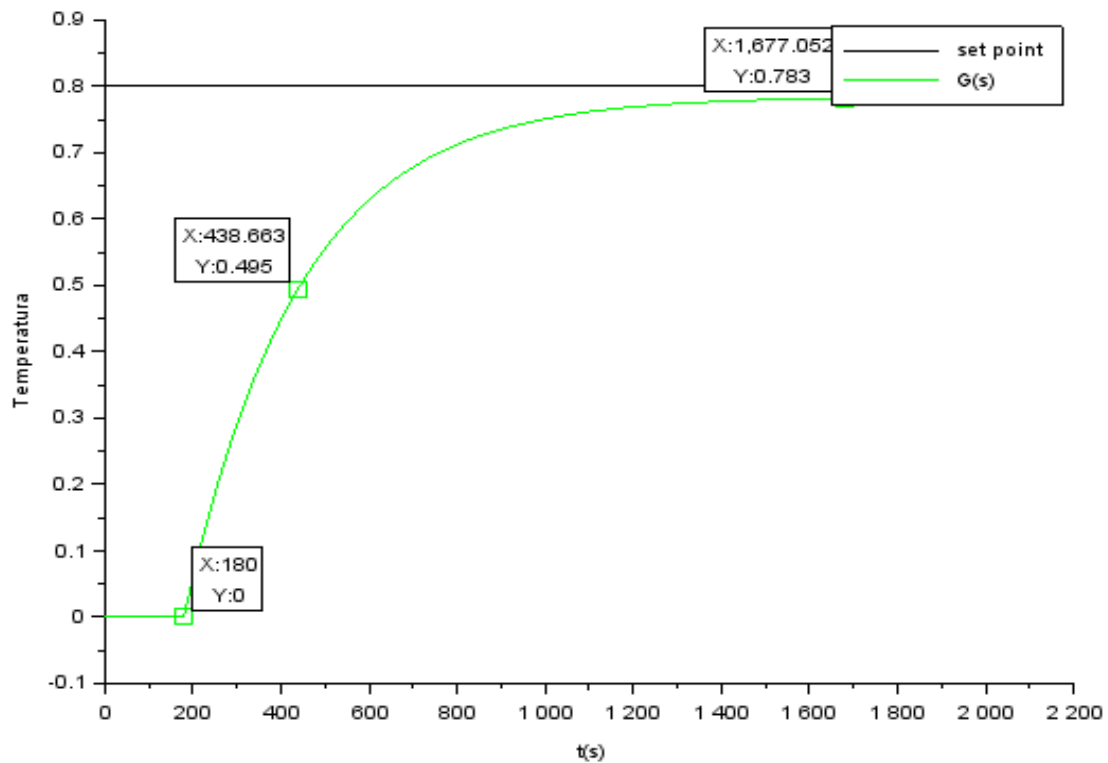


Figura 31: Simulación de la función de transferencia en XCOS.

En la siguiente grafica realizada en Python se realiza la traficación de la respuesta obtenida por simulación y los datos obtenidos por experimentación.

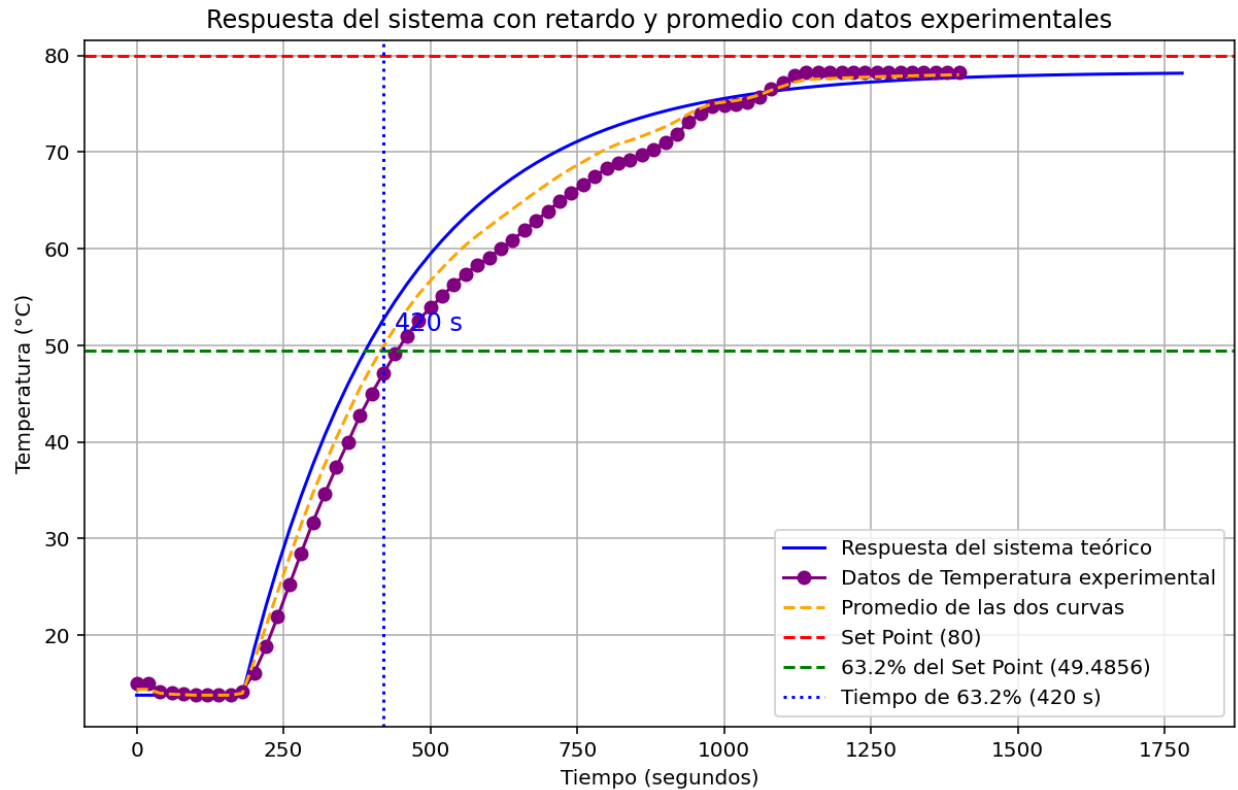


Figura 32: Sistema real vs Sistema simulado.

De ambas graficas se puede rescatar tres puntos importantes, el primero es que ambas señales presentan un retraso de 180 segundos, tal cual se observa en las etiquetas de cada gráfica. El punto dos es que ambas señales alcanzan el 63.2 % del valor final de la variable medida 78.3 °C, los 49 grados aproximadamente, demostrando la fidelidad de nuestra simulación con los datos experimentales. La única variabilidad es en el tiempo que le lleva alcanzar dicho valor, mientras que en el caso experimental le toma 440 segundos el teórico le lleva 400 segundos. Siendo una diferencia de 40 segundos. Ahora, si sacamos el promedio de ambas graficas obtenemos la reducción de este tiempo de retardo de alcanzar el 63.2 % de eficiencia de 20 segundos antes con respecto a los datos experimentales.

5.1.2 Diseño e implementación de un sistema de control PID.

Con los datos obtenidos tanto de manera experimental y teórico se realizará el diseño de un control PID.

Se realiza la simulación de la planta en xcos scilab para tener una visualización grafica del sistema en lazo cerrado. Para así comparar la señal de salida $Y(s)$ con la señal de referencia $R(s)$ mediante una realimentación unitaria $H(s)$. por lo tanto, el error es $E(s) = R(s) - Y(s)$. por lo cual implementaremos un control PID. La siguiente imagen muestra el diagrama de bloques.

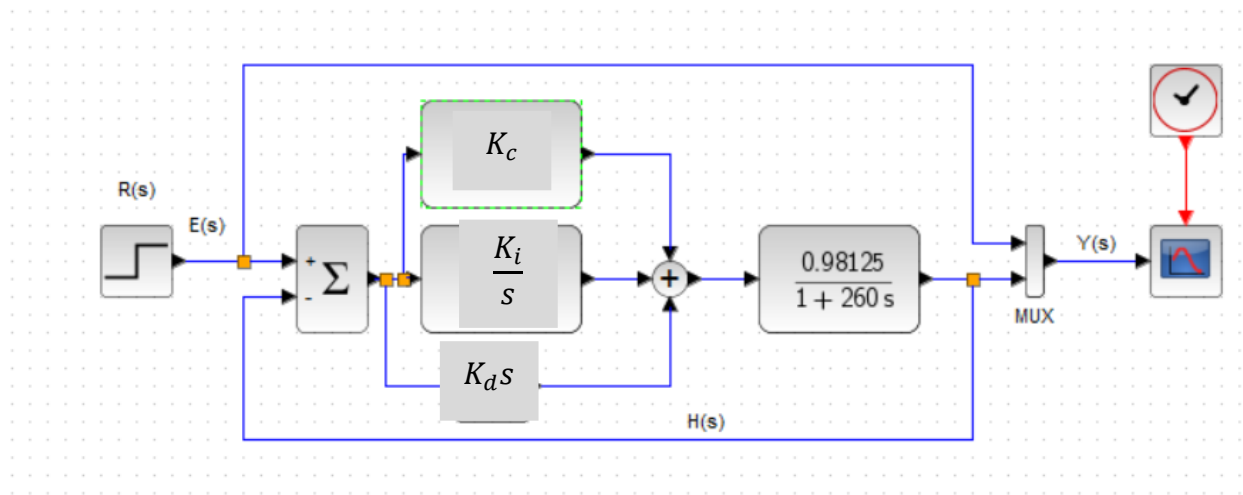


Figura 33: Implementación del control PID.

Para la implementación del PID y cuestiones de practicidad y diseño, omitirá el retardo del sistema. Debido que al considerar el retardo se estaría añadiendo un cero al sistema que lo volvería inestable [15]. Por lo cual nuestro sistema queda de la siguiente manera:

$$G(S) = \frac{0.98125}{260s + 1}$$

Se realizará la sintonización de controladores PID, utilizando el método de Ziegler-Nichols. El cual consiste en recomendaciones para la selección de parámetros de acuerdo con distintas

combinaciones de acciones en un controlador PID. La siguiente tabla se realiza las combinaciones pertinentes para la obtención de los valores PID.

	k_p	τ_I	τ_D
PI	$\frac{0.9 * \tau}{K * t_d} = 1.325$	$\frac{t_d}{0.3} = 6$	
PID	$\frac{1.2 * \tau}{k * t_d} = 1.764$	$2 * t_d = 360$	$0.5 * t_d = 90$

La siguiente imagen muestra los resultados al aplicar el controlador PID, al sistema.

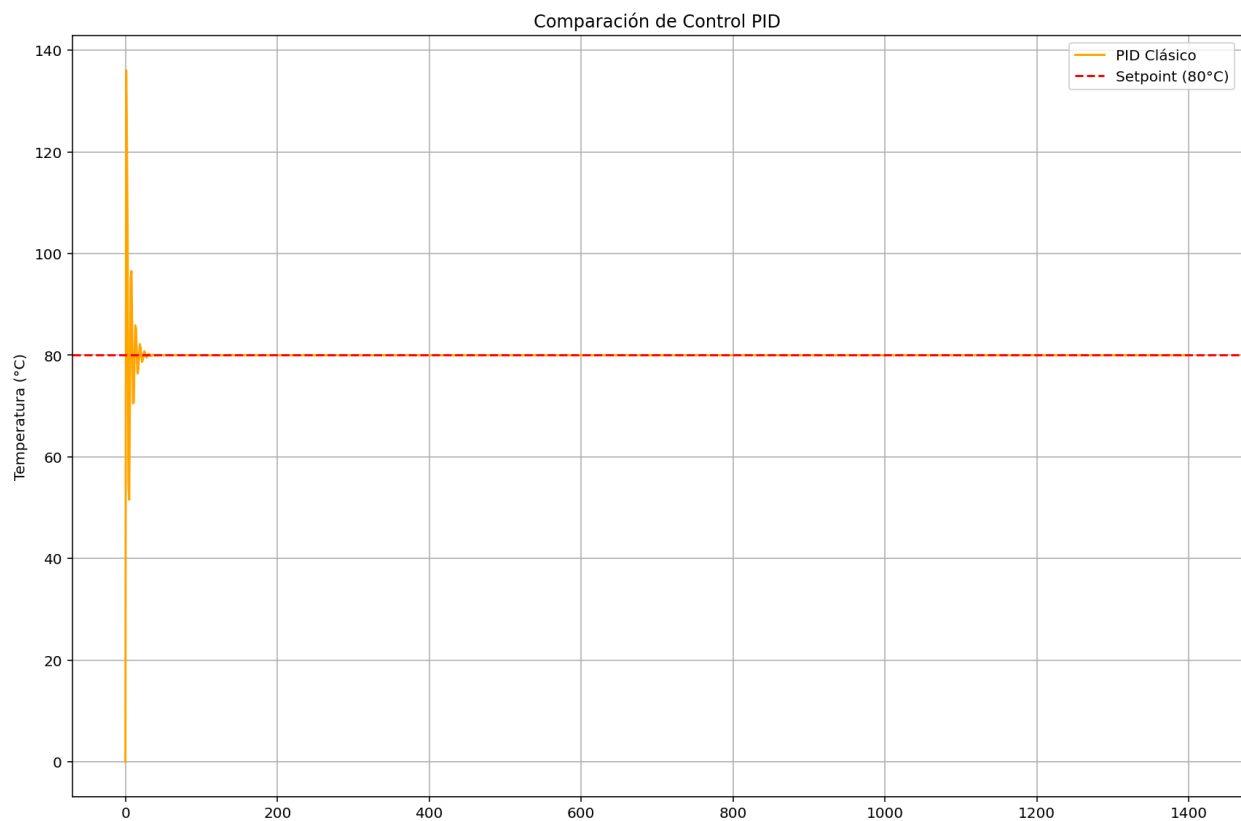


Figura 34: Respuesta del sistema al aplicar el PID.

En la figura anterior se observa en la primera grafica la respuesta del sistema al implementar control PID. Cabe mencionar que se utilizaron los valores obtenidos con método de zigler nichols

Sintonización a través de método heurístico.

Dicho método es la contra parte de sintonizaciones cuantitativos, donde los valores del PID son obtenidos a través una colección de datos. Mientras que el método heurístico o de prueba y error busca tener resultados aproximados. Siguiendo esa lógica, se obtuvieron los siguientes datos para la sintonización PID, que se muestra en la siguiente tabla.

	Valores heurísticos
Proporcional	1.765
Integral	0.009
derivativo	0.001

Al aplicar dichos valores para nuestra simulación obtenemos la siguiente gráfica.

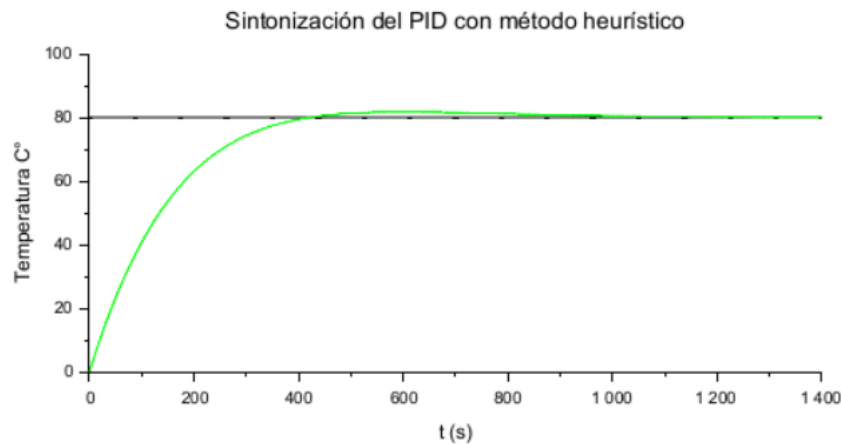


Figura 35: Respuesta del sistema con los nuevos valores PID.

Como se observa en la figura anterior la respuesta de la señal de salida es mejor al aplicar una sintonización de valores PID a través del método heurístico.

5.1.3 Aplicación del PID al sistema real.

La siguiente imagen muestra la comparación de la aplicación del control PID clásico al prototipo de la secadora y la respuesta obtenida en simulación.

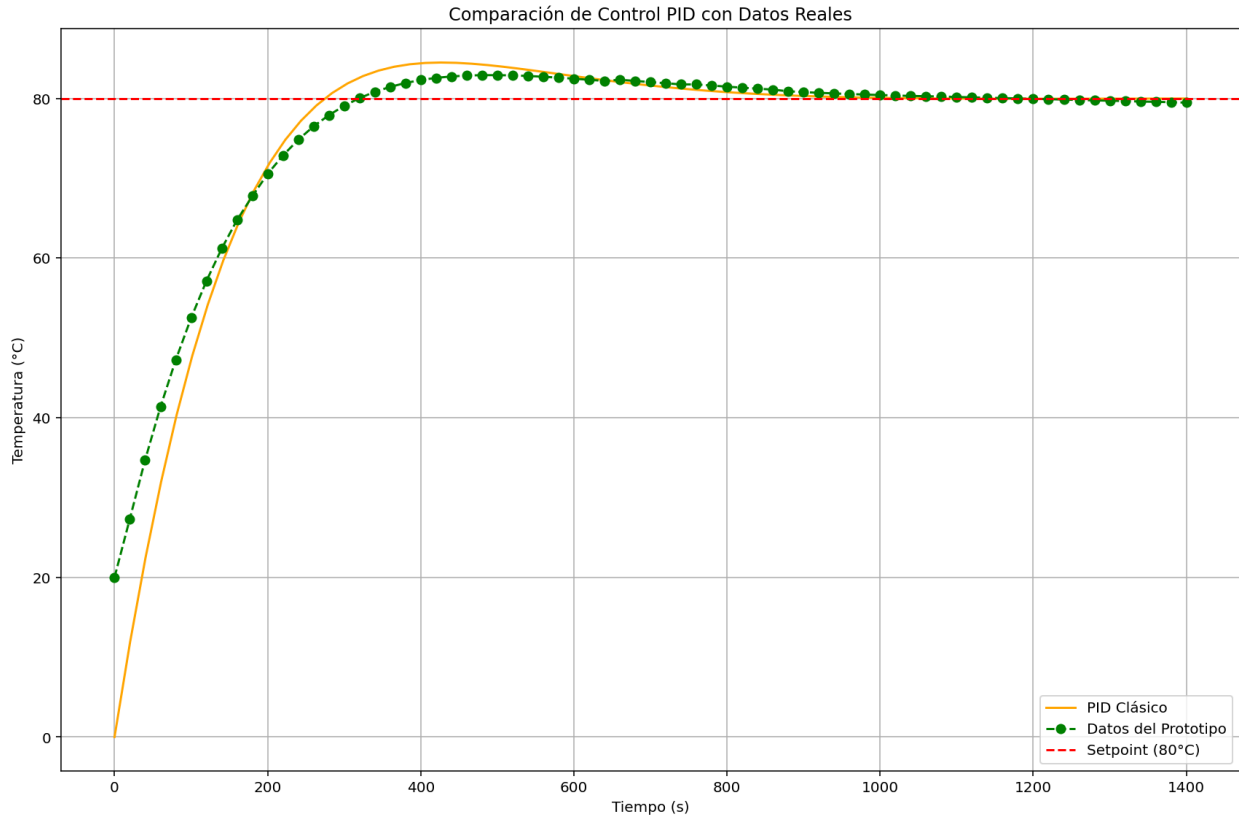


Figura 36: Comparación de información real vs simulación.

En la gráfica anterior se ve la respuesta que tenemos del sistema de control PID en simulación y de los datos reales obtenidos en la secadora. En donde la línea naranja representa la respuesta simulada del sistema aplicando un controlador PID clásico. Se observa que el modelo teórico sigue una trayectoria suavizada y predecible hacia el setpoint de 80 grados centígrados (Línea roja).

Mientras que los puntos verdes solo los valores obtenidos del prototipo que se fueron testeando cada 20 segundos. Donde se observa una coincidencia general con la simulación, teniendo pequeñas variaciones que podría deberse a ruido o retrasos del sistema real.

En general, la respuesta del sistema real es similar a la simulación, validando el modelo PID utilizado. Ambos enfoques alcanzan los 80° con una leve sobre oscilación en los datos experimentales.

5.2 Aplicación de i-PID

Por simplicidad y eficiencia computacional, este trabajo se decidió ajustar dinámicamente k_i del controlador PID. Esta ganancia es una de tres que componen la estructura clásica del

PID (k_p, k_i, k_d), y esta directamente relacionada con la eliminación del error acumulado a trevez del tiempo. Esta elección permite producir la complejidad del sistema de control al evitar el ajuste simultáneo de los tres parámetros.

En procesos como la deshidratación, donde las condiciones térmicas pueden variar significativamente, la acción integral se vuelve crítica para garantizar un seguimiento preciso del setpoint. Al mantener constantes las ganancias proporcional y derivativa, se preservan las características de respuesta transitoria del sistema, minimizando el riesgo de inestabilidad debido a los sobreajustes.

Para diseñar el controlador inteligente i-PID, se utilizaron datos experimentales obtenidos durante las pruebas con el prototipo de la deshidratadora. Se planteó una estrategia de ajuste dinámico basada en reglas heurísticas simples, definidas a partir del conocimiento previo del sistema. La lógica del control es la siguiente:

- k_i alto, es un error grande por lo cual se aplicará una acción más agresiva.
- k_i bajo, un error pequeño por lo cual se aplicará una acción más controlada.
- $k_i = 0$, no habrá incremento manteniéndose constante.

Para ver el funcionamiento del sistema con este control se realizaron diferentes simulaciones con diferentes valores de k_i , para observar el comportamiento del sistema aumentar o reducir k_i .

Para realizar el ajuste dinámico de los valores k_i del PID inteligente, según el error ($e(t)$), se basó en las siguientes reglas heurísticas.

- Sí ($|e(t)| > 1$): Se incrementará el valor de k_i de manera agresiva para acumular rápidamente el error y eliminarlo más eficiente.
- Sí ($0 < |e(t)| \leq 1$): Reducir el valor de k_i de manera moderada para evitar sobrecompensaciones y oscilaciones alrededor del setpoint.
- Sí ($|e(t)| = 0$): no hacer nada o mantener k_i constante

Si se aplica el control con los valores obtenidos con el método de Ziegler Nichols la respuesta del control i-PID es la siguiente comparada con el PID clásico.

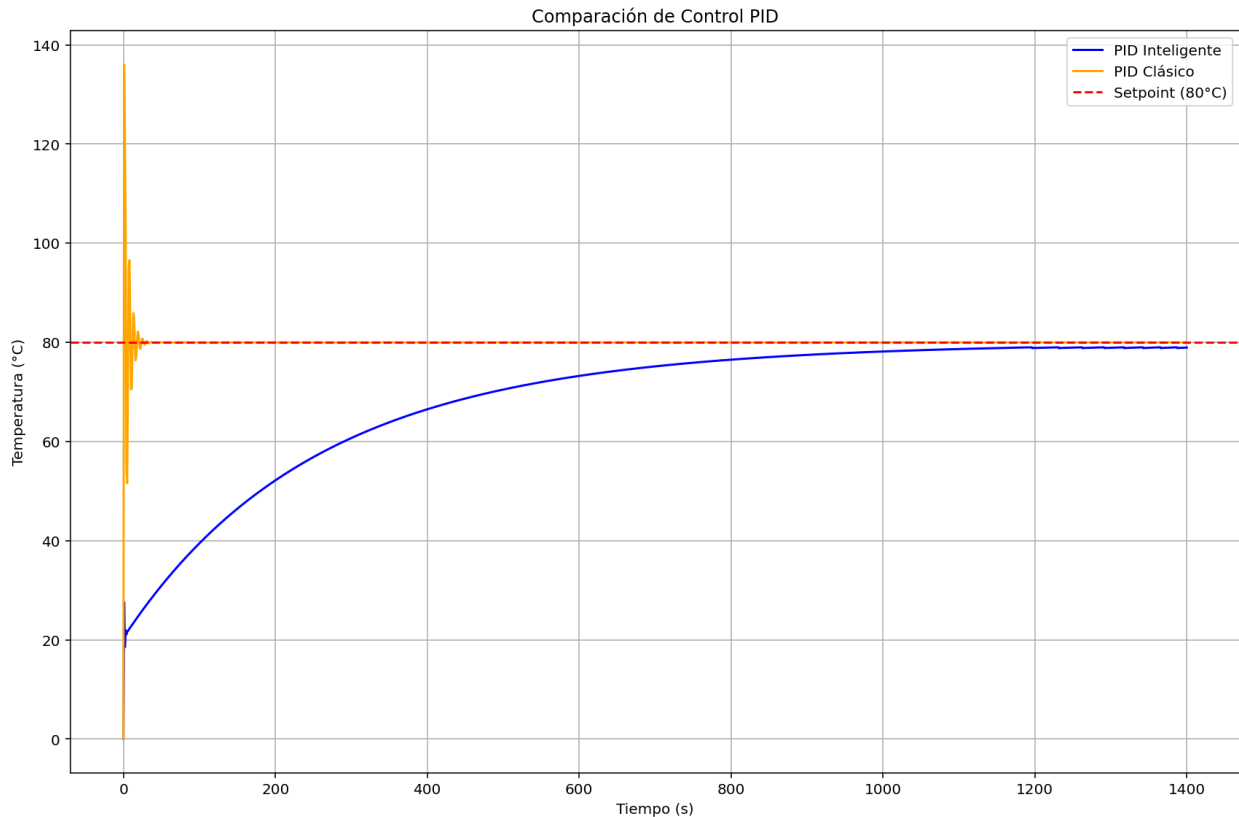


Figura 37: Comparación de las señales de respuesta del PID y i-PID.

En la gráfica anterior se observa el comportamiento distante entre el control PID clásico y la i-PID al ser sintonizados con los valores obtenidos por el método de Ziegler-Nichols.

Mientras que en el PID clásico se observan picos de temperatura que superan fácilmente el setpoint de 80°. Siendo un comportamiento típico de un sistema con una ganancia integral fija, provocando un sobre impulso considerable y oscilaciones persistentes hasta que logra estabilizarse.

Mientras que, en un contraste, el PID inteligente. La respuesta es más lenta a comparación del PID clásico, teniendo una estabilidad mejor en comparación. Y, gracias a la estrategia de ajuste dinámico de la ganancia integral, el error inicial es acumulado de manera eficiente cuando este es grande, acelerando la convergencia sin inducir oscilaciones severas como el PID clásico.

Cuando el error se reduce, la reducción de la ganancia integral evita sobrecompensaciones y oscilaciones innecesarias, resultando en una convergencia al setpoint más estable.

La respuesta del i-PID puede servir como referencia para realizar un reajuste de los valores del PID clásico, debido al ajuste dinámico de la ganancia integral permite identificar valores óptimos para mejorar el desempeño del PID clásico.

En estudio, se observa que la respuesta del PID clásico es más rápida, mientras que el i-PID ofrece una mejor adaptación a variaciones del sistema con respecto a los valores de las ganancias. Así, los valores al ajustar el i-PID pueden ser de guía a una nueva sintonización heurística del controlador clásico, optimizando su estabilidad y precisión sin repetir el proceso de ajuste desde cero.

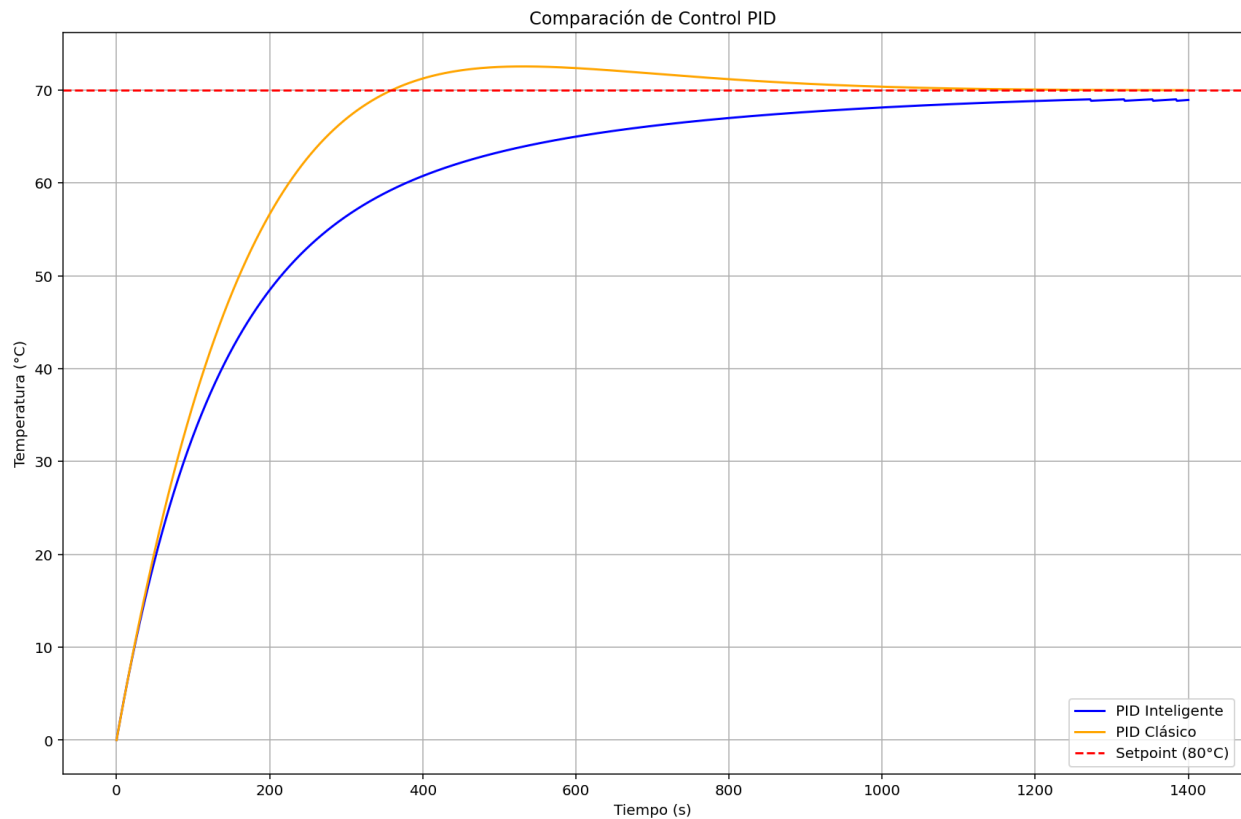


Figura 38: Sintonización de valores PID con el método heurístico.

Al aplicar los valores del PID bajo una sintonización heurística, se observa en la gráfica una mejor respuesta de ambos controladores PID en comparación con la gráfica anterior (figura 37).

El PID clásico mantiene un tiempo de respuesta rápida para alcanzar el setpoint, teniendo un sobre impulso más controlado.

Mientras que el i-PID sigue teniendo una respuesta lenta en comparación con el clásico, pero mostrando un mejor control al sobre impulso.

Capítulo VI Análisis y discusión de resultados

Se realizaron cuatro simulaciones de ambos sistemas de control para tomar la decisión de cuál sería el adecuado para su implementación en la deshidratadora híbrida, las dos primeras muestran las gráficas obtenidas del control de temperatura dentro de la cámara de secado. Mientras que las siguientes dos, muestran el comportamiento de ambos sistemas de control ante una perturbación, que de acuerdo a este estudio es el calor proporcionado por el colector solar por convección forzada a la cámara de secado.

6.1 Aplicación de control PID

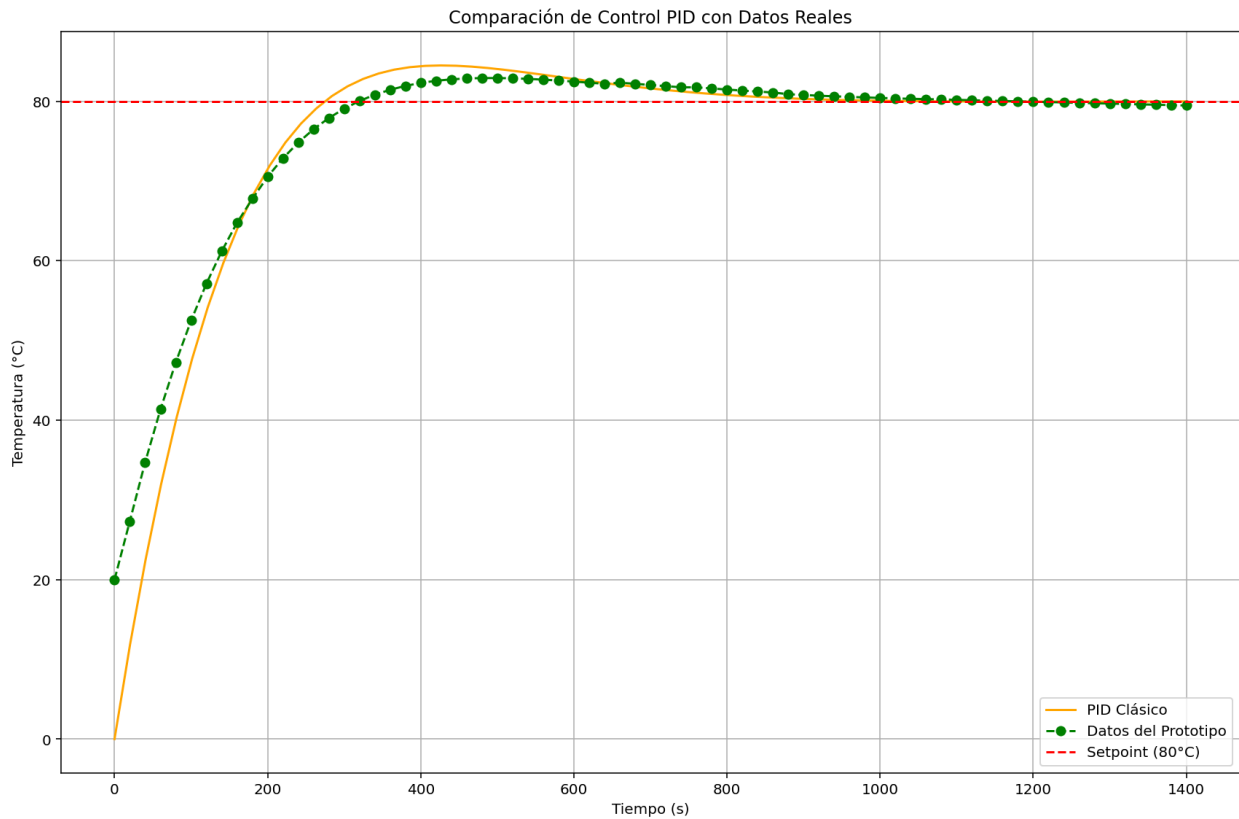


Figura 39: PID clásico con Datos reales.

Al realizar una comparación entre la respuesta obtenida con el PID clásico en simulación con los datos obtenidos de manera heurística y al momento de aplicarlo al prototipo revela una

concordancia significativa en la respuesta del sistema, sugiriendo que la sintonización del controlador es adecuada para dicha secadora.

Observando una trayectoria suavizada hacia el setpoint del PID clásico, mostrando una respuesta predecible sin oscilaciones excesivas. Sin embargo, en la información obtenida en el prototipo, hay pequeñas oscilaciones con respecto a la simulación, lo cual es natural al deberse a un sistema físico, como los retardos en los actuadores, variaciones en la transferencia de calor y posibles perturbaciones externas.

El pequeño sobre impulso registrado en el testeo experimental sugiere que el modelo PID podría aplicársele un ajuste más preciso de los parámetros de control, especialmente en la ganancia integral para evitar acumulación de error. Sin embargo, a pesar de ese pico de temperatura se logra alcanzar y estabilizarse con respecto al setpoint de 80° , validando el diseño del controlador y su aplicabilidad en la implementación práctica.

6.2 Comparación del PID clásico vs el i-PID

En la siguiente figura se realiza la comparación del PID clásico y el PID inteligente, mostrando también los resultados obtenidos de manera experimental con el prototipo. Cabe mencionar que el i-PID solo se realizó simulaciones debido a lo complejo de adaptar al rex-c100 para tener una ganancia integral dinámica. Sin embargo, como se observa en la siguiente figura 40. La respuesta obtenida de manera experimental es similar a la obtenida con el PID inteligente.

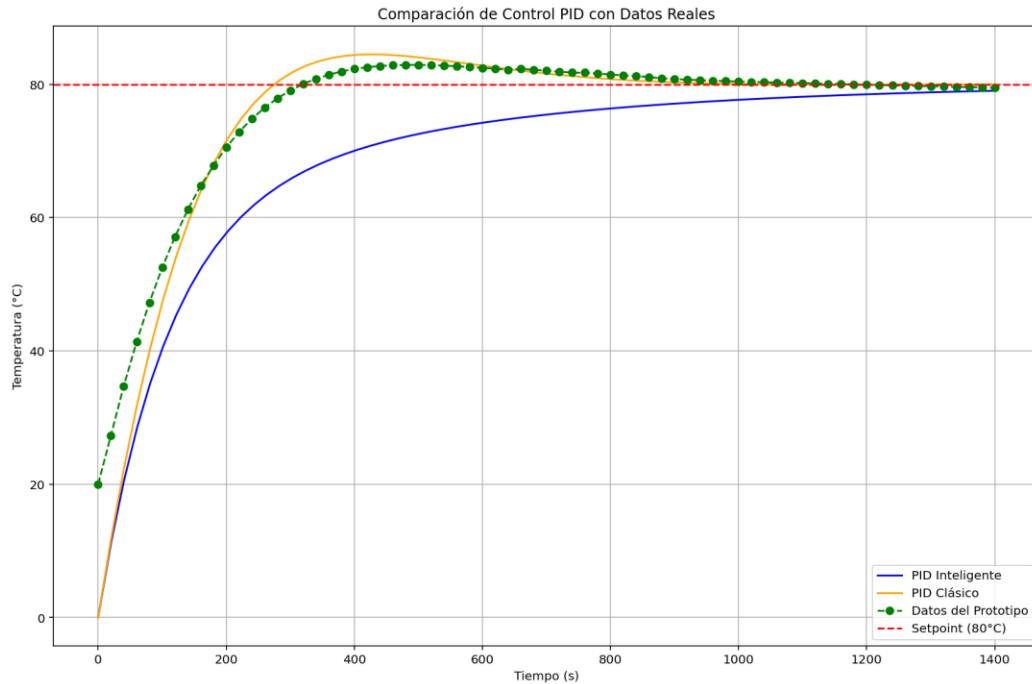


Figura 40: Comparación de respuesta de simulación PID clásico vs Inteligente.

Al aplicar una sintonización heurística demuestra una mejora en el desempeño de ambos controladores PID en comparación con el ajuste inicial de Ziegler-Nichols.

Se observa una respuesta rápida del PID clásico, e incluso de los datos experimentales al alcanzar el setpoint en un menor tiempo. Mostrando un sobreimpulso más moderado que la sintonización inicial. La estabilización ocurre con menor tiempo de asentamiento, con ligeras oscilaciones hasta estabilizarse.

Por otra parte, el PID inteligente tiene una respuesta más lenta en comparación con su homólogo, mostrando una reducción significativa al sobre impulso. Teniendo una aproximación más progresiva al setpoint, evitando oscilaciones. La estrategia adaptativa permite un control más estable a largo plazo, reduciendo la posibilidad de perturbaciones en estado estacionario.

La sintonización a través del método heurístico permite lograr un equilibrio óptimo entre la estabilidad y la rapidez de la respuesta de ambos controladores.

PID clásico sigue siendo una opción viable para aplicaciones donde la rapidez de respuesta es prioridad, a pesar de tener cierto riesgo de oscilaciones.

Mientras que i-PID demuestra ventajas en estabilidad y reducción de sobre impulso, lo que lo hace ideal para sistemas donde se busca minimizar perturbaciones.

6.3 Análisis de respuesta del sistema ante una perturbación

En este apartado se realizó el análisis del comportamiento de ambos controladores; clásico e inteligente, frente a una perturbación en el sistema a controlar. Mientras que en simulaciones anteriores se consideraba un sistema cerrado de control de temperatura de la fuente de calor eléctrica, en esta ocasión se introduce el efecto del calor proveniente del colector solar como una perturbación externa del sistema.

Dado que el sistema de estudio es una secadora híbrida eléctrico-solar, es fundamental evaluar la capacidad de cada controlador para compensar esta perturbación y mantener las variables críticas de secado.

En la siguiente figura se muestra la respuesta de ambos sistemas de control ante una perturbación, en este caso la variabilidad de temperatura dada por el colector solar a través del tiempo en un lapso de 24 horas.

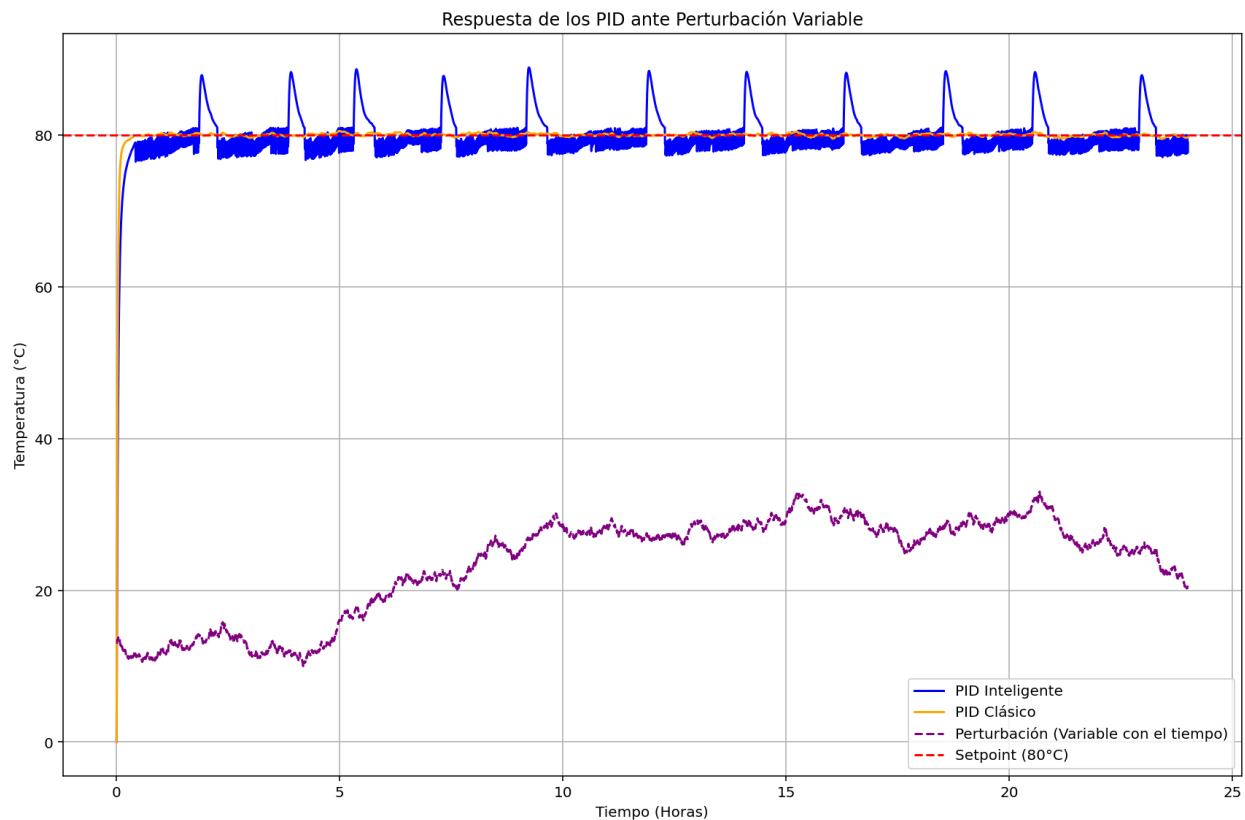


Figura 41: Respuesta de ambos controladores ante una perturbación.

En la imagen anterior se observa que el PID clásico mantiene una respuesta más estable en comparación con el i-PID. A pesar de que muestra un pico, su capacidad de recuperación es más predecible y consistente, ya que su respuesta ante perturbaciones sigue un comportamiento esperado al tener ganancias fijas. Aunque no se adapta dinámicamente a las variaciones del sistema, la estructura del control al ser constante permite anticipar su reacción ante perturbaciones, lo que garantiza una regulación aceptable de la temperatura dentro de la cámara de secado sin variaciones inesperadas.

Y en un contraste el PID inteligente muestra oscilaciones significativas tras la perturbación, lo que indica que la estrategia de ajuste dinámico es sensible ante los cambios del sistema. La variabilidad de la ganancia integral podría estar generando inestabilidad en ciertas condiciones.

Aunque su diseño busca mejorar el desempeño en sistemas con variables no modeladas, en este caso, la adaptación no logra estabilizarse de manera óptima. Para mejorar el desempeño del i-PID se podría ajustar los parámetros de adaptación o aplicar otros métodos de control avanzado para reducir su sensibilidad a perturbaciones externas y evitar oscilaciones.

6.3.1 Aplicación de filtro pasa-bajas al controlador i-PID

Una manera de corregir la variabilidad del control inteligente es aplicando un filtro pasa-bajas. La implementación de un filtro pasa bajas permite atenuar las fluctuaciones al reducir la influencia de componentes de alta frecuencia para lograr una respuesta más suave y estable. Ayudando al sistema actuar ante cambios significativos y no pequeñas variaciones.

La siguiente figura muestra la respuesta del PID inteligente al aplicar el filtro pasa bajas.

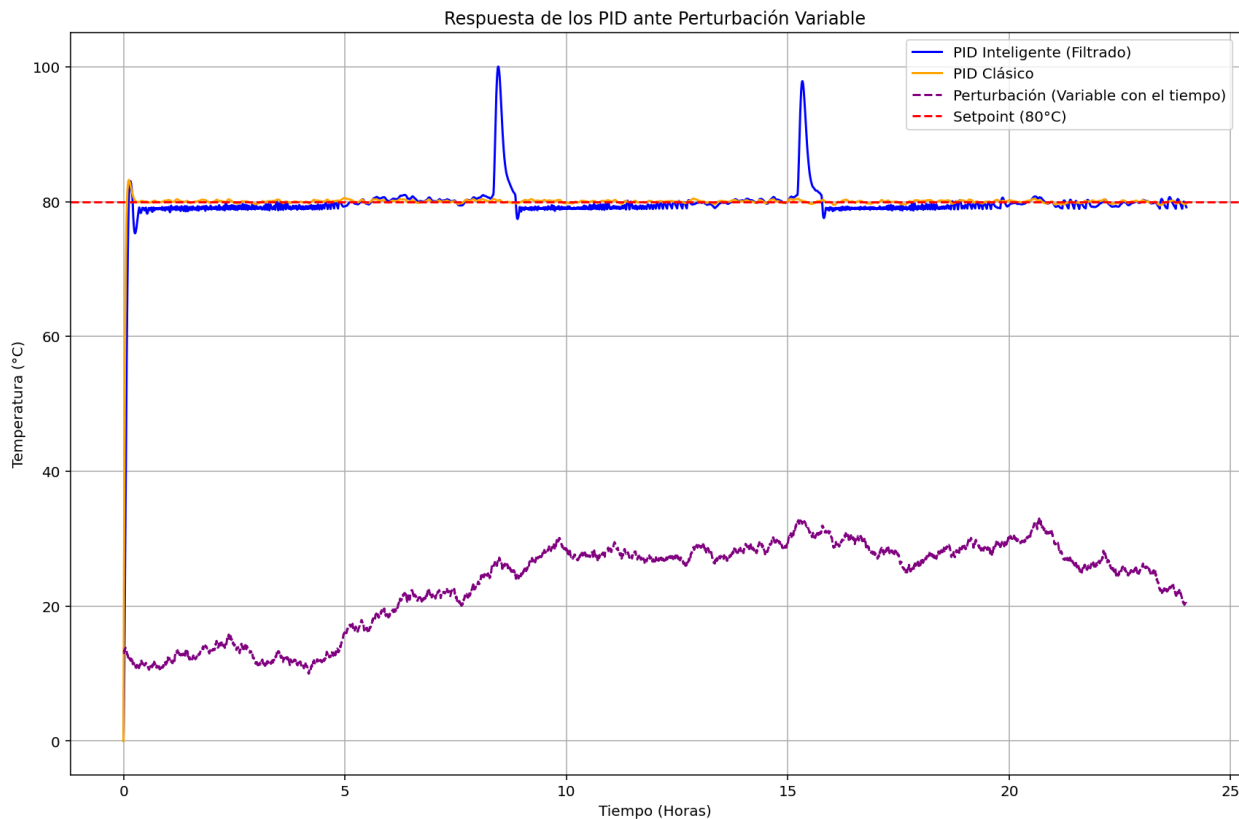


Figura 42: Respuesta del i-PID al aplicar el filtro pasa bajas.

De la imagen anterior se puede observar la disminución de variabilidad del PID inteligente. Sin embargo, muestra dos picos que superan los 90°, indicando que el i-PID experimenta lapsos de sobreimpulso probablemente debido a:

Ganancia integral elevada ya que la ganancia integral se ajusta dinámicamente, es posible que su incremento este generando una acumulación en el error provocando una respuesta agresiva. También se puede deber a una reacción tardía a la perturbación, si la corrección ocurre después de la afectación de la perturbación, entonces el controlador podría intentar compensar de manera rápida generando estos picos. Y por último, la falta de amortiguamiento en la acción de control sin una regulación adecuada estas variaciones de los valores dinámicos del i-PID puede causar picos pronunciados.

6.4 Respuestas a las preguntas de investigación

1. ¿Es posible hacer eficiente el uso de recursos naturales usando sistemas de control?

De acuerdo a los resultados obtenidos tanto experimentales y en simulaciones muestran que al implementar un sistema de control, ya sea clásico o un PID inteligente permite optimizar la temperatura dentro de una secadora híbrida solar-eléctrica, asegurando un secado óptimo de manzanas sin depender de fuentes de energías convencionales. Sin embargo, se observó que el PID clásico proporciona una regulación de variables críticas de secado más estable, mientras que el i-PID reduce el sobre impulso en algunas condiciones. Esta información sugiere que el uso de sistemas de control mejora la eficiencia en el uso de recursos naturales, al minimizar la pérdida de energía térmica y estabilizar el procesos de deshidratación de frutos.

¿El uso de tecnologías es favorable para los sistemas agro-comestibles de la región y contribuye al desarrollo de cultivos sostenibles?

Al usar sistemas de control en la deshidratadora híbrida permite reducir la dependencia de condiciones ambientales inestables, es decir; al no deshidratar o secar a sol abierto, directo y/o indirecto. Lo que incrementa la eficiencia del proceso de secado y favorece a la conservación de frutos en las comunidades rurales. Teniendo un impacto directo en la sostenibilidad del sector agroalimentario, al aprovechar frutos que de otra manera se desperdiciarían. A demás, al implementar esta tecnología se reducirá el uso de leña o gas, minimizando la huella de carbono y promoviendo prácticas que son más responsables con el medio ambiente.

¿Cómo influye la implementación de sistemas de control en la reducción de desperdicios de manzanas en comunidades rurales?

El estudio experimental realizado demuestra que el uso de una secadora híbrida prolonga la vida útil de la manzana, facilitando su comercialización como fruta deshidratada. En comunidades como Gómez Poniente, en donde una gran cantidad de frutas se pierde debido a estándares de calidad del mercado, este proyecto ofrece una alternativa viable para transformar los excedentes en productos con valor agregado. Reduciendo el desperdicio, y también genera nuevas oportunidades económicas para los productores locales.

6.5 Impacto social y ambiental

Desde una perspectiva ambiental, la implementación de un sistema de control en la secadora híbrida disminuye el uso de leña o gas, significando una reducción de emisiones contaminantes de dióxido de carbono. Además, la optimización del proceso de secado maximiza el aprovechamiento de energía solar en fecha en donde por cuestiones climatológicas y temporadas de frutas hay poca radiación solar en Tlatlauquitepec. Contribuyendo a un modelo más sostenible.

Mientras que el impacto social, este proyecto ofrece una solución accesible para las comunidades rurales, promoviendo una inclusión tecnológica en sectores agrícolas que tradicionalmente dependen de métodos artesanales de secado. La aplicación de la secadora híbrida no solo reducirá el desperdicio de alimentos, sino que también podría generar empleos en la operación y mantenimiento de estas secadoras.

Conclusión

La realización de este proyecto nace como respuesta al llamado del “Programa Sectorial Derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024”, “La Agenda Estratégica para la Autosuficiencia Alimentaria y el Rescate del Campo Mexicano” y los objetivos de desarrollo sostenible de la FAO. Que como objetivo general buscan la gestión del conocimiento basada en una estructura organizativa para garantizar el acceso a la tecnología en el sector agroalimentario.

Por ello la propuesta de la optimización de una deshidratadora eléctrico-solar para la deshidratación de manzana en Gómez Poniente, Tlatlauquitepec, Puebla. Para solucionar un problema de desperdicio de alimentos empezando desde un contexto local y proyectándose a un contexto macro.

Se diseñó y construyó un prototipo de deshidratadora solar-eléctrico, del cual se realizó la identificación del sistema a controlar para optimizar el secado de manzana aprovechando la energía solar y eléctrica como fuentes de calor para este propósito.

En este contexto, se evaluaron dos métodos de control: el PID clásico y un algoritmo de control inteligente, el i-PID. Se realizaron simulaciones para comparar y evaluar el desempeño frente a la variabilidad de temperatura del colector solar, se concluyó que el PID clásico es el más adecuado para este caso en particular. Ya que el PID inteligente mostró una mayor sensibilidad, lo que resultó en oscilaciones en la señal de respuesta. Para minimizar dichas oscilaciones se requieren de técnicas de control avanzadas, que se alejan a la meta de garantizar el acceso a la tecnología en el sector agroalimentario.

En conclusión, el diseño y control de la deshidratadora solar-eléctrica se logró optimizar con el uso del PID clásico, alcanzando una solución práctica y eficiente que cumple con los objetivos del proyecto, y contribuye al objetivo en común de la Secretaría de agricultura y Desarrollo Rural, el TecNM y a la FAO para contribuir al bienestar del campo, alineándose con las políticas de desarrollo y mejora continua en las tecnologías aplicadas al campo mexicano. Proponiendo en la medida de lo posible un sistema asequible y barato de realizar al implementar un control clásico en vez de un sistema de control avanzado.

Además, que el uso de un sistema de control mejora la eficiencia de la deshidratación de frutos, reduce el desperdicio de alimentos y contribuye a la sostenibilidad del sector agro-alimentario. La implementación de este proyecto representa una estrategia clave para la economía circular y el

desarrollo rural, demostrando que el aprovechamiento inteligente de recursos naturales es viable y necesario.

Referencias

- [1] Secretaría de Bienestar. (13 de Noviembre de 2013). Obtenido de Gobierno de México:
<https://www.gob.mx/bienestar/prensa/se-desperdician-mas-de-diez-mil-toneladas-de-alimentos-cada-ano-en-mexico>
- [10] Hernández Sánchez, J. A. (2011). Automatización y Elaboración de un sistema de control de una deshidratadora para la conservación de plantas medicinales.
- [11] Changoluiza Cunuhay, W. F. (2022). *Implementación de una máquina deshidratadora de insumos vegetales para el sector agroalimentario del cantón La maná*. Ecuador: La Maná: Universidad Técnica de Cotopaxi: Tesis.
- [12] Valdovinos, B. E. (2001). DISEÑO DE UN ALGORITMO DE CONTROL BASADO EN LOGICA DIFUSA APLICADO A UN SECADOR DE TAMBOR ROTATORIO DE ALIMENTOS. *Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos. Instituto Tecnológico de Veracruz*.
- [13] Jain, D. &. (2004). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation. *Energy Conversion and management*, 45(17), 2777-2793.
- [14] Fernández del Busto y Ezeta, R. (2013). *Análisis y diseño de sistemas de control digital*. México: Mc Graw Hill Education.
- [15] VERGARA-BETANCOURT, A. S.-H.-N. (2017). Obtención de la función de transferencia de un motor de DC mediante el análisis de la curva de reacción. *Revista de Aplicación Científica y Técnica*.
- [16] Galán, R. J. (2000). Control inteligente Inteligencia artificial . *Revista Iberoamericana de inteligencia artificial* , 4(10), 43-48.
- [17] Villagrà, j. M. (2010). Control basado en PID inteligentes: Aplicación al control de cruce de un vehículo a bajas velocidades . *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(4), 44-52.
- [18] Kuliela, H. K. (2020). *Neural Networks from scratch in Python*. Pahrump NV: Kinsley Enterprises Inc.

- [19] Lee, J. S. (2016). Integrating machine learning in embedded sensor systems for Internet of things application. *In 2016 IEEE international symposium on signal processing and information technology (isspit)*, 290-294.
- [2] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (25 de Junio de 2020). Obtenido de PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2019-2024: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5595549&fecha=25/06/2020#gsc.tab=0
- [20] Falay, B. W. (2021). oupling physical and machine learning models: case study of a single family house. *In Modelica Conferenses* , 335-341.
- [21] MORALES LUNA, G. (2002). *Introducción a la lógica difusa*. México: Centro de Investigación y Estudios Avanzados.
- [22] Fliess, M. a. (2008a). Intelligent PID controllers. *Proc. of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 326-331.
- [23] Fliess, M. C.-R. (2006). Complex continuous nonlinear systems: their black box identification and their control. . *Proc. of the 14th IFAC Symposium on System Identification (SYSID)*, Vol 14.
- [24]. (2013). *Estufa solar de secado de madera*. México: Paquete tecnológico,.
- [25] Erenturk, K. (2009). Artificial Intelligence techniques for food drying technology. *In 1st International Symposium on Sustainable Development, Sarajevo*, pp. 375-380.
- [26] Qadeer, K. A. (2021). Developing machine learning models for relative humidity prediction in air-based energy systems and environmental management applications. *Journal of Environmental Management*, 292, 112736.
- [27] Rodríguez A. R., F. J. (1989). El uso de los secadores solares en la industrial de la madera. *Amatl, Boletín de Difusión del Instituto de Madera, Celulosa y Papel. No. 9*, 22-30.
- [28] Clodoaldo Sivipaucar, H. C. (2008). Cálculo y construcción de un secador solar por convección natural para el secado de plantas medicinales no tradicionales. *CEDIT-Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos* , 18-30.
- [29] Reyes, A. C. (2014). Control system in a híbrid solar dryer. *In 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 1-5.
- [3] Tecnológico Nacional de México. (28 de Febrero de 2023). Obtenido de La Agenda Estratégica del TecNM para la Autosuficiencia Alimentaria y el Rescate del Campo Mexicano.: <https://www.tecnm.mx/?vista=noticia&id=4038>

- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (Noviembre de 2023). Obtenido de Acelerar el apoyo de la FAO en el seguimiento de los ODS: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/af277ae5-a049-454f-9840-2efa6c6ef33d/content>
- [5] WeatherSpark. (s.f.). Obtenido de Clima promedio en Ciudad de Tlatlauquitepec, México durante todo el año. Recuperado el: <https://es.weatherspark.com/y/7661/Clima-promedio-en-Ciudad-de-Tlatlauquitepec-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [6] El Sol de Durango. (24 de Agosto de 2023). Obtenido de A \$1.30 el kilogramo se encuentra la compra de ripio en Canatlán, Durango: <https://www.elsoldedurango.com.mx/local/municipios/a-1.30-el-kilogramo-se-encuentra-la-compra-de-ripi-en-canatlan-durango-10587567.html>
- [7] Tiwari, G. (2009). *SOLAR ENERGY Fundamentals, desing, Modelling and Aplications*. India: Alpha Science .
- [8] Zoukit, A. E. (2019). Fuzzy modeling of a hybrid solar dryer: experimental validation. *Journal of Energy Systems*, 1-13.
- [9] Kolla, M. C. (2021). Effect of different drying methods and storage conditions on physical, nutritional, bioactive compounds and antioxidant properties of doum (*Hyphaene thebaica*). *Heliyon*, 7(4).