

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y NEGOCIOS
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN DESHIDRATADOR
SOLAR HÍBRIDO DE JITOMATES, AUTOMATIZADO CON TÉCNICAS DE
CONTROL CLÁSICO”

TESIS

que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA:

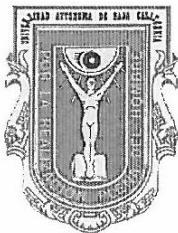
RODRÍGUEZ TAPIA BERNABÉ

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. CARLOS ALBERTO CHÁVEZ GUZMÁN

CODIRECTOR DE TESIS

DR. EDGAR ARMANDO CHÁVEZ MORENO



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

VOTOS APROBATORIOS DE TESIS DE DOCTORADO O MAESTRIA

Fecha: 02 de Diciembre del 2013

Nombre del autor: Bernabé Rodríguez Tapia

Título de la tesis:

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN DESHIDRATADOR SOLAR
HIBRIDO DE JITOMATES, AUTOMATIZADO CON TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICO”

CERTIFICAMOS QUE ESTA TESIS HA SIDO APROBADA POR LOS MIEMBROS DEL
COMITÉ DE TESIS PARA SU DEFENSA EN EXAMEN ORAL.

Grado Académico	Nombre	Firma	Función
Maestría	M.C. Carlos A. Chávez Guzmán		Presidente
Maestría	M.I. Adriana I. Garambullo		Secretario
Maestría	M.I. Edith Montiel Ayala		Vocal
Maestría	M.C.A. Velia V. Ferreiro Martínez		Sup

Coordinación de Investigación y Posgrado

Nombre y firma del Presidente del SACC (programa).

Con mucho cariño a mi esposa Yuliana...

Yuli, contigo me siento el mejor, siempre me lo has hecho saber y me la he creído, todo tu apoyo ha sido incomparable. Gracias por permitirme lograr esta meta y por ser quien le dio claridad a tantas ideas mientras escuchabas entusiasmada, simplemente Te amo...!!

A mis padres Olga y José Guadalupe...

Ustedes han sido parte fundamental de lo que ahora soy, me han apoyado para lograr todo aquello que me he propuesto, me han llenado de herramientas necesarias para afrontar la vida y su cariño y admiración han dado seguridad a mi caminar. Son los mejores...!!

Agradecimientos

Mi sincero agradecimiento a Dios por tomar parte fundamental de mi vida en todo lo que realizo.

Un agradecimiento especial al Maestro Carlos Alberto Chávez Guzmán por asesorarme a lo largo de la tesis, por compartir sus conocimientos que dieron claridad y proveyeron una dirección objetiva en cada etapa de este proyecto.

Al Doctor Edgar Armando Chávez Moreno, por sus aportaciones y consejos invaluable a lo largo de todo el proyecto, inspirándome siempre a una seriedad y responsabilidad en mi labor de investigador.

A la Doctora Ana Bertha Plascencia Villanueva, por su dirección entusiasta en la tarea metodológica, motivación y ánimo en los momentos más difíciles y por ayudarme a reconocer la belleza en cada descubrimiento.

Resumen

En este trabajo se diseña un sistema de control automático para un deshidratador híbrido de jitomates, dicho sistema es de convección forzada con temperaturas de referencia de 50 a 60 °C y velocidad de aire de 1.2 m/s. Para lograr el deshidratado óptimo del jitomate, el sistema consta de dos controles: uno de temperatura y otro de velocidad de aire. Se desarrolla el modelado matemático del comportamiento dinámico del horno eléctrico y del ventilador, se genera la función de transferencia de cada planta y se automatiza por medio de técnicas de control clásico. Finalmente se visualizan los resultados en Matlab, Simulink y Proteus quedando la implementación del sistema para un posterior trabajo.

Abstract

In this paper an automatic control system for a tomato hybrid dehydrator is designed. This system is of forced convection with reference temperatures of 50 to 60 ° C and an air velocity of 1.2 m/s. To achieve an optimal dehydration of tomato; the system consists of two controls: one of temperature and another of air velocity. It develops the mathematical modeling of the dynamic behavior of the electric oven and the ventilator, it generates the transfer function of each plant and it is automated by means of classical control techniques. Finally the results are displayed in Matlab, Simulink and Proteus leaving the system implementation for further work.

ÍNDICE

Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas.....	viii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Preguntas de investigación	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Hipótesis.	4
1.6 Viabilidad.....	5
1.7 Aportación.....	5
1.8 Definiciones	5
1.9 Resumen.....	6
2 Marco Teórico.....	7
2.1 Introducción.	7
2.2 Procesos y técnicas del Secado	7
2.2.1 Teoría del Secado.	7
2.2.2 Modelos de secado.	10
2.2.3 Curvas de velocidad del secado.....	15
2.2.4 Secado del Jitomate.	17
2.3 Sistemas de Control.....	20
2.3.1 Modelado Matemático de sistemas dinámicos.	21
2.3.2 Diseño de un control Clásico PID	23
2.4 Resumen.....	29
3 Metodología	30
3.1 Introducción.	30
3.2 Diseño del estudio	30
3.3 Metodología de la investigación	33
3.4 Modelo de la investigación.	34
3.4.1 Control del Horno eléctrico:	35
3.4.2 Modelado del Ventilador	45

3.4.3	Modelo Ex- ante.	48
3.5	Descripción del instrumento.....	49
3.6	Confiabilidad y validez de Instrumento.	49
3.7	Procedimiento y recolección de datos.	50
3.8	Procedimiento para examinar los resultados.	51
3.9	Limitaciones.....	52
3.10	Resumen.....	52
4	Resultados de la investigación	54
4.1	Introducción	54
4.2	Resultados del Sistema de Control de Temperatura.....	54
4.3	Controlador de velocidad del sistema de deshidratación.....	57
4.4	Resumen.....	59
5	Visión general de la investigación	60
5.1	Visión General de la Investigación.	60
5.2	Replanteamiento del Problema.....	61
5.3	Preguntas que condujeron a la investigación.....	61
5.4	Contrastación de hipótesis.....	62
5.5	Hallazgos no calculados.	63
5.6	Limitaciones no esperadas.	64
5.7	Conclusiones y aplicación.	64
5.8	Propuesta para investigaciones futuras.....	65
6	Bibliografía	66

Lista de Figuras

Figura 2.1 Funcionamiento básico de un deshidratador solar de alimentos.....	8
Figura 2.2 Diagrama de flujo de calor en la pared plana.	13
Figura 2.3 Curva de velocidad del secado.	16
Figura 2.4 Control PID de una planta.	24
Figura 2.5 Oscilación sostenida con periodo Pc.	25
Figura 2.6 Curva de respuesta en forma de S.	26
Figura 2.7 Método de 2 puntos.	28
Figura 3.1 Secador solar hibrido.....	34
Figura 3.2 Modelado de la planta en sub-sistemas.	35
Figura 3.3 Sistema Térmico.....	35
Figura 3.4 Deshidratador solar “Prototipo”.	37
Figura 3.5 FLUKE 971 “Temperature Humidity Meter”.	38
Figura 3.6 Entrada escalón en bucle abierto.	39
Figura 3.7 Simulación en Simulink Matlab.	41
Figura 3.8 Controlador PID electrónico.	42
Figura 3.9 Sistema de control.	43
Figura 3.10 Sistema de control Proteus.	44
Figura 3.11 Sumador de sistema a lazo cerrado.	44
Figura 3.12 Atenuador de la señal del Sensor de temperatura.	45
Figura 3.13 (CD) Pittman de la serie 14204	45
Figura 3.14 Diagrama de Bloques PID.	46
Figura 3.15 Modelo Ex ante.	49
Figura 4.1 Respuesta del sistema de control Método Smith.	54
Figura 4.2 Respuesta del sistema de control Método Alfaro.	55
Figura 4.3 Respuesta del sistema de control Método Ho el al.	55
Figura 4.4 Perturbación de 4 grados centígrados.	56
Figura 4.5 Perturbación de 25 grados centígrados.....	56
Figura 4.6 Señal de perturbación de 35 grados centígrados	57
Figura 4.7 Respuesta a una función escalón con los valores calculados.....	58
Figura 4.8 Respuesta al sintonizar $K_i=0.030$; K_d y K_P originales de los cálculos.	58

Lista de Tablas

Tabla 1 Principales Productores agrícolas de México.	2
Tabla 2 Parámetros de ajuste (método de oscilación).	25
Tabla 3 Parámetros de ajuste (método de curva de reacción).	27
Tabla 4 Constantes para la identificación de los parámetros de los modelos de primer orden más tiempo muerto. .	28
Tabla 5 Variables para el secado del jitomate.	32
Tabla 6 Tabla de Routh para obtener KP2.	48
Tabla 7 Visión general de la investigación.	60

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Desde tiempos antiguos el secado de plantas medicinales, granos y carnes ha sido una práctica habitual para conservar los productos alimenticios durante todo el año (Echeverriarza, 2005).

La Educación MERCOSUR UNESCO Montevideo señaló que el secado de vegetales y carnes no tiene solamente una función de auto-abastecimiento como antes, sino que ofrecen una alternativa productiva y comercial para el mercado nacional e internacional; los habitantes de los países industrializados quieren consumir cada vez más productos naturales y sanos (Almada, Cáseres & Pulfer, 2005).

Los cambios climáticos y la minimización del sector productivo primario, así como los altos costos de producción agrícola siguen creando la necesidad de aprovechar al máximo todos los cultivos sin dar pie al desperdicio, además de que el secado solar como una gestión de ingeniería encamina en la actualidad a resolver dos grandes problemas, comenta Costales (2010): la disminución de los costos de producción de los productos agrícolas y la reducción de emisiones de CO_2 a la atmosfera que contribuye a disminuir el efecto invernadero que nos afecta globalmente.

A nivel nacional, Baja California ocupa el segundo lugar en producción de tomate con más de 180 mil toneladas y un valor de la producción de mil 692 millones de pesos, sólo después de Sinaloa que en 2009, produjo 668 mil toneladas con un valor superior a los 3 mil millones de pesos según datos de la Secretaria de Fomento a los Agro negocios en el 2012.

Con referencia a los principales cultivos por entidad se observa en la Tabla 1.1, que Baja California ocupaba los primeros lugares en la producción de: cebolla, frambuesa, flores, tomate rojo (jitomate), fresa, dátil y uva; siendo Baja California el segundo principal productor de tomate rojo (jitomate) en toda la región Mexicana.

Tabla 1 Principales Productores agrícolas de México.

	Producción (Toneladas)	% en el total nacional	Lugar nacional
Frambuesa	7 588	100	1° de 1
Flores	2 661	100	1° de 1
Algodón hueso	82 528	22.6	1° de 6
Aceituna	6 096	33.7	2° de 4
Dátil	1 393	45.4	2° de 4
Fresa	70 411	39.5	2° de 8
*Tomate rojo (jitomate)	206 257	9.1	2° de 32
Espárrago	5 991	11.2	3° de 5
Uva	16 018	6.0	3° de 13
Trigo grano	535 201	12.7	3° de 23

Fuente: INEGI .*Perspectiva Estadística. Serie por Entidad Federativa. México.*

Por ser un producto de temporada y muy sensible a perderse a altas temperaturas ha sido un objeto de estudio en la industria de deshidratación de alimentos. La deshidratación de este alimento puede potencializar la máxima cantidad de ganancias que este sector productivo genera.

El tiempo de deshidratación natural oscila entre 2 a 6 días, dependiendo del producto, ya que solo se aprovecha el calor que se produce al ser expuestos al sol; esto hace a los procesos no rentables para el área industrial (Duran ,2010); el mismo autor comenta la necesidad de *asegurar las condiciones diarias de secado lo cual no es fácil de realizar con sistemas que aprovechen solo la energía solar.*

La mayoría de los proyectos desarrollado en el rubro del secado han sido enfocados de manera artesanal debido a que existe la fuerte necesidad de aprovechar cosechas de temporadas y evitar el desperdicio de la misma comenta la Memoria del Foro de Transferencia de Tecnología y Laboratorio de Arquitectura Básica en México realizada en el 2008.

1.2 Planteamiento del problema

Investigando acerca de los métodos y técnicas de secado de alimentos en regiones agrícolas del distrito de desarrollo rural 001 Maneadero, Ensenada, Baja California; se observa en algunos productores de jitomate a pequeña y mediana escala, la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia y velocidad de aire necesaria para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate, lo anterior es causado probablemente por la falta de implementación de los procesos y técnicas de secado en un sistema de control, la falta de implementación de técnicas de control para la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria para el secado y eléctrica como secundaria y a los altos costos de la tecnología de punta en la industria del secado.

Este problema trae como consecuencia una escasa modernización e innovación en los procesos de la deshidratación del jitomate en la región, poco crecimiento en el mercado de la industria del secado de alimentos, y baja optimización en la utilización de la energía solar y eléctrica en el sector productor de jitomate a pequeña y media escala.

1.3 Preguntas de investigación

- 1.- ¿Cuáles son los procesos, perfiles y técnicas necesarias para obtener la deshidratación del jitomate?
- 2.- ¿Cuáles son los comportamientos físicos - dinámicos que permiten representar un modelo matemático útil para crear un controlador automático de temperatura y velocidad de aire para el deshidratado del jitomate?
- 3.- ¿Cuáles son los elementos de control para diseñar un sistema de control automático considerando la eficiencia al conmutar energía solar-energía eléctrico y costos de implementación para el deshidratado del jitomate?
- 4.- ¿Es posible demostrar que el sistema de control automático diseñado pueda seguir los perfiles para el deshidratado natural del jitomate mediante una plataforma de simulación?

1.4 Objetivos

Diseñar un sistema de control automático para deshidratar jitomates, capaz de regular una temperatura de referencia y velocidad de aire necesaria para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate.

Objetivos específicos:

- I. Analizar los procesos, perfiles y técnicas de deshidratación del jitomate.
- II. Crear el modelado de la planta para el control automático.
- III. Diseñar un sistema de control automático en etapa de simulación para deshidratar jitomates; considerando la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria y energía eléctrica como secundaria.
- IV. Validar que el sistema de control diseñado pueda seguir los perfiles para el deshidratado natural del jitomate mediante una plataforma de simulación.

1.5 Hipótesis.

H_o Al no regular los procesos de secado por medio de un sistema de control, ni optimizar la conmutación de energía solar como fuente primaria para el secado y la eléctrica como secundaria mediante técnicas de control y al no abaratar los costos en tecnología, el sistema de control diseñado no será eficiente en el uso de energías, incapaz de regular la temperatura y velocidad del aire de referencia, para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate en la región rural 001, Maneadero, Ensenada, Baja California.

H_i Al regular los procesos de secado por medio de un sistema de control, así como optimizar la conmutación de energía solar como fuente primaria para el secado y la eléctrica como secundaria mediante técnicas de control y al abaratar los costos en tecnología, el sistema de control diseñado será eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura y velocidad del aire de referencia, para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate en la región rural 001, Maneadero, Ensenada, Baja California.

1.6 Viabilidad

El sistema de control quedará a nivel de simulación y listo para su implementación en un proyecto posterior.

1.7 Aportación

Los resultados de este estudio proveerán conocimiento en lo siguiente:

- Aportará información útil relacionada al comportamiento de las variables para el secado de jitomates en la región de Baja California.
- Conocimiento de cómo desarrollar deshidratadores solares híbridos pensado en las necesidades específicas de un agricultor.
- Contribuirá a la deducción de los coeficientes necesarios para implementarlos en sistemas de control clásico buscando tener la mayor eficiencia en mecanismos híbridos.

También servirá como base para la construcción de secadores solares híbridos a mediana y grande escala para el desarrollo agrícola. La etapa de construcción se podrá realizar por medio de fuentes de financiamiento de Conacyt.

1.8 Definiciones

Deshidratar: Privar a un cuerpo o a un organismo del agua que contiene. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Eficiencia: Capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado. Está vinculada a utilizar los medios disponibles de manera racional para llegar a una meta. Se trata de la capacidad de alcanzar un objetivo fijado con anterioridad en el menor tiempo posible y con el mínimo uso posible de los recursos, lo que supone una optimización. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Energía: Eficacia, poder, virtud para obrar. Es una capacidad que consiste en transformar o movilizar alguna cosa. Dentro del contexto de la tecnología, el término refiere al recurso natural que puede emplearse a nivel industrial gracias a ciertos factores asociados. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Energía alterna. La energía alternativa es la que se utiliza como alternativa a las utilizadas mayoritariamente o fuentes de energía convencional. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Energía solar: El adjetivo solar se toma del significado que procede del vocablo *Solaris*, se trata de lo que está vinculado al sol, es aquella que se obtiene al captar el calor y la luz que emite el sol. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Modelo Matemático: Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos bastante bien. (Ogata, 2008).

Perfiles de secado (Curva de velocidad del secado). Es la velocidad de secado y el tiempo requerido para el secado, dependientes de la temperatura del aire de secado, el coeficiente de transferencia de calor y el diámetro de la gota a secar. (Almilla, 2001)

Secador de alimentos: Se utiliza como sinónimo de deshidratar alimentos. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Secado: El secado es la operación unitaria en la cual el contenido de humedad del material es eliminado hasta alcanzar la humedad de equilibrio mediante la evaporación como resultado de la aplicación del calor bajo condiciones controladas. (Almilla, 2001)

Simulación: Alteración aparente de la causa, la índole o el objeto verdadero de un acto o contrato. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

Simulador: Aparato que produce el comportamiento de un sistema en determinadas condiciones, aplicado generalmente para el entrenamiento de quienes deben manejar dicho sistema. *Diccionario. Real academia Española (2001), 22ª ED*

1.9 Resumen.

Se identificó el problema en algunos productores de jitomate a pequeña y mediana escala en regiones agrícolas del distrito de desarrollo rural 001 Maneadero, Ensenada Baja California como la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular una temperatura de referencia y velocidad del aire necesaria para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate. Lo que llevó a una hipótesis de causa mediante una investigación de tipo estadística etnográfica siendo un problema que abarcará las áreas de estudio de automatización de procesos para el desarrollo tecnológico de la región.

2 Marco Teórico

2.1 Introducción.

Es de suma importancia tener un fundamento teórico y realizar una revisión bibliográfica que esté relacionada con las áreas del secado de alimentos y sistemas de control automático, mismas que proporcionarán bases suficientes para la solución de la problemática observada, fundamentado y agregando citas y revisiones bibliográficas de diversos autores con el objetivo de lograr posibles soluciones al problema y a las hipótesis planteadas en la presente investigación.

2.2 Procesos y técnicas del Secado

La falta de implementación de los procesos y técnicas de secado en un sistema de control tiene probablemente que ver con el problema de la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías capaz de regular la temperatura de referencia para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate, diversos autores han escrito con respecto a estos proceso y secados como se describe a continuación.

2.2.1 Teoría del Secado.

El proceso de secado de un alimento consiste en la remoción de parte de su agua libre hasta llegar a un nivel tal que pueda ser consumida y/o almacenada en un lugar de temperatura ambiente (Almilla, 2001).

El secado de productos se pueden realizar en tres diferentes técnicas ya estudiadas (Puertas, 2005).

- Por evaporización con ayuda de calor (secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, y otras clases de vaporización).
- Mediante procesos físico-químicos (lío-filización, osmosis, adsorción y congelación)
- Por extracción de agua a través de medios mecánicos (presión, vibración, congelación)

El secado térmico es la operación más habitual y utilizada, el cual es un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía, de ahí que se han generado numerosos estudios de modelado, tipos de secadores y maneras de hacer eficiente este proceso de secado. La figura.

2.1 muestra un sistema artesanal que define el funcionamiento básico de un deshidratador solar de alimentos.

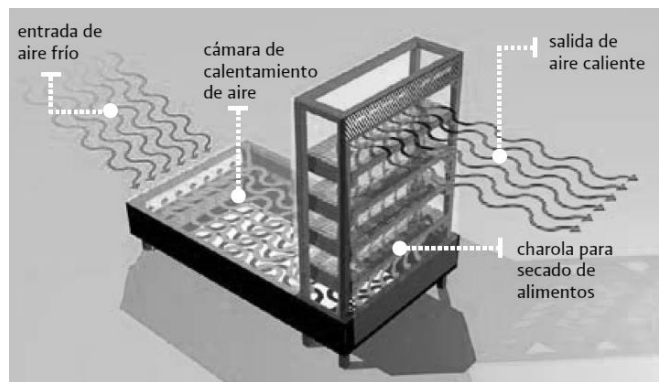


Figura 2.1 Funcionamiento básico de un deshidratador solar de alimentos.

Fuente: Adaptado de la guía *Deshidratador de alimentos* (2008). Publicado en: *Transferencia de tecnología y divulgación sobre técnicas para el desarrollo humano y forestal sustentable* (pág. 13) México. Conafor

El mercado mundial para el secado solar puede ser dividido fundamentalmente en tres segmentos (Costales, 2010):

1. Secado mecánico para temperaturas menores de 50 °C.
2. Secado mecánico para temperaturas superiores a los 50 °C.
3. Secado al sol.

El mismo autor sigue articulando que el tercer segmento ha representado muchos inconvenientes tales como: escasa calidad en el producto final y sus reducidas probabilidades de mantener sus condiciones operacionales, altas pérdidas, posibilidad de contaminación y contradicciones entre las diferentes estaciones del año, principalmente en los periodos lluviosos, de aquí que no constituye un método recomendable y que el secador solar híbrido busca posicionarse en el primer segmento “Secado mecánico para temperaturas menores de 50 °C” buscando la factibilidad y ventajas sobre el tercer:

- Reducción en el tiempo de secado entre 30% y 50 %.
- Mejoras significativas en la calidad del producto final.
- Reducción de pérdidas por ataques de plagas, corrupción y vandalismos.
- Control y reproducibilidad del proceso.

El tiempo de deshidratación natural oscila entre 2 a 6 días (Gomez, 2009), dependiendo del producto, ya que solo se aprovecha el calor que se produce al ser expuestos al sol; esto hace a los procesos no rentables para el área industrial. Es necesario implementar un sistema donde se vea aprovechado el calor del sol, en especial en las temporadas húmedas en donde hay ausencia de esta energía y su secado provenga de un horno eléctrico apoyado por mecanismos automáticos (Duran, 2010).

Existen gran variedad de secadores solares en el mercado y documentados en diversos estudios; dentro de los secadores de baja temperatura, se pueden clasificar según la forma de circulación del aire desecante en 2 grandes grupos (Puertas, 2005):

- Sistemas solares activos o de convección forzada: donde se incorporan elementos externos, como ventiladores para mover el aire caliente utilizando la transferencia de humedad del producto. Pueden ser “todo solar” donde la fuente de temperatura se obtiene en su totalidad de la radiación del sol, o sistemas “híbridos” donde además de la radiación se utilice alguna fuente secundaria de energía para elevar la temperatura.
- Sistemas solares pasivos o de convección natural: donde no se incorporan elementos externos para la circulación del aire desecante (aire caliente), se produce este movimiento por la variación de temperatura.

Además de estas clasificaciones se puede hablar de 3 subclases de sistemas que describen el modo de uso de la energía solar:

- Secadores solares tipo integral o directo: en ellos la radiación solar se recoge en la cámara de secado.
- Secadores solares tipo distribuido o indirecto: están conformados de un mecanismo llamado colector solar donde capta la energía de la radiación y la transmite al aire provocando su calentamiento.
- Secadores solares de tipo mixto: donde la radiación solar se transmite a ambos mecanismos; al colector solar y a la cámara de secado.

Otra manera de clasificar el secado se define como (Ferreira & Sebastião, 2007):

- Secado Natural, dependiendo del producto se expone al sol en un determinado tiempo con algunas condiciones climáticas necesarias. Se logra de manera natural o con Secadores artesanales ya que no necesitan de alguna fuente de energía más que la natural (Solar).
- Secado Artificial, este secador involucra sistemas mecánicos y/o automatizados para la aceleración de este proceso el cual hace fluir el aire caliente impulsado por ventiladores, las formas de calentar este aire puede variar de acuerdo al sistema de Secador diseñado , puede ser por medio de leña o combustibles fósiles (Energía por Biomasa) o por la misma electricidad.

Las partes más generales que componen a un deshidratador solar son: Cámara o colector, que permite el calentamiento del aire, entrada y flujo del aire, charolas para el secado de alimentos, y salida del aire caliente se muestran en la figura. 2.1.

Se han desarrollado números trabajos relacionados a la utilización de Secadores Híbridos, tal es el caso de la investigación realizada por Ferreira & Sebastião (2007) en la Universidad Federal de Rio Grande en Brasil donde se crea un sistema de secado solar para frutos tropicales utilizando un sistema de secado con energía solar, convección forzada y resistencias eléctricas.

Un procedimiento de secado, que combina el secado mecánico con el natural, es usado en Brasil principalmente para granos. El mismo consiste en combinar la energía colectada como radiación solar y convección forzada del aire, realizada por ventiladores, resultando en el aprovechamiento tanto de la radiación solar así como de la convección forzada.

2.2.2 Modelos de secado.

Para el logro de una eficiencia en energía y secado es necesario trabajar con el modelado de secado en determinados elementos, a continuación se trabajará una sección de modelos de Secado.

Las técnicas de simulación numérica resultan cada vez de mayor utilidad para la caracterización de procesos (Gainza, 2002), de esta manera los modelos matemáticos para implementación de controladores viene a proporcionar una herramienta importantísima para

poder predecir la influencia de diferentes parámetros en su funcionamiento para así lograr un secado mucho más eficiente energéticamente (Dubey O.P, 1996).

El siguiente bloque a desarrollar está basado en el principio de deshidratación por medio de secado térmico, comentado anteriormente como la metodología de secado más habitual y practicado.

Cuando deseamos determinar un modelo de secado para poder manipularlos de manera física, matemática o automatizada es necesario recurrir a diferentes modelos desarrollados en el área de transferencia llamados:

- Ecuaciones básicas de fenómeno de transporte: ecuación de transferencia de materia (masa) y energía y cantidad de movimiento.
- En investigaciones previas (Ferreira & Sebastião, 2007) también se ha trabajado este modelado del secado a través de la difusividad (Almada, Cáceres, & Pulfer, 2005) de los líquidos.

A continuación se muestra la perspectiva e implicaciones de los modelos propuestos para el análisis de coeficientes para luego desarrollar un sistema de control adecuado.

1).- Modelos de transferencia de masa y energía.

Existen varios métodos para el cálculo de transferencia de masa y energía, a continuación se desarrollaran dos de los más importantes.

- En la transferencia de energía encontramos la Ecuaciones de Fourier (Ferreira & Sebastião, 2007)
- Para la transferencia de materia la Ecuaciones de Fick (Cengel, 2007) ; (Ferreira & Sebastião, 2007)

La transferencia de masa y energía interviene en muchos problemas significativos de transferencia de calor que se encuentran en la realidad; por ejemplo, alrededor de un tercio de la pérdida de calor de una persona en reposo se debe a la evaporación. Resulta que la transferencia

de masa es análoga a la transferencia de calor en muchos aspectos y existe una cercana semejanza entre las relaciones de ambas.

La transferencia de masa requiere de la presencia de dos regiones con composiciones químicas diferentes y se refiere al movimiento de especies químicas desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor. (Cengel, 2007)

El calor se transfiere por conducción, convección y radiación. Sin embargo, la masa se transfiere sólo por conducción (llamada difusión) y convección.

Hace más de un siglo Fourier propuso que la relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperaturas es de carácter lineal, de tal forma que se puede expresar como lo indica la ecuación (2.1):

$$\dot{Q} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (2.1)$$

donde Q representa el flujo de calor, k es la conductividad térmica de los materiales, A es el área de transferencia y ΔT es la diferencia de temperaturas entre dos puntos del sólido que se encuentran separados por la distancia L .

Por otra parte el flujo puede entrar o salir del sólido, por lo tanto es necesario tener un sistema de referencia que permita distinguir entre los dos eventos. Se crea entonces un sistema de referencia donde el flujo de calor es positivo si lleva el mismo sentido del eje x , como lo indica la figura 2.2.

La expresión (2.1) puede ser descrita como:

$$\dot{Q}_{con} = -kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.2)$$

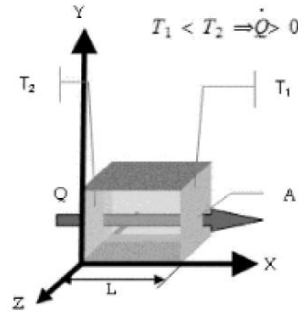


Figura 2.2 Diagrama de flujo de calor en la pared plana.

Fuente: Herrera (2005). *Procesos de transferencia de calor*. (p. 14)

En algunas ocasiones conviene expresar la ecuación (2.1) en su forma diferencial:

$$\dot{Q}_{con} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

donde la razón de conducción del calor en una dirección x es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx en esa dirección y se expresa por la **ley de Fourier de la conducción del calor**.

De modo semejante, la razón de difusión de masa, $\dot{m}_{dif}$, de una especie química A en un medio en reposo, en la dirección x , es proporcional al gradiente de concentración dC/dx en esa dirección y se expresa mediante la **ley de Fick de la difusión** por:

$$\dot{m}_{dif} = -D_{AB}A \frac{dC_A}{dx} \quad (2.4)$$

donde D_{AB} es el **coeficiente de difusión** (o *difusividad de la masa*) de la especie en la mezcla y C_A es la concentración de esa especie en la mezcla en ese lugar. Puede demostrarse que las ecuaciones diferenciales, tanto para la conducción de calor como para la difusión de masa, tienen la misma forma. Por lo tanto, con sólo cambiar los coeficientes y variables correspondientes, pueden obtenerse las soluciones de las ecuaciones de la difusión de masa a partir de las soluciones de las ecuaciones correspondientes de la conducción del calor, para el mismo tipo de condiciones de frontera (Herrera, 2005).

2).- Modelo de difusividad molecular del agua.

Los modelos difusivos generalmente están basados en la difusión de líquido y/o vapor dentro del producto. Con ellos son obtenidos los perfiles de temperatura y de concentración de agua, en función de la posición adentro del sólido. (Ferreira & Sebastião, 2007)

Karim & Hawlader (2005) desarrollaron un modelo de transferencia de materia y energía, para el secado de transferencia térmica convectiva de frutos tropicales. El modelo del material (banana) es capaz de predecir temperatura y humedad instantáneas adentro del fruto. Es admitido el encogimiento del material y, debido a esto, el coeficiente de difusión no es constante, pero es dependiente del contenido acuoso y de la temperatura del fruto (Bird, 2002).

También fueron obtenidas ecuaciones para el secador, denominado modelo del equipo, las cuales son usadas para predecir los cambios que ocurren en el equipo durante el proceso de secado, es decir, predicen la temperatura y la humedad instantáneas del aire de secado a lo largo del secador tipo túnel, que consiste en una cabina equipada con rieles para mover unos cajones a lo largo de la cámara de secado; un sistema de calefacción calienta el aire que entra a la cámara y este circula a través de los cajones con alimentos. Ellos presentaron datos de coeficientes de difusión de agua en bananas a temperaturas de 40, 50 y 60 °C y velocidades del aire de secado de 0,3, 0,5 y 0,7 m/s. Según ellos, la velocidad de secado es mucho más dependiente de la temperatura que de la velocidad del aire. Este resultado se debe a que la resistencia externa no cambia mucho o es despreciable, en el rango usado de velocidad del aire de secado.

La difusividad obtenida por ellos disminuye con el progreso de secado. Es decir, debido al encogimiento son producidos cambios en la estructura microscópica del fruto y, por esto, aumenta la resistencia a la difusión del agua, disminuyendo su coeficiente de difusión.

Karim & Hawlader (2005) concluyeron que, con los modelos desarrollados por ellos, se obtienen buenas predicciones de la velocidad de secado, perfiles de temperatura y humedad en bananas y de perfiles de temperatura y humedad a lo largo del secador. Compararon datos experimentales obtenidos en un secador solar y valores calculados, usando rodajas de banana y

concluyeron que ellos concuerdan bien; prediciendo temperatura y humedad en el secador tipo túnel, así como en las rodajas de banana durante su secado.

Mabrouk (2006) desarrollo un modelo numérico para la predicción de la transferencia de materia y energía de productos granulares en un secador tipo túnel. Como la capa usada del producto era de pequeño espesor, admitieron que no existía gradiente de temperatura y humedad en la capa de material, y obtuvieron un modelo simplificado basado en una capa delgada. Empleo, por ejemplo, una capa de frutos, admitidos como placas, de 0,8 cm de espesor, velocidades del aire de secado de 0,5 a 7 m/s y temperatura de entrada de 60°C, en un túnel de 6 m. Después de conducir una serie de experimentos, en los rangos de temperatura de entrada de aire de 40 a 80°C, velocidad del aire de 1 a 7 m/s y humedades relativas de 5 a 50 %, concluyendo que la temperatura y velocidad del aire influyen mucho en la velocidad de secado.

Según el, el régimen de flujo del aire es turbulento y, en consecuencia, la superficie del material, directamente expuesta al secado, se acerca rápidamente a la humedad de equilibrio, pero los cambios en el interior de la capa de material es lenta.

Estos resultados con respecto a la transferencia de masa y energía y difusividad, son de gran utilidad para considerar como elementos importantes dos variables: la temperatura y la velocidad del aire.

2.2.3 Curvas de velocidad del secado

La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso. En la figura. 2.3 se muestra una representación gráfica de la velocidad de secado frente a la humedad del producto o frente al tiempo, y se le denomina “curva de secado” (Gomez, 2009).

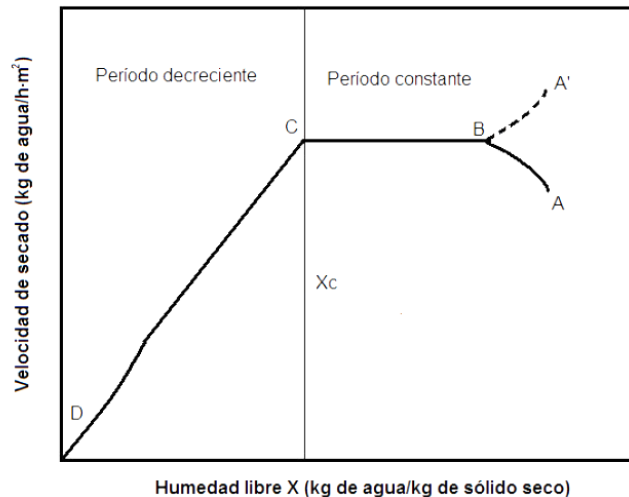


Figura 2.3 Curva de velocidad del secado.

Fuentes. Gómez (2009). *Deshidratado de tomate saladette en un secador de charolas giratorias*. (p. 27). Oaxaca. Tesis.

En la investigación realizada por Gómez (2009) el producto se encuentra inicialmente en el punto A. En la etapa inicial del secado (AB) el agua se calienta lentamente. En el punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Cuando el sólido está a una temperatura por arriba de operación, la velocidad de secado empieza en el punto A'. Posteriormente, inicia una pérdida de agua velocidad constante (BC).

El periodo de velocidad de secado constante se caracteriza por la evaporización de la humedad a partir de una superficie saturada. El secado de velocidad constante equivale fundamentalmente a evaporación a partir de un cuerpo de agua grande y es independiente del tipo de sólido. Esta etapa finaliza cuando se alcanza la llamada humedad crítica X_c , fácilmente identificable en las curvas de secado por el cambio brusco de velocidad. En esta etapa no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película constante.

La velocidad empieza a decrecer (CD), pudiendo existir uno o varios periodos de velocidad decreciente. El periodo de velocidad decreciente es por lo general el periodo más largo de una operación de secado y depende de la temperatura del aire y del espesor del alimento. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea pequeña; sin embargo los tiempos de secado pueden ser prolongados.

Las curvas de velocidad de secado se realizan mediante la siguiente expresión (2.5):

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \quad (2.5)$$

donde:

X_t = Humedad al tiempo t (kg de agua entre kg solido seco)

W = Peso del solido húmedo (kg totales del agua)

W_s = Peso del solido seco (kg de solido seco)

Después de establecer las condiciones de secado constante y contenido de humedad en equilibrio, se procede a calcular el contenido de humedad libre X , para cada valor de X_t :

$$X = X_t - X^* \quad (2.6)$$

donde:

X = humedad libre (kg de agua entre kg solido seco)

X^* = Humedad en equilibrio (kg de solido seco)

Se realiza un gráfico de la humedad libre X vs tiempo (t) con los valores obtenidos de la ecuación (2.6). La velocidad del secado a partir de la gráfica se logra midiendo la pendiente de la curva, con la cual se obtienen valores de dx/dt para los valores de t .

Con la ecuación (2.7) se calcula la velocidad R para cada punto.

$$R = - \frac{L_s dx}{A dt} \quad (2.7)$$

donde:

R = Velocidad de secado (kg de agua/ $h \cdot m^2$).

L_s = Peso del solido seco usado.

A = Área superficial expuesta al secado (m^2).

2.2.4 Secado del Jitomate.

El jitomate es muy apreciado en diversas partes del mundo, debido a su escasa cantidad de calorías (100g de jitomate aportan solamente 18kcal) (Hernandez Rodríguez & Antonio, 2011)

además de constituir una fuente importante de ciertos minerales tales como el potasio y el magnesio.

La mayor parte de su peso es agua y el segundo de gran importancia son los hidratos de carbono.

Gracias a la cultura culinaria, el secado del jitomate ha tomado mucho auge; entre las principales estudios se encuentran (Hernandez Rodríguez & Antonio, 2011) a). J. Khazaei, quien analizo el efecto de la temperatura del aire de secado en la calidad final de rodajas de jitomate, empleando temperaturas dentro del rango de 60 – 120 °C; b). P. Lewicki, quien estudio el efecto del pre tratamiento con una solución de calcio en el secado; c). K. Movagharnejad desarrollo una técnica de modelación del proceso de secado en base a redes neuronales; d) R. Karel realizó un estudio sobre la influencia de un pre tratamiento osmótico en el secado; e). P. Rajkumar, analizo el secado del jitomate al vacío, y f). R. Queiroz, realizo el secado de jitomate a través de secadores con bombas de calor.

En algunos estudios se ha trabajado con resultados significativos del secado del jitomate en rodajas de 5 mm de espesor a bajas temperaturas (entre 50, 55, 60°C) y con velocidades de secante entre 1.5 y 2.5 m/s, con un pre tratamiento escalado (consiste en la inmersión en una solución de agua y limón, con la finalidad de evitar que el producto cambie su coloración durante el proceso de secado).

Algunas de las pruebas de secado son:

- Se prepara el jitomate con algún tratamiento pre establecido.
- Se coloca en el secador a temperaturas altas, de manera creciente puede llegar hasta los 90°C.
- Se verifica el peso hasta que deje de variar durante 1 hora con una balanza, con un margen de error de $\pm .001\text{g}$.
- Una vez obtenido el peso del jitomate seco, el contenido de humedad en base seca se calcula por medio de la expresión (2.5).

Según diversos investigadores (Queiroz & Gabas, 2004) las pruebas más seguras de secado para jitomates son a temperaturas de 50, 55 y 60°C, y con velocidades de 1.5 y 2.5 m/s,

para Gomez (2009) los resultados más favorables se obtuvieron en 60°C ,con velocidades de .6 y 1.2 m/s con rebanadas de 6mm de espesor. Estas condiciones se seleccionan debido a que en investigaciones previas los productos no experimentaron perdidas en sus propiedades alimenticias y a temperaturas menores a las de 50°C conducen a tiempos muy largos de secado.

Como mencionamos anteriormente cuando un sólido (jitomate) es sometido a un proceso de secado utilizando aire se presenta dos sub procesos (Cengel, 2007) (Gomez, 2009).

- Transferencia de materia. El movimiento de la humedad dentro del solido es una función de la naturaleza física del sólido, su temperatura y contenido de humedad.
- Transferencia de energía. Este segundo subproceso depende de las condiciones externas de temperatura, humedad y flujo de aire, área de exposición y el tipo de secador empelado.

Las condiciones a las que lleva a cabo el secado típico del jitomate, inducen a pérdidas de algunas propiedades antioxidantes y cambios de color. Para ayudar a disminuir el daño oxidativo durante el secado del jitomate con aire se ha sugerido. (Kerkhofs, 2005)

- Usar bajas temperaturas (45°C - 55°C).
- Reducir el grosor del tomate usando cuartos de tomate o rebanadas de 2 a 8 mm de espesor.
- Realizar una remoción parcial del contenido de agua por deshidratación osmótica (DO) Consiste en sumergir los alimentos en soluciones hipertónicas con el objetivo de producir dos efectos principales: flujo de agua desde el producto hacia la solución hipertónica y flujo de solutos hacia el interior del alimento. En algunos casos se puede presentar la salida de solutos como son los ácidos orgánicos. (Genina, 2002)

La temperatura desempeña un papel importante en los procesos de secado, podría considerarse como la variable más importante del Secado (Kerkhofs, 2005).

La velocidad del aire del secador tiene dos funciones importantes (Gomez, 2009):

- Transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el alimento facilitando su evaporación.

- Ayuda a transportar la humedad saliente del material.

La velocidad del secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado (Foust, 1997).

La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en el secado. Cuanto menos sea el espesor de la capa límite, más rápida será la remoción de humedad. Por otra parte, el flujo del aire es importante, uno turbulento es mucho más eficaz que uno ligero.

Estas dos características jugarán un papel importante a controlar, a continuación se muestra la curva característica del secado.

2.3 Sistemas de Control

La falta de implementación de técnicas de control para la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria para el secado y eléctrica como secundaria tiene probablemente que ver con el problema de la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate, diversos autores han escrito con respecto a estas técnicas de control.

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia comenta Ogata (2008), dentro de la deshidratación de alimentos ha venido a ser una excelente solución para evitar pérdidas de secado en tiempo, infección de plagas o vandalismo como lo menciona Costales (2010).

Para lograr tener un mecanismo híbrido es necesario manejar un sistema de control; las herramientas de control ya establecidas serán de mucha ayuda para lograr tener un sistema eficaz y eficiente.

Es necesario recurrir al conocimiento en la teoría y la práctica del control automático ya que proporcionan los medios para conseguir un comportamiento óptimo de los sistemas

dinámicos, mejorar la productividad, simplificar el trabajo de muchas operaciones manuales repetitivas y rutinarias.

El siguiente bloque se dedicará para establecer el modelado matemático necesario para el desarrollo posterior del sistema de control requerido.

2.3.1 Modelado Matemático de sistemas dinámicos.

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como *un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos bastante bien.* (Ogata, 2008).

También según la misma literatura un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva.

La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describen en términos de ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones diferenciales se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, como las leyes de Newton para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos. *El modelado matemático de sistemas de fluidos y sistemas térmicos son el medio más versátil para transmitir señales y potencia, los fluidos, ya sean líquidos o gases. Tienen un amplio uso en la industria.* (Ogata, 2008).

Los sistemas térmicos son aquellos que involucran la transferencia de calor de una sustancia a otra. Estos sistemas se analizan en términos de resistencia y capacitancia, aunque la capacitancia térmica y la resistencia térmica tal vez no representen la mayor precisión, se utilizan para simplificar el análisis. Se representa que las sustancias que se caracterizan por una resistencia al flujo de calor tienen una capacitancia térmica insignificante y que las sustancias que se caracterizan por una capacitancia térmica tienen una resistencia al flujo de calor (Ogata, 2008).

Como se ha mencionado con anterioridad, el calor fluye de una sustancia a otra de tres formas diferentes: por conducción, por convección y por radiación. La mayor parte de los

procesos térmicos en los sistemas de control de procesos no involucran transferencia de calor por radiación.

Para la transferencia de calor por conducción o convección se tiene la siguiente relación:

$$q = K\Delta\theta \quad (2.8)$$

donde q = flujo del calor, $\frac{\text{kcal}}{\text{seg}}$

$\Delta\theta$ = diferencia de temperatura, °C

K = coeficiente, $\frac{\text{kcal}}{\text{seg}}^{\circ}\text{C}$

El coeficiente K se obtiene mediante

$$\begin{aligned} K &= \frac{kA}{\Delta X}, \text{por conducción} \\ &= HA, \text{por convección} \end{aligned} \quad (2.9)$$

donde k = conductividad térmica, $\text{kcal/seg}^{\circ}\text{C}$

A = área normal para flujo de calor m^2

ΔX = espesor del conductor, m

H = coeficiente de convección. $\text{Kcal/m}^2 \text{seg}^{\circ}\text{C}$

Las resistencias térmica R para la transferencia entre dos sustancias se definen del modo siguiente:

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de temperatura } ^{\circ}\text{C}}{\text{cambio en el flujo de calor, kcal/seg}} \quad (2.10)$$

La resistencia térmica para una transferencia de calor por conducción o por convección se obtiene mediante:

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{1}{K} \quad (2.11)$$

Como los coeficientes de conductividad y convección térmica son casi constantes, la resistencia térmica para la conducción o la convección es constante.

La capacitancia térmica C se define mediante.

$$C = \frac{\text{cambio en el calor almacenado, kcal}}{\text{cambio en la temperatura, } ^{\circ}\text{C}} \quad (2.12)$$

o bien

$$C = mc \quad (2.13)$$

donde m = masa de la sustancia considerada, kg

c = calor específico de la sustancia, $kcal/kg\ ^\circ C$

Este modelado de sistemas dinámicos (térmicos) es el medio para lograr el modelado dentro del deshidratador.

2.3.2 Diseño de un control Clásico PID

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite (en general procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden). (Amestegui, 2001)

Según el mismo autor el uso extensivo en la industria es tal que el 95% de los lazos de control que existen en las aplicaciones industriales son del tipo PID, de los cuales la mayoría son controladores PI, lo que muestra la preferencia del usuario en el uso de leyes de control muy simples.

Las técnicas de control actuales se combinan con funciones lógicas y secuenciales y una serie de mecanismos y funciones para adecuarse a responder a las necesidades de los modernos sistemas de control y automatización industrial, esto da lugar a dispositivos para el control de temperatura, velocidad, distribución de energía, transporte, máquinas-herramientas, reacción química, fermentación, entre otros.

En general, no se explotan todas las características de estos controladores, quizás por falta de una mejor comprensión desde el punto de vista de la teoría de control. Es interesante señalar que más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado (Ogata, 2008).

La utilidad de los controles PID está en que se aplican en forma casi general a la mayoría de los sistemas de control (Amestegui, 2001).

En el siguiente apartado se mostraran las técnicas básicas necesarias para poder sintonizar de manera delicada y fina, controladores PID.

Control PID de plantas: La figura 2.4 muestra un control PID de una planta. Si se puede aplicar un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado.

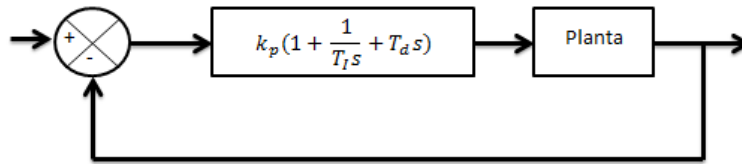


Figura 2.4 Control PID de una planta.

PID: acción de control proporcional –integral – derivativo, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t) d\tau + Kp Td \frac{de(t)}{dt} \quad (2.14)$$

Y su función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Ti s} + Td s \right) \quad (2.15)$$

En esta sección veremos tres métodos de ajuste de ganancias de un controlador PID, el *Método de Oscilación o Método de Respuesta de Frecuencia*, el *Método basado en la Curva Reacción o Método de Respuesta al Escalón* y el *Método de los dos puntos* (C.I Smith, Alfaro y Ho et al). El primero se basa en un lazo de control solo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al periodo de esas oscilaciones, podemos establecer las ganancias del controlador PID. El segundo método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PID. Estos métodos fueron iniciados por Ziegler y Nichols (Z-N) en 1942, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos.

1).- Método de Oscilación

Este procedimiento es válido solo para plantas estables a lazo abierto y se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Utilizando solo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que estas deben ser observadas en la salida del controlador.
2. Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el periodo de oscilación de la salida figura 2.5 del controlador, P_c (en el diagrama Nyquist, corresponde a que $K_c G(j\omega)$ cruza el punto $(-1,0)$ cuando $K_p = K_c$).
3. Ajustar los parámetros del controlador según la tabla 2

Tabla 2 Parámetros de ajuste (método de oscilación).

	Kp	Ti	Td
P	0.50Kc		
PI	0.45Kc	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	0.60Kc	0.5Pc	$\frac{P_c}{8}$

Dicha tabla fue obtenida por Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que pueda describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-sT_0}}{v_0 s + 1} \text{ donde } v_0 > 0 \quad (2.16)$$

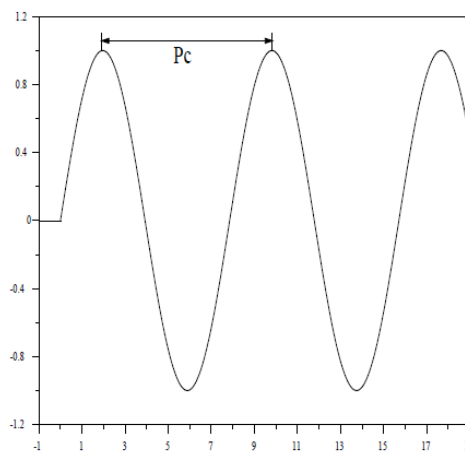


Figura 2.5 Oscilación sostenida con periodo P_c .

2).- Método Basado en la curva de Reacción.

Para este método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes conjugados, la curva de respuesta unitaria puede tener la forma de S, como se observa en la figura. 2.6. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva de forma de S. Tales respuestas escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

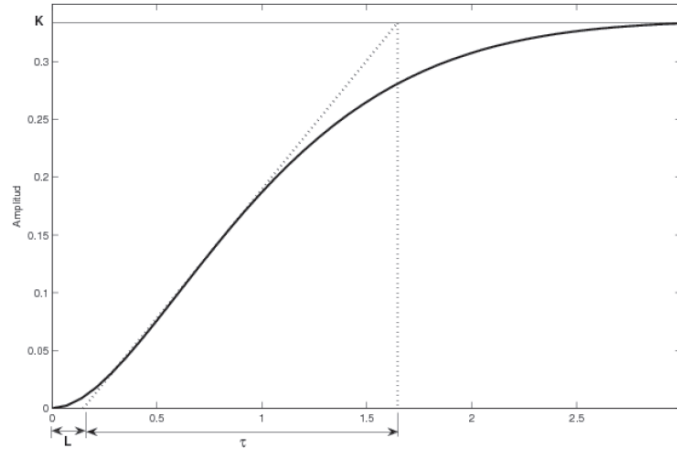


Figura 2.6 Curva de respuesta en forma de S.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva y determinado las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea K , tal como se muestra en la figura 2.6. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (2.17)$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de Kp , Ti y Td de acuerdo con la fórmula que muestra en la **Tabla. 3**.

El controlador PID sintonizado mediante este método de la ecuación (2.15) produce:

$$1.2 \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad (2.18)$$

$$0.6T \frac{(s + \frac{1}{L})^2}{s} \quad (2.19)$$

Por lo tanto el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -1/L$

Tabla 3 Parámetros de ajuste (método de curva de reacción).

<i>Tipo de controlador</i>	<i>Kp</i>	<i>Ti</i>	<i>Td</i>
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0.5L

Las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols se han usado ampliamente para sintonizar controladores PID en sistemas de control de procesos en los que no se conoce con precisión la dinámica de la planta. Durante muchos años tales reglas de sintonía han demostrado ser muy útiles. Por su puesto estas reglas se pueden aplicar a plantas cuya dinámica se conoce (Ogata, 2008).

3).- Método de los dos puntos (Smith, Alfaro, Ho et al)

Este método elimina la dependencia en la recta tangente del primer método (Alfaro, 2011). El método consiste en determinar los instantes de tiempo t_1 y t_2 diferenciándose únicamente en la selección de los dos instantes en que la respuesta del modelo se hace coincidir con la del proceso real.

Si p_1 y p_2 son dos valores porcentuales del cambio en la respuesta del sistema a un cambio escalón en la entrada y t_1 y t_2 son los tiempos requeridos para alcanzar estos dos valores como se muestra en la figura 2.7, entonces los parámetros de un modelo de primer orden más tiempo muerto se puede obtener de (Alfaro, 2011):

$$\tau = at_1 + bt_2 \quad (2.20)$$

$$L = ct_1 + dt_2 \quad (2.21)$$

Con los resultado tomados de Alfaro (2011) se construye la tabla 4 para los valores de a, b , c y d.

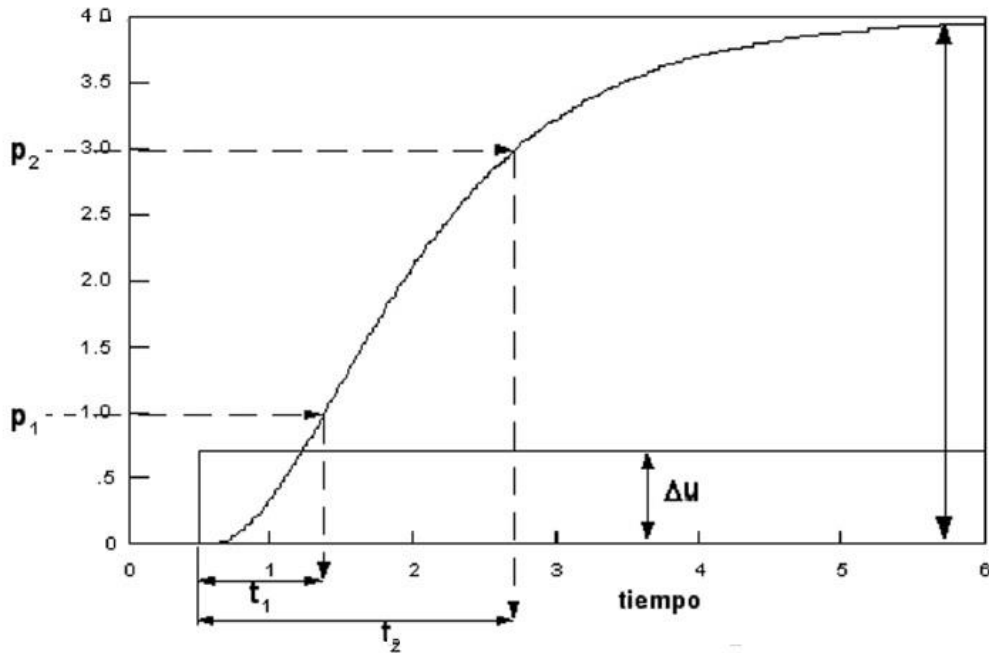


Figura 2.7 Método de 2 puntos.

Fuente: Alfaro (2009). Identificación de procesos sobre amortiguados utilizando técnicas de lazo abierto. (p.16). Ingeniería 11 (1,2):11-25, 2 001 San José. Costa Rica.

Tabla 4 Constantes para la identificación de los parámetros de los modelos de primer orden más tiempo muerto.

Método	% $p_1(t_1)$	% $p_2(t_2)$	a	b	c	d
Alfaro	25.0	75.0	-0.910	0.0910	1.262	-0.262
Smith	28.3	63.2	-1.5	1.5	1.5	-0.5
Ho et al	35.0	85.0	-0.67	0.67	1.3	-0.29

Fuente: Alfaro (2009). Identificación de procesos sobre amortiguados utilizando técnicas de lazo abierto. (p.16). Ingeniería 11 (1,2):11-25, 2 001 San José. Costa Rica.

Para la determinación de los parámetros de K_p , T_i y T_d para elaborar el controlador se sustituyen τ y L con las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols de la tabla 3 (Parámetros de ajuste de control)

K que es la ganancia estática de la planta se calcula:

$$K = \frac{C(t)_{final} - C(t)_{inicial}}{U_{final} - U_{inicial}} \quad (2.22)$$

Donde $C(t)_{final}$ corresponde al valor en que la planta se estabiliza debido a una entrada escalón y $C(t)_{inicial}$ es el valor inicial de la planta al momento en que se le inyecta la señal escalón. Por otra parte U_{final} y $U_{inicial}$ corresponden al cambio en la señal escalón (Alfaro, 2011).

Las tres reglas estudiadas en esta sección, son conocidas para sintonizar controladores PID, por sus aplicaciones y su alto desarrollo experimental se han decidido tomar como base para el controlador a diseñar en esta investigación.

2.4 Resumen.

La revisión bibliográfica resulto relevante para dar el fundamento a la investigación relacionada con el problema que es la falta de un sistema de control automático para deshidratar jitomates. Los diversos autores mencionados en el capítulo II, permitieron dar el rigor científico a la investigación que se realizó.

3 Metodología

3.1 Introducción.

La metodología de investigación que se aplicó y que orientó en el camino crítico durante el tratamiento de la presente investigación fue con el objeto de someter a comprobación la hipótesis que da solución al problema detectado como la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular una temperatura de referencia y la velocidad del aire óptima para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate.

Esto se llevó a cabo con un estudio de tipo cuantitativo estadístico etnográfico como ya se mencionó en el Capítulo I prevaleciendo lo cuantitativo siguiendo un rigor metodológico, incluyendo varios instrumentos para darle cientificidad como: observación, investigación, tratamiento estadístico de datos generados por software de simulación y validación de los resultados comparando con las técnicas de control presentadas en los documentos científicos que se muestra en la bibliografía.

Así mismo se agregan 7 apartados en este capítulo entre los cuales se encuentran: Diseño de estudio, metodología de la investigación, modelos de investigación, descripción del instrumento, confiabilidad y validez del instrumento, procedimiento y recolección de datos, procedimiento para examinar los resultados y las limitaciones encontrados en la presente investigación.

3.2 Diseño del estudio

En el *Capítulo I* se mencionan las actividades a realizar en esta investigación como una combinación de metodologías: en lo cualitativo se realizó observación y en lo cuantitativo se evaluó lo observado en la investigación, así como el tratamiento estadístico de datos generados por software de simulación y validación de los resultados comparando con los datos estadísticos de resultados de otras investigaciones similares.

Se aplicó la estadística etnográfica como se explica a continuación:

Se analizaron datos estadísticos de cuatro investigaciones encontrando 4 similitudes para el deshidratado del jitomate: técnica de secado, espesor de las rodajas, temperatura a la que se expone el jitomate y velocidad del aire, la tabla 5 muestra los resultados de dichas investigaciones.

Las investigaciones concuerdan que las mejores temperaturas para el secado optimo parecido al natural son de 50 y 60 °C, el espesor de las rodajas varía entre 3mm, 5mm y 6 mm justificando que entre más delgado el espesor es mejor para el deshidratado, las velocidad del aire se manejaron velocidades de entre 0.5 y 1.2 m/s concordando que aunque la temperatura tiene un efecto mayor en el deshidratado del jitomate que la velocidad del aire, a mayor velocidad del aire el tiempo de secado disminuye, cuidando no tener un exceso para que el producto no pierda sus propiedades, por último encontramos variedad en la técnicas de secado, prevaleciendo una notable tendencia a forzar de manera mecánica la temperatura y la velocidad.

Analizando estos datos se procedió a trabajar con las siguientes variables independientes.

- V1. Temperatura de secado de 50 a 60 grados centígrados.
- V2. Velocidad del secado de 1.2 m/s.
- V3. Técnica de secado mixta o híbrida.
- V4. Espesor de las rebanadas de 6 milímetros.

Con esta información se identificó la necesidad de diseñar un sistema de control automático capaz regular la temperatura de secado y la velocidad de referencia para tener un secado semejante al natural del secado por medio de un sistema híbrido.

Tabla 5 Variables para el secado del jitomate.

Autor	Estudio	Año	Variable	Comentarios
Passamai, Sánchez, Mendoza, Dorado, Valdez	Experiencias de secado sin radiación solar directa y a baja temperatura. Comparación con el secado solar.	2006	Espesor: 5mm Temperatura de secado: 30°C en el colector Velocidad del aire: .5m/s Técnica de secado: Secador solar tipo colector con ventilación forzado por medio de un panel fotovoltaico.	(1) Se observa que el secado sin radiación alcanza el nivel de secado 24 horas después comparado con el secador solar. (2) No se observan diferencias de manera cualitativa en el aspecto final del tomate en ambos métodos.(3) El uso de secadores de baja velocidad pueden suponer- en principio un ahorro de inversión para economías deprimidas, pero a lo largo tales secadores con mayores exigencias de producción pueden significar igualmente menos ingresos
			Espesor: 5mm Temperatura de secado: 25°C Velocidad del aire .5m/s Técnica de secado: Secado sin radiación en Túnel de laboratorio	
Monsalve , Machado	Evaluación de dos métodos de deshidratación del tomate	2007	Espesor: 3mm Temperatura de secado: 52°C. Técnica de secado: Estufa de aire	(1) Las mejores condiciones de temperatura fueron para la estufa de aire ya que el aire caliente se distribuye uniformemente dentro del secador.(2) No se consideró velocidad del aire caliente.
			Espesor 3mm Temperatura:70°C Técnica de secado: Bandejas	
Gómez Gómez	Deshidratado de tomate Saladette en un secador de charolas giratorias	2009	Espesor: 6mm Temperatura de secado:45,50 y 60 °C Velocidad del aire: .6 - 1.2 m/s Técnica de secado: Rotación de charolas.	(1) Las mejores condiciones de secado fueron con 60°C, .6 m/s. (2) Los tiempos de secado disminuyeron con aumento de velocidad del aire Foust , 1990.(3) La velocidad del aire tiene la menor contribución al secado con respecto a su temperatura.(4) A una velocidad de 1.2m/s se mostró un color negruzco en el tomate.
Hernández Rodríguez, Fernández Castillo, Quinto Diez, Flores Murrieta, Acosta Olea	Estudio de la Cinética del Jitomate	2011	Espesor: 5mm. Temperatura.:50, 55 y 60 °C Velocidades de aire:1.5 y 2.5 m/s Técnica de secado: Horno eléctrico.	(1) Con el uso de temperaturas de secado menores a 65°C, los productos generalmente no experimentan pérdidas en sus propiedades alimenticias. (2) La temperatura tiene un efecto más significativo en la pérdida de humedad que la velocidad del medio secante.

Fuente de información: Elaboración propia.

Nota: Adaptado de Rivas, L (2006). ¿Cómo hace una Tesis de Maestría? México: Ediciones taller abierto/ Sociedad cooperativa de Producciones S. C.L.

3.3 Metodología de la investigación

El sistema tomado para elaborar el deshidratador de jitomates fue el de un secado híbrido; Puertas (2005) lo llama *secado mecánico* para temperaturas de 50 °C y Costales (2010) se refiere a él como *Secado Artificial*. Este secador involucra sistemas mecánicos y/o automatizados para la aceleración de este proceso, el cual hace fluir el aire caliente impulsado por ventiladores. Las formas de calentar este aire pueden variar de acuerdo al sistema diseñado, por medio de biocombustibles o combustibles.

El sistema fue automatizado por medio de teorías de control clásica en dos fases: la primera consiste en el análisis de la planta para lo cual se generaron modelados paramétricos de un sistema térmico (horno eléctrico). La segunda fase consiste en la síntesis de los controladores PID para el control de temperatura del horno y el control de velocidad del ventilador, se apoyó en herramientas de análisis y diseño asistido, como por ejemplo: MatLab, Simulink y Proteus.

La teoría matemática del modelado para el horno eléctrico se basó principalmente en la *ley de Fourier de la conducción del calor* (Cengel, 2007), derivando en una función de transferencia de primer grado de la planta a controlar

$$G(s) = \frac{1}{RC s + 1} \quad (3.1)$$

Por medio de identificación de sistemas (Chavez & Esqueda, 2010) se obtiene el modelo paramétrico del motor marca Pitman, y la función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{6944.44k}{s(s+133.33)} \quad (3.2)$$

El sistema de control automático diseñado se basó en una estructura similar a la de la imagen de la figura 2.1, provisto por la guía del deshidratador solar de SEMARNAT (2008) donde describe de manera gráfica las partes que componen el deshidratador solar con un colector para aumentar de manera natural la temperatura y unas rendijas para que exista el flujo del aire.

Se pretende mejorarla como lo muestra la figura 3.1 en el cual se acopla un ventilador capaz de generar las velocidades necesarias para que el colector solar funcione como el horno

solar, por debajo de las charolas donde se coloca el jitomate se colocara una resistencia (horno eléctrico) para elevar la temperatura del aire cuando el horno solar es incapaz de proveerla.

Los actuadores son los dispositivos encargados de las acciones físicas del horno y motor, son controlados por módulos de procesamiento. Fueron dos diferentes: resistencia calefactora y motor – ventilador.

Las dimensiones consideradas son: colector de 2 mts por 1.5mts, la base de las charolas 1.25mts por 30 cm, la altura de las patas del colector son de 35cm y las patas de la base son de 40cm, las charolas se colocan cada 15 cm, cada charola mide 1m por 15 cm.

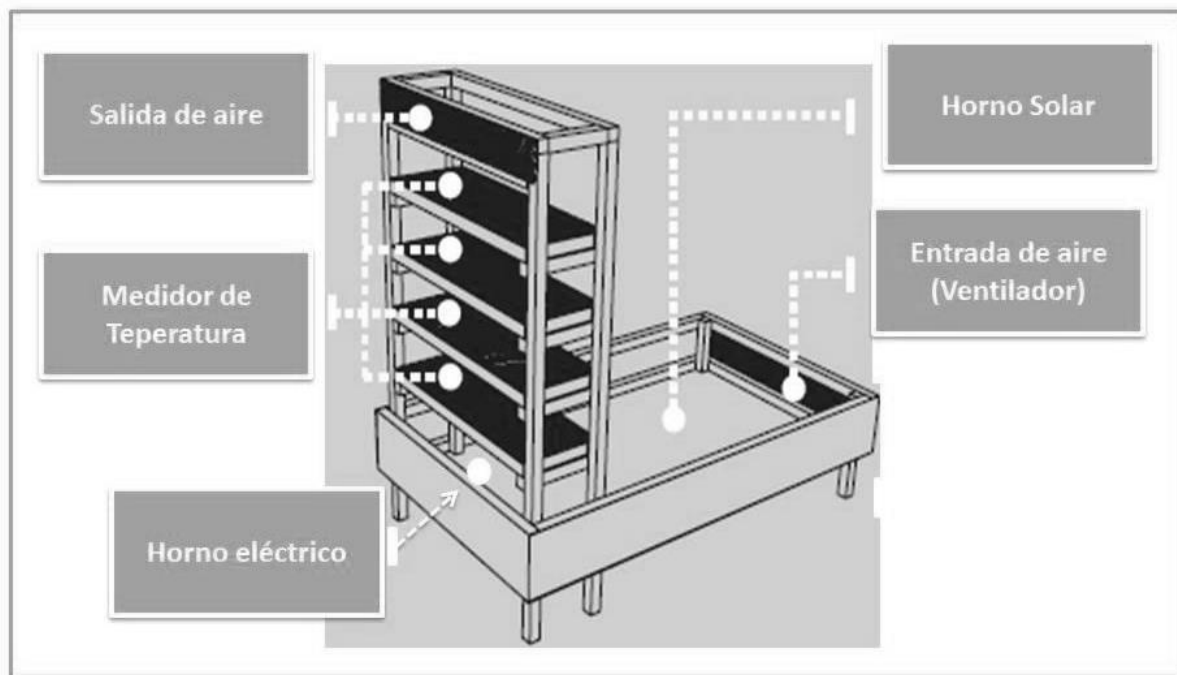


Figura 3.1 Secador solar híbrido.

Fuente: Adaptado de la guía *Deshidratador de alimentos* (2008). Publicado en: *Transferencia de tecnología y divulgación sobre técnicas para el desarrollo humano y forestal sustentable* (pág. 14) México. Conafor.

3.4 Modelo de la investigación.

El modelado de la planta general se realizó en subsistemas: para el horno eléctrico y para la velocidad del aire. La señal de entrada para el controlador solar es de 50°C, mientras sea posible

tener dicha temperatura no desearemos utilizar el controlador eléctrico, sin embargo cuando no es capaz de proveer la temperatura se activara el horno eléctrico siendo la fase del control la que dicte con cuanta temperatura iniciará el horno eléctrico, logrando así la eficiencia en la utilización de cada sistema de control.

La figura. 3.2 muestra los diagramas a bloques correspondientes al modelado de la planta representado en subsistemas.

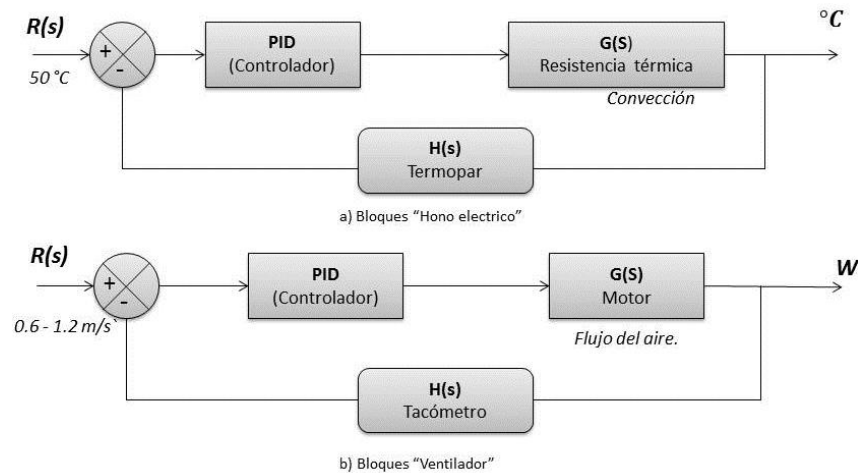


Figura 3.2 Modelado de la planta en sub-sistemas.

3.4.1 Control del Horno eléctrico:

El sistema que muestra la figura 3.2 (a) se realizó bajo las siguientes suposiciones: el tanque está aislado para eliminar las pérdidas de calor hacia el flujo circundante, no existe almacenamiento de calor en el aislamiento, por lo que tiene una temperatura estable; de este modo, se usa una sola temperatura para describir la del flujo entrante y del flujo que sale figura 3.3.

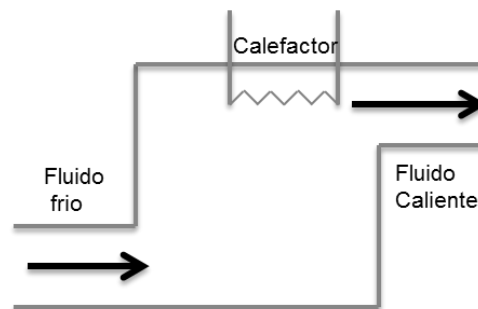


Figura 3.3 Sistema Térmico.

En la práctica, la temperatura del aire que entra puede cambiar y actuar como perturbación de carga. Si la temperatura del aire que entra cambia repentinamente de $\bar{\theta}_i$ a $\bar{\theta}_i + \theta_i$, mientras que el flujo de calor de entrada H y el flujo del aire G se conservan constantes, el

flujo de calor de salida cambiara de $\bar{H}$ a $\bar{H} + h_0$ y la temperatura del aire que sale cambiara de $\bar{\theta}_0$ a $\bar{\theta}_0 + \theta$.

Para este caso, h_0 , C y R se obtienen, respectivamente, como

$$h_0 = Gc\theta \quad (3.3)$$

$$C = Mc \quad (3.4)$$

$$R = \frac{1}{Gc} \quad (3.5)$$

donde:

$\bar{\theta}_i$ = tempertatura en estado estable del aire que entra , °C

$\bar{\theta}_0$ = temperatura en esado estable del aire que sale, °C

G = velocidad del flujo del aire en esta estable , kg/seg

M = masa del aire

c = calor especifico del liquido , kcal/kg°C

R = resistencia termica, °C $\frac{\text{seg}}{\text{kcal}}$

C = capacitancia termica, $\frac{\text{kcal}}{^\circ\text{C}}$

H = entrada del flujo de calor en estado estable, kcal/seg

La ecuación diferencial para este sistema del horno será entonces:

$$Cd\theta = (G_c\theta_i - h_0)dt \quad (3.6)$$

o bien

$$C \frac{d\theta}{dt} = G_c\theta_i - h_0 \quad (3.7)$$

que puede reescribirse como

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{R}\theta_i - G_c\theta \quad (3.8)$$

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{R}\theta_i - \frac{1}{R}\theta \quad (3.9)$$

$$RC \frac{d\theta}{dt} = \theta_i - \theta \quad (3.10)$$

$$RC \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_i \quad (3.11)$$

Aplicando transformada de Laplace obtenemos

$$RC S\theta(s) + \theta(s) = \theta_i(s) \quad (3.12)$$

La $G(s)$ de sistema del horno entonces será:

$$\frac{\theta(s)}{\theta_i(s)} = \frac{1}{RC s + 1} \quad (3.13)$$

Multiplicando por la función desplazada en el tiempo.

$$F(s) = \delta[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = e^{-st} \frac{1}{RC s + 1} \quad (3.14)$$

Así llegamos a la $G(s)$ de un sistema de 1^{er} orden con retardo en el tiempo que definirá la planta del Horno eléctrico:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-LS}}{1 + TS} \quad (3.15)$$

donde:

K_p = Ganancia estática (static gain). Es la ganancia o amplificación del sistema para una entrada constante (ganancia DC)

L = (dead time) Es el tiempo que transcurre desde que provoca un cambio en la entrada hasta que aparece algún cambio en la salida

T = (characteristic time) Tiempo característico del sistema de primer orden. Esto se refiere a la relación del retardo a la salida con respecto a una variación de la entrada.

Se creó el prototipo de deshidratador solar como se muestra figura 3.4, para poder trabajar con un sistema controlado en las variables de temperatura.



Figura 3.4 Deshidratador solar “Prototipo”.

Una vez conocido el comportamiento de la planta (colector-horno eléctrico) como una función de transferencia de 1^{er} Orden. Se procedió a tomar mediciones con un termómetro FLUKE 971 “Temperature Humidity Meter” figura. 3.5

La temperatura ambiente en las que se tomaron las temperaturas fue de 30 °C dentro del área donde se colocan las charolas se registró una temperatura de 33.13°C mismas que por el flujo del aire se incrementaron ya que en el colector solar se registraron temperaturas de 38.8°C .



Figura 3.5 FLUKE 971 “Temperature Humidity Meter”.

Al colocar la resistencia de un secador de cabello (como actuador) dentro del área donde se colocan las charolas se registran temperaturas crecientes alcanzando los 56.11 °C en un periodo de tiempo de 40 seg (tiempo donde la temperatura se estabilizo).

El resultado de las mediciones genero un patrón aproximado al de un sistema de primer orden en bucle abierto a una entrada escalón, mismos que se representan en un sistema desarrollado en el software Proteus para la simulación de dichos datos como se muestra en la figura 3.6.

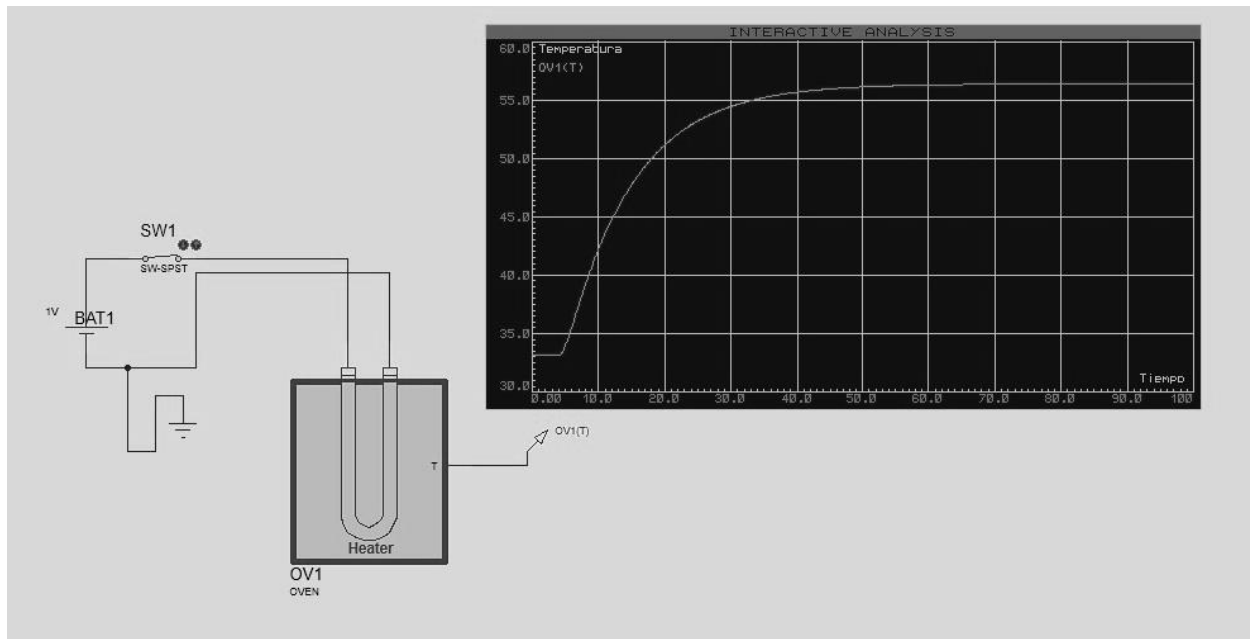


Figura 3.6 Entrada escalón en bucle abierto.

Para la simulación se utilizó el componente “OVEN” del software de diseño Proteus.

El componente OVEN se configuro de con las características similares a las de la pruebas en el deshidratador solar “prototipo”.

- Temperature Ambient ($^{\circ}\text{C}$)= 33.13
- Thermal Resistence to Ambient ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)= 0.0985, Resistencia térmica del sistema.
- Oven Time Constant (sxec)= 10 constante de tiempo del horno. Para evitar largas simulaciones su valor se ajusta a 10 segundos.
- Heater Time Constant (sec)= 1 Para evitar largas simulaciones su valor se ajusta a 1 segundos.
- Temperature coefficient ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$)= 1 sensibilidad del sensor T. Es decir ante una temperatura de trabajo del horno de 100°C , T debe marca 100°V .
- Heating Power (W)= 120

La temperatura máxima $C(t)_{final}$ máxima alcanzada por el sistema fue de 56.8°C , con un error de 0.67 grados más que la real (para determinar los parámetros para el controlador PID se tomó la temperatura máxima real de 56.13°C

La temperatura inicial $C(t)_{inicial}$ (ambiente) fue de 33.13°C

Para determinar el controlador PID del horno, se optó primeramente por la identificación de los parámetros K_P , L y T del sistema de 1^{er} Orden de la figura 3.6.

Por medio de los métodos Smith, Alfaro y Ho et al (Alfaro, 2011) se determinan los valores de T y L con las formulas (2.20) y (2.21) tomando dos puntos de la recta tangente en la respuesta representada en la figura 2.7 y utilizando la tabla 4.

Los puntos seleccionados para cada método fueron $t_{28.3}$ y $t_{63.2}$ (para Smith), t_{25} y t_{75} (para Alfaro) y t_{35} y t_{85} (para Ho) con esta información se obtuvieron los siguientes parámetros:

Método de Smith.

Temperatura al tiempo de $t_{28.3\%}$: 39.7°C a 8.34 seg.

Temperatura al tiempo de $t_{63.2\%}$: 47.6°C a 14.7 seg.

$K=23$, $T=9.54$ y $L=5.16$; quedando la función de transferencia de la planta (horno eléctrico) como:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{23e^{-5.16s}}{9.54s+1} \quad (3.16)$$

Método Alfaro

Temperatura al tiempo de $t_{25\%}$: 38.8°C a 7.57 seg.

Temperatura al tiempo de $t_{75\%}$: 50.38°C a 18 seg.

$K=23$, $T=9.5$ y $L=4.83$; quedando la función de transferencia de la planta (horno eléctrico) como:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{23e^{-4.83s}}{9.5s+1} \quad (3.17)$$

Método Ho et al

Temperatura al tiempo de $t_{35\%}$: 41.18°C a 9.04 seg.

Temperatura al tiempo de $t_{85\%}$: 52.68°C a 22.3 seg.

$K=23$, $T=8.89$ y $L=5.29$; quedando la función de transferencia de la planta (horno eléctrico) como:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{23e^{-5.29S}}{8.89s+1} \quad (3.18)$$

Una vez teniendo esto parámetros se construye el controlador por medio de las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols usadas ampliamente para sintonizar controladores PID tabla 3.

Obteniéndose los siguientes resultados para cada método.

Método Smith

$K_p=2.21$, $T_i=10.32$ y $T_d= 2.58$

Método de Alfaro

$K_p=2.36$, $T_i=9.66$ y $T_d= 2.4$

Método de Ho et al.

$K_p=1.68$, $T_i=10.58$ y $T_d= 2.64$

Se procedió a realizar la simulación por medio de Simulink Matlab como se muestra en la figura 3.7.

La entrada del sistema fue una señal escalón en 50 unidades (que referencian a los 50 grados centígrados). La señal de perturbación fueron temperaturas más bajas a las de referencia para verificar que el sistema está controlando: para este caso se trabajaron con 4, 25 y 35 °C, temperaturas comunes en la región.

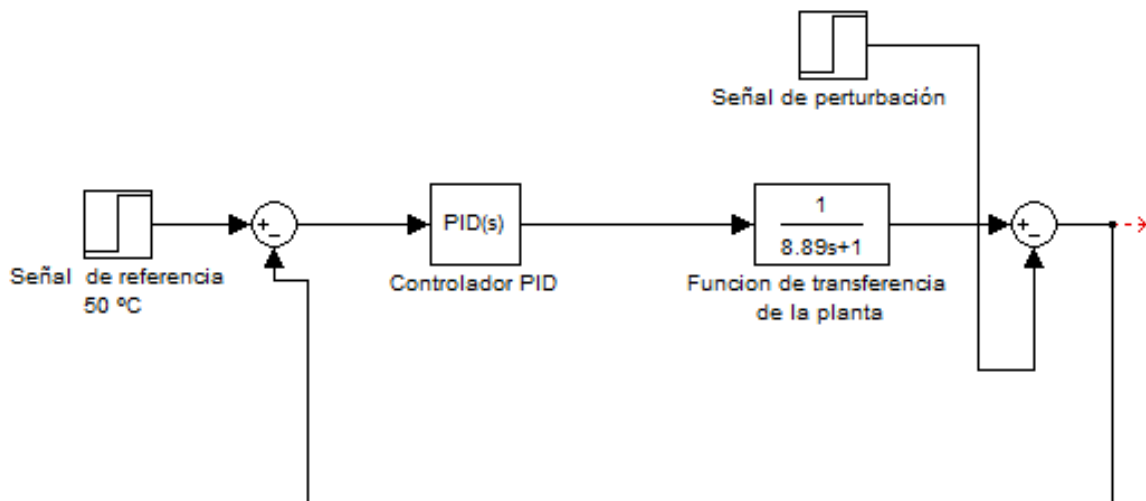


Figura 3.7 Simulación en Simulink Matlab.

El diseño del sistema de control PID electrónico es el de la figura 3.8

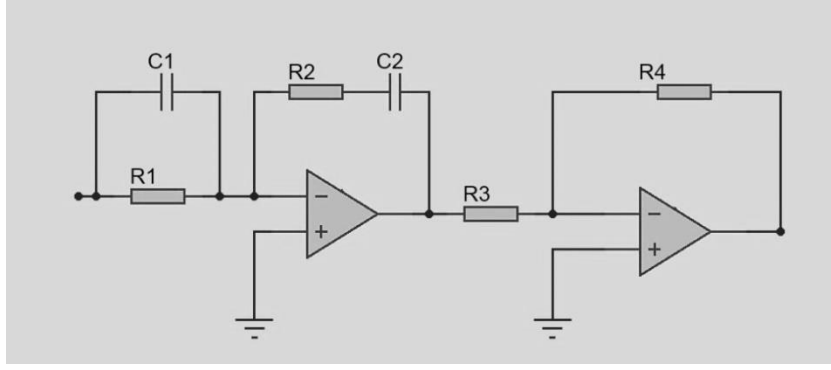


Figura 3.8 Controlador PID electrónico.

La función de transferencia se describe como:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{R_4(R_1C_1 + R_2C_2)}{R_3R_1C_1} \left[1 + \frac{1}{(R_1C_1 + R_2C_2)s} + \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1 + R_2C_2} s \right] \quad (3.19)$$

Cuando un controlador PID se expresa como:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{Ti s} + Td s \right) \quad (3.20)$$

Kp se denomina ganancia proporcional, Ti tiempo integrativo y Td tiempo derivativo. A partir de esta ecuación se obtiene:

$$Kp = \frac{R_4(R_1C_1 + R_2C_2)}{R_3R_1C_1} \quad (3.21)$$

$$Ti = \frac{1}{R_1C_1 + R_2C_2} \quad (3.22)$$

$$Td = \frac{R_1C_1R_2C_2}{R_1C_1 + R_2C_2} \quad (3.20)$$

Cuando el control se expresa como:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = Kp \left(1 + \frac{Ki}{s} + kd s \right) \quad (3.23)$$

Kp se denomina ganancia proporcional, Ki tiempo integrativo y Kd tiempo derivativo. A partir de esta ecuación se obtiene:

Si $R1=R2=R3=R4$

$$Kp = \frac{R_4(R_1C_1 + R_1C_2)}{R_3R_1C_2} = 1 + \frac{C_1}{C_2} = Kp \quad (3.24)$$

$$Ki = \frac{R_4}{R_3R_1C_2} = \frac{1}{RC_2} = \frac{Kp}{Ti} \quad (3.25)$$

$$K_d = \frac{R_4 R_2 C_1}{R_3} = R C_1 = K_p * T_d \quad (3.26)$$

De las formulas (3.24), (3.25) y (3.26) y tendiendo los resultados de T_i y T_d , se determinar los siguientes parámetros.

Método Smith

$K_p=2.21$, $K_i= .21$ y $K_d=5.70$

Para este diseño $R = 100k\Omega$ $C_1 = 60.4\mu F$ $C_2 = 27\mu F$

Método Alvarado

$K_p=2.36$, $K_i= .24$ y $K_d=5.66$

Para este diseño $R = 100k\Omega$ $C_1 = 56 \mu F$ $C_2 = 41.66 \mu F$

Método Ho et al

$K_p=2.21$, $K_i= 0.158$ y $K_d=4.43$

Para este diseño $R = 100k\Omega$ $C_1 = 44.3 \mu F$ $C_2 = 63\mu F$

El esquema de sistema de control completo se muestra en la figura 3.9 y en 3.10 el diagrama de simulación en Proteus.

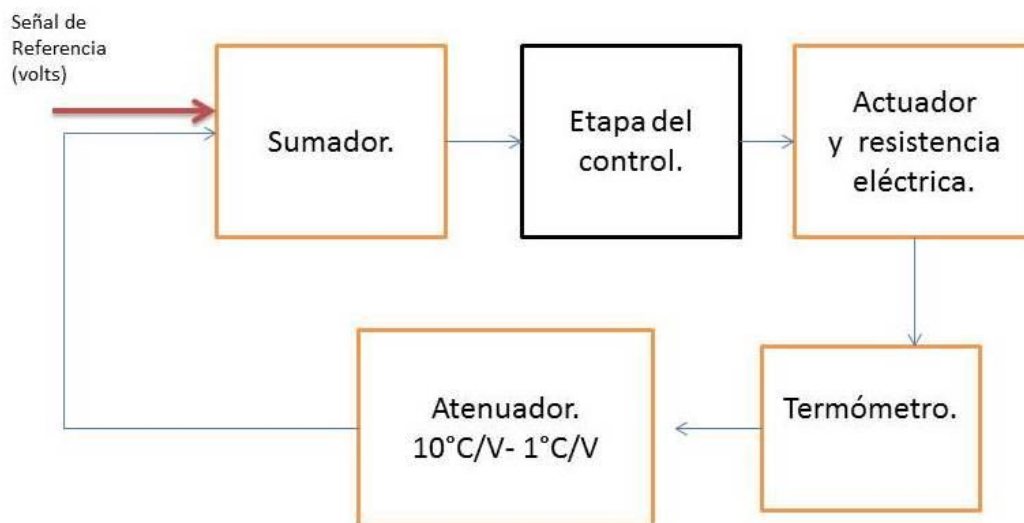


Figura 3.9 Sistema de control.

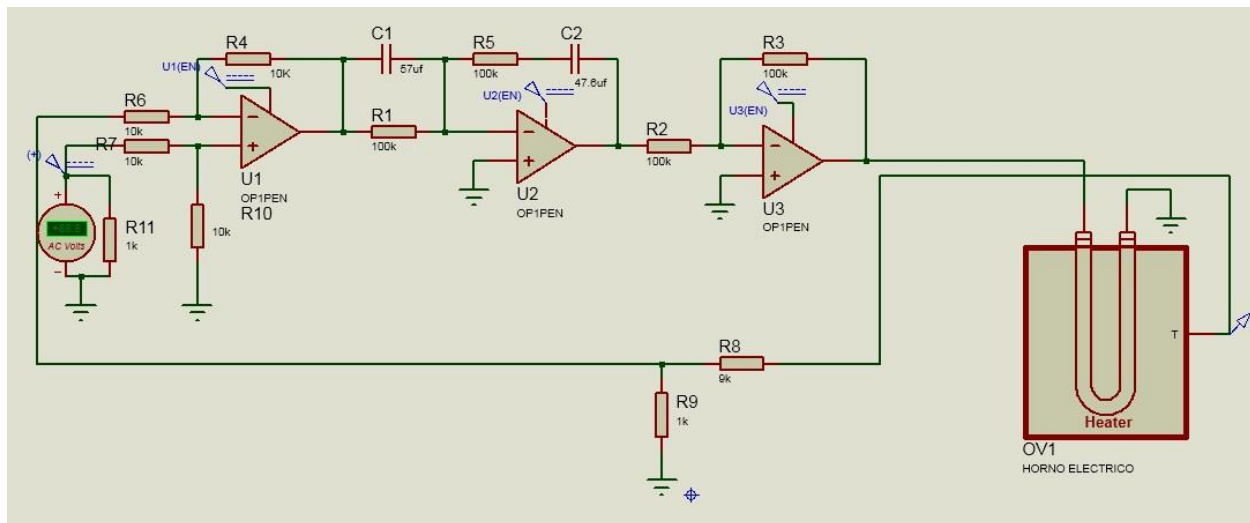


Figura 3.10 Sistema de control Proteus.

El sumador comparador se obtiene mediante un amplificador operacional Figura 3.11

Donde $V_0 = V_2 - V_1$ con valores de $R=10k$

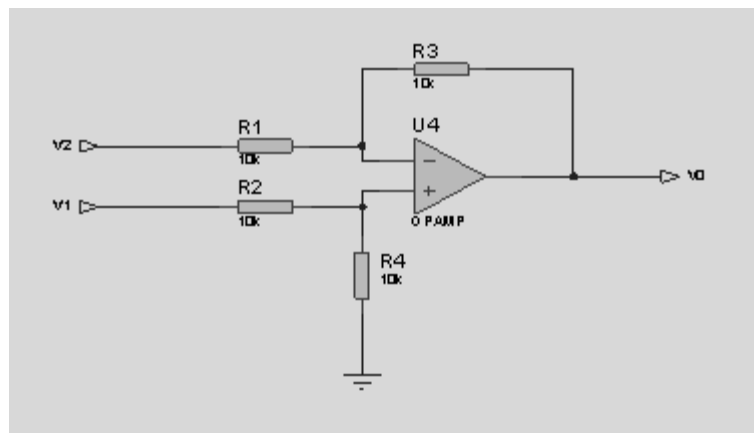


Figura 3.11 Sumador de sistema a lazo cerrado.

El valor de referencia se obtiene mediante una fuente DC de 15v y una resistencia de 1K.

Para la temperatura deseada de 50 °C se tiene que el valor de referencia tiene que ser de 5V.

$$\frac{\text{Temperatura a trabajar}}{Ref} = \frac{10\text{ }^{\circ}\text{C}}{V}$$

Fue necesario cambiar la sensibilidad del sensor T de 1°C/V a 0.1 °C/V. Para ello se utilizó el divisor de voltaje de la figura 3.12 como un atenuador.

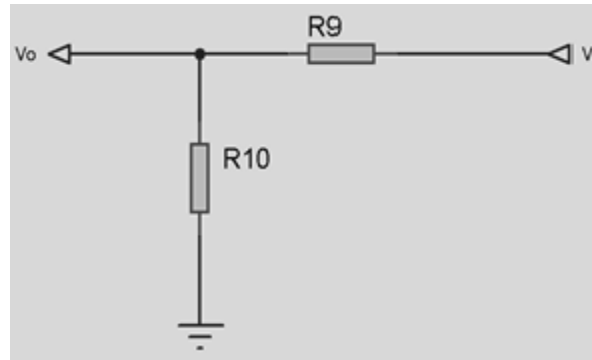


Figura 3.12 Atenuador de la señal del Sensor de temperatura.

3.4.2 Modelado del Ventilador

El modelado de la planta figura 3.2 (b) para el ventilador se realizó con la $G(s)$ de un motor de corriente directa (CD) Pittman de la serie 14204 figura 3.12 proporcionado por el fabricante.



Figura 3.13 (CD) Pittman de la serie 14204

La ecuación diferencial de la planta para el motor Pittman de corriente directa se muestra en la ecuación (3.27).

$$G(s) = \frac{6944.44k}{s(s+133.33)} \quad (3.27)$$

Criterio de diseño del controlador (Kuo, 1966)

Considerando los parámetros de: error en estado estable (ess), máximo sobre paso (MP) y tiempo de asentamiento (ts) como elementos del diseño:

$$ess \leq 0.000433$$

$$MP \leq 5\%$$

$$ts \leq 40ms$$

Antes de iniciar el cálculo de cada uno de los valores K_p , K_i y K_d del controlador PID fue necesario determinar el valor proporcional de la función de transferencia de la planta. Se obtuvo por medio del teorema del valor final.

$$\begin{aligned} ess &= \frac{1}{k_p'} \\ k_p' &= \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[\frac{6944.44k_p'}{s(s+133.33)} \right] = 52.0846k_p' \\ .000433 &= \frac{1}{52.0846k_p'}; k_p' = \frac{1}{.022552} = 44.3047 \end{aligned} \quad (3.28)$$

El valor de la planta $G(s)$ multiplicada por la ganancia proporcional quedo como (3.29).

$$G(s) = \frac{307921}{s(s+133.33)} \quad (3.29)$$

Para diseñar un PID se tomó como referencia el siguiente diagrama a bloques figura 3.13 que expresa el bucle de control y su $G(s)$ se muestra en la ec. (3.30).

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = (1 + K_d s) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (3.30)$$

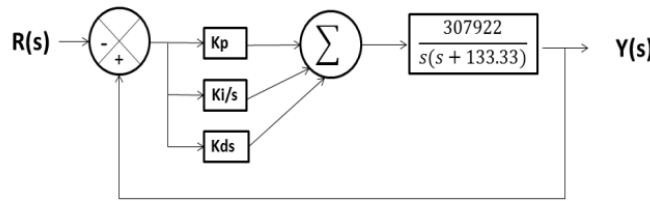


Figura 3.14 Diagrama de Bloques PID.

donde :

$$K_p = K_{p2} + K_{di} + K_{i2}$$

$$K_d = K_{di} * K_{p2}$$

$$K_i = K_{i2}$$

Empezaremos con la sección PD del controlador para determinar el valor de K_{di} .

En bucle cerrado obtenemos la función de transferencia ec. (3.31):

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{\frac{307921(1 + K_{dis})}{s(s+133.33)}}{1 + \frac{307921(1 + K_{dis})}{s(s+133.33)}} = \frac{307921K_{dis} + 307921}{s^2 + 133.33s + 307921K_{dis} + 307921} \quad (3.31)$$

De la función de transferencia (3.31) igualamos el denominador con el polinomio característico de segundo orden: $s^2 + 2\ell W_n s + W_n^2 = 0$

Con la relación despejamos y determinamos $MP = e^{-\ell/\sqrt{1-\ell^2})*\pi}$ $\ell = .6901$

Obtendremos W_n , por medio de la relación del tiempo de asentamiento. Como se muestra en el siguiente desarrollo:

$$ts = 5T$$

$$T = 1/\ell W_n$$

$$ts = 5\left(\frac{1}{\ell W_n}\right)$$

$$W_n = 5\left(\frac{1}{.04 * .6901}\right) = 181.133 \text{ rad/seg}$$

Teniendo los valores de W_n y ℓ se sustituyen en el polinomio característico igualado con el denominador (3.31), dando como resultado el valor de K_{di} :

$$\frac{2(\ell)(W_n) - 133.33}{301922} = .0003789 = K_{di} \quad (3.32)$$

Pasaremos a determinar K_i de la Sección PI ecuación (3.33).

$$G(s) = \frac{307921(K_{p2}s + K_{i2})}{s^2(s + 133.33)} \quad (3.33)$$

Con bucle abierto determinamos K_{i2} del teorema de valor final:

$$\begin{aligned} \text{ess} &= \frac{1}{k_v} \\ k_v &= \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 \left[\frac{307921(k_{p2}s + k_{i2})}{s^2(s + 133.33)} \right] \\ K_{i2} &= \frac{1}{.999} = 1 \end{aligned} \quad (3.34)$$

El valor de K_{p2} lo calcularemos trabajando con la misma función de transferencia (3.33) en bucle cerrado generándonos la ec. (3.35):

$$(3.35) \quad \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{307921K_{dis} + 307921}{s^3 + 133.33s^2 + 307921K_{p2}s + 307921K_{i2}}$$

Utilizando (3.35) aplicamos el método de la tabla de Routh para determinar el rango de K_{p2} .

Tabla 6 Tabla de Routh para obtener KP2.

s^3	1	307921Kp2
s^2	133.33	307921Ki
s^1	-2309.47+	307921Kp2
s^0	307921	

Como hay un cambio de signo y esto lo convierte en un sistema inestable, será necesario variar el valor de Kp2 para un valor positivo y lo determinamos despejando.

$$-2309.47 + 307921Kp2 \geq 0$$

$$Kp2 \geq .0075$$

Una vez obtenidas las tres ganancias procedemos a calcular la función de transferencia del PID (3.36) y en bucle cerrado para todo el sistema tenemos como resultado la ecuación (3.37) que nos será de utilidad para simularlo en Matlab R2011b.

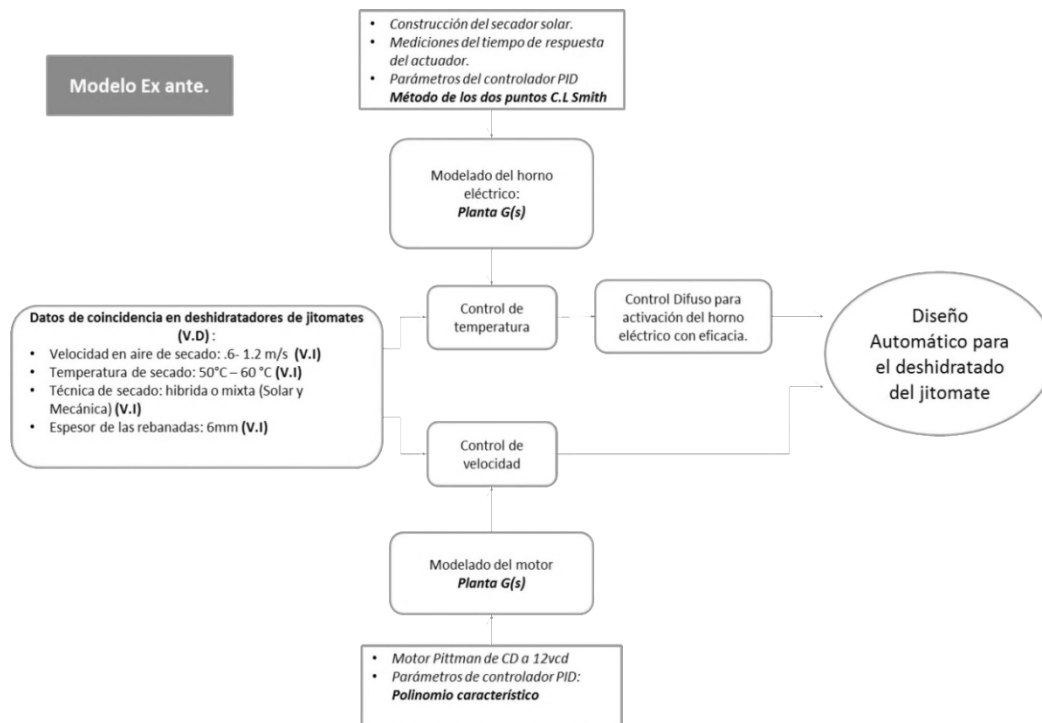
$$\frac{307921(Kps + Ki + Kds)}{s^2(s+13333)} \quad (3.36)$$

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{307921Kp + 307921Kds + 307921Ki}{s^3 + 133.33s^2 + (307921Kp + 307921Kd)s + 307921Ki} \quad (3.37)$$

3.4.3 Modelo Ex- ante.

El trabajo de investigación se resume empleando los pasos que se muestran en la Figura 3.1 donde se identificaron las 4 variables de 4 investigaciones, se desarrollaron los controladores utilizando el modelado de las plantas que describe el comportamiento dinámico por medio de ecuaciones diferenciales de cada proceso Figura 3.2 y los procedimientos necesarios para encontrar los parámetros de los controladores por medio de 3 técnicas propuestas para el control del horno eléctrico y la del polinomio característico para el control de velocidad y así llegar al sistema que nos define el diseño automático para deshidratar jitomates.

Figura 3.15 Modelo Ex ante.



Fuente: Elaboración Propia. **Nota:** Adaptado de Rivas, L (2006). *¿Cómo hace una Tesis de Maestría?* (p. 231). México: Ediciones taller abierto/ Sociedad cooperativa de Producciones S. C.L.

3.5 Descripción del instrumento.

El instrumento que pudo generar los datos para luego compararlos con los parámetros que maneja la bibliografía fue el sistema de control obtenido Figura 3.15, el cual fue utilizado para proporcionar las respuestas deseadas a una determinada entrada (señal escalón para este caso) y así validar si el sistema se pudo comportar como un buen deshidratador al corregir los cambios de temperatura y velocidad del aire necesarias para la deshidratación del jitomate de manera natural

3.6 Confiabilidad y validez de Instrumento.

La confiabilidad del diseño final del sistema de control (Instrumento de medición) se basó indiscutiblemente en la respuesta del sistema a una entrada escalón, rampa, parábola etc. Es necesario que el sistema final pueda seguir de manera confiable dicha entrada.

La validez del instrumento fue aprobada por 3 condiciones necesarias que debe presentar el sistema de control

- Mp (Estabilidad). Un sistema estable es aquel que permanece en reposo a no ser que se excite y, en tal caso volverá al reposo una vez que desaparezca la excitación
- Tp (Rapidez). Que tan rápido responde el sistema automático a los cambios de la señal de referencial.
- Error (Precisión). Es minimizar el error de estado estacionario para una determinada clase de entradas. Es deseable en un sistema de control que responda con el mínimo error a cambios en la posición, velocidad, aceleración y derivadas de orden superior.

Si el sistema logra tener una respuesta y seguir la entrada escalón mostrara que es *confiable* para controlar las variables de temperatura y velocidad del aire, necesarias para el deshidratado. Pero mientras el sistema no muestre las características de estabilidad, rapidez y precisión en los valores deseados no se considerara *valido* como instrumento ya que mostrara que el sistema diseñado para el deshidratado del jitomate no responde de manera adecuada a los cambios de temperatura y velocidad del aire.

3.7 Procedimiento y recolección de datos.

Una vez conocidas las funciones de transferencias de la plantas a controlar (horno eléctrico y motor de CD), se procedió a calcular los parámetros de control que fueron las ganancias que permitieron llegar a tener controladores más precisos.

Se utilizaron dos maneras de obtener los resultados de la respuesta al aplicar la señal escalón al sistema: MatLab R2011b - Simulink e ISIS PROTEUS

En Matlab2011 se trabajó de manera matemática y con una programación estructurada en cada una de las fases en bucle cerrado desplegando la salida del sistema en un gráfico para así examinar los resultados.

Simulink fue la mejor opción para representar el sistema en un diagrama en forma de bloques, gracias a sus herramientas fue posible tener una infinidad de resultados de ganancias de los valores de PID utilizando la función TUNE dentro del bloque donde se colocaron los valores de las ganancias del PID para así sintonizar la respuesta más adecuada.

Se hicieron comparación con los métodos y nos resultó más conveniente trabajar por medio de Simulink, ya que es más flexible y la función TUNE nos generara los cambio finos en los diferentes controladores.

PROTEUS fue útil para trabajar la simulación del horno eléctrico, utilizando el componente de la familia de transducer llamado “OVEN” el cual es un horno equipado con un sensor de temperatura, se puede variar sus características funcionales tales como: temperatura ambiente de trabajo, resistencia térmica, constante de tiempo establecido, constante de tiempo de calentamiento, coeficiente de temperatura y potencia de calentamiento.

3.8 Procedimiento para examinar los resultados.

Los resultados fueron examinados conforme a cómo se comportaron las señal de salida en bucle cerrado y que tan amortiguada es la señal, así se pudo definir si está operando de manera eficiente el control seleccionado.

Al tener el grafico corroboramos si cumple con la confiabilidad y Validez al analizar la respuesta de la señal a una señal de entrada escalón “mientras el sistema se mantenga estable su desempeño es confiable”.

Dependiendo de estas tres características y el cómo se comportaron se pudo justificar y dar respuesta a la hipótesis, la cual dice que al implementar los procesos y técnicas de secado en un sistema de control, así como técnicas de control para la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria para el secado y la eléctrica como secundaria y al abaratar los costos en tecnología, el sistema de control automático diseñado será eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia y la velocidad del aire para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate en la región rural 001, Maneadero, Ensenada, Baja California.

3.9 Limitaciones

Dentro de las limitaciones más importantes para el logro del proyecto fue la necesidad de crear el modelado de la planta del horno eléctrico, ya que el ambiente y las condiciones a las cuales se está destinado acoplar dicho control tiene características particulares en su temperatura y velocidad del aire ; es por ello que fue necesario realizar un prototipo del deshidratador solar en el cual costo \$598 pesos y así hacer la mediciones con el actuador de temperatura y velocidad del aire seleccionado.

La investigación queda en fase de simulación por las limitantes de tiempo y recursos, quedará su aplicación para una segunda etapa.

Existe suficiente bibliografía en cuanto al secado del jitomate y el control automático sin embargo fue difícil encontrar investigaciones que manejaran la aplicación de ambos, encontrando un área de oportunidad para futuras investigaciones.

Se encuentra necesario analizar la sustentabilidad energética de este sistema de control, ya que está pensado en productores de pequeña y media escala, por lo que se debería buscar alimentar el sistema a implementar con una energía totalmente limpia como celdas fotovoltaicas y así reducir costos en la energía eléctrica convencional.

3.10 Resumen.

En este capítulo se identificó el diseño de estudio cuantitativo de tipo estadístico.

Con 4 de las investigaciones mostradas en el marco teórico sobre el tema se elaboró la tabla 5 “Variables para el secado del jitomate”. Se procedió a construir la metodología de la investigación basada en el diseño del secador solar propuesto en la Figura 3.1 “Secador solar híbrido”.

El modelo de la investigación se resumió con la generación de un modelo ex-ante que se muestra en la Figura 3.15. El instrumento de medición fue el mismo sistema de control diseñado y de acuerdo a los parámetros de estabilidad, rapidez y precisión se pudo determinar si es válido

y confiable dicho instrumento. Se utilizaron 3 software de simulación para adquirir los datos Proteus para la simulación de horno eléctrico, Simulink para simular los controladores de temperatura y Matlab para el control de velocidad y para conocer el comportamiento del sistema retroalimentado a la entrada de una señal escalón. De acuerdo al comportamiento de las señales con respecto a los parámetros de estabilidad, rapidez y precisión se analizaron para dar respuesta a la hipótesis presentada al inicio de la investigación.

4 Resultados de la investigación

4.1 Introducción

En el siguiente apartado se encuentra la documentación de los resultados generados por observación, análisis y gráficos generados por software de simulación. Esto con el fin de darle cientificidad a la investigación y por medio de estos comprobar la validez de las hipótesis presentadas al inicio de la investigación y así traer una resolución del problema de manera acertada.

4.2 Resultados del Sistema de Control de Temperatura

Control PID del Método Smith.

$K_p=2.21$, $T_i=10.32$ y $T_d=2.58$

$K_p=2.21$, $K_i=.21$ y $K_d=5.70$

Se tiene la respuesta de la figura 4.1

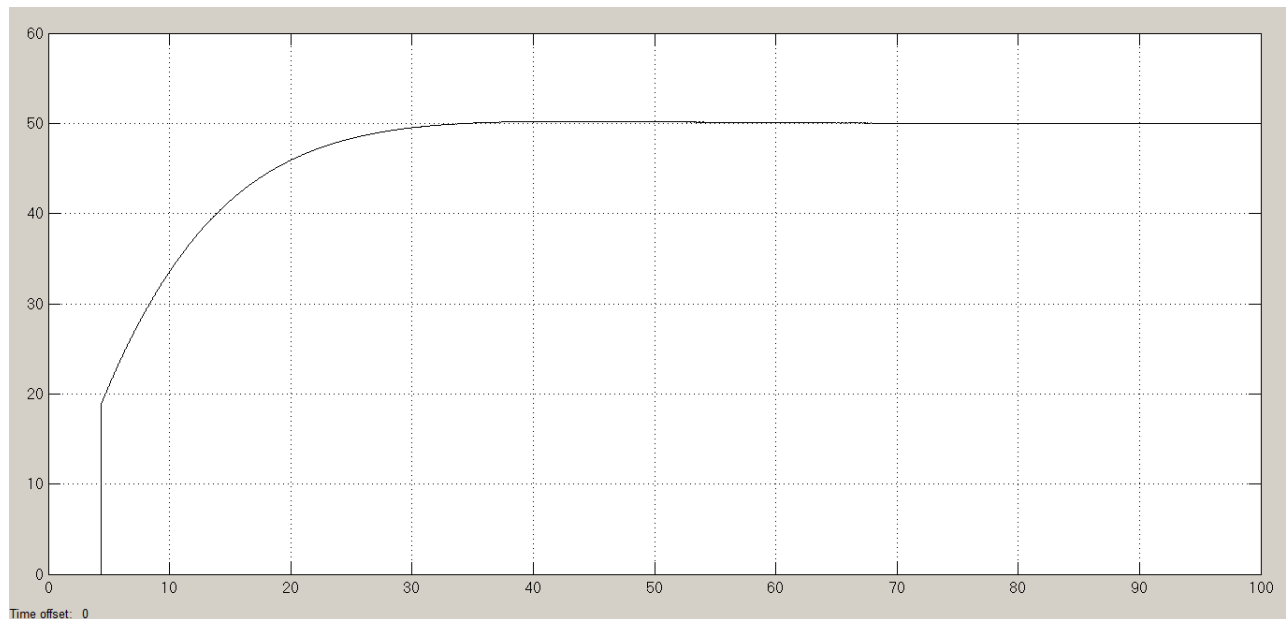


Figura 4.1 Respuesta del sistema de control Método Smith.

Método de Alfaro

$K_p=2.36$, $T_i=9.66$ y $T_d=2.4$

$K_p=2.36$, $K_i=.24$ y $K_d=5.66$

Se tiene la respuesta de la figura 4.2

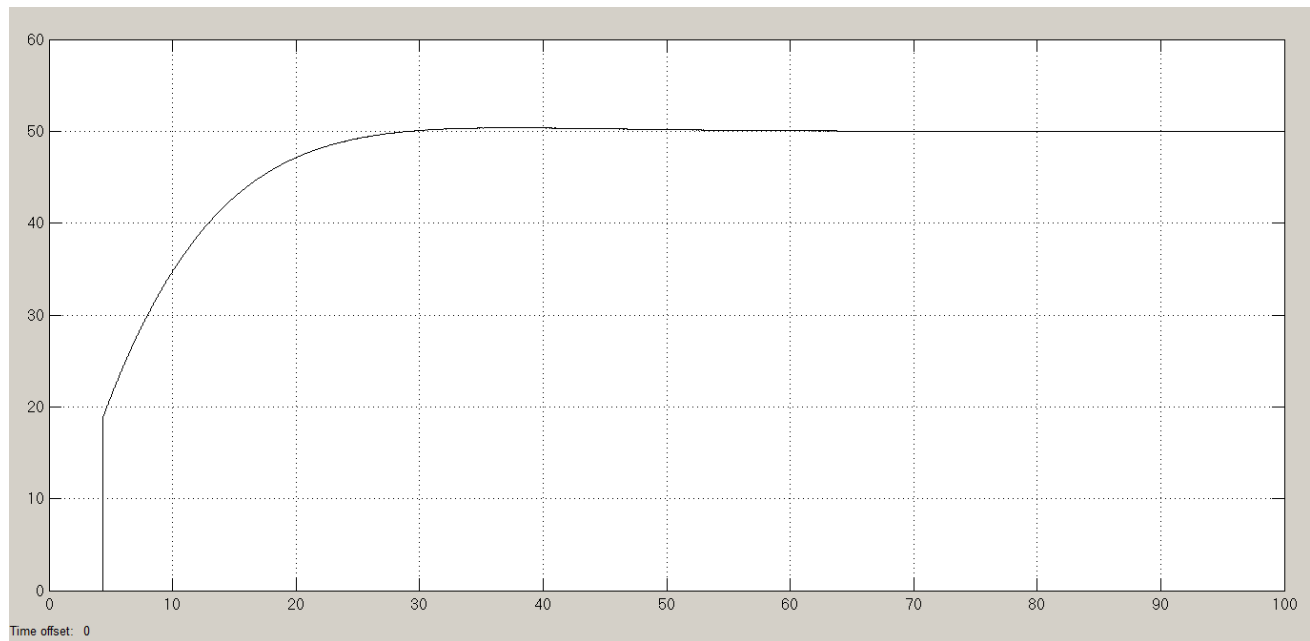


Figura 4.2 Respuesta del sistema de control Método Alfaro.

Método de Ho et al.

$K_p=1.68$, $T_i=10.58$ y $T_d= 2.64$

$K_p=2.21$, $K_i= 0.158$ y $K_d=4.43$

Se tiene la respuesta de la Figura 4.3

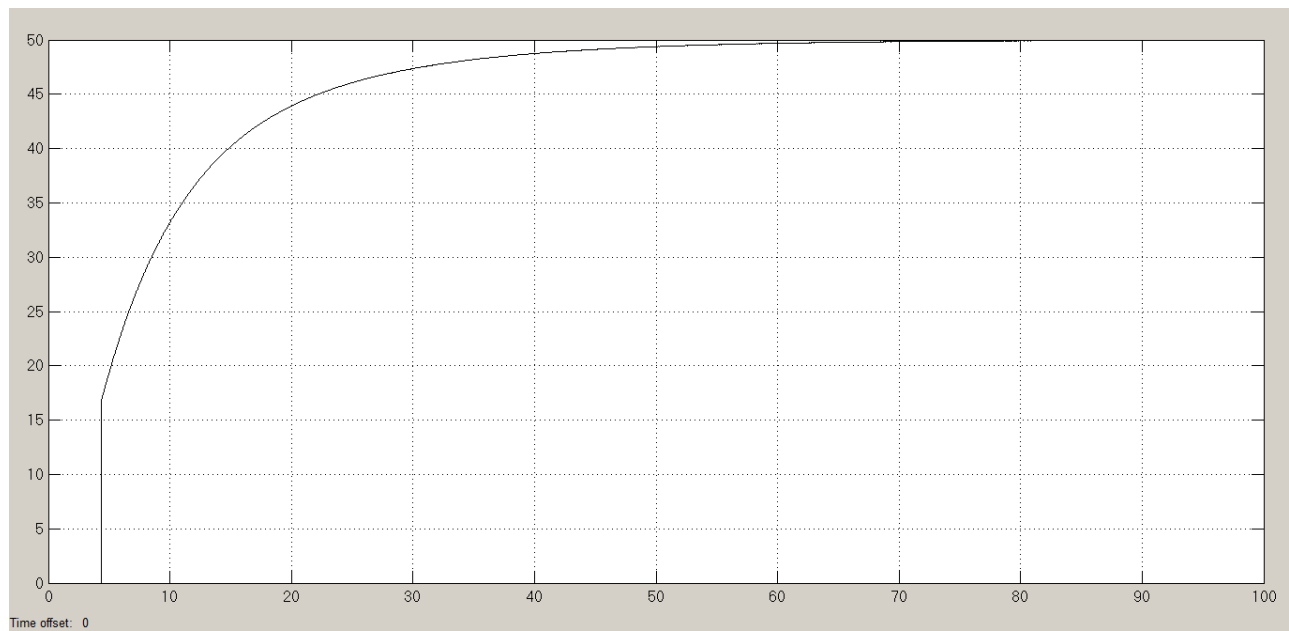


Figura 4.3 Respuesta del sistema de control Método Ho et al.

Para validar que el sistema de control esta funcionando en optimas condiciones , se procedio a afectarlo con señales de perturbacion; cuando la temperatura ambiente es de 4°C figura 4.4, cuando la temperatura ambiente es de 25 °C figura 4.5 y cuando es de 35°C figura4.6.

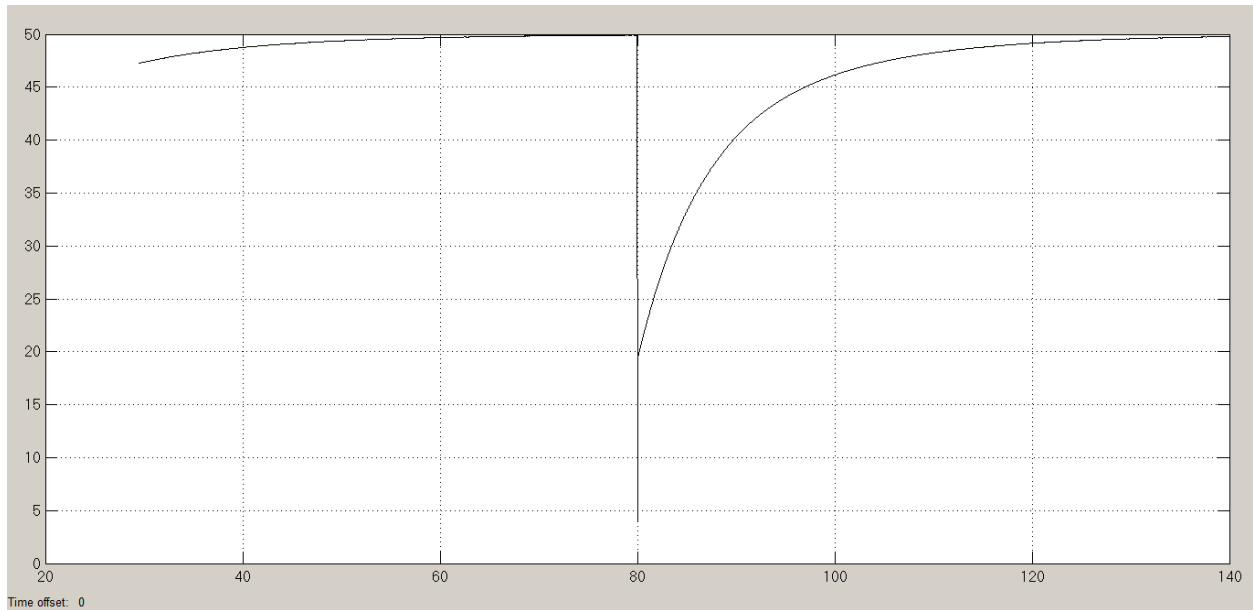


Figura 4.4 Perturbación de 4 grados centígrados.

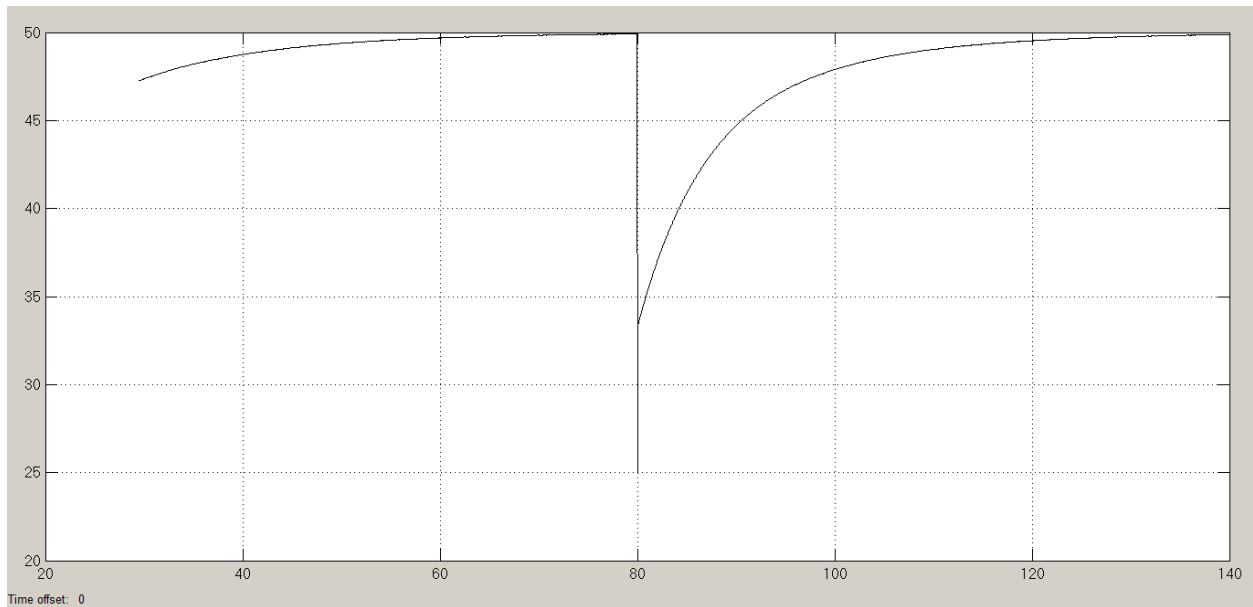


Figura 4.5 Perturbación de 25 grados centígrados

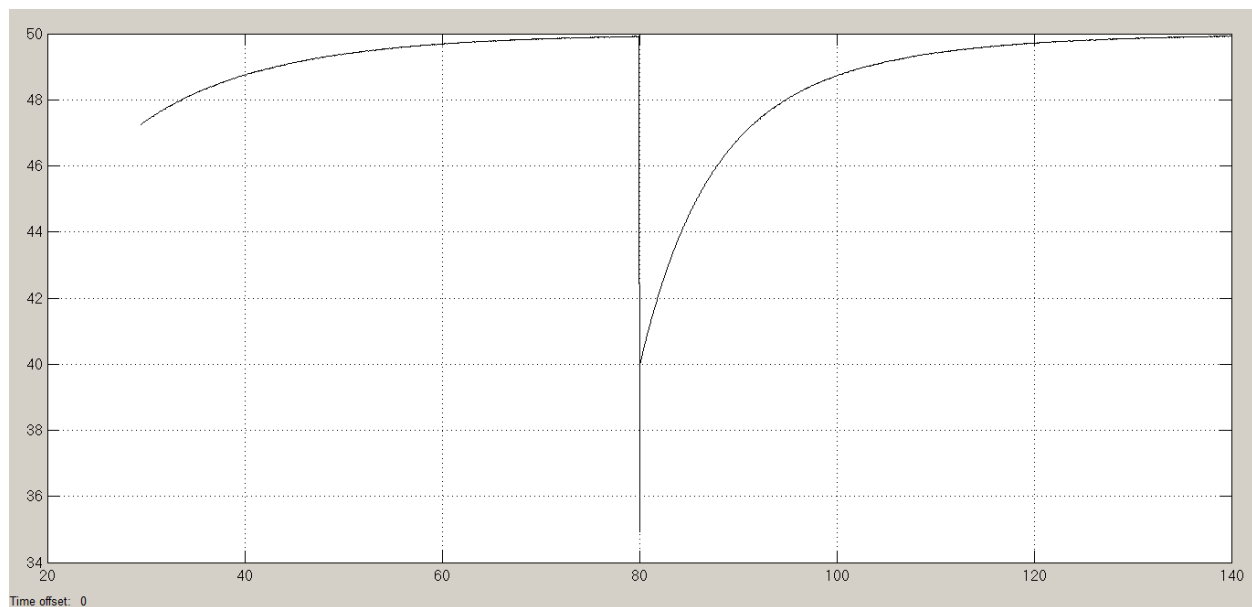


Figura 4.6 Señal de perturbación de 35 grados centígrados

4.3 Controlador de velocidad del sistema de deshidratación.

El controlador de velocidad se simulo en Matlab ya que es una plataforma de mucha utilidad para emplear un código y de manera sencilla comprobar cómo se comporta la respuesta a sistemas de control PID real.

A continuación se muestra el código en Matlab utilizado para generar la respuesta en bucle cerrado del sistema controlado.

```
%Codigo Matlab
clear all;
close all;
clc;
%Bucle cerrado
Ki2=1;
Kp2=.0075;
Kdi= 0.0003789;
Kp= Kp2+ Kdi+Ki2;
Kd=Kdi*Kp2;
Ki=Ki2;
n=[0 0 (307922*Kp+307922*Kd) 307922*Ki];
d=[1 133.33 (307922*Kp+307922*Kd) 307922*Ki];
step(n,d);
grid on;
```

Los resultados de esta simulación se pueden apreciar en la Figura. 4.7

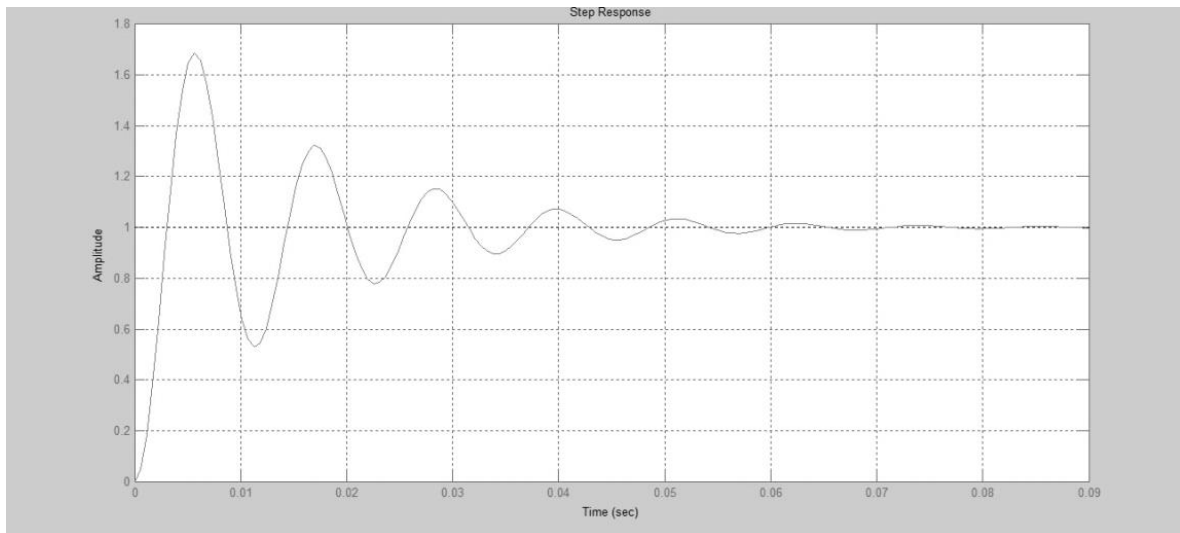


Figura 4.7 Respuesta a una función escalón con los valores calculados.

Con los datos calculados notamos que la respuesta final era muy inestable; al variar las ganancias llegamos a una sintonía con mejor respuesta Figura. 4.8 y solo fue necesario mover el valor de $K_i = .030$ para tener las características de diseño deseadas más aproximadas.

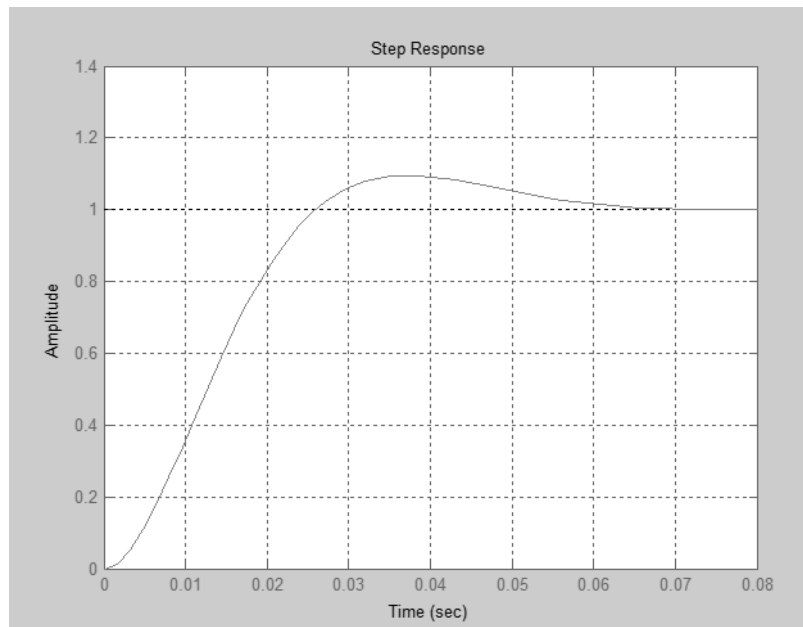


Figura 4.8 Respuesta al sintonizar $K_i=0.030$; K_d y K_P originales de los cálculos.

Las condiciones de diseño eran: $ess \leq 0.000433$, $M_p \leq 5\%$ y $t_s \leq 40\text{ms}$. Con el grafico se comprueba que se llegó a estas condiciones de diseño y se considera un sistema valido para regular cualquier velocidad de referencia en donde se requiera implementar.

4.4 Resumen

Se realizó la simulación de los dos sistemas de control (Temperatura y Velocidad del aire) en tres software de simulación: Proteus fue útil para simular el proceso de un horno eléctrico y Matlab Simulink para conocer las respuestas a una entra escalón del sistema de control de temperatura y velocidad.

Los resultados para el control PID de la variable de temperatura continua para el deshidratado óptimo teniendo 50°C como señal de referencia fueron aceptables.

El método más favorable fue el de *Ho et al* no teniendo máximo sobre paso ni error en estado estable y teniendo un tiempo de respuesta de 40 a 60 segundos muy buenos para permitir que el actuador (resistencia eléctrica) pueda responder. Se considera un sistema estable ya que en la función de transferencia los polos aparecen en la parte izquierda.

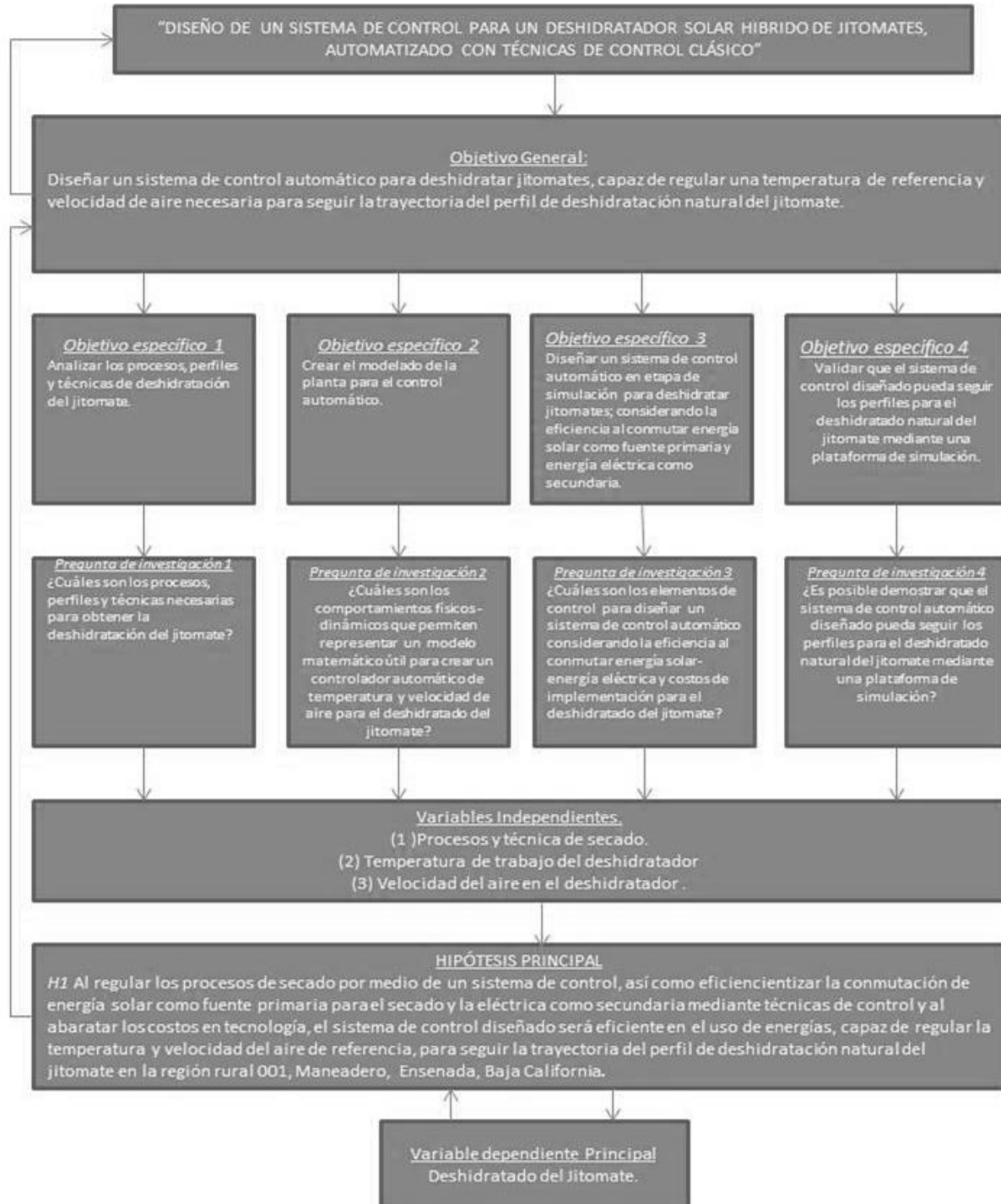
El control de temperatura pudo responder a las perturbaciones (cambios de temperatura) obteniendo gráficos para tres de las temperaturas más comunes en la región. Por ejemplo: a una temperatura de 35 grados centígrados el sistema de control responde favorable disminuyendo la energía en la resistencia permitiendo aprovechar la energía del sol al máximo.

La variable de velocidad del aire para el deshidratado optimo esta oscila entre .6 m/s- 1.2m/s, es posible controlarla con un control clásico PID, teniendo un $ess \leq 0.000433$, $M_p \leq 5\%$ y $t_s \leq 40\text{ ms}$. Quedando para posteriores trabajos la implementación de dicho control. De igual manera se considera un sistema estable, ya que sus polos se encuentran localizados en la parte izquierda.

5 Visión general de la investigación

5.1 Visión General de la Investigación.

Tabla 7 Visión general de la investigación.



Nota: Adaptado de Rivas, L (2006). ¿Cómo hace una Tesis de Maestría? (p. 195). México: Ediciones taller abierto/ Sociedad cooperativa de Producciones S.

5.2 Replanteamiento del Problema.

Al inicio de la investigación se presentó la problemática en algunos productores de jitomate a pequeña y mediana escala como: la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia y la velocidad del aire para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate , lo anterior es causado probablemente por la falta de implementación de los procesos y técnicas de secado en un sistema de control, la falta de implementación de técnicas de control para la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria para el secado y eléctrica como secundaria y a los altos costos de la tecnología de punta en la industria del secado.

En la investigación se encontró con basta información en lo que respecta a técnicas y procesos de secado, y técnicas de control para resolver estos problemas, sin embargo muy poca en la que se estén aplicando estos conocimiento al deshidratado del jitomate.

En esta investigación fue posible relacionar los conocimientos de secado y control para generar un diseño prototipo de control automático considerando los procesos, técnicas y variables necesarias para que el deshidratado del jitomate pueda darse de manera natural disminuyendo costos comparados con los secadores industrial y velocidad con respecto a los deshidratadores comunes artesanales.

5.3 Preguntas que condujeron a la investigación.

1.- ¿La implementación de procesos y técnicas de secado inadecuado propician la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías capaz de regular la temperatura de referencia y la velocidad del aire para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate?

Según los resultados generados constatamos que es de suma importancia la implementación de los procesos y técnicas de secado ya que ello nos brinda las variables necesarias de secado para de esta manera no alterar las características nutrimentales del producto y a su vez trabajar con valores de referencia en temperatura y velocidad del aire.

2.- ¿Sera que por falta de implementación del control para la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria y la eléctrica como secundaria genera la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia y la velocidad del aire para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate?

Se encontraron trabajos que sí implementan las técnicas de control en el secado de alimentos pero muchos de ellos son industriales y con altos costos de maquilado, para esta aplicación se buscó reducir costos al utilizar las técnicas de control clásico

3.- ¿Sera que por los altos costos en la inversión de la tecnología de punta en la industria del secado incidirá en la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate?

Efectivamente un factor por el que incide el uso sistemas automáticos es el costo, es por ello que no se ve reflejado en la producción del deshidratado del secado en productores de pequeña a media escala.

Se concluye pues que la falta implementación de ambos técnicas en el proceso para deshidratar jitomates ha generado de la falta de un sistema de control automático y eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate.

5.4 Contrastación de hipótesis.

<i>Ho</i>	Resultado	Observaciones
<i>Al no regular los procesos de secado por medio de un sistema de control, ni optimizar la conmutación de energía solar como fuente primaria para el secado y la eléctrica como secundaria mediante técnicas de control y al no abaratar los costos en tecnología, el sistema de control diseñado no será eficiente en el uso de energías, incapaz</i>	La hipótesis nula es rechazada.	<i>Al implementar los procesos y técnicas de secado en un sistema de control, así como técnicas de control para la eficiencia al conmutar energía solar como fuente primaria para el secado y la eléctrica como secundaria y al abaratar los costos en tecnología, el sistema de control automático</i>

de regular la temperatura y velocidad del aire de referencia, para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate en la región rural 001, Maneadero, Ensenada, Baja California.		diseñado será eficiente en el uso de energías, capaz de regular la temperatura de referencia y la velocidad del aire para seguir la trayectoria del perfil de deshidratación natural del jitomate en la región.
--	--	---

5.5 Hallazgos no calculados.

Algunos de los hallazgos no calculados y que pueden influir en las condiciones de nuestro sistema es la capacitancia térmica de las paredes del colector solar y/o horno eléctrico. Para este estudio se hizo la consideración de un modelo ideal despreciando esa capacitancia térmica manifestada en un modelo real.

Otros hallazgos no calculados se muestran en forma de preguntas a continuación:

¿Podrá responder este sistema, de manera eficiente, en ambientes de temperaturas bajas y velocidades del aire por debajo de las necesarias donde tendría que estar activada la parte eléctrica por tiempos prolongados?

¿Cuánto costo energético tendría en condiciones de temporadas largas no favorables en temperaturas y velocidad de aire como: días nublados y/o noches frías? ¿Sería redituable en costos de mantenimiento y energía?

¿Cuál es la potencia del sistema, es posible alimentarlo con fuentes de energía alternas (energía solar, energía eólica, etc.) con respecto a su demanda de potencia y así reducir costos?

Mismas preguntas que se dejan en incógnitas para investigaciones futuras.

5.6 Limitaciones no esperadas.

Una de las limitaciones más relevantes fue la del tiempo, ya que no fue posible realizar la implementación del diseño de control.

Como estudiantes de una Maestría en Ingeniería Industrial fue necesario investigar y estudiar mucho sobre las herramientas necesarias para el área de control, área deficiente en mi formación profesional en la cual tuve que invertir mucho tiempo para el entendimiento de los principios matemáticos, técnicas de control e instrumentación.

5.7 Conclusiones y aplicación.

Es posible desarrollar un sistema de control híbrido eficiente al cambio de temperatura y a la velocidad del aire, que funcione con la energía solar como fuente primaria y cuando no existan las condiciones que active una parte eléctrica.

Las variables a considerar en un proceso de deshidratación son: técnica de secado, temperatura de trabajo, velocidad del aire el producto y espesor del producto. Para lograr la simulación de sistema de control diseñado solo son necesarias las primeras tres características.

La técnica de secado solar híbrido permite guardar las propiedades nutrimentales del jitomate más que las de un deshidratación industrial o un horno eléctrico.

La temperatura dentro deshidratador elaborado (donde se colocan las charolas para el producto) fue de 33.13°C, al implementar la resistencia de una secadora de cabello en su nivel de temperatura más bajo alcanzo de manera estable 56.17 °C (un poco más de lo necesario).

La variable de temperatura continua para el deshidratado optimo debes ser $\leq 50^{\circ}\text{C}$ y es posible controlarla con un control clásico PID, teniendo un sistema sin máximo sobre paso, a un tiempo de respuesta de 40 a 60 seg con el método de sintonización más favorable *Ho et al.*

Se considera un sistema estable y capaz de responder a señales de perturbación (temperaturas distintas a la de referencia) disminuyendo la energía en la resistencia, permitiendo aprovechar la energía del sol al máximo.

El control de temperatura pudo responder a las perturbaciones (cambios de temperatura) obteniendo gráficos para tres de las temperaturas más comunes en la región. Por ejemplo: a una temperatura de 35 grados centígrados el sistema de control responde favorable disminuyendo la energía en la resistencia permitiendo aprovechar la energía del sol al máximo

La variable de velocidad del aire para el deshidratado optimo esta oscila entre .6 m/s-1.2m/s, es posible controlarla con un control clásico PID, teniendo un $\text{ess} \leq 0.000433$, $M_p \leq 5\%$ y $t_s \leq 40$ ms.

Los sistemas de control fueron posibles simularlos en Proteus, Matlab y Simulink.

5.8 Propuesta para investigaciones futuras.

Hay dos ejes claves para las investigaciones futuras:

- Implementar y demostrar la viabilidad de este diseño de control en condiciones reales.
- Constatar que tan sustentable puede ser este deshidratador con respecto a la demanda de potencia del sistema y costos energéticos.

6 Bibliografía

- Aguirre, H. &. (2009). Estudio dinámico de un horno de resistencias eléctricas convertido en gas. *Redalyc*, 339-344.
- Alfaro, V. (2011). *Identificación de procesos sobre amortiguados utilizando técnicas de lazo abierto*. San Jose. Costa Rica: Ingeniería 11.
- Almada, M., Cáceres, M. S., & Pulfer, J. C. (2005). *Guía de uso de secadores solares para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes*. Montevideo: UNESCO.
- Almilla. (2001). *Aspectos sobre el uso de secadores por aspersión*. México: Documento predoctoral. ENCB-IPN.
- Amestegui, M. M. (2001). *Apuntes de control PID*.
- Bird, R. W. (2002). *Transport Phenomena*. New York, USA: John Wiley.
- Cengel. (2007). *Transferencia de masa*. McGraw-hill.
- Chavez, C., & Esqueda, J. (2010). *Diseño y construcción de un módulo didáctico basado en un control de posición prismático, para la implementación de control por retroalimentación de estados lineales*. Chihuahua , Chihuahua México: ITCH- ELECTRO 2010.
- Costales, R. (2010). Aplicación de la energía renovable en el secado. Estado del arte y su potencial en las producciones agrícolas. *Redalyc*, 47-53.
- Dubey O.P, P. (1996). A simulation model for de bed solar drying. *WREC*.
- Duran, G. J. (2010). Secador solar híbrido para la producción continua a escala industrial de pimienta para pimentón. *IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA)*. Cusco Perú: INENCO, Instituto de Investigación en Energía no Convencional.
- Ferreira, A. R., & Sebastião, R. (2007). Sistema de secado solar para frutos tropicales. *Información Tecnológica*, 18(5), 49-58.
- Foust, A. (1997). *Principios de operaciones unitarias*. CECSA.
- Gainza, A. (2002). *Modelización, simulación y control del proceso de deshidratación de vegetales troceados rotatorio*. Navarra: Tesis Doctoral Universidad Publica de Navarra.
- Genina, P. (2002). Deshidratación osmótica: alternativa para conservación de frutas tropicales. *Avance y perspectiva*.
- Gomez, M. S. (2009). *Deshidratador de Tomates Saladette en un secador de charolas giratorias*. Huajuapán de León , Oaxaca: Tesis para Ingeniero en Alimentos.
- Hernandez Rodríguez, J., & Antonio, F. C. (2011). Estudio de la Cinética de secado de Jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). 3, 125-130.
- Herrera, D. (2005). *Procesos de transferencia de calor*.
- Karim, M., & Hawlader, M. (2005). Drying Characteristics of Banana; Theoretical Modelling and Experimental Validation. *Journal of Food Engineering*, 35-40.
- Kerkhofs, N. L. (2005). Change in colour and antioxidant content of tomato cultivars following forced-air drying. *Plants Foods Human Nutr.*, 117-121.
- Kuo, B. (1966). *Sistemas de control*. Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Pearson.

- Mabrouk, S. B. (2006). Modelling of Heat and Mass Transfer in a Tunnel Dyer. *Applied Thermal Engineering*, 2110-2118.
- Ogata, K. (2008). *Ingeniería de Control Moderna*. Ribera de Loira: Pearson.
- Puertas, I. M. (2005). *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos*. Badajoz: Tesis doctoral.
- Queriroz, R., & Gabas, L. (2004). Drying kinetics of tomatoe by using electric resistance and heat pump dryers. *Drying Technology*, 22(7), 1603-1620.
- Rivas, L. (2006). *¿Cómo hace una Tesis de Maestría?* Mexico: Ediciones taller abierto. Sociedad cooperativa de producciones S.C.L.