

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA



TESIS DE MAESTRÍA



Automatización de un deshidratador solar

Autor:

Lic. Omar Sandoval Toral

Director de Tesis:

Mtro. Fernando González
Manzanilla


*Esta tesis se presenta como un requisito
para obtener el grado de Maestría en Ingeniería*

en

Automatización de Procesos Industriales

Departamento de Posgrado

Diciembre 2014



“Los éxitos y los fracasos, son los frutos que cosechamos con nuestras decisiones, el trabajo continuo con responsabilidad, perseverancia, disciplina, orden, dedicación y sobre todo con ética profesional seguramente nos llevara al éxito lo demás sera fracaso.”

Omar Sandoval Toral

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA

Resumen

Automatización de Procesos Industriales

Departamento de Posgrado

Maestría en Ingeniería

Automatización de un deshidratador solar

por Lic. Omar Sandoval Toral

La deshidratación, es un proceso de conservación de los alimentos en el cual el agua es retirada por medios naturales i.e. mediante la exposición al sol o al viento, o por medio de secadores industriales donde la evaporación del agua es llevada a cabo por diversos procesos controlados y monitoreados.

En el presente artículo se abarca la implementación de un controlador PID a través de un PIC para el control de la temperatura de forma automática en un deshidratador solar tipo armario de charolas.

El flujo de aire a través del colector solar depende de la velocidad de giro de dos ventiladores ubicados en la región baja del colector solar, los cuales son controlados por modulación de ancho de pulsos (PWM), permitiendo obtener circulación de aire constante dentro de la bóveda de secado, asegurando la calidad bromatológica y organoléptica del producto.

Para la visualización y selección de la temperatura por parte del usuario, se propone la instrumentación de un LCD, el cual facilitará el control del proceso. La alimentación del sistema eléctrico y de automatización se lleva a cabo mediante celdas solares.

Agradecimientos

Al término de esta etapa de mi vida, quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a lograr esta hermosa realidad.

Le agradezco a Dios por haberme permitido vivir hasta este día, haberme guiado a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo y mi camino. Por darme fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad para la conclusión de este proyecto.

Le doy gracias a mis padres Roberto y Alicia por apoyarme y sembrar en mi vida la importancia de superarme, de crecer con valores, respeto, humildad y haberme dado la oportunidad de una excelente educación en el transcurso de mi vida.

Le agradezco el apoyo y dedicación de tiempo al Mtro. Fernando Gonzalez Manzanilla, por haberme dado su voto de confianza cuando más difícil se presentaban las cosas, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia para el desarrollo de este proyecto y sobre todo por haberme brindado su amistad incondicionalmente.

A Lucero por todo el apoyo brindado, por aguantarme y por siempre buscar la manera de tenerme de buenas. Por soportar mis ratos de histeria. Por ser una buena esposa y darme a la estrella que me ilumina a mi nena hermosa Itsayana.

Pero muy particularmente quiero agradecer al Doc. Jacob por que sin su apoyo y sin sus conocimientos no hubiera finalizado la maestria, ya que en el momento más tenso, cuando pense que no podría terminar, me brindo su apoyo incondicionalmente asesorandome en todo momento.

Hago extensivo mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca por haber realizado mis estudios de Maestría y por el apoyo económico brindado que se utilizó para el desarrollo del trabajo, dentro del marco de proyecto de investigación. ...

Índice

Resumen	iii
Agradecimientos	iv
Índice	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xiii
1 Planteamiento del problema de investigación	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación	3
2 Marco Teórico	5
2.1 ¿Por qué secar los alimentos?	5
2.2 Factores que intervienen en el procesos de secado	6
2.2.1 Aire como agente secante	6
2.2.2 Temperatura en el proceso de secado	7
2.2.3 Contenido de humedad del aire seco	7
2.2.4 Contenido de humedad en el producto	7
2.3 Técnicas para un secado correcto	8
2.4 Tiempos de secado	9
2.4.1 Secado durante el periodo de velocidad constante	9
2.4.2 Secado durante el periodo de velocidad decreciente	10
2.5 Deshidratado	11
2.6 Clasificación de los deshidratadores industriales	11
2.6.1 Secadores directos	12
2.6.2 Secadores indirectos	13
2.6.3 Secadores infrarrojos y secadores de calor dieléctrico	13

2.6.4	Secadores por congelación	14
2.7	Tipos de secadores industriales	15
2.7.1	Deshidratadores por convección	15
2.7.2	Deshidratadores por conducción	16
2.8	Secadores solares	16
2.8.1	Tipo “carpa”	17
2.8.2	Tipo “Armario”	18
2.8.3	Tipo “túnel”	18
2.9	Tipo de circulación	19
2.10	Sistema de control	20
2.10.1	Sistemas de control en lazo abierto	21
2.10.2	Sistema de control en lazo cerrado	21
2.10.3	Tipos de controladores	22
2.10.4	Control de dos posiciones (encendido - apagado/todo o nada/ on - off)	23
2.10.5	Control proporcional	23
2.10.6	Controlador integral	24
2.10.7	Controlador Proporcional-Integral	25
2.10.8	Controlador Proporcional-Derivativo	26
2.10.9	Controlador Proporcional - Integral - Derivativo	27
2.11	Sintonización mediante Ziegler-Nichols	28
2.12	Modulación por ancho de pulsos	29
2.13	Microcontroladores	30
2.13.1	Familias de microcontroladores	30
2.14	Microcontrolador PIC16F877	30
2.15	Pantalla de cristal líquido	32
2.16	Sensores de temperatura	34
2.16.1	Sensor LM35	35
2.17	MOSFET IRF640N	35
2.18	Alimentación de un PIC	36
3	Implementación del sistema	39
3.1	Descripción general	39
3.2	Secador solar de alimentos	40
3.3	Partes del sistema de control de temperatura	42
3.3.1	Sensor	43
3.3.2	Actuadores	44
3.3.3	Etapa de potencia	45
3.3.4	Panel frontal	47
3.4	Controlador PID	47
3.4.1	Controlador digital PID	48
3.5	Algoritmo de programación	48
3.6	Simulación	49
3.7	Implementación de un control digital PID	51

3.7.1	Código fuente en lenguaje C para un controlador PID discreto	51
4	Resultados y Discusiones	55
4.1	Temperatura contra tiempo	56
4.2	Comportamiento en la simulación	58
4.3	Simulación del control de la velocidad de los motores	63
5	Conclusiones	65
	Appendices	67
	A Primer Apéndice	69
	Bibliografía	79

Lista de Figuras

2.1	Curva de velocidad en función del contenido de humedad libre . . .	10
2.2	Secador solar tipo carpa	17
2.3	Secador solar tipo armario	19
2.4	Secador solar tipo tunel	20
2.5	Diagrama a bloques de un control de lazo abierto	21
2.6	Diagrama a bloques de un sistema de control en lazo cerrado. . . .	22
2.7	a) Diagrama a bloques de un controlador on-off; b) Diagrama a bloques de un controlador on-off con una brecha diferencial	23
2.8	Diagrama a bloques de un controlador proporcional.	24
2.9	Diagrama a bloques de un controlador integral.	25
2.10	Diagrama a bloques de un controlador Proporcional - Integral. . . .	26
2.11	Diagrama a bloques de un controlador Proporcional - Derivativo. . .	27
2.12	Diagrama a bloques de un controlador Proporcional - Integral - Derivativo.	27
2.13	Respuesta de salida a una entrada escalón.	28
2.14	Respuesta de salida a una entrada escalón.	29
2.15	Microcontrolador PIC16F877A	33
2.16	Sensor de temperatura	35
2.17	Configuración de los pines MOSFET IRF640n	36
2.18	Regulador de voltaje de 0 a 5 voltios	37
3.1	Diagrama a bloques del sistema general	40
3.2	Diagrama a bloques de un sistema de control de temperatura	41
3.3	Parte interna del colector solar	41
3.4	Diseño conceptual del secador solar	42
3.5	Sistema de control de temperatura	43
3.6	Sistema de control de flujo de aire	43
3.7	Diagrama de conexión del sensor de temperatura LM35	44
3.8	Resistencia eléctrica	44
3.9	Ventiladores	45
3.10	MOC	46
3.11	TRIAC	46
3.12	configuración	47
3.13	LCD 2 líneas X 16 columnas	47
3.14	Diseño paralelo del controlador PID	49
3.15	Algoritmo de programación del PID digital en el microcontrolador .	50

4.1	Gráfica de datos de la planta en lazo abierto	56
4.2	Función similar a los datos obtenidos	57
4.3	Pendiente más alta de la gráfica	57
4.4	Valores aproximados de t_0 , t_1 , $y t_2$	58
4.5	Diagrama de conexión para la simulación del programa de control PID	59
4.6	Interactive Analysis	59
4.7	Selección de la temperatura a 61 grados	60
4.8	Respuesta del control PID a 61 grados	60
4.9	Selección de la temperatura a 45 grados	61
4.10	Respuesta del controlador PID a 45 grados	61
4.11	Selección de la temperatura a 70 grados	62
4.12	Respuesta del controlador PID a 70 grados	62
4.13	Diagrama esquemático del control de velocidad del motor	63
A.1	Deshidratador solar	70
A.2	Deshidratador solar	71
A.3	Deshidratador solar	72
A.4	Deshidratador solar	72
A.5	Deshidratador solar	73
A.6	Deshidratador solar	73
A.7	Deshidratador solar	74
A.8	Deshidratador vista frontal	75
A.9	Deshidratador vista posterior	76
A.10	Parte interna del horno	77
A.11	Dimensiones de la estructura que soporta los paneles solares	78

Lista de Tablas

2.1	Características generales de los tipos de secadores más utilizados en la industria alimentaria (Perry y col., 1992).	14
2.2	Tipo de deshidratadores.	16
2.3	Características generales de los microcontroladores.	31
2.4	Características del $\mu CPIC16F877A$	32
2.5	Tipos de transductores de temperatura.	34

Dedicado a mi vida...

Capítulo 1

Planteamiento del problema de investigación

1.1 Introducción

Desde la antigüedad las personas han tratado de procesar los alimentos de distintas formas para el consumo posterior de ellos, uno de estos procesos es la deshidratación de plantas, frutas, carne entre otras, consiste en sustraer el agua que contienen los materiales a tratar, por eso también recibe el nombre de secado. Se puede realizar de dos formas: por la acción del sol pero de forma austera y por un largo tiempo, o por medio de deshidratadores industriales, los cuales requieren del consumo de combustible (principalmente gas) que significa un gasto de energía, por lo que en la medida en que estas dos formas de secado se relacionen se tendrá un proceso más eficiente para conseguir una mejor relación costo beneficio. [1].

Una manera de relacionar estas dos técnicas es con la utilización de energías alternas, México por su ubicación geográfica cuenta con una gran extensión territorial que recibe radiación solar que pudiese ser aprovechada de manera eficiente y efectiva en el deshidratado ya que un resultado que aporta el secado de alimentos es la disminución de peso y volumen, reduciendo los costos de empaque, almacenamiento y transporte, permitiendo salvaguardar el producto.

A continuación se presenta una propuesta para optimizar el secado de alimentos, mediante el control y automatización de los diferentes módulos que integran al

prototipo, como resultado se obtendrá una mejor transferencia de calor a través del control del flujo de aire desde los ventiladores hasta la bóveda de secado.

En la actualidad existe un gran número de empresas que ofertan al mercado sus tecnologías para el procesamiento de alimentos, lo que abre una gama de perspectivas para el desarrollo de tecnologías enfocadas en la automatización y control de secadores que integran las dos formas de secado expuestas anteriormente y así lograr la optimización de los procesos. Este tipo de propuesta no se encuentra fácilmente en una versión comercial microcontrolada.

El deshidratador del laboratorio de energías renovables de la UPP, funciona bajo el principio de transferencia de calor por radiación y convección. Por medio de un colector solar se concentra la temperatura suficiente para la deshidratación y con dos ventiladores se hace circular el aire caliente en la bóveda la cual contiene los alimentos. La resistencia eléctrica entrará en funcionamiento a menos que la acción del sol no sea la suficiente para alcanzar la temperatura deseada.

Para controlar la intensidad de corriente que fluye por la resistencia eléctrica se ocupa un control de temperatura PID programado en un PIC16F877, puesto que es un dispositivo que contiene los requerimientos mínimos para esta acción, la ventaja principal de este dispositivo radica en que incluye un convertidor analógico digital (ADC) que permite la digitalización adecuada de las señales. Adicionalmente, es un dispositivo de fácil manejo y económico.

Entre los objetivos principales, se establece diseñar un controlador PID que pueda ser implementado en el PIC y controlar la generación de calor de una resistencia eléctrica ubicada en el fondo de la bóveda como herramienta auxiliar para el deshidratado, cuando no es alcanzada la temperatura de forma natural mediante la radiación solar. La velocidad de giro de los ventiladores es igualmente establecido mediante otro PIC, pero éste de la familia 16F84, controlando la circulación de aire caliente a través de la bóveda generando una nueva versión controlada de un deshidratador solar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Automatizar un prototipo deshidratador solar, mediante la implementación de la ley de control a través de un microcontrolador, para la regulación de la temperatura que circulan por los alimentos los cuales responden de manera diferente al proceso de deshidratación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Implementar un controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) para la regulación de la temperatura basado en microcontrolador PIC.
- Diseñar e implementar el control de la velocidad de los ventiladores por medio de la modulación por ancho de pulsos.
- Diseñar e implementar la etapa de adquisición de datos necesaria para la medición de la variable a controlar que es la temperatura.
- Diseñar e implementar la etapa de potencia para el manejo de la resistencia eléctrica.

1.3 Justificación

Los deshidratadores forman parte de la categoría de tecnologías limpias, puesto que utilizan energía solar. En México cerca del 40% de la producción agrícola se pierde por diferentes factores como puede ser la variación de las condiciones climáticas, saturación de mercados o pérdidas en la transportación de la mercancía. Los deshidratadores plantean una solución de bajo costo a esta problemática, ofreciendo la conservación de la calidad de los productos, es decir no modifican sus propiedades organolépticas (olor, sabor y textura) ni bromatológicas (densidad, grasas, cenizas, proteínas, vitaminas, etc.) El deshidratado de frutas y vegetales es una labor sencilla, pero que requiere de mucho tiempo de exposición a la radiación solar y a los agentes que arrastran el agua y la humedad contenida en los alimentos. [2] Esto depende del tipo de alimento, la cantidad de agua, el tamaño

del cuerpo a deshidratar, el grosor del cuerpo o rodajas, circulación de aire, sequedad, la constante de temperatura y la velocidad a la que se requiere el flujo de aire dentro de la bóveda. [2] Por tales motivos, principalmente por los dos últimos (temperatura y velocidad del aire) surge la necesidad de automatizar un prototipo deshidratador con un control de temperatura de proporciones medianas de producción que ocupa como calefactor principal la energía del sol, calefactor secundario una resistencia eléctrica, el modo de deshidratación es por medio de soplado de aire caliente y como suministro principal de energía se ocupa un panel de celdas solares, con miras a beneficiar a todo aquel producto que sea susceptible de ser deshidratado.

Capítulo 2

Marco Teórico

El secado consiste en la extracción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material con el fin de reducir el contenido de este líquido. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades de agua bastante grandes; además ahí el agua se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire. [3] El secado es por lo general la etapa final de un proceso, el producto que se extrae de un secador reduce su peso y por lo tanto su costo y está listo para ser empaquetado. Los sólidos que se secan muestran diferentes formas (escamas, gránulos, cristales, polvos, hojas o láminas continuas) y tienen características muy diferentes. El líquido que se evapora puede hallarse sobre la superficie del sólido, completamente en el interior del sólido o parte en el interior y parte en el exterior. Dependiendo de las características del producto que se seca, puede soportar temperaturas elevadas o tal vez solo necesite un proceso suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto ocasiona a que se desarrollen diferentes tipos de secadores y en el mercado se encuentre versiones comerciales económicas pero también algunas no tan comerciales que solo sean a un nivel industrial, las diferencias entre los secadores radica fundamentalmente en el modo en que el producto se mueve en la zona de secado y en la forma en la que se transfiere calor. [4].

2.1 ¿Por qué secar los alimentos?

Existen varias razones por las cuales es importante y necesario secar los alimentos:
[2]

- Conservar los alimentos durante un largo tiempo y poderlos consumir en tiempos de escasez o fuera de su temporada de cosecha.
- Asegurar la calidad de los alimentos, es decir que conserven los nutrientes.
- Aprovechar la radiación del sol ya que es limpia y gratuita.
- Generar trabajo ya que los alimentos deshidratados se pueden, almacenar adecuadamente y confeccionarlos para la venta, de esta manera se puede generar fuentes de empleo.

2.2 Factores que intervienen en el procesos de secado

2.2.1 Aire como agente secante

Normalmente se utiliza aire como agente deshidratador debido a su abundancia, rendimiento, su comodidad y que puede ser moderado o controlado. La optimización del flujo necesario de aire caliente es trascendente, ya que el contacto del aire con el producto es el encargado de extraer su humedad. El aire caliente ocasiona la transferencia de calor necesaria para llevar acabo la deshidratación del alimento, por otro lado el aire húmedo se conduce a la salida del secador y la velocidad de secado se incrementa a medida que se intensifica la velocidad de aire que circula sobre el alimento. [5]

A lo largo de su trayectoria en el deshidratador, el aire incrementa su humedad relativa. Para la realización de un proceso de secado ideal, la humedad relativa debe llegar a ser lo más cercano posible a la humedad de saturación. En un proceso eficiente es forzoso determinar el flujo másico de aire para deshidratar el producto en el mínimo tiempo posible, que va a depender de las características del producto, tipo de secador, etc. Si se conocen las temperaturas en diversos puntos del secador, se puede establecer aproximadamente que tan adecuadamente está trabajando el flujo de aire en la entrada. La corriente de aire óptima para el secado será alcanzada cuando, en el punto final del secador, la humedad del aire sea cercana a la humedad de saturación.

2.2.2 Temperatura en el proceso de secado

Existe una relación entre la temperatura de secado y la humedad relativa del aire, si no se controlan adecuadamente estas dos variables corremos el riesgo de que se forme una corteza en la superficie del material, esto sucede si la temperatura del aire de secado es muy alta y la humedad relativa es baja, cuando esto sucede la humedad se elimina más rápido de lo que el agua puede propagarse del interior al exterior del alimento. Este revestimiento retarda la libre propagación de la humedad, pero puede ser evitada si existe un correcto control de la humedad relativa del aire que circule y la temperatura del mismo. [5]

2.2.3 Contenido de humedad del aire seco

La disminución de peso depende de la humedad del aire en la bóveda de secado, por lo tanto es de vital importancia conocer las condiciones de humedad y temperatura del aire, si la humedad del aire es baja, la disminución del peso en el alimento es muy alta. El aire por lo regular tiene vapor de agua, esto origina a lo que se conoce como aire húmedo que no es otra cosa más que una composición de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor contenido en esta mezcla puede variar entre cero y el estado de saturación, es decir la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede llevar a una temperatura determinada. [5]

2.2.4 Contenido de humedad en el producto

Contenido de humedad: es la cantidad de agua que existe en el producto que puede ser evaporada y se expresa con relación a su masa total o a su masa seca. Existen diferentes maneras o métodos para medir la cantidad de humedad contenida en un producto. El análisis directo de la cantidad de humedad involucra medir la masa total del producto y la masa seca consecuente al proceso de deshidratado.

Humedad Inicial Óptima: no hay que dejar a un lado ni mucho menos olvidar el efecto que actúa del medio ambiente sobre el producto a deshidratar durante el previo almacenamiento al secado; si el producto es almacenado en lugares donde existe un ambiente húmedo, es recomendable colocarlo o adecuarlo de tal manera que se genere un secado natural, para que se logre un mejor nivel de humedad inicial. Existen otros métodos de secado alternativos, que previamente pueden disminuir

considerablemente el contenido de humedad de un producto, antes de realizar un proceso de secado por convección. Estos métodos pueden ser de separación mecánica, e incluso por otro tipo de secado térmico.

Humedad Final Óptima: El proceso de deshidratado puede calificarse como exitoso cuando el contenido de humedad del producto que se extrae del secador ha disminuido lo suficiente para que pueda ser tratado y dirigido a otros procesos o embalajes para su venta inmediata. Además, para un eficiente gasto de energía y no exceder el consumo de éste, se debe tener en cuenta lo siguiente: no tiene caso secar el producto más allá de su humedad de equilibrio, ya que el producto al salir del deshidratador tendría q recobrar humedad hasta que se equilibre con la atmósfera que la rodea sin olvidar que la humedad de equilibrio varía de acuerdo a las características atmosféricas del lugar donde se esté realizando el proceso en especial la humedad relativa. Por lo tanto concluimos que la humedad ideal de salida es la humedad de equilibrio del producto con la atmósfera donde se va a almacenar.

2.3 Técnicas para un secado correcto

Los factores claves para un buen secado son:

- Aire caliente a una temperatura de 40 a 70 grados centígrados.
- El aire con un bajo contenido de humedad.
- Movimiento constante del aire.

Al calentar el aire, que se encuentra a una temperatura ambiental y con una cierta cantidad de humedad, aumenta su capacidad para absorber el vapor de agua. La relación existente es que por cada 20 grados centígrados de aumento de la temperatura del aire la capacidad de retención del vapor de agua aumenta tres veces, esto ocasiona que la humedad relativa se reduzca a un tercio.

Para reducir al mínimo la humedad que contienen los alimentos, necesitamos que el aire que circula por los alimentos esté en constante movimiento y renovación. Esta ventilación se puede conseguir en forma natural por el efecto chimenea, es decir el aire caliente asciende por el deshidratador hasta ser regresado al ambiente

o en forma forzada por medio de ventiladores, dependiendo del tipo de secador. Para obtener un mejor resultado en el secado, los productos tienen que estar acomodados de tal forma que exista el espacio suficiente entre las partes que lo componen.

2.4 Tiempos de secado

Dado que la lista de productos que se pueden deshidratar es extensa, es de suma importancia seleccionar el proceso de deshidratación más adecuado para cada alimento.

No menos importante es controlar la velocidad de giro de los motores para dominar el flujo de aire a la que se va a ejecutar el proceso. En el tiempo que dura el lapso de secado de algún producto se debe considerar tres períodos distintos:

Primer Período: Es el lapso donde se inicia el calentamiento del alimento y la velocidad de secado aumenta o está en función con respecto al tiempo.

Segundo Período: En este intervalo la velocidad de secado se mantiene constante y no depende del sólido.

Tercer Período: Una vez que la humedad de la superficie ha sido eliminada, la humedad interna remanente comienza a ser separada pero, una secuela de esta acción es la disminución de la velocidad del secado, esto a medida que se va perdiendo humedad interna por evaporación en la superficie.

2.4.1 Secado durante el periodo de velocidad constante

El secado de diversos sólidos bajo diferentes condiciones constantes de secado casi siempre produce curvas de forma variable en el periodo de velocidad decreciente, pero en general siempre están presentes las dos zonas principales de la curva de velocidad de secado: el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente. Durante el primer periodo, la superficie del sólido está muy mojada al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente

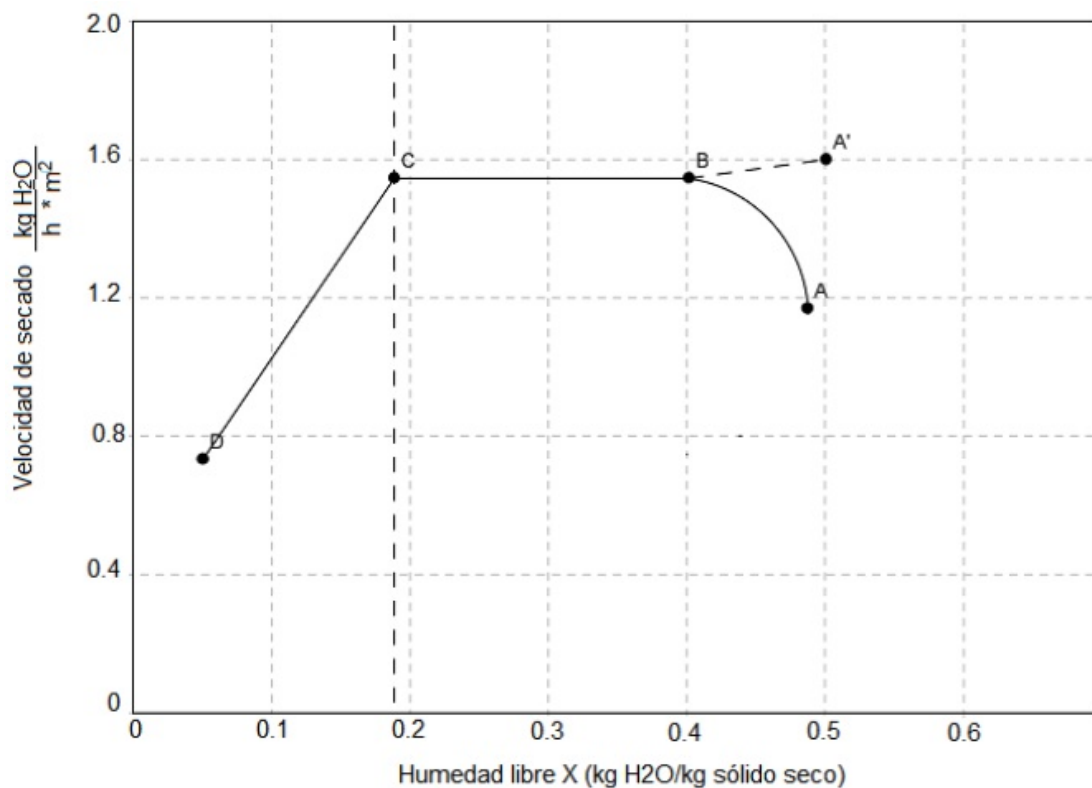


FIGURA 2.1: Curva de velocidad en función del contenido de humedad libre.

del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la que tendría una superficie completamente plana. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior. Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora. La evaporación durante este periodo es similar a la que existe cuando se determina la temperatura de bulbo húmedo, y en ausencia de transferencia de calor por radiación o conducción, la temperatura de la superficie equivale en forma aproximada a la temperatura de bulbo húmedo.

2.4.2 Secado durante el periodo de velocidad decreciente

En el punto C de la Figura 2.1, corresponde al contenido crítico de humedad libre X_c . En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada y la porción

mojada comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto D de la Figura 2.1.

El segundo periodo de velocidad decreciente empieza en el punto D, cuando la superficie esta seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire.

En algunos casos no hay discontinuidad definida en el punto D, y el cambio de condiciones de secado de una superficie con humedad parcial a una superficie completamente seca, es tan gradual que no se detecta un punto de inflexión. Es posible que la cantidad de humedad que se elimina durante el periodo de velocidad decreciente sea bastante pequeña, no obstante el tiempo requerido puede ser largo.

[3]

2.5 Deshidratado

Los deshidratados pertenecen a una de las cuatro clasificaciones más significativas dentro de la agroindustria, los productos agroindustriales que generan una gran derrama económica y que por esta razón son los que se utilizan con mayor frecuencia para el deshidratado son los del subsector hortofrutícola.

Se trata de alimentos cuyas características finales son bastante diferentes de la materia prima que lo origina, principalmente en términos de humedad y textura.

Las ventajas de los productos vegetales deshidratados son amplias y bien conocidas ya que al reducir el contenido de humedad en ellos también disminuye considerablemente la actividad microbiológica y enzimática; además que se disminuyen los costos de almacenamiento y transporte.

2.6 Clasificación de los deshidratadores industriales

De acuerdo con Warren L. McCabe, Julian C. Smith y Peter Harriott en su libro “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”, los equipos de secado se clasifican

en: 1) secadores en los que el sólido se encuentra directamente expuesto a un gas caliente (por lo general aire); 2) secadores en los el calor es transferido al sólido desde un medio externo tal como vapor de agua condensante, generalmente a través de una superficie metálica con la que el sólido está en contacto, y 3) secadores que son calentados por energía dieléctrica radiante o de microondas. Los secadores que exponen los sólidos a un gas caliente se llaman secadores directos o adiabáticos; aquellos en los que el calor es transferido desde un medio externo reciben el nombre de secadores indirectos o no adiabáticos. Algunas unidades combinan el secado adiabático y no adiabático, y se denominan secadores directos – indirectos.

Existen diversas clasificaciones de deshidratadores la más general es según el método con el que se lleva a cabo la transferencia de calor, que puede ser por conducción, por convección y por radiación.

2.6.1 Secadores directos

Los sólidos están expuestos al gas en algunas de las formas siguientes:

- El gas circula sobre la superficie de un lecho o una lámina de sólidos, o bien sobre una o ambas caras de una lámina o película continua.
- El gas circula a través de un lecho de sólidos granulares gruesos que están soportados sobre un tamiz.
- Los sólidos descenden en forma de lluvia a través de una corriente gaseosa que se mueve lentamente, con frecuencia dando lugar a un arrastre no deseado de las partículas finas en el gas.
- El gas pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho. Inevitablemente se produce arrastre de las partículas más finas.
- Los sólidos son totalmente arrastrados por una corriente gaseosa de alta velocidad y transportados de manera neumática desde un dispositivo de mezcla hasta un separador mecánico.

El líquido que se evapora es transportado junto con los gases calientes del secado. También se conoce como secadores por convección. Estos equipos de igual forma pueden operar de manera continua o discontinua.

Los deshidratadores cuyo funcionamiento de transferencia de calor es por convección se utilizan frecuentemente para secar alimentos en forma de láminas o pastas. El calor es suministrado a través del aire caliente o gas, el cual circula por la superficie del sólido. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado o gases de combustión directa se pueden utilizar en sistemas de secado convectivos. [1]

2.6.2 Secadores indirectos

El colector y la bóveda de secado se encuentran separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no trasgrede sobre los alimentos colocados en las bandejas de la bóveda de secado. No se permite la entrada de la radiación solar a la bóveda, el calor es transferido a los alimentos por medio de una pared de retención. El líquido que se evapora se separa rápidamente del medio de calentamiento. También son llamados secadores por conducción o de contacto. De igual forma que el secador directo, puede operar de forma continua o discontinua (Perry y col., 1992).

Estos tipos de secadores son apropiados para alimentos de poco grosor o alimentos con demasiada humedad. El calor se distribuye a través de superficies calientes. [1]

2.6.3 Secadores infrarrojos y secadores de calor dieléctrico

Este tipo de secadores se basa principalmente de la generación, propagación y absorción de rayos infrarrojos y de la distribución de los alimentos dentro de un campo dieléctrico de alta frecuencia (Perry y col., 1992).

El proceso de deshidratado se lleva a cabo por medio de la radiación electromagnética cuya longitud de onda se encuentra dentro rango del espectro solar y microondas. Un ejemplo de estos tipos de secadores son los de radiación solar, el cual está formado por un colector cubierto en el cual la tapa consta de un material traslúcido como puede ser un cristal o plástico transparente que deja pasar los rayos solares; de esta manera se utiliza la radiación del sol para alcanzar la disipación de la humedad del alimento. Este deshidratador tiene la ventaja que su costo de producción es bajo pero las desventajas que presenta es que depende de los factores climáticos, como las nubosidades o la lluvia, el tiempo que se lleva

Secadores directos	Secadores indirectos
El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.	El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de índole metálica.
Las temperaturas de secado pueden ser hasta de 1000 K, que es la temperatura limitante para casi todos los materiales estructurales de uso común.	Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación, en el caso de secadores de este tipo, hasta mayores de 800 K para secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión
Para secar a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, se requiere deshumidificar el aire de secado.	Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista del consumo de calor.
La velocidad de secado depende de temperatura, velocidad de flujo y humedad relativa del aire.	La velocidad del secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y la superficie caliente.

TABLA 2.1: Características generales de los tipos de secadores más utilizados en la industria alimentaria (Perry y col., 1992).

en realizar un ciclo de secado es muy largo y la capacidad de producción es muy pequeña. [1]

2.6.4 Secadores por congelación

La liofilización, que en otras palabras es el secado por congelación, es un proceso para secado de alimentos, vitaminas y otros productos que son sensibles al calor; en este proceso a temperaturas por debajo de 0 oC el material o los alimentos que van a ser secados se congelan rápidamente y se colocan en capas delgadas sobre platos perforados en cámaras especiales de vacío. El vacío completo es aplicado y un fluido pasa a través de los platos para suplir el calor de sublimación. A medida que procede el secado, el frente de hielo se retira desde la superficie, dejando atrás una zona de sólido poroso casi seco. En la mayoría de los periodos de secado la temperatura en el frente de hielo es prácticamente constante a valores por debajo de 0 oC. Esta temperatura se determina por un balance entre la velocidad de transferencia de calor a través de la zona de secado y la película gaseosa externa y la velocidad de transferencia de masa del vapor de agua a través de las mismas regiones.

Este método presenta las siguientes ventajas:

- Se reduce al mínimo la alteración física de las hortalizas.
- Mejora las características de reconstrucción.
- Reduce al mínimo las reacciones de oxidación y del tratamiento térmico.

2.7 Tipos de secadores industriales

También se pueden clasificar los secadores según el tipo de contenedor del deshidratador: charolas, tambor, túnel, aspersión, etc.

2.7.1 Deshidratadores por convección

Algunos tipos de deshidratadores convectivos son:

- Deshidratador en bandejas o charolas. Funciona con un ventilador que provoca la circulación forzada de aire, calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las charolas. También puede usarse calor eléctrico por medio de un calefactor.
- Deshidratador de túnel: funciona con carretillas que se trasladan permanentemente por un túnel con gases calientes que transitan sobre la superficie de cada una; un ventilador expulsa el aire húmedo hacia el exterior.
- Deshidratadores rotatorios. Está formado por medio de un cilindro que gira sobre su propio eje con determinada inclinación. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo de gases calientes por medio de un flujo a contracorriente, o también, puede ser a través de la pared calentada del cilindro.
- Deshidratadores por aspersión. Un líquido se atomiza o rocía en un torrente de gas caliente para lograr una lluvia de gotitas finas, las cuales se evaporan y de esta manera obtenemos partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. las partículas obtenidas son porosas y ligeras.

Tipos de deshidratador	Productos
Bandeja o Gabinete	Frutas, vegetales, carnes y confitería
Tunel	Frutas y vegetales
Rotativo	Semillas y granos
Tambor	Leche, sopa, alimentos para bebés y puré
Spray	Leche, café y té
Liofilización	Carnes, camarón y café

TABLA 2.2: Tipo de deshidratadores.

2.7.2 Deshidratadores por conducción

Algunos tipos de deshidratadores por conducción son:

- Deshidratadores de tambor. Está formado de un tambor metálico caliente que gira, dentro de este tambor se evapora una capa ligera de líquido o solución hasta secarse, posteriormente se raspa el sólido hasta desprender los excedentes.
- Deshidratadores al vacío con anaqueles. Es un gabinete cerrado con bandejas o anaqueles donde el calor se transporta por medio de las paredes metálicas y por efecto de la radiación entre los anaqueles. Se usa para productos que son sensibles a la temperatura y al oxígeno.

Debido a la extensa variedad de productos que se pueden deshidratar, sus diferentes características y a la elevada demanda de alimentos en el mercado, existen diferentes tipos de secadores que se usan en la industria. Algunos deshidratadores típicos y su aplicación más común durante el procesamiento de alimentos se muestran en la Tabla 2.

2.8 Secadores solares

Los dos componentes básicos de un deshidratador solar son: el colector, donde la radiación solar se absorbe y de esta manera se calienta el aire; la bóveda de secado, donde el producto se coloca y es deshidratado por el aire que circula. Estos dos componentes pueden diseñarse y construirse de diferentes formas.

2.8.1 Tipo “carpa”

Es un secador sencillo, compacto, liviano, plegadizo y transportable para secar cualquier tipo de alimento en pequeñas cantidades.

El esqueleto normalmente es metálico o de madera, con forma de carpa triangular, cubierta en gran parte por una lámina de plástico transparente (polietileno) o cristal, resistente a los rayos ultravioletas y puede realizarse de diferentes tamaños.

La ventilación se lleva a cabo por medio de dos ventanillas en los lados más longitudinales, la primera está ubicada en la parte baja y es por donde ingresa el aire, la segunda se encuentra en la parte superior, por medio de esta se devuelve el aire húmedo a la atmosfera, las dos ventanillas están cubiertas de malla mosquitero para evitar el ingreso de insectos. A 20 cm del suelo aproximadamente se encuentra la bandeja de secado removible. Sobre este se coloca una gasa o una malla sobre la cual se colocan los alimentos a secar Figura 2.2. [2]

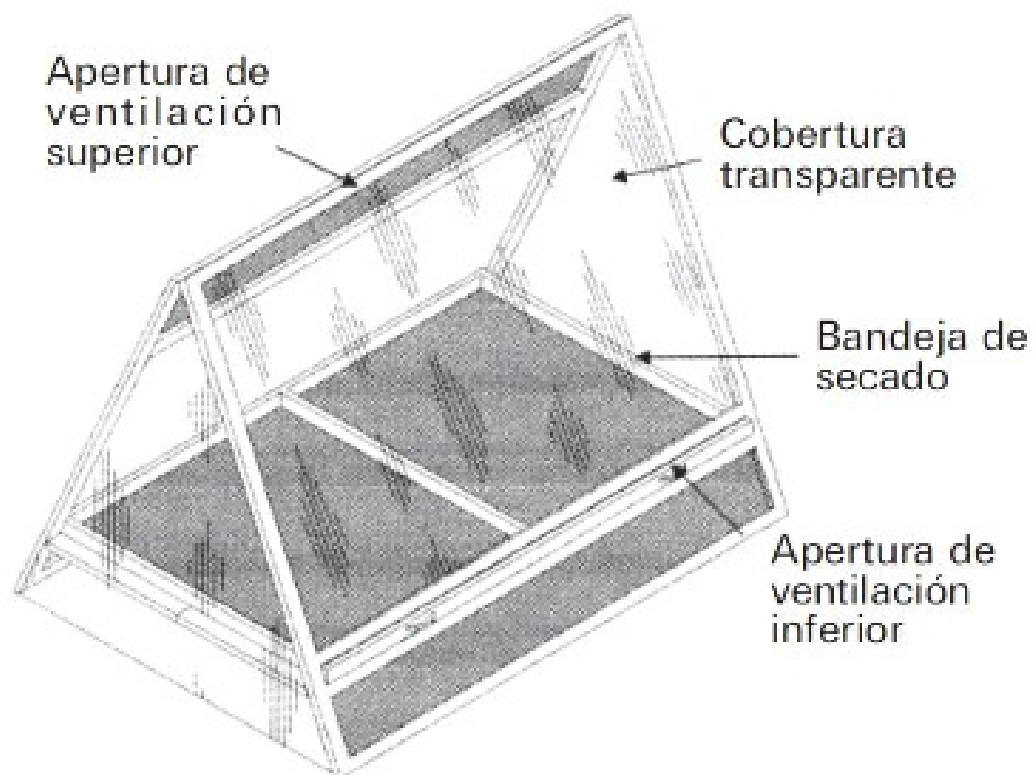


FIGURA 2.2: Secador solar tipo carpa.

2.8.2 Tipo “Armario”

Es un deshidratador con mayores ventajas ya que en términos generales mantiene un mejor aspecto principalmente en el color y protege las propiedades naturales de todo tipo de alimentos.

Está formado por una cámara de secado y un colector solar inclinado, unidos entre sí en la parte inferior de la cámara. En esta bóveda se encuentran superpuestas bandejas o charolas de secado removibles. Los alimentos son colocados y están protegidos por una puerta colocada en la parte trasera de la bóveda.

El colector está cubierto con vidrio y tiene en su interior una serie de cilindros con chapa de color negro y están superpuestos en zigzag, para aumentar la superficie de intercambio de calor con el aire y disminuir el tiempo de elevación de temperatura. El aire ambiental entra por la parte inferior del colector, que está cubierta por una malla mosquitero, y se calienta gradualmente hasta alcanzar una temperatura de 25 a 30C superior a la temperatura ambiental. [2]

Entra finalmente en la bóveda, donde atraviesa las charolas efectuando la deshidratación de los alimentos. Un extractor eléctrico de aire colocado en la parte superior de la bóveda garantiza la circulación de aire forzado Figura 2.3.

2.8.3 Tipo “túnel”

Consiste en un túnel horizontal colocado sobre una base rígida y una tapa transparente de lámina de polietileno o cristal, igual que el tipo carpa Figura 2.4. El túnel está dividido en secciones y se van alternando de colector-secador-colector-secador.

Generalmente el aire circula en forma horizontal a través de todo el túnel con ayuda de ventiladores eléctricos, ingresa por un extremo al pasar por el primer colector se eleva la temperatura y comienza el proceso de secado, en un segundo colector recupera la temperatura perdida por la absorción de la humedad y efectúa un segundo proceso de secado en el último tramo del túnel. En sitios sin energía eléctrica el deshidratador está provisto por una chimenea ubicada en la salida del secadero.

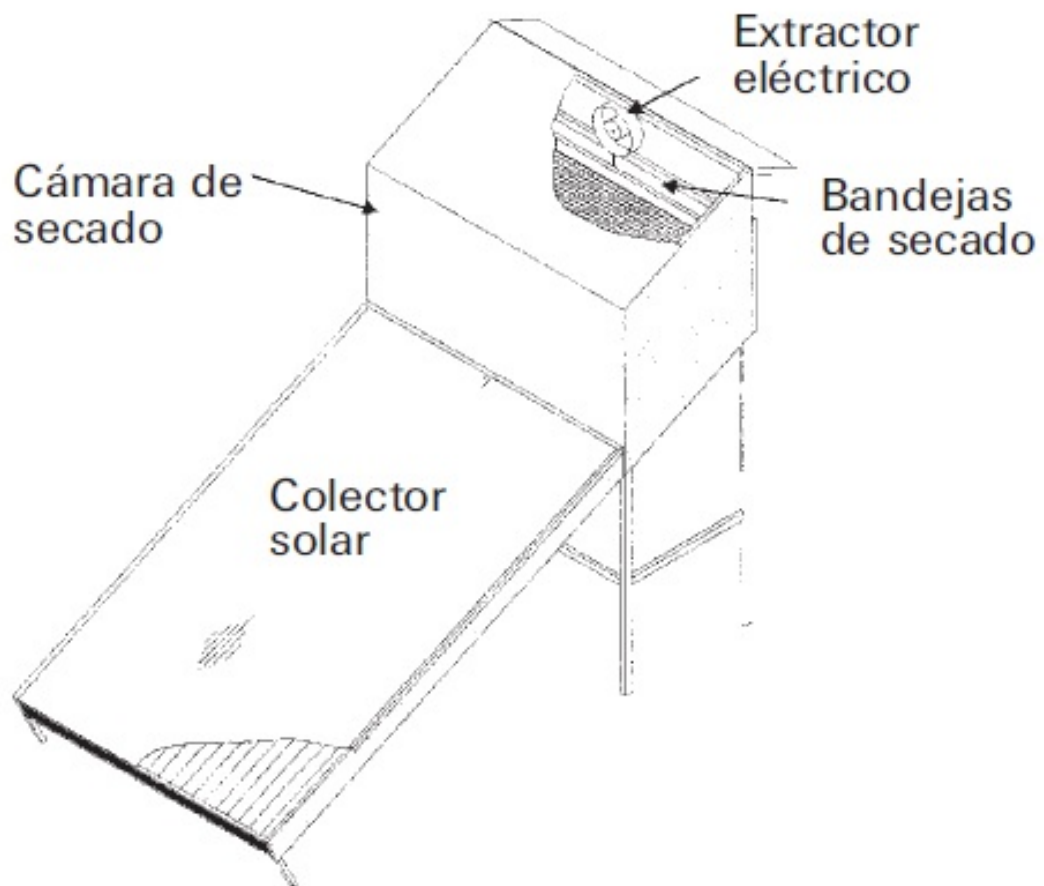


FIGURA 2.3: Secador solar tipo armario.

Las bandejas de secado se pueden mover y extender lateralmente como los cajones de un armario. Por la forma de las bandejas es posible deshidratar productos que ocupan mucho volumen, tales como hierbas o flores. La entrada y la salida del aire están protegidas con una malla mosquitero para evitar el ingreso de insectos. Las bandejas de secado se calientan a una temperatura de 20° a $25^{\circ}C$ superior a la temperatura ambiental. Para un mejor aprovechamiento del deshidratador, se puede agregar un sistema de calefacción auxiliar.

2.9 Tipo de circulación

El aire que circula dentro de los secadores es con el fin de eliminar la humedad que se evapora de los productos. Esta circulación se genera por dos métodos: circulación forzada y por convección natural.

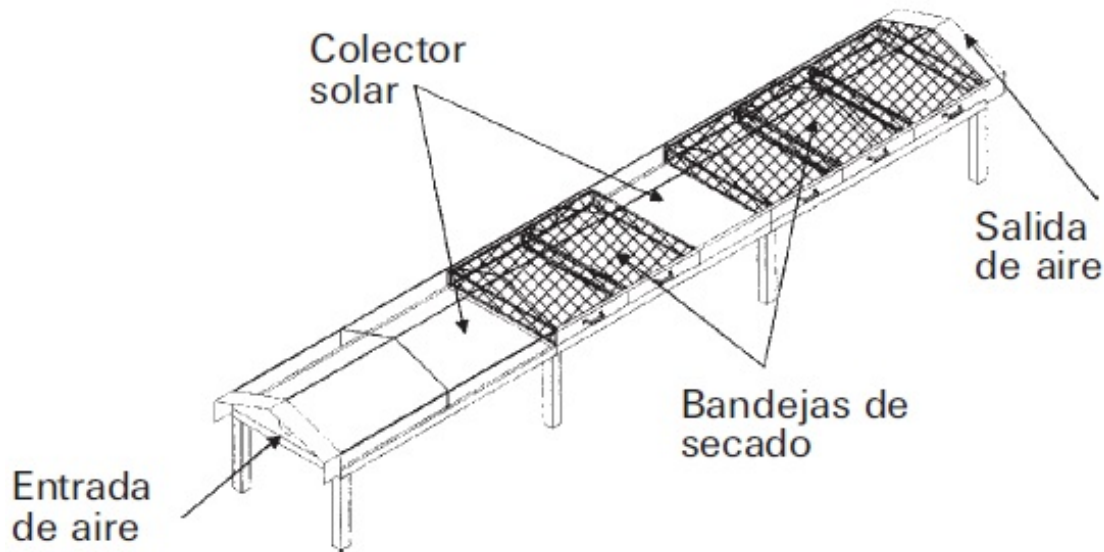


FIGURA 2.4: Secador solar tipo túnel.

Circulación forzada: el aire es movido por ventiladores que son excitados con energía mecánica o eléctrica. Este tipo de circulación facilita el diseño para equipos de gran tamaño y el control del proceso de secado. Este tipo de circulación puede generar velocidades del flujo de aire entre 0.5 y 1 m/s. La desventaja de la circulación forzada radica en el hecho que debemos disponer de una fuente de energía eléctrica para alimentar los ventiladores.

Circulación por convección natural: el aire es movido de forma natural por la diferencia de temperatura entre los niveles del equipo, que promueven la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se hace más difícil de generar en equipos grandes. Para equipos pequeños o medianos se pueden generar flujos de aire de 0.4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0.1 a 0.3 m/s. [2]

2.10 Sistema de control

Podemos considerar que en la actualidad que los sistemas de control cuyo objetivo principal es modificar y controlar la dinámica del sistema, de acuerdo a una forma prescrita se ha categorizado básicamente en dos grupos, sistemas de control en bucle o lazo abierto y sistemas de control en bucle o lazo cerrado.

2.10.1 Sistemas de control en lazo abierto

Los sistemas en los cuales la salida no influye en la operación de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. Es decir que, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se toma en cuenta para compararla y retroalimentar la entrada. Por tanto a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza acciones correctivas a la tarea deseada. [6]

El control de temperatura proporciona una cierta cantidad de energía que puede ser variable o constante y se ocupa para lograr una temperatura fijada previamente o aproximada. Cualquier variación del elemento de entrada que modifique las condiciones del elemento a controlar, no será corregida por no disponer de conocimiento directo de la temperatura a controlar, Figura 2.5. [7]

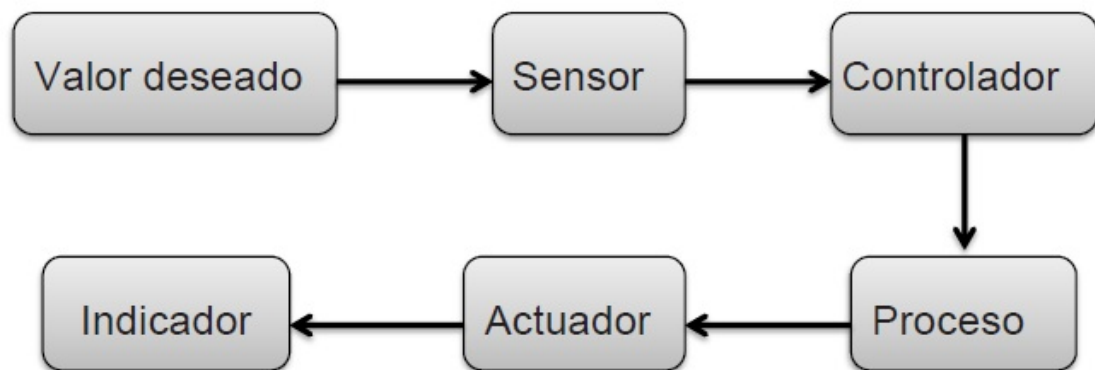


FIGURA 2.5: Diagrama a bloques de un control de lazo abierto.

2.10.2 Sistema de control en lazo cerrado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En este tipo de sistemas se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación, a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. [6]

En un sistema de control de temperatura, la energía que se entrega será dependiente de la diferencia de la temperatura real del elemento a controlar y de la

temperatura establecida previamente, significa que existe un lazo conectado a la entrada y proporciona datos que son tomados en cuenta para el control, Figura 2.6. [7]

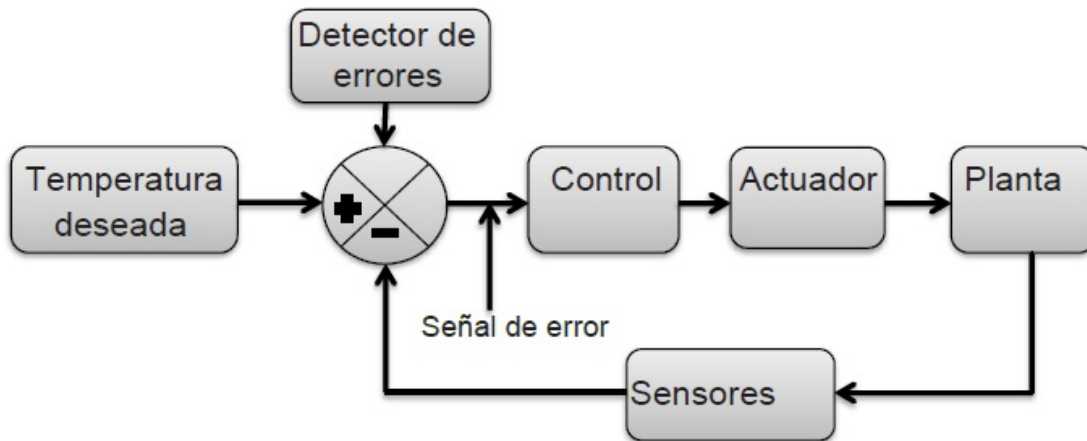


FIGURA 2.6: Diagrama a bloques de un sistema de control de temperatura en lazo cerrado.

2.10.3 Tipos de controladores

Los sistemas de control se pueden clasificar en neumáticos, hidráulicos o electrónicos según el tipo de energía usada en su funcionamiento. El tipo de controlador a utilizar depende de las características de la planta, sus condiciones de funcionamiento y las acciones de control, se presenta una breve explicación de los controladores usados con mayor frecuencia:

- Controladores de dos posiciones (encendido - apagado).
- Controladores proporcionales.
- Controladores integrales.
- Controladores proporcional – integral.
- Controladores proporcional – derivativo.
- Controladores proporcional – integral – derivativo.

2.10.4 Control de dos posiciones (encendido - apagado/todo o nada/ on - off)

En un sistema de control todo–nada, el elemento actuador solo puede realizar dos acciones, encendido o apagado. Este tipo de control normalmente se usa con una banda diferencial en la que el dispositivo final de control se mantiene en la última posición, para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. El control todo nada funciona correctamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo [charolas giratorias]. Para sistemas de calefacción se tiene un tiempo de retardo grande, lo cual ocasiona que se tenga inercias térmicas elevadas y no se puede tener un control muy preciso de la temperatura. [1]

La Figura 2.7, muestra los diagramas de bloques para dos controladores de dos posiciones, el rango en que debe moverse la señal de error antes de que ocurra la conmutación se denomina brecha diferencial. [6]

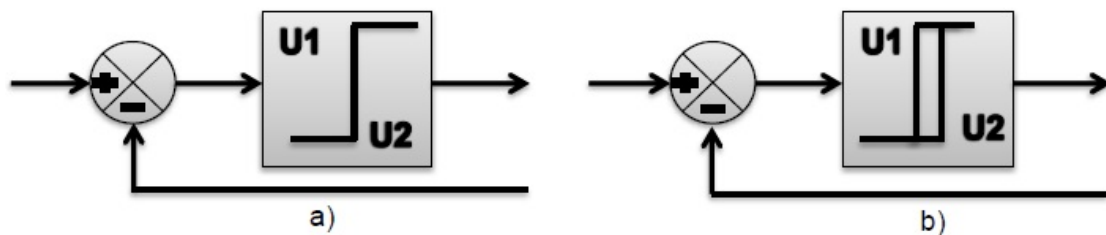


FIGURA 2.7: a) Diagrama a bloques de un controlador on-off; b) Diagrama a bloques de un controlador on-off con una brecha diferencial

2.10.5 Control proporcional

Para un control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \tag{2.1}$$

O expresado en transformada de la Laplace:

$$U(s)E(s) = K_p \tag{2.2}$$

Donde K_p se denomina la ganancia proporcional.

Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es en esencia un amplificador con ganancia ajustable. Con el inconveniente de que su acción de control produce una desviación del valor en estado estacionario, ya que nunca llegara por más que se aumente K_p al valor de la referencia.

En la figura 2.8 se presenta un diagrama de bloques de tal controlador.

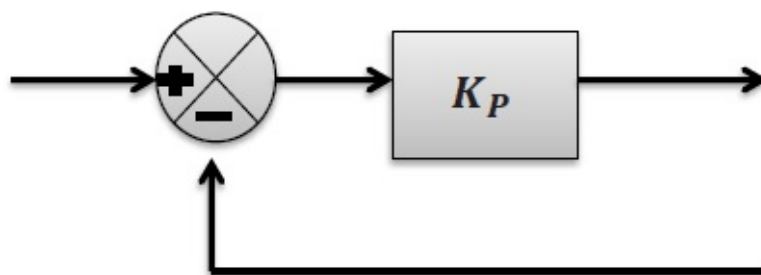


FIGURA 2.8: Diagrama a bloques de un controlador proporcional.

2.10.6 Controlador integral

En un controlador con acción de control integral el valor de la salida del controlador $u(t)$ se cambia a una razón proporcional a la señal de error $e(t)$ [ogata]. Es decir:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2.3)$$

O bien:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.4)$$

En donde K_i es una constante ajustable. [6] La función de transferencia del controlador integral es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.5)$$

Si se duplica el valor de $e(t)$, el valor de $u(t)$ varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de $u(t)$ permanece estacionario. En ocasiones, la acción de control integral se denomina control de reajuste (reset). La Figura 2.9 muestra un diagrama de bloques de tal controlador.[6]

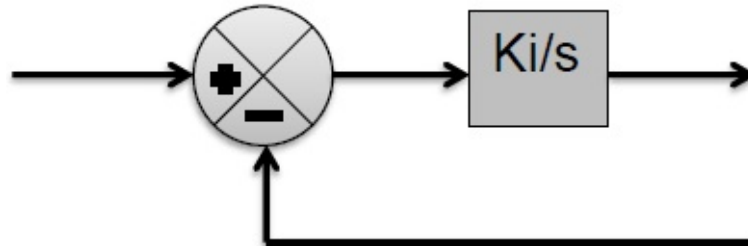


FIGURA 2.9: Diagrama a bloques de un controlador integral.

2.10.7 Controlador Proporcional-Integral

La acción de control de un controlador Proporcional –Integral se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.6)$$

O la función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.7)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral. Tanto K_p como T_i son ajustables. El tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integra T_i se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. [6]. Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con la acción integral, un error pequeño positivo siempre resulta en una acción de control creciente, y si el error es negativo la señal de control será decreciente.

La figura 2.10, muestra el diagrama a bloques de un controlador proporcional más integral.

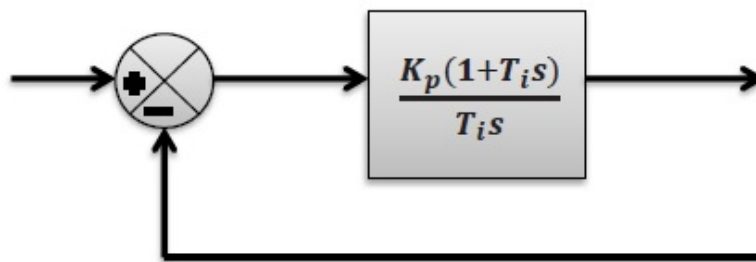


FIGURA 2.10: Diagrama a bloques de un controlador Proporcional - Integral.

2.10.8 Controlador Proporcional-Derivativo

La acción de control de un controlador proporcional-derivativo se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Y la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.9)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Tanto K_p como T_d son ajustables. La acción de control derivativa, en ocasiones denominada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. [6] El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante de que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. [8] Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. [8] La Figura 2.11, muestra un diagrama de bloques de un control proporcional derivativo. [6]

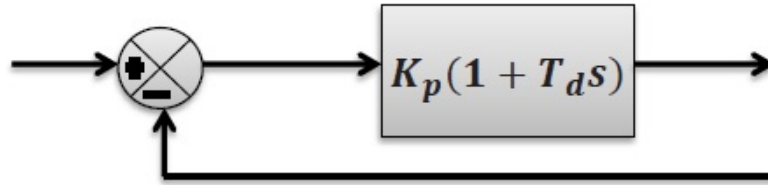


FIGURA 2.11: Diagrama a bloques de un controlador Proporcional - Derivativo.

2.10.9 Controlador Proporcional - Integral - Derivativo

El control PI no siempre tiene una buena respuesta para todos los tipos de procesos. Cuando el proceso tiene cambios muy rápidos en la carga, se presentan retardos de tiempo grandes entre la aplicación de la acción correctora y su efecto de dicha acción en la variable medida. [1] Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante: [6]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

O la función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \right) \quad (2.11)$$

En donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. El diagrama a bloques se muestra en la figura 2.12.

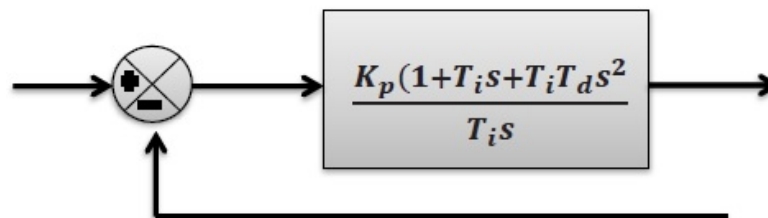


FIGURA 2.12: Diagrama a bloques de un controlador Proporcional - Integral - Derivativo.

2.11 Sintonización mediante Ziegler-Nichols

En lazo abierto, muchos procesos pueden definirse según la siguiente función de transferencia: [9]

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{1 + s\gamma} \quad (2.12)$$

Donde los coeficientes K_0 y γ se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en $y(t) = y_0$ para $u(t) = u_0$. Se aplica una entrada escalón de u_0 a u_1 (el salto debe estar entre un 10 por ciento y un 20 por ciento del valor nominal) y se registra la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. [9]

Los parámetros se pueden obtener de la respuesta mostrada en la Figura 2.13. [9]

$$\tau_0 = t_1 - t_0 \quad (2.13)$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 \quad (2.14)$$

$$K_0 = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} \quad (2.15)$$

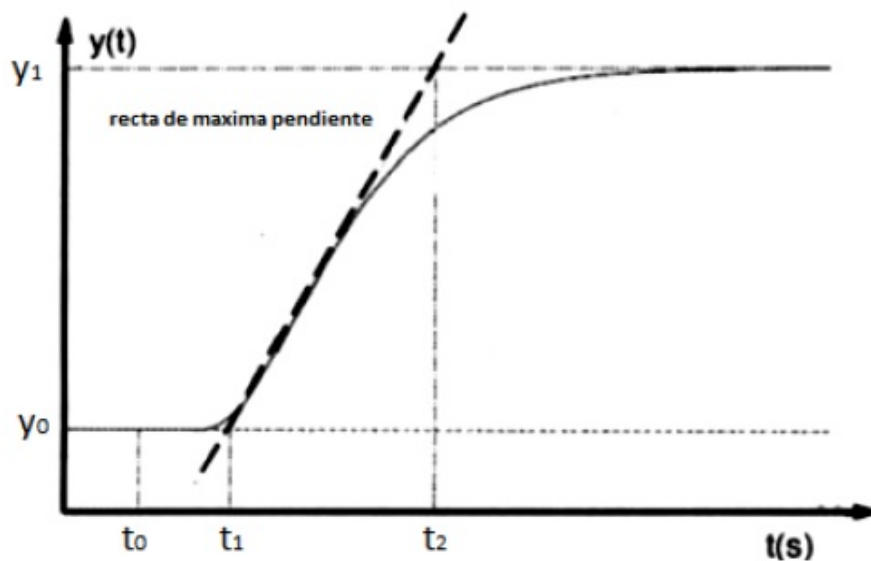


FIGURA 2.13: Respuesta de salida a una entrada escalón.

Según Ziegler-Nichols, la relación de estos coeficientes con los parámetros del controlador son: [9]

$$K_p = \frac{1.2\gamma_0}{K_0\tau_0} \quad T_i = 2\tau_0 \quad T_d = 0.5\tau_0 \quad (2.16)$$

2.12 Modulación por ancho de pulsos

La velocidad de un motor de corriente continua depende del valor medio de la tensión aplicada en sus extremos. El sistema más utilizado para controlar la velocidad de un motor DC de pequeña potencia es mediante la modulación por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation) de una señal cuadrada TTL. La tensión continua media presentada al motor se controla manteniendo la frecuencia constante, y variando el tiempo que la señal permanece en alto, es decir, variando el ciclo de trabajo (duty cycle). Así, si el ciclo de trabajo es del 50 por ciento se suministra al motor una tensión media del 50 por ciento, con un ciclo de trabajo del 20 por ciento sólo una quinta parte de la tensión máxima es suministrada a la carga. [10] Cambiar de un ciclo de trabajo del 50 por ciento a otro del 20 por ciento conllevará una disminución de velocidad del motor. [10] De tal manera que cuanto más tiempo este la línea digital en nivel alto, el motor girará más rápido, lógicamente si la duración del impulso a nivel bajo es muy grande el motor se parará. La Figura 2.14, ayuda a comprender de mejor manera lo antes dicho:

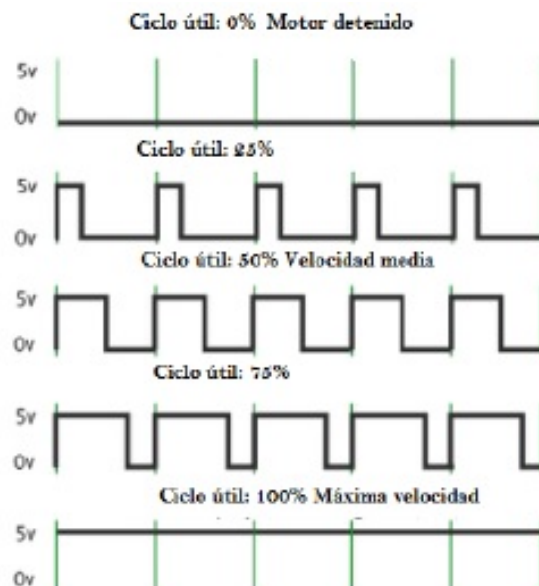


FIGURA 2.14: Respuesta de salida a una entrada escalón.

2.13 Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado (CI) programable, está formado por un aserie de elementos necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Un sistema microcontrolado dispone de una memoria donde se almacena una serie de instrucciones que gobiernan el funcionamiento del mismo que, una vez programado y configurado, solo sirve para realizar la tarea asignada. Las ventajas que ofrece la utilización de un microcontrolador en un circuito son variadas dependiendo del proceso, entre ellas se encuentra: la reducción notable en el tamaño, el número de averías, el volumen y el peso de los equipos entre otras.

2.13.1 Familias de microcontroladores

Los microcontroladores se clasifican de acuerdo al número de instrucciones, en tres gamas:

Los microcontroladores también se agrupan en 5 grandes familias: PIC10, PIC12, PIC16, PIC17 Y PIC 18. Los PIC10 contienen 6 terminales; la familia de los PIC12 agrupa a los microcontroladores de 8 terminales o pines. Los PIC17 y PIC18 son de gama alta o mejorada. La Tabla 3, muestra las características más importantes de estas familias.

2.14 Microcontrolador PIC16F877

Existen en el mercado varios fabricantes de microcontroladores como: Hitachi, Motorola y Microchip, etc. Para la automatización del prototipo seleccionamos el microcontrolador 16f877a de Microchip debido a que hay una mayor información, herramientas como: son los programas de diseño y principalmente la versatilidad en el manejo de los parámetros, alimentación, consumo, tamaño, velocidad y el convertidor analógico digital que requerimos para nuestro sistema.

Las características generales del PIC16F877A son: [7]

- Procesador de arquitectura RISC
- 35 instrucciones

Gama	Características
Baja	<p>→ 33 instrucciones de 12 bits</p> <p>→ Memoria de programa de 2K de 12 bits organizada</p> <p>→ Registro de 8 bits organizados en bancos de 32 registros</p> <p>→ Las familias de gama baja son los PIC16X5xx y PIC12X5xx</p>
Media	<p>→ 35 instrucciones de 14 bits cada una.</p> <p>→ Memoria de programa de 8K palabras de 14 bits y paginas de 2K.</p> <p>→ Registros de 8 bits organizados en bancos de 120 registros.</p> <p>→ Memoria EEPROM.</p> <p>→ Pila de 8 niveles, donde se almacenan direcciones de programa.</p> <p>→ Puertos paralelos de entrada y salida, puertos en serie para la comunicación síncrona y asíncrona</p> <p>→ Tres temporizadores</p> <p>→ 2 módulos de captura, comparación y modulación de ancho de pulsos (PWM) denominados CCP.</p> <p>→ Convertidor A/D de 10 bits</p> <p>→ Los PIC12X6xx con encapsulado de 8 terminales y los PIC16 excepto los PIC16X5xx</p>
Alta	<p>→ Instrucciones de 16 bits.</p> <p>→ Mayor capacidad de pila.</p> <p>→ Sistema de interrupciones interna y externa.</p> <p>→ Número de dispositivos de entrada y salida más amplio que los de gama media.</p> <p>→ 58 instrucciones de 16 bits.</p> <p>→ Memoria de programa de hasta 64K de 16 bits cada una.</p> <p>→ Memoria de datos de hasta 1K y registros de 8 bits.</p>

TABLA 2.3: Características generales de los microcontroladores

- Las instrucciones se ejecutan en un ciclo de reloj, excepto los saltos que requieren dos.
- Frecuencia de 20 Mhz.
- Opciones de selección del oscilador.
- Programación y depuración serie “In . Circuit” (ISCP a través de dos patillas).
- Voltaje de alimentación de 2.0 a 5.5 Volts.
- Alta disipación de corriente de la fuente: 25 mA.
- Bajo consumo de potencia.

Memoria Programable (FLASH)	14336 Bytes 8192X 14 Palabras
Memoria de dator	256 Bytes EEPROM 368 Bytes RAM
Convertidor A/D	8 (10 bits)
BOD (Detección de baja tensión)	SI
Líneas de E/S	33
Comunicación serie	USART/MSSP
CCP	2
Temporizadores	1 a 16 bits, 2 a 8 bits, 1 WDT
Frecuencia maxima Mhz	20
ICSP	SI
Encapsulados	40 P, 44 L, 44 PQ, 44 PT
Fuente de interrupción	14
Comunicación Paralelo	SI

TABLA 2.4: Características del $\mu\text{PIC16F877A}$

- Menos de 0.6 mA a 3V, 4Mhz
- $20 \mu\text{A}$ a 3V, 32Khz

Algunas de las características relevantes en este μC son mostradas en la tabla 4.

La mayoría de robots tienen los siguientes componentes comunes que pueden variar dependiendo de las necesidades de cada trabajo del manipulador:

Estas características se conjugan para lograr un dispositivo altamente eficiente en el uso de la memoria de datos y programa y por tanto en la velocidad de ejecución [Figura 2.15](#).

2.15 Pantalla de cristal líquido

Las pantallas de cristal líquido LCD o display LCD para mensajes (Liquid Cristal Display) tienen la capacidad de mostrar cualquier carácter alfanumérico, permitiendo representar la información que genera cualquier equipo electrónico de una forma fácil y económica. Este tipo puede manejar de una a dos líneas de 8 caracteres cada una, cuando la pantalla es mayor se utilizan otro driver (el HD44100) el cual aumenta la capacidad de este a ocho caracteres por línea. El módulo más utilizado es el LCD LM016L, este utiliza un controlador HD44780 y un driver HD44100 el cual maneja una pantalla LCD de 2 líneas con 16 caracteres cada una. El microcontrolador HD44780 maneja una memoria RAM la cual sirve para

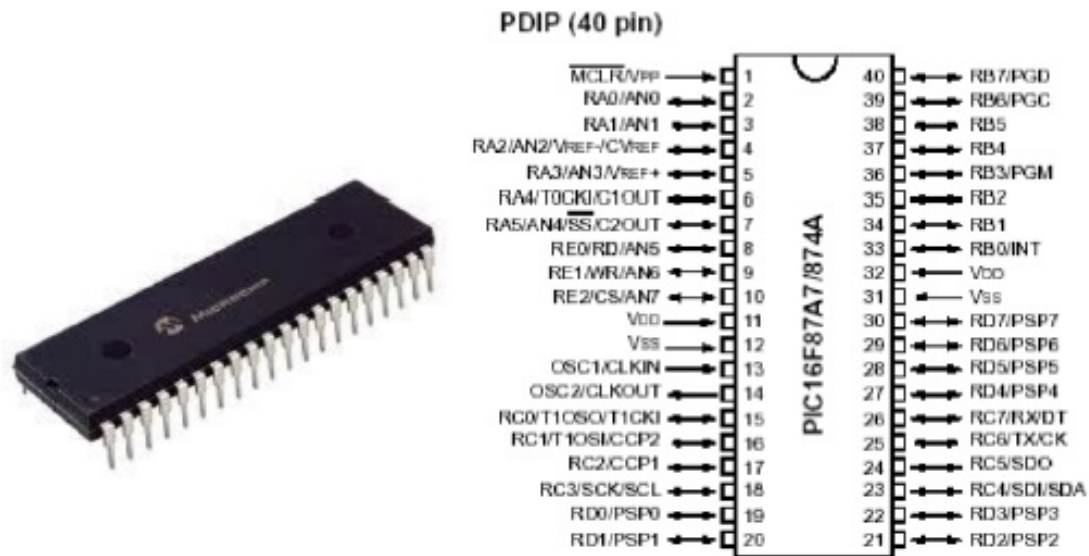


FIGURA 2.15: Microcontrolador PIC16F877A

almacenar los códigos ASCII de hasta 80 caracteres alfanuméricos, esta memoria funciona de manera circular para manejar los datos (En una memoria circular, una vez que se ha alcanzado la posición final, la lectura o escritura de un nuevo dato se realiza en la posición inicial de la memoria).

También el HD44780 contiene una memoria ROM la cual almacena la matriz de puntos de cada caracter y una CGRAM la cual permite definir caracteres que no están diseñados por el microcontrolador.

Las características principales que maneja este tipo de LCD, se muestran a continuación:

- Se puede conectar a puertos paralelos de 4 u 8 bits.
- Almacenamiento de hasta 80 caracteres de 80 bytes cada una.
- Generador de caracteres en la ROM.
- Generador de caracteres en la RAM.
- Muy bajo consumo de energía (debido a que utiliza tecnología CMOS).
- Circuito de Reset.
- Amplio repertorio de órdenes.

2.16 Sensores de temperatura

La temperatura es difícil de medir con exactitud aún en circunstancias óptimas, y en las condiciones de prueba en entornos reales es aún más difícil. Entendiendo las ventajas y los inconvenientes de los diversos enfoques que existen para medir la temperatura, resultará más fácil evitar los problemas y obtener mejores resultados. En la siguiente tabla se comparan los cuatro tipos más comunes de los transductores de temperatura que se usan en los sistemas de adquisición de datos: detectores de temperatura de resistencia (RTD), termistores, sensores de IC y termopares. La elección de los transductores de temperatura adecuados y su correcta utilización puede marcar la diferencia entre unos resultados equívocos y unas cifras fiables.

	RTD	Termistor	Sensor de IC	Termopar
Ventajas	Más estable. Más preciso. Más lineal que los termopares	Alto rendimiento. Rápido Medida de dos hilos	El más lineal. De alto rendimiento Económico	Autoalimentado Robusto Económico Amplia variedad de formas físicas. Amplia gama de temperaturas
Desventajas	Caro. Lento. Precisa fuente de alimentación Pequeño cambio de resistencias	No lineal. Rango de temperaturas limitado. Fragil Precisa fuente de alimentación	Limitado a ; $250^{\circ}C$ Precisa fuente de alimentación Lento Autocalentable Configuraciones limitadas	No lineal Precisa referencias El menos estable El menos sensible

TABLA 2.5: Tipos de transductores de temperatura.

2.16.1 Sensor LM35

El sensor LM35DZ utilizado para monitorear la temperatura del deshidratador tiene una precisión calibrada de 1 Centígrado y un rango de lectura a partir de los 0C hasta + 100C. Existen diversos tipos de encapsulados, en nuestro caso utilizamos el encapsulado tipo TO-92 como se muestra en la figura 6, es un encapsulado de plástico similar a un típico transistor con tres terminales dos de ellas para alimentarlo (+Vs y GND) y la tercera terminal es la que envía o entrega un valor de tensión (Vout). Esta tensión de salida es linealmente proporcional a la escala de grados centígrados. Es decir, la salida es lineal y equivalente a 10mV/C, por ejemplo si se tiene una lectura de 150mV esto equivale a tener 15 C. Posee una precisión aceptable además que es de bajo costo. El sensor LM35DZ se alimenta a partir de los 5 Volts hasta los 30 Volts. En nuestro caso lo alimentamos con 5 Volts Figura 2.16.



FIGURA 2.16: Sensor de temperatura

2.17 MOSFET IRF640N

Quinta generación HEXFET MOSFET de potencia de International Rectifier, utiliza técnicas de procesamiento avanzado para lograr extremadamente baja resistencia por área de silicio. Este beneficio, combinado con la conmutación rápida, la velocidad y el diseño de dispositivos robustos, proporcionan un dispositivo eficiente y fiable para su uso en una amplia variedad de aplicaciones. Este dispositivo es preferido para aplicaciones comerciales e industriales a nivel de disipación de energía a aproximadamente 50V. La baja resistencia térmica y bajo costo contribuyen a su amplia aceptación en toda la industria.

Las características más relevantes son:

- Polaridad N

- Resistencia DS .15 ohms
- Voltage GS 10V
- Corriente ID a 25 grados 18^a
- 200 Volts CD
- Poder de Disipación 150 W

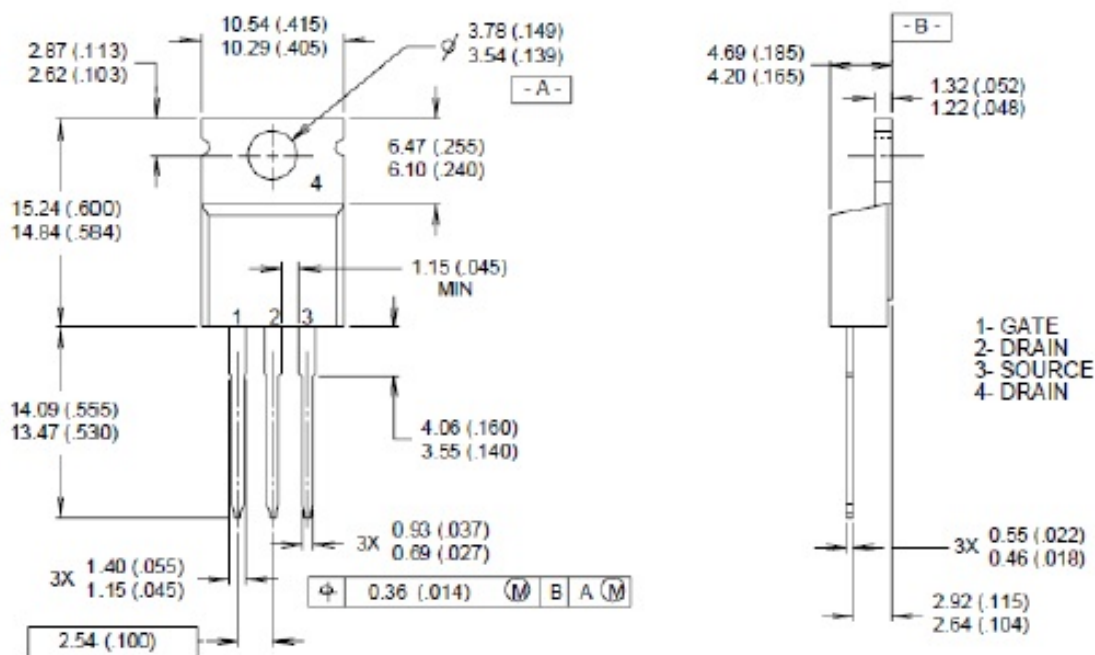


FIGURA 2.17: Configuración de los pines MOSFET IRF640n

2.18 Alimentación de un PIC

Normalmente el microcontrolador PIC 16F877A se alimenta con 5 voltios aplicados entre los pines VDD y VSS que son, respectivamente, la alimentación y la masa del chip. La figura 2.18, describe un circuito de alimentación que obtiene los 5 voltios a partir de una tensión continua de 12 voltios y de al menos 1 amperio. Este circuito se basa en el popular regulador de tensión 7805. Dispone de un diodo a la entrada para protegerlo en el caso que se aplicaran tensiones con la polaridad invertida. El condensador C4 reduce considerablemente el rizado de la tensión de entrada que finalmente el regulador 7805 se encarga de estabilizar a los 5 voltios. El consumo de corriente para el funcionamiento para el microcontrolador depende de la tensión

de alimentación, de la frecuencia de trabajo y de las cargas que soporten sus salidas, siendo del orden de unos pocos miliamperios. El circuito de alimentación del microcontrolador debe tratarse como el de cualquier otro dispositivo digital debiendo conectarse un condensador de desacoplo de unos 100 nF lo más cerca posible de los pines de alimentación.

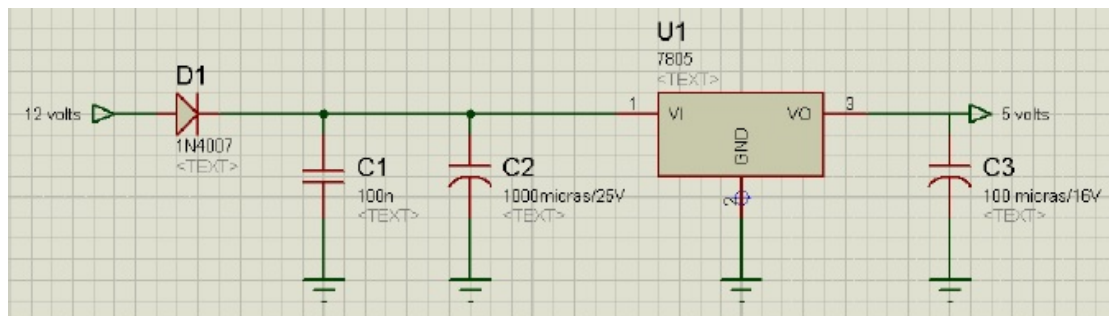


FIGURA 2.18: Regulador de voltaje de 0 a 5 voltios

Capítulo 3

Implementación del sistema

El objetivo principal de la presente tesis, es el diseño y construcción de un sistema de control de un deshidratador solar tipo armario de charolas, mejorando las prestaciones que actualmente posee. Además el sistema debe permitir la selección de la temperatura deseada desde el panel frontal del horno.

Sus características más importantes son:

- Rango de temperatura 20° a 100° centígrados.
- Rango de flujo de aire: .
- Control de temperatura mediante un controlador PID.
- Control de potencia integral o por modulación de ancho de pulsos (PWM)
- Interfaz de usuario mediante panel frontal (LCD)

3.1 Descripción general

Para llevar a cabo el diseño, se propone el diagrama a bloques de la Figura 3.1

- La bóveda es donde físicamente se lleva a cabo el proceso de secado, en su interior se tienen los sensores de temperatura, así como los ventiladores para hacer circular el calor que produce el colector solar o la resistencia eléctrica como calefactor secundario.
- El acondicionamiento de señal es el encargado de adaptar las señales provenientes del sensor para que puedan ser manipuladas por el convertidor analógico – digital del PIC16F877 y del PIC16F84.

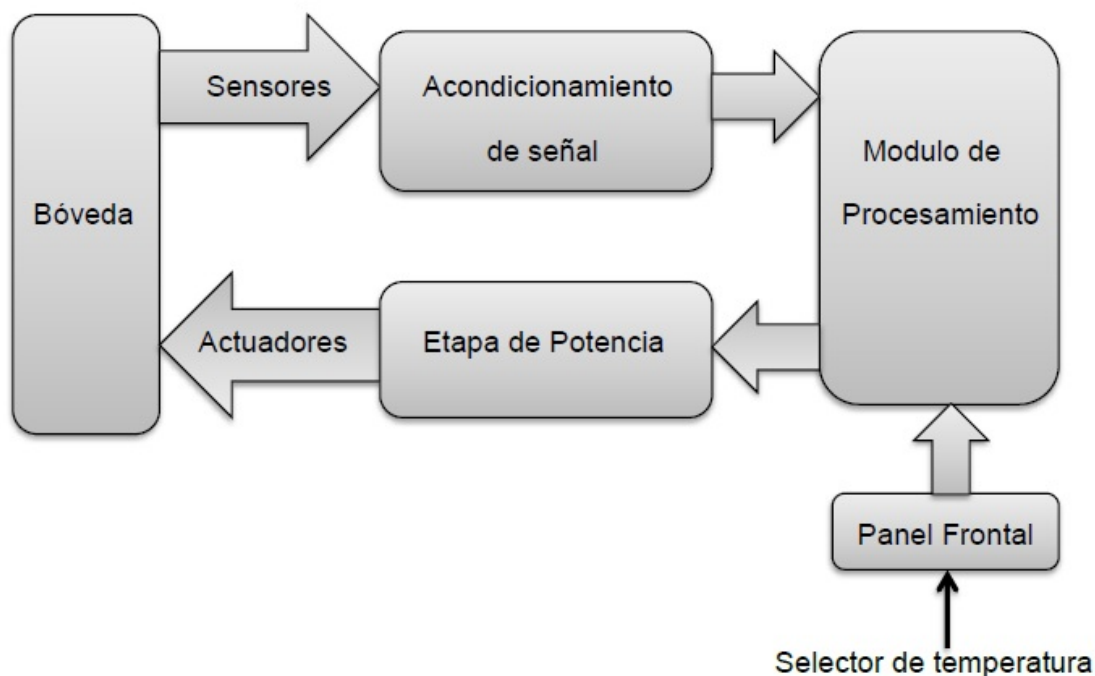


FIGURA 3.1: Diagrama a bloques del sistema general

- El módulo de procesamiento es el encargado de transformar la información de los sensores y controlar los actuadores. Envía y recibe información del panel frontal. De esta forma controla la regulación de la temperatura y velocidad de los ventiladores.
- El panel frontal está conformado por un teclado y un LCD con los cuales el usuario ingresa la temperatura deseada hacia el módulo de procesamiento.
- La etapa de potencia acondiciona la señal para tener un detector de fase y con ello poder controlar la potencia del calentador y la velocidad de los ventiladores.

El diagrama a bloques del sistema de control se muestra en la Figura 3.2.

3.2 Secador solar de alimentos

El secador funciona al utilizar los rayos del sol para calentar el aire que sube, secando las rebanadas de alimentos que se encuentran en charolas.

Los materiales empleados para la construcción del secador consistieron básicamente en perfil ángulo de 1 pulgada para la elaboración de la estructura, madera para

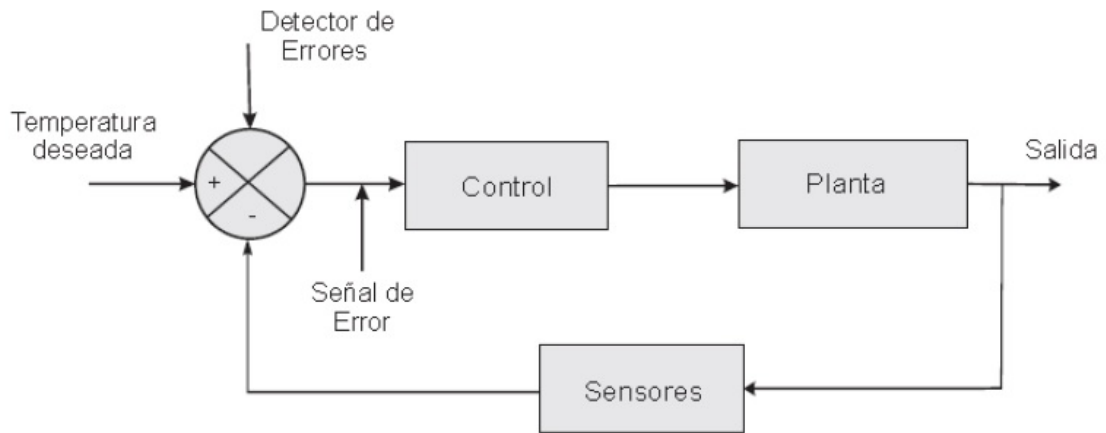


FIGURA 3.2: Diagrama a bloques de un sistema de control de temperatura

ferrar la estructura, latas de aluminio y pintura negro mate. La metodología empleada fue la del secador solar tipo armario, esta consiste en una colectora o captadora de radiación solar, en la parte interna del colector se tiene una serie de latas de aluminio pintadas igualmente de negro mate, colocadas en forma de zigzag a lo largo y ancho de todo el colector, permitiendo la absorción de la radiación solar.

La parte superior del colector se cubre con un cristal transparente a fin de generar y retener la mayor cantidad de calor posible teniendo un efecto invernadero dentro del colector solar como se muestra en la Figura 3.3.

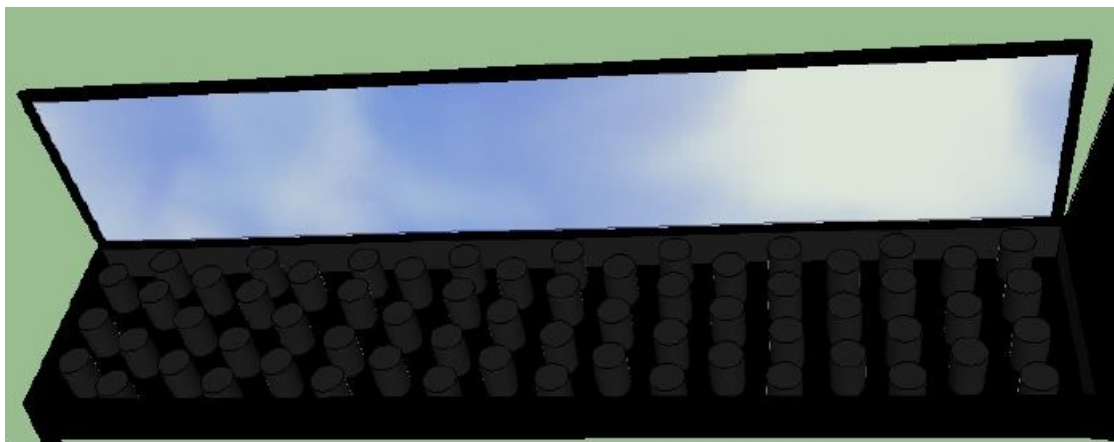


FIGURA 3.3: Parte interna del colector solar

A esta base se adosa el armario donde se ubican las bandejas de secado donde se colocan los alimentos a procesar las cuales tienen la particularidad de ser extraíbles

para una mejor manipulación al colocar los alimentos, colocadas en forma vertical Figura 3.4.

En su parte frontal se deja una abertura que permite la entrada de aire a la cámara donde se calienta, y al ser retenido se crea un efecto invernadero lográndose elevar la temperatura calentando el aire de la cámara; el aire fresco que va ingresando eleva el aire caliente existente hacia las bandejas de secado donde se encuentran los alimentos provocando su deshidratación y secado.

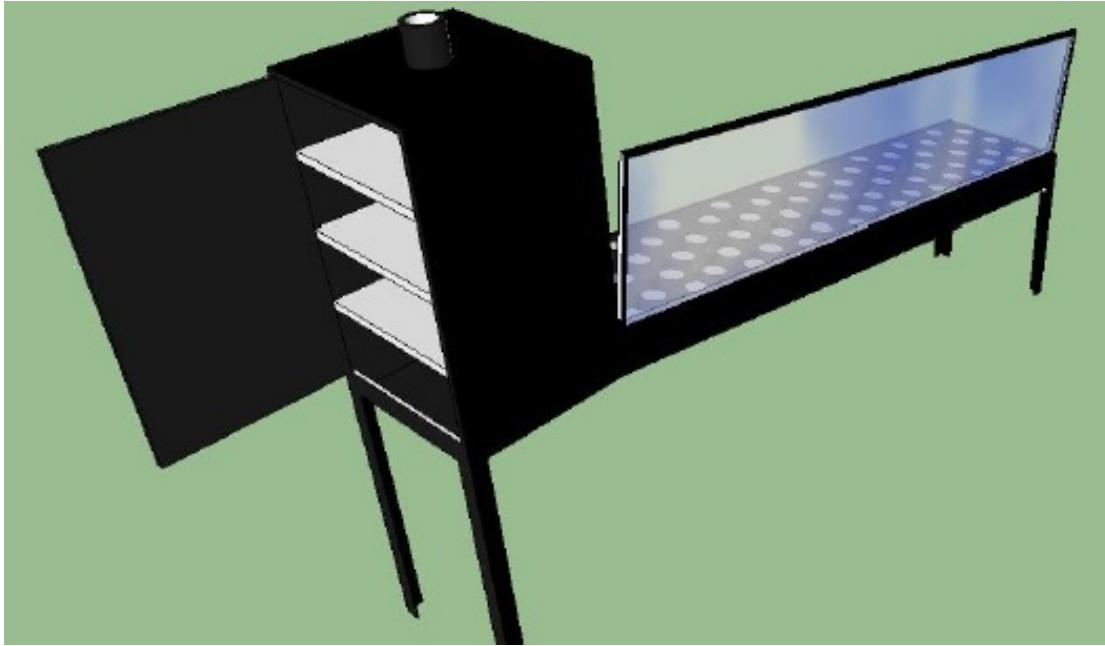


FIGURA 3.4: Diseño conceptual del secador solar

3.3 Partes del sistema de control de temperatura

El suministro principal de calor radica en el colector solar, lamentablemente la temperatura depende de las condiciones climáticas presentes en ese instante, para evitar la caída de temperatura, la bóveda contara con una resistencia eléctrica para suministrar calor de manera secundaria.

Para evitar que los alimentos dentro de la bóveda se cuezan en lugar de deshidratarse es importante que exista una circulación constante de aire, por medio de dos ventiladores.

Como se muestra en la Figura 3.5 y Figura 3.6, el control consiste en medir la temperatura y con base en la configuración deseada, aumentar o disminuir la

potencia que se le suministra al calefactor y aumentar o disminuir la velocidad del giro de los ventiladores.

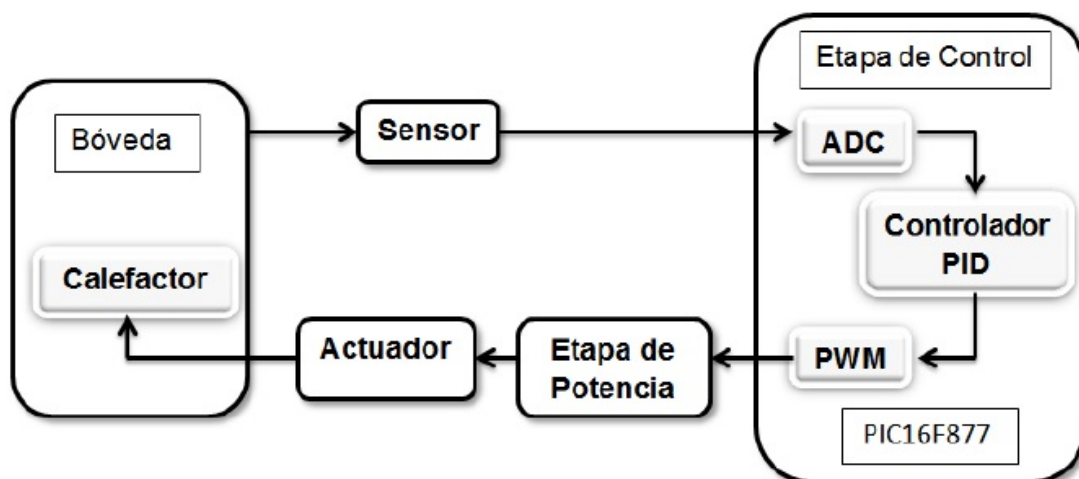


FIGURA 3.5: Sistema de control de temperatura

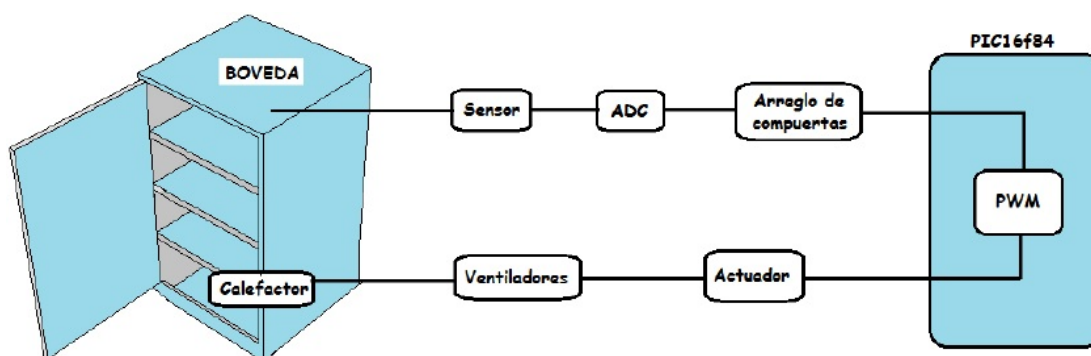


FIGURA 3.6: Sistema de control de flujo de aire

3.3.1 Sensor

El sensor de temperatura es el LM35, es un circuito integrado de precisión el cual está clasificado dentro de los transductores integrados.

La conexión de este sensor es sencilla debido a que en el sistema, el intervalo de temperaturas a medir es desde temperatura ambiente aproximadamente 20 oC hasta 80 oC. La configuración usada se muestra en la Figura 3.7.

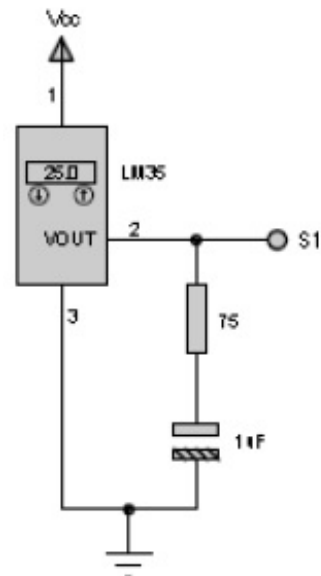


FIGURA 3.7: Diagrama de conexión del sensor de temperatura LM35

3.3.2 Actuadores

El secador tipo armario consta de dos actuadores que modifican su comportamiento los cuales son: calefactor y ventilador.

El calefactor se encarga de incrementar la temperatura del aire que pasa por el colector y entra a la boveda de secado siempre y cuando la acción del sol no sea suficiente para elevar la temperatura. El calefactor tiene una resistencia de 50Ω y consume una corriente de $5.5 A$ y una potencia de $700 W$, en la Figura 3.8 se muestra el calefactor montado en la base del horno.



FIGURA 3.8: Resistencia eléctrica

El ventilador es el actuador encargado de ingresar aire a la cámara de secado. Este tiene un consumo de 12 Volts y. La Figura 3.9 muestra el ventilador montado entre el colector y la bóveda.



FIGURA 3.9: Ventiladores

3.3.3 Etapa de potencia

En aplicaciones de potencia normalmente la fuente de donde se toma la energía es de corriente alterna(AC). El manejo de potencia implica tener consideraciones de seguridad tanto para el usuario como para la etapa electrónica del sistema. Para mantener protegida la etapa digital es necesario que exista aislamiento eléctrico entre ésta y la parte de AC.

Los Optoacopladores, conectan la entrada con la salida por medio de luz, de esta forma se consigue el aislamiento de hasta 7500 Volts. En la figura 3.10 se muestra un optoacoplador con salida a TRIAC y detector de cruce por cero. Cuando el diodo emisor de luz (LED) se polariza directamente emite luz, esta luz sirve como señal de disparo para el Triac, haciendo que pase al estado de conducción. Este tipo de dispositivos se usa para disparar a su vez un Triac con mayor capacidad de corriente. El diagrama esquemático del circuito de la figura 3.10 corresponde con el del MOC3031.

Esta etapa es de mucha importancia ya que es la encargada de brindar a los actuadores del horno la energía necesaria para su correcto funcionamiento, además

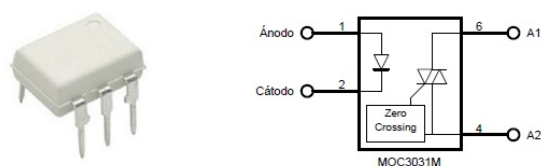


FIGURA 3.10: MOC

de aislar la etapa de control mediante el uso de Transistores MOSFET con detector de cruce por cero.

El control de potencia usado para el funcionamiento del calefactor y el ventilador consiste en encender y/o apagar los actuadores mediante el uso de MOSFET, los cuales son controlados mediante una señal proveniente del microcontrolador que indica el número de ciclos durante el cual los MOSFET dejarán pasar la señal al actuador.

Para conmutar cargas de AC se usan tiristores. Los tiristores forman una familia de tres terminales, entre los que se encuentran el rectificador controlado por silicio (SCR), el TRIAC, el tiristor de bloqueo por puerta (GTO) y el tiristor MCT o tiristor controlado por MOS (metal-oxido semiconductor). Sus tres terminales son ánodo, cátodo y compuerta. Los tiristores pueden soportar altas corrientes y altas tensiones de bloqueo en aplicaciones de alta frecuencia, pero las frecuencias de conmutación están limitadas a valores de 10 y 20 kHz.

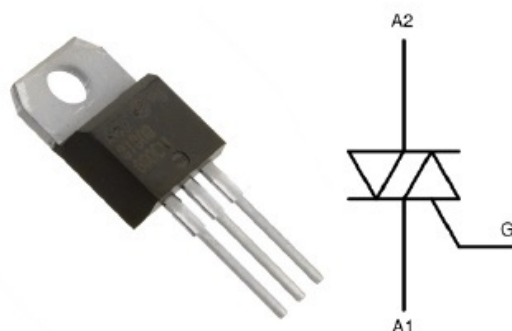


FIGURA 3.11: TRIAC

En la Figura 3.12 se muestra la configuración típica para el disparo de un triac, El uso de optoacopladores con detector de cruce por cero además de ayudar a aislar la etapa de control con la etapa de potencia, también ayuda a reducir o eliminar la Interferencia Electromagnética.

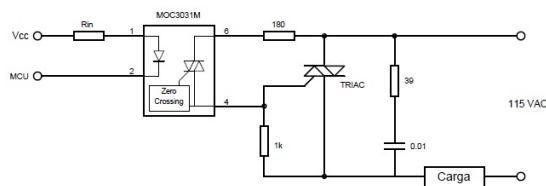


 FIGURA 3.12: Configuración típica para el disparo de un TRIAC

3.3.4 Panel frontal

El panel frontal del horno estará conformado por un LCD y 2 botones. Mediante los botones el usuario ingresará la temperatura deseada según el alimento a deshidratar, este dato es tomado por el microcontrolador como el set point y de esta manera efectuar la regulación del PWM.

En LCD se despliegan al mismo tiempo 2 datos; el primero es la temperatura actual que se encuentra dentro de la bóveda tomada por el sensor, conforme la temperatura aumenta el sensor manda la señal y está se visualizará en el LCD. El display de cuarzo líquido usado, consta de 2 líneas y 16 columnas como lo muestra la Figura 3.13.

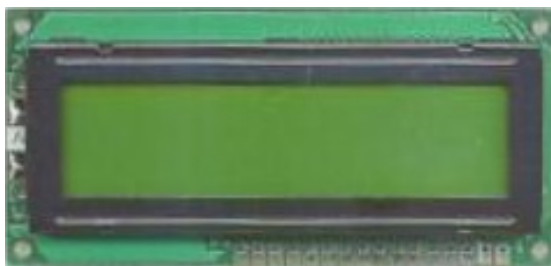


 FIGURA 3.13: LCD 2 líneas X 16 columnas

3.4 Controlador PID

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. Los controladores PID analógicos, son principalmente de tipo hidráulico, neumático, electrónico, eléctrico o sus combinaciones. En la actualidad, muchos de estos se transforman en formas digitales mediante el uso de microprocesadores. Se puede indicar que un controlador PID responde a la siguiente ecuación: [9]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Donde $e(t)$ es el error de la señal y $u(t)$ es la entrada de control del proceso. K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa. [9]

En el dominio de la frecuencia, el controlador PID se puede escribir como:

$$U(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] E(s) \quad (3.2)$$

Un controlador PID tiene tres parámetros (K_p , T_i , T_d) los cuales interactúan uno con otro y su ajuste para obtener el mejor control puede ser muy complicado.

3.4.1 Controlador digital PID

La función de transferencia para el controlador PID digital se convierte en:

$$U(z) = E(z) K_p \left[1 + \frac{T}{T_i (1 - z^{-1})} + T_d \frac{(1 - z^{-1})}{T} \right] \quad (3.3)$$

También:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = a + \frac{b}{1 - z^{-1}} + c (1 - z^{-1}) \quad (3.4)$$

Donde:

$$a = K_p \quad b = \frac{K_p T}{T_i} \quad c = \frac{K_p T_d}{T} \quad (3.5)$$

Existen distintas posibilidades de la realización práctica de un controlador PID, una de las más habituales es la realización en paralelo:

3.5 Algoritmo de programación

El algoritmo utilizado para programar el PIC se muestra en la Figura 3.15. El muestreo (T) debe ser mayor que el tiempo de establecimiento del sistema en lazo abierto. En el modelo Ziegler-Nichols se toma un valor $T < \frac{\tau_0}{4}$. [9]

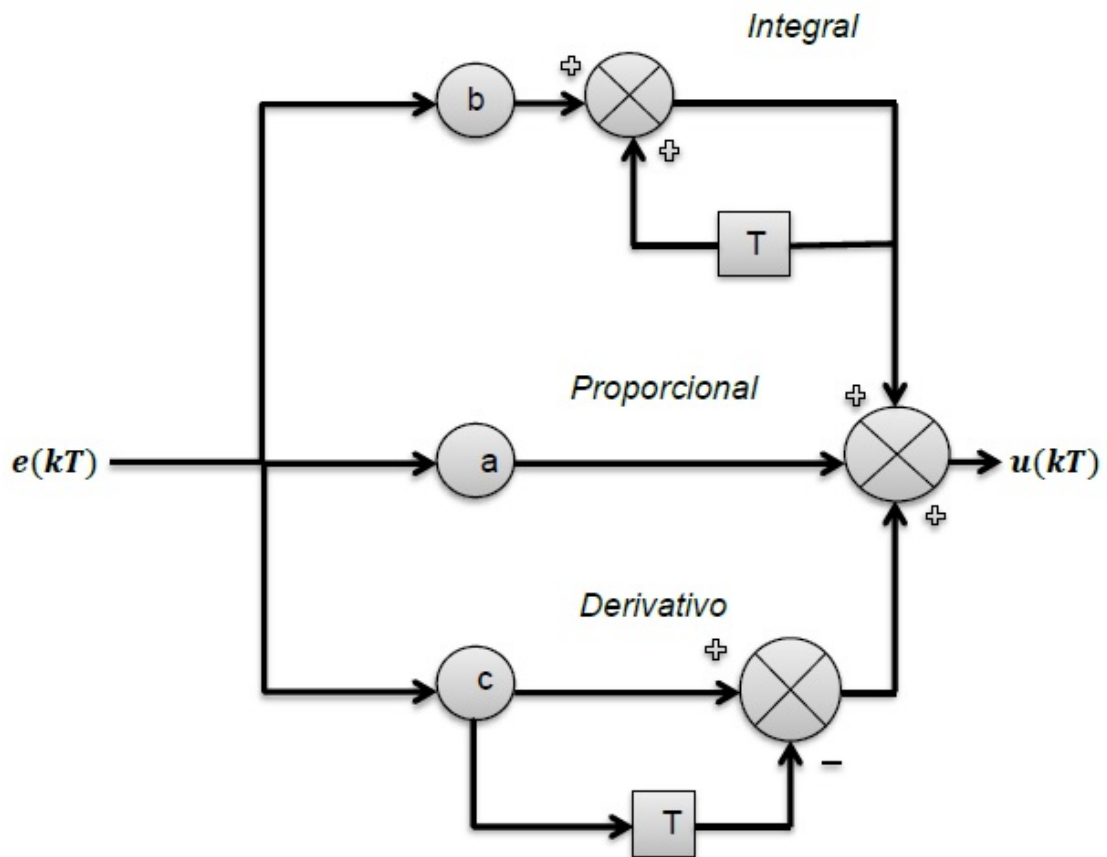


FIGURA 3.14: Diseño paralelo del controlador PID

3.6 Simulación

Para la implementación y simulación del controlador PID se utilizara el software ISIS Proteus. En la categoría transducers existe un componente llamado OVEN. OVEN es un horno o sistema de calefacción que posee un sensor de temperatura llamado T, además se le pueden variar sus características funcionales tales como: Temperatura ambiente de trabajo, resistencia térmica, constante de tiempo de establecimiento, constante de tiempo de calentamiento, coeficiente de temperatura y potencia de calentamiento [11]

Para facilidades de simulación se establecerán los siguientes valores de parámetros funcionales del modelo OVEN: [11]

$$Temperaturaambiente(^{\circ}C) = 25$$

$$ThermalResistencetoAmbient(^{\circ}C/W)$$

$$OvenTimeConstan(sec) = 10$$

$$HeaterTimeConstant(sec) = 1$$

$$Temperaturecoefficient(V/^{\circ}C) = 1$$

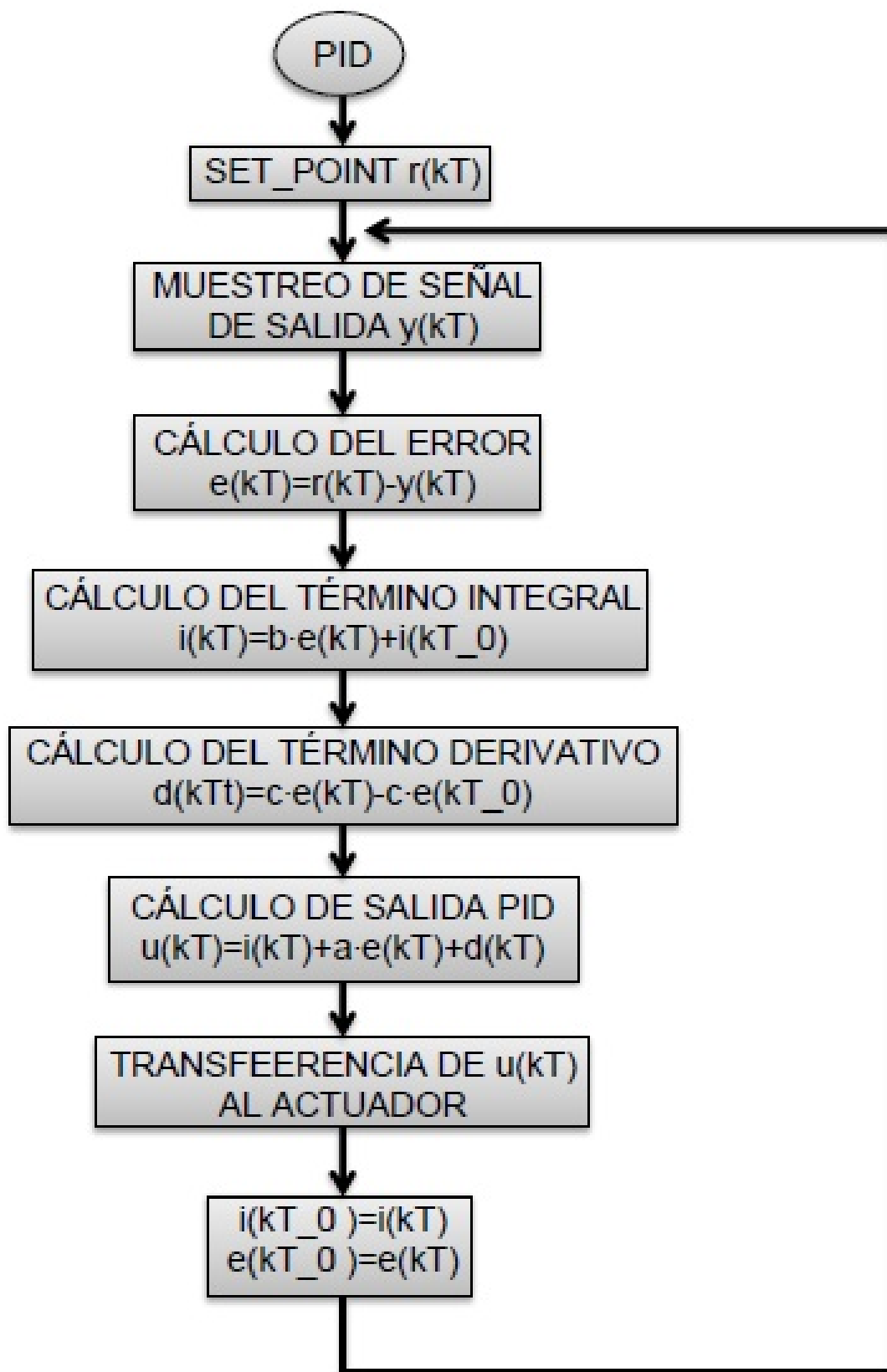


FIGURA 3.15: Algoritmo de programación del PID digital en el microcontrolador

$$\text{HeatingPower}(W) = 120$$

El modelo esquemático OVEN contiene un terminal sensor T que entrega un voltaje proporcional a la temperatura del sistema.

Consideraciones preliminares:

- Se requiere de un conversor Análogo/Digital para ingresar el voltaje entregado por el sensor T del modelo OVEN. Dado que dicho terminal entrega $1V/^{\circ}C$, se utiliza un divisor de voltaje para adecuar la señal del sensor a niveles permitidos por el conversor A/D; en este caso se utiliza un divisor de voltaje con factor 100, es decir, que para una temperatura de $100^{\circ}C$ (100V) el conversor recibirá 1V.
- El control se realiza mediante una señal PWM proporcional a la señal generada por el controlador.

Por tanto el uso del microcontrolador PIC16F877A es pertinente para la aplicación descrita.

3.7 Implementación de un control digital PID

Para la realización del código fuente se utilizó el compilador C CCS Compiler. De acuerdo al algoritmo planteado en la Figura 3.15 para programación de PID en el microcontrolador, el código fuente propuesto es: [11]

3.7.1 Código fuente en lenguaje C para un controlador PID discreto

```
INCLUDE < 16F877A.H >
DEVICEADC = 10
USEDelay(CLOCK = 4000000)
FUSESXT, NOWDT
VOIDMAIN()
INT16 valor, control; //Variables para lectura de ADC y señal de Control a
//modulo CCP
FLOAT a, b, c; //Constantes para parámetros de controlador PID
FLOAT TEMPERATURA_LIMITE; //Referencia de Temperatura
```

```

Float rt, eT, iT, dT, yT, uT, iT0, eT0; //Variables del controlador PID
Float max, min; //Variables para anti – windup
min = 0.0;
max = 1000.0;
iT0 = 0.0;
eT0 = 0.0;
a = 0.1243;
b = 0.0062;
c = 0.6215;
TEMPERATURA_LIMITE = 600.0; //Set Point  $r(kT) = 60^{\circ}C$ 
setup_timer2(t2divby4, 249, 1); //Configuración de Timer 2 para establecer frec. PWM a //1kHz
setup_ccp1(ccp_pwm); //Configurar módulo CCP1 en modo PWM
setup_adc_ports(all_analog); //Configurar ADC
setup_adc(adc_clock_internal);
set_adc_channel(0); //Seleccionar Canal 0 para sensor de Temperatura
while(true)
valor = read_adc(); //Leer ADC
yT = 5000.0 * valor / 1024.0;
rT = TEMPERATURA_LIMITE;
eT = rT - yT; //Calcular señal de error  $e(kT)$ 
iT = b * eT + iT0; //Calcular término integrativo  $i(kT)$ 
dT = c * (eT - eT0); //Calcular termino derivativo  $d(kT)$ 
uT = iT + a * eT + dT; //Calcular señal de control  $u(kT)$ 
if (uT > max) //Anti – windup
uT = max;

else
if (uT < min)
uT = min;

control = uT;
set_pwm1_duty(control); //Transferencia de señal de control al actuador
iT0 = iT;
eT0 = eT;
delay_ms(100); //Periodo de muestreo  $T = 0.1s$ 

```


Capítulo 4

Resultados y Discusiones

En el capítulo anterior se describió la forma en que se realizó el control del horno para el deshidratado de alimentos. En este capítulo se van a describir las pruebas realizadas al secador solar, las cuales se dividen en pruebas de software y hardware.

Las pruebas de hardware consisten en monitorear las señales más importantes provenientes del hardware y verificar su comportamiento con respecto al que se esperaba, estas se realizaron con un multímetro.

Las pruebas de software básicamente se centran en el funcionamiento del programa para desarrollar un control PID digital, el programa para regular la velocidad de los ventiladores y la interfaz de usuario. Estos programas se realizaron en el ambiente de programación PIC C CCS Compiler, ISIS Proteus y MPLAB.

Las pruebas a realizar son de caja negra y blanca. Las pruebas de caja negra son aquellas que ven al sistema como un todo, en el cual existen entradas y salidas. Las pruebas de caja negra se realizaron al programa, con el cual se pudo conocer el comportamiento del sistema en general. Las pruebas de caja blanca se le realizaron al hardware con el fin de conocer el comportamiento de las etapas del sistema de acuerdo a lo planeado y diseñado anteriormente a nivel software.

Como se vio en el Capítulo 3, el sistema se dividió en 5 etapas, pero son dos las que nos interesa saber su funcionamiento: el sistema de control de temperatura y el sistema de control de flujo de aire.

4.1 Temperatura contra tiempo

En el capítulo 2 se describió un método para obtener los parámetros necesarios para construir un controlador PID llamado Sintonización mediante Ziegler – Nichols, de acuerdo a este método, la bóveda del secador tipo armario se sometió a varias pruebas para observar la respuesta del sistema en lazo abierto. Se conectó la resistencia eléctrica dentro de la bóveda y se tomaron las muestras de la temperatura a cada segundo, para dicha medición se ocupó un termopar, la Figura 4.1 muestra la gráfica de la temperatura (200 oC) contra el tiempo (300 s).

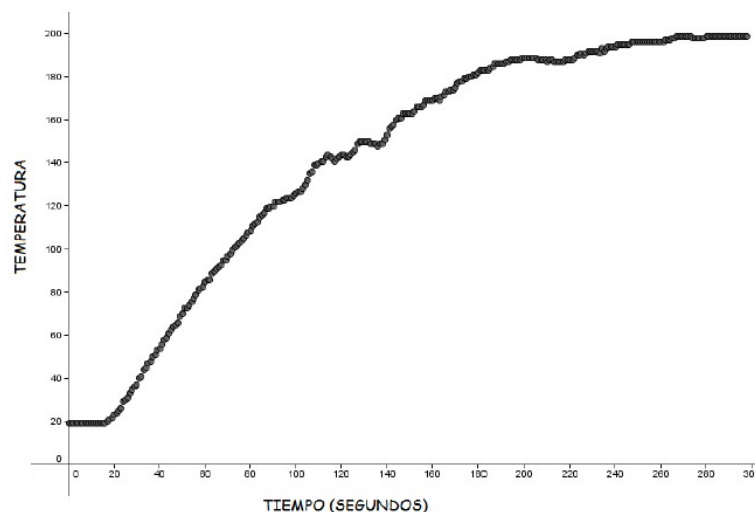


FIGURA 4.1: Gráfica de datos de la planta en lazo abierto

De acuerdo al método presentado se establece la pendiente más alta de la gráfica y se toman los valores, para ello ocupamos el software matemático GeoGebra para tratar de comparar y coincidir la grafica anterior con una ecuación matemática y facilitarnos la obtención de la pendiente, las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran el procedimiento para obtener los valores de t_0 , t_1 , y t_2 .

Estos valores se sustituyen en las ecuaciones correspondientes y se obtienen los coeficientes τ_0 , γ_0 y K_0 para esta respuesta.

$$\tau_0 = 18.57 - 14.31 = 4.26$$

$$\gamma_0 = 127.96 - 18.57 = 109.39$$

$$K_0 = \frac{199-19}{2-0} = 90$$

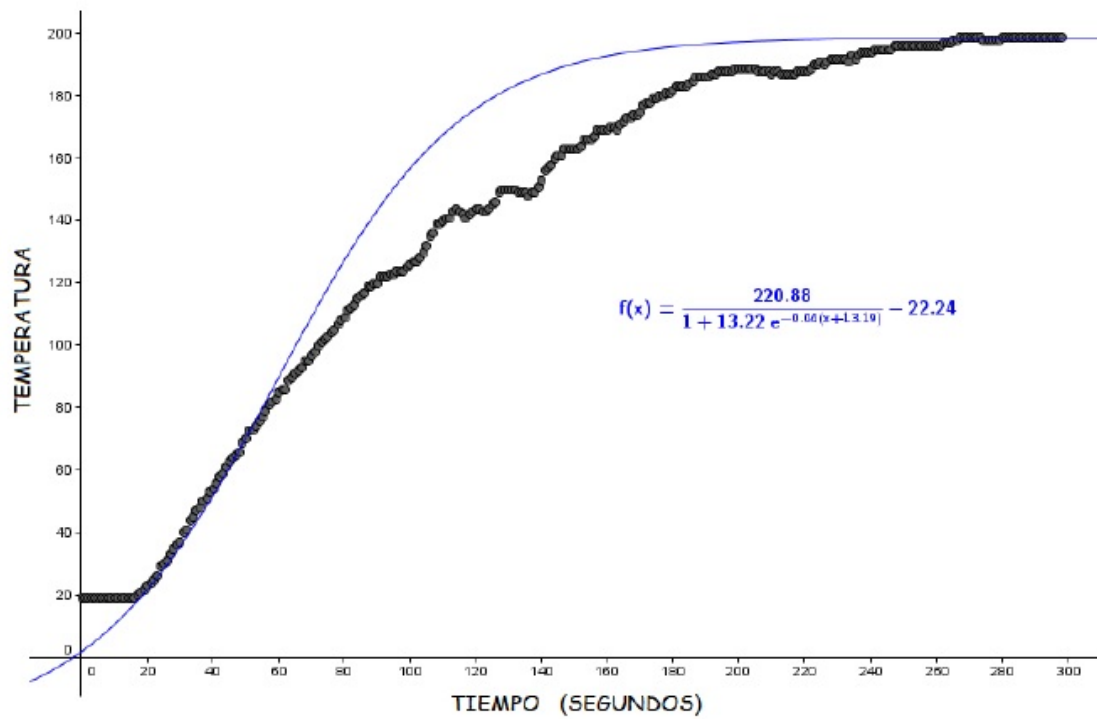


FIGURA 4.2: Función similar a los datos obtenidos.

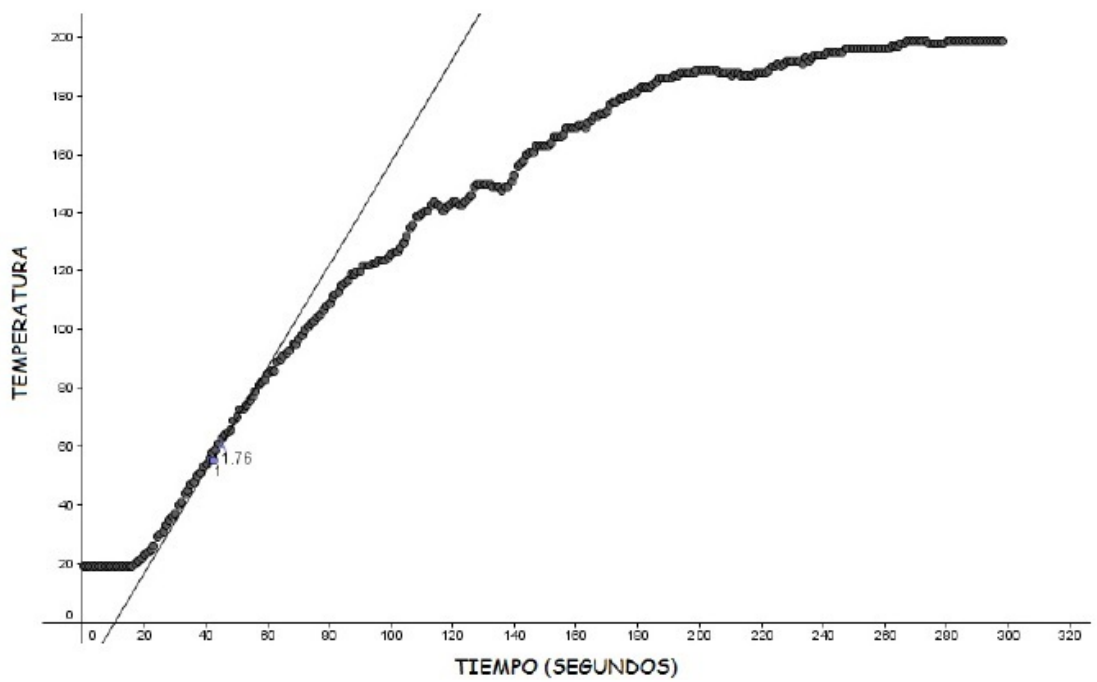
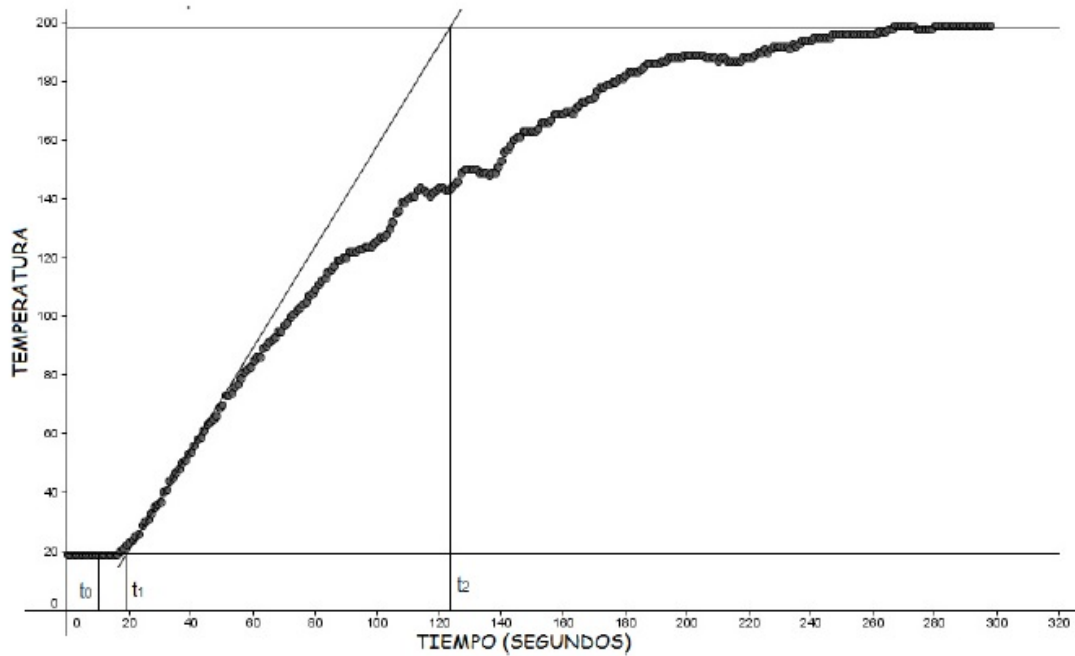


FIGURA 4.3: Pendiente más alta de la gráfica

FIGURA 4.4: Valores aproximados de t_0 , t_1 , y t_2

De esta manera podemos relacionar estos coeficientes con los parámetros del controlador por medio de las ecuaciones:

$$K_p = \frac{(1.2)(109.39)}{(90)(4.26)} = 0.342378716$$

$$T_i = 2(4.26) = 8.52$$

$$T_d = 0.5(4.26) = 2.13$$

Donde:

$$a = 0.342378716$$

$$b = \frac{(0.342378716)(0.8)}{8.52} = 0.032148236$$

$$c = \frac{(0.342378716)(2.13)}{0.8} = 0.91158333$$

Finalmente estos valores obtenidos se sustituyen en el programa del controlador digital PID.

4.2 Comportamiento en la simulación

En la Figura 4.5 se muestra la simulación en el software ISIS Proteus, como se puede observar el microcontrolador tiene conectado a los pines 13 y 14 un oscilador de cristal de cuarzo, es un oscilador de bajo consumo que trabaja a una frecuencia de 4 MHz. Los valores de los condensadores C_1 y C_2 dependen del cristal o resonador, en este caso se ocuparon 2 capacitores cerámicos de 22p.

Contiene 2 botones conectados al puerto B que corresponden a los pines 33 y 34 y son los encargados de aumentar o disminuir la temperatura que se desea controle el PIC16F877.

Para controlar los ciclos en que se mantendrá encendido o apagado el sistema OVEN a la salida del pin 17 se conecta un transistor MOSFET IRL1004

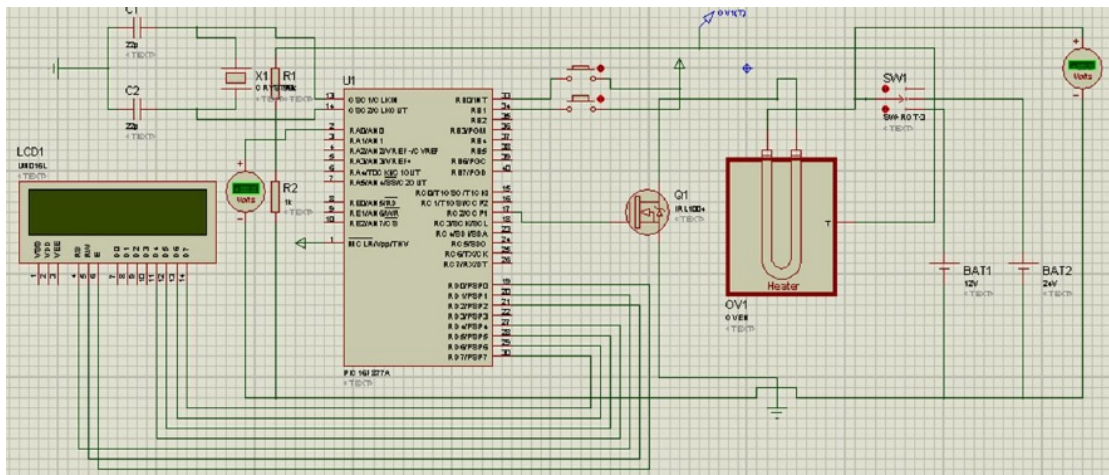


FIGURA 4.5: Diagrama de conexión para la simulación del programa de control PID

Para poder visualizar si el programa es capaz de control la temperatura seleccionada, además del display y los voltímetros conectados en el diagrama se agrega un análisis interactivo (interactive analysis) que ofrece el software ISIS Proteus, que muestra una gráfica del comportamiento durante todo el periodo en que funciona, Figura 4.6.

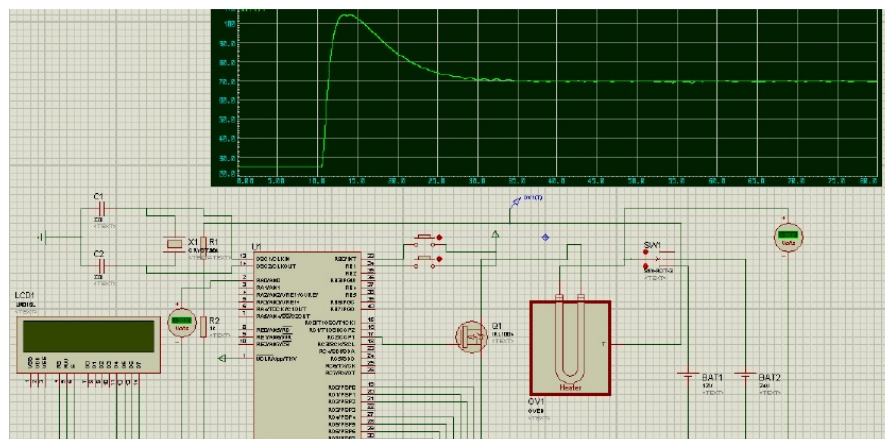


FIGURA 4.6: Interactive Analysis

Como se puede apreciar en las Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, el controlador PID responde de manera eficiente, de acuerdo a la referencia seleccionada en el display, se realizaron 3 pruebas a temperaturas diferentes, 61, 45 y 70 grados respectivamente.

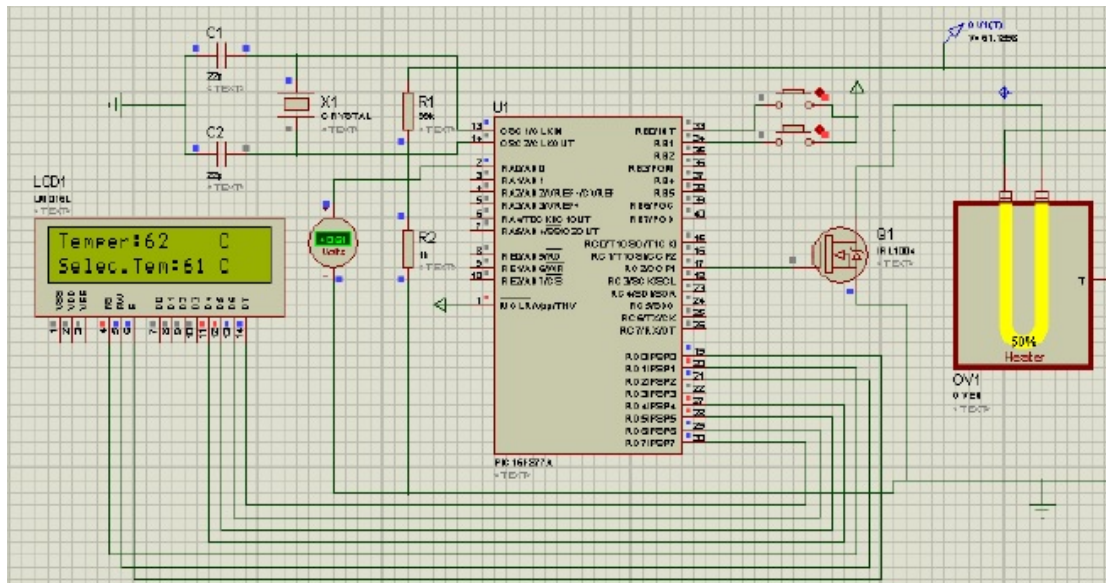


FIGURA 4.7: Selección de la temperatura a 61 grados

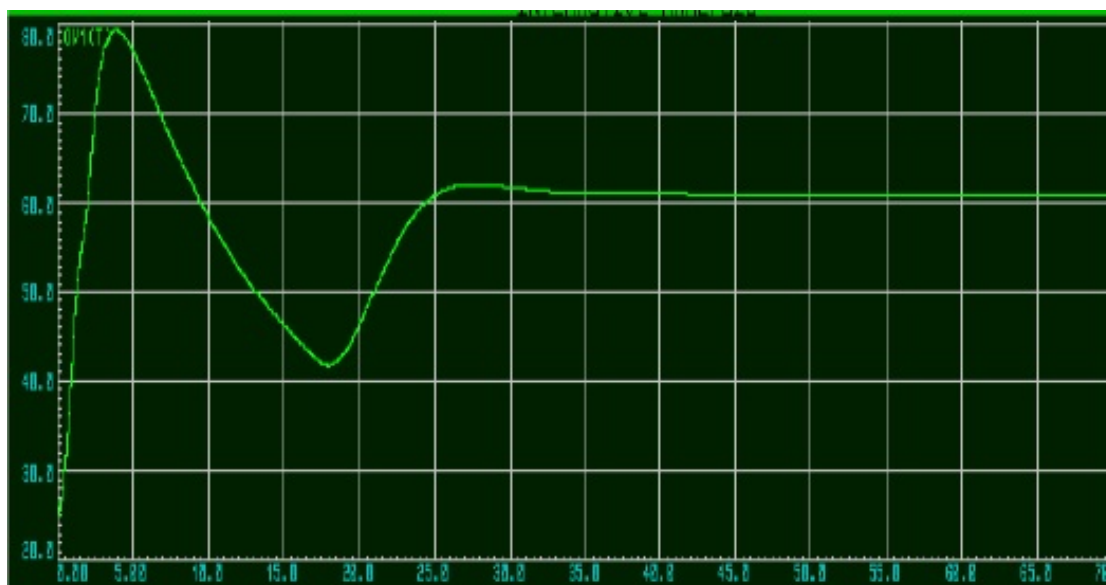


FIGURA 4.8: Respuesta del control PID a 61 grados

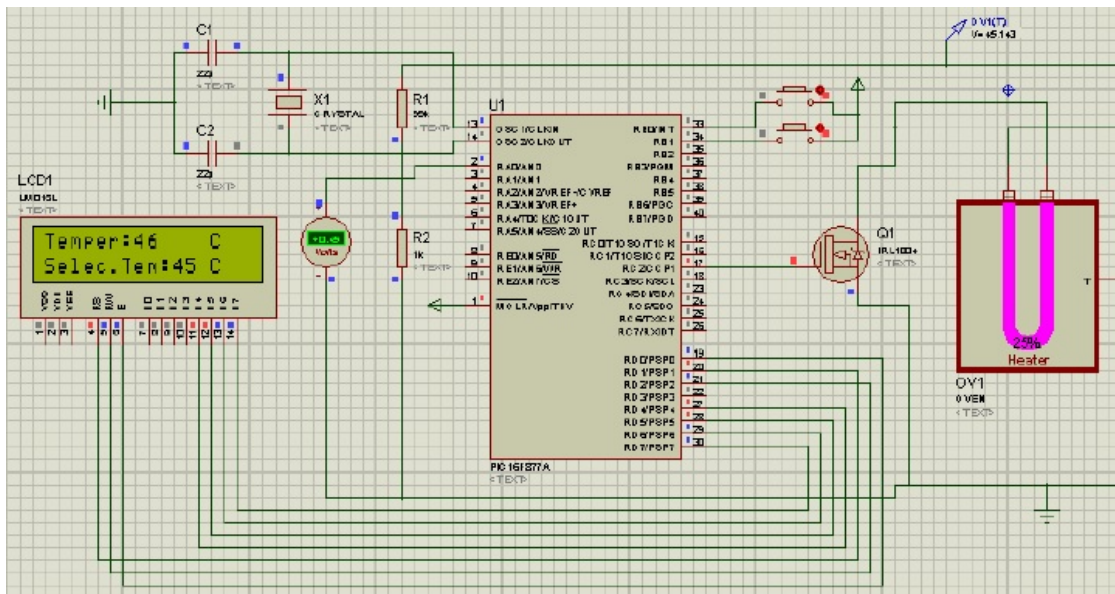


FIGURA 4.9: Selección de la temperatura a 45 grados

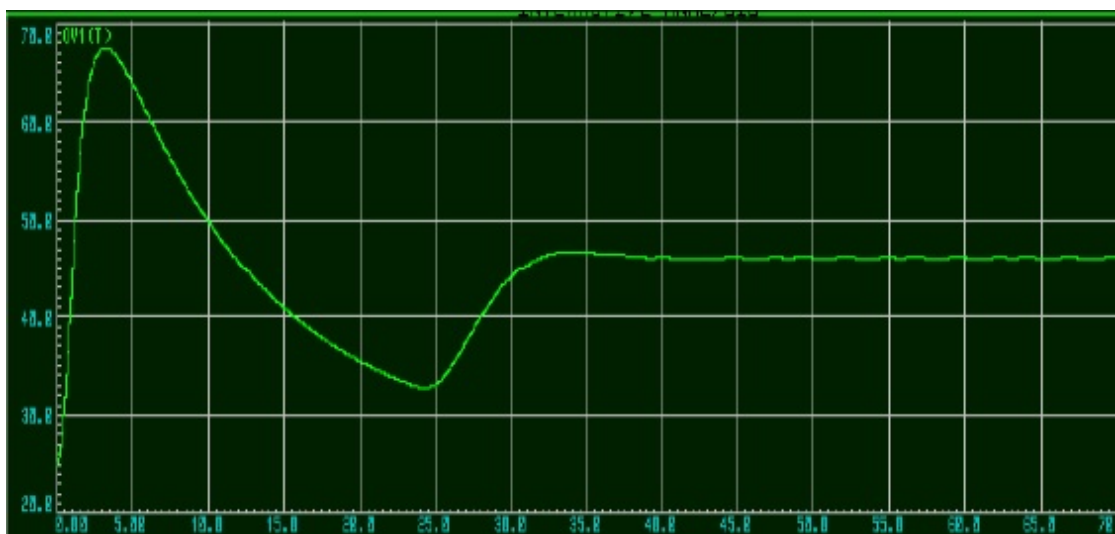


FIGURA 4.10: Respuesta del controlador PID a 45 grados

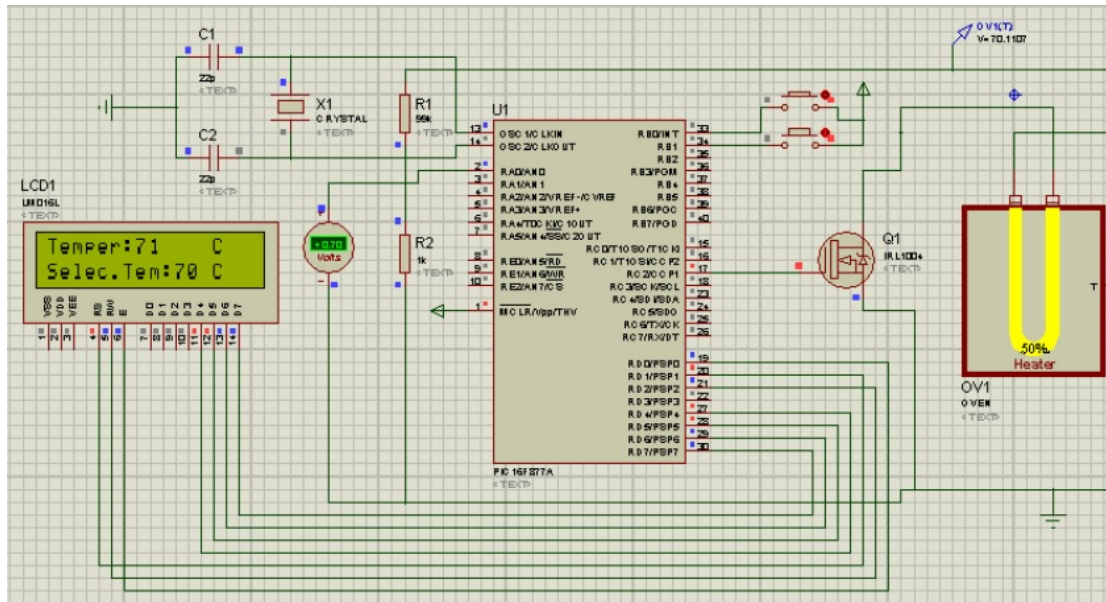


FIGURA 4.11: Selección de la temperatura a 70 grados

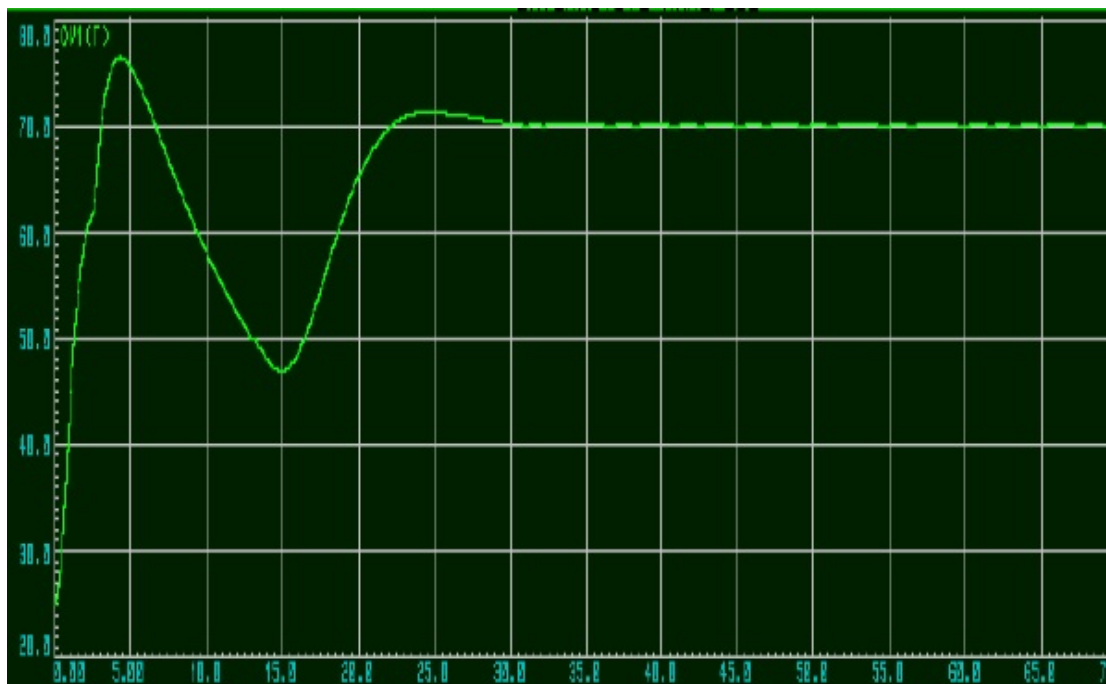


FIGURA 4.12: Respuesta del controlador PID a 70 grados

4.3 Simulación del control de la velocidad de los motores

La variación de la velocidad de los dos motores se realizó por medio de una modulación de ancho de pulsos, variando el tiempo en estado alto de la señal con respecto al tiempo en estado bajo se reduce la tensión media que le llega al motor y en consecuencia variaremos su velocidad. Leeremos una tensión con el convertor AD del PIC16F876A proporcionada por el LM35 como variador de la velocidad. Este valor determinará el tiempo de los pulsos en estado alto de la señal que controlará la velocidad [4.13](#)

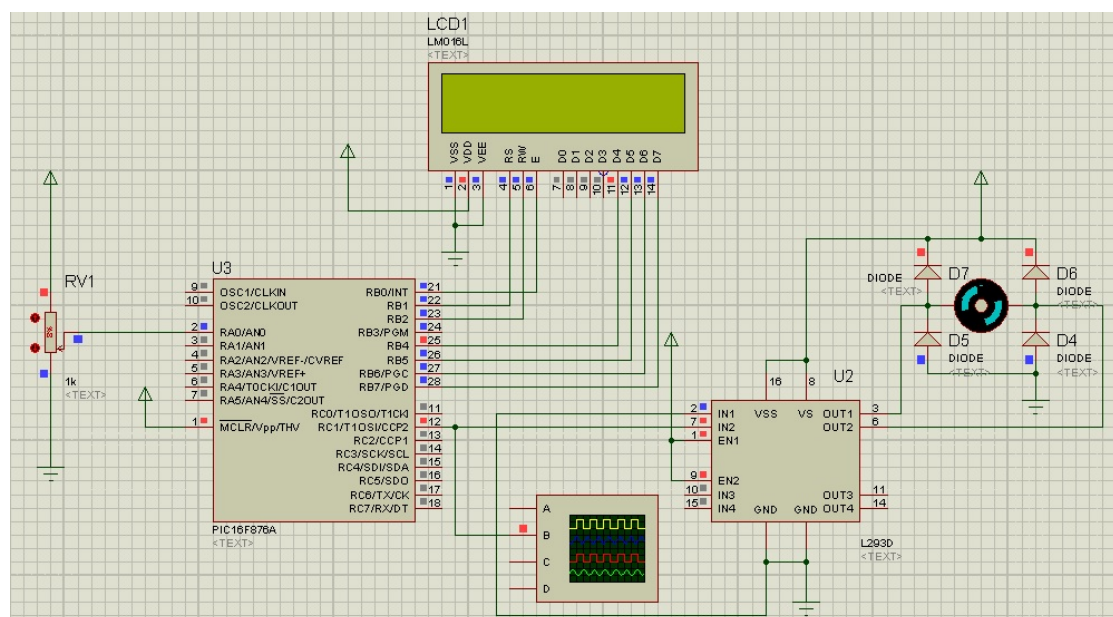


FIGURA 4.13: Diagrama esquemático del control de velocidad del motor

Capítulo 5

Conclusiones

- Se cumplió satisfactoriamente los objetivos propuestos mediante el diseño e implementación de un control PID en un PIC, el cual permite el control de temperatura, la selección de la temperatura se hace de forma manual.
- Se cumplió satisfactoriamente los objetivos propuestos de regular el flujo de aire a través de la programación de un PWM, el cual permite el control de temperatura.
- Una contribución importante fue la implementación de un controlador PID en un PIC 16F877 para el control de la temperatura, es un método básico para desarrollo de aplicaciones a bajo costo.
- La etapa de potencia se mostró muy eficiente, ya que en este trabajo se utilizaron dispositivos electrónicos (IRF640N y IRFZ44N), en lugar de los relevadores.
- Todos los componentes electrónicos utilizados en este trabajo son comerciales con el fin de facilitar su mantenimiento y reparación.
- Con el equipo se pueden realizar procesos de secado a condiciones constantes de temperatura y velocidad de flujo de aire, ya que se tiene un sistema electrónico que controla estas dos variables.
- El control de velocidad diseñado mantiene la velocidad del motor constante de acuerdo a una referencia elegida, sin importar la variación de la carga del motor

-
- El control y medición del flujo de aire es complicado debido a las condiciones a las que opera el horno, ya que no se encontró un sensor apropiado para dicha medición la calibración de flujo de aire se realizó experimentalmente variando la potencia del ventilador y midiendo su efecto dentro del horno. Sin embargo no fue posible encontrar una ecuación que describa el flujo de aire de forma continua, por lo que la calibración se hizo por niveles de flujos de aire.

Appendices

Apéndice A

Primer Apendice

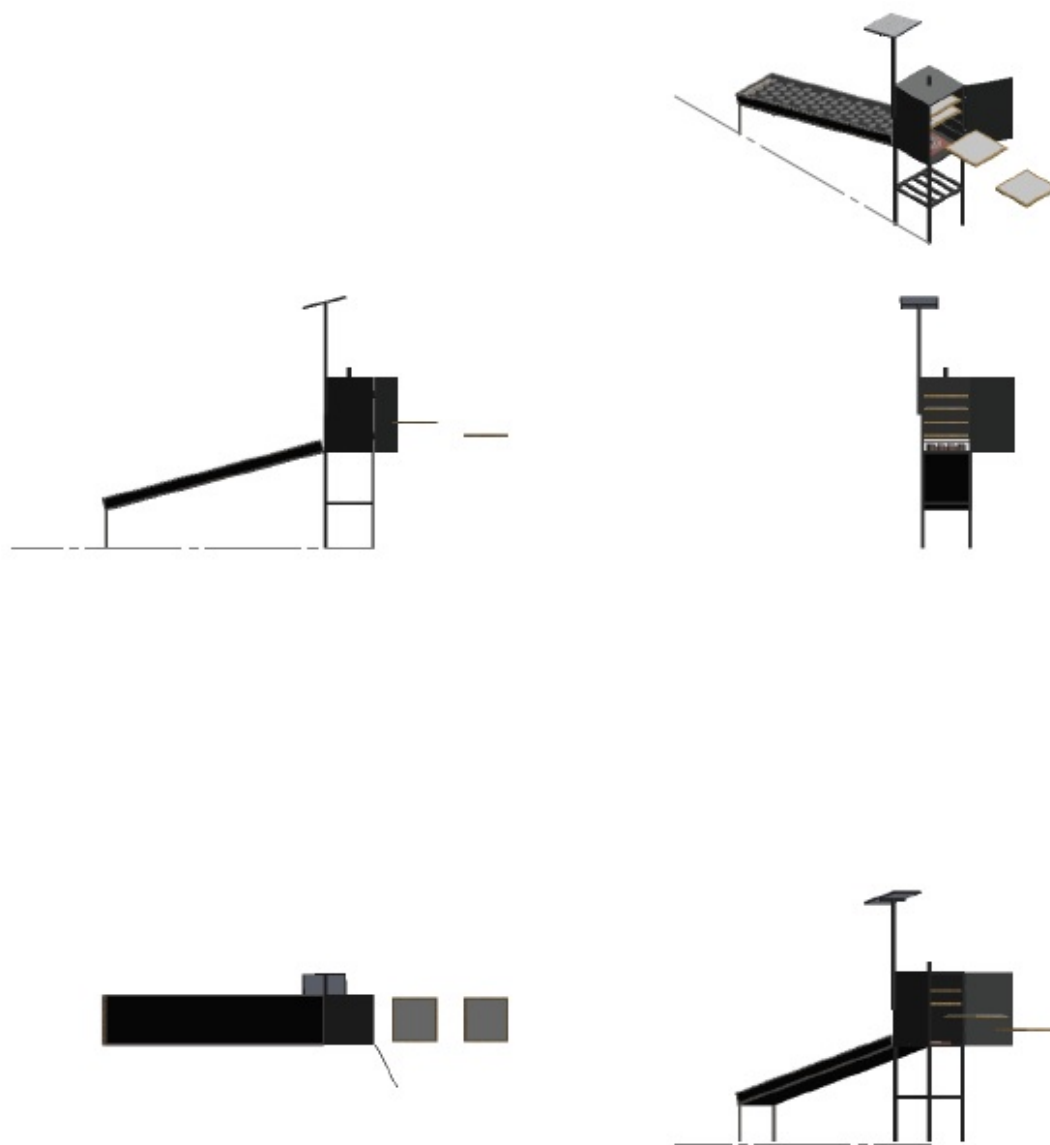


FIGURA A.1: Deshidratador solar

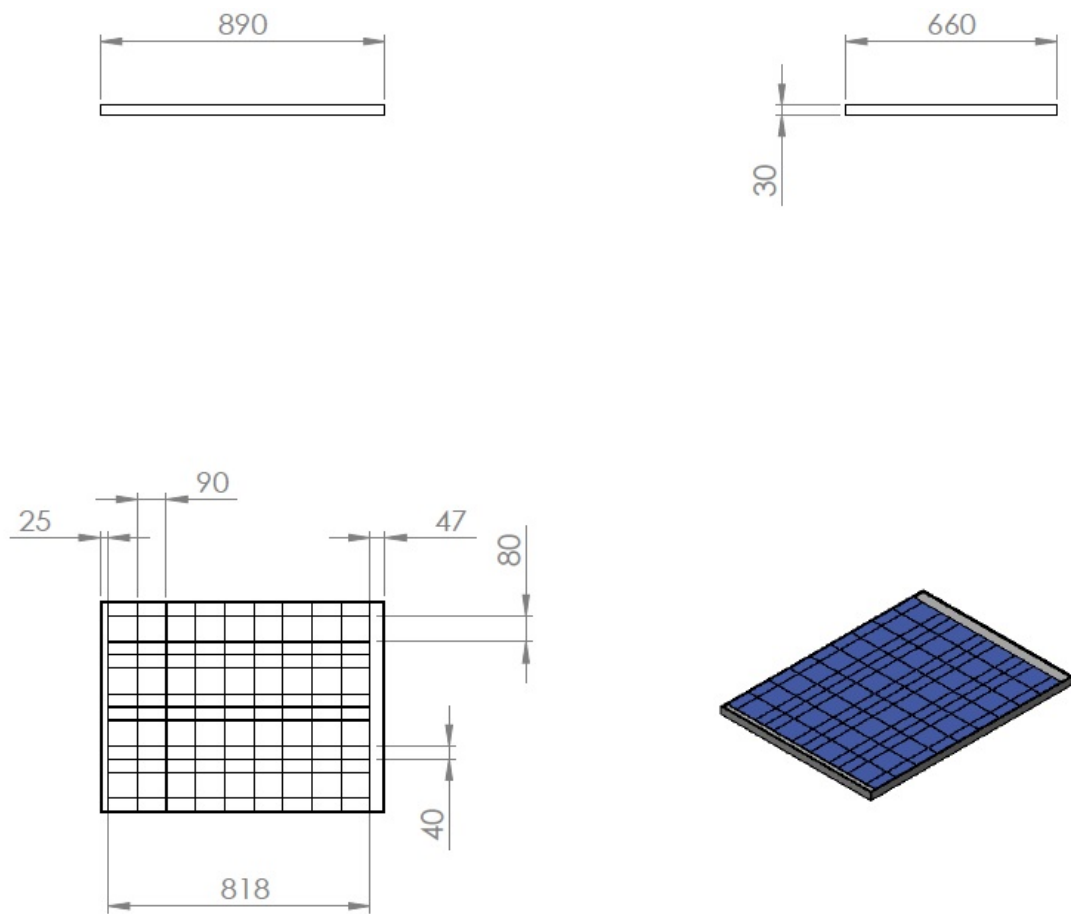


FIGURA A.2: Deshidratador solar

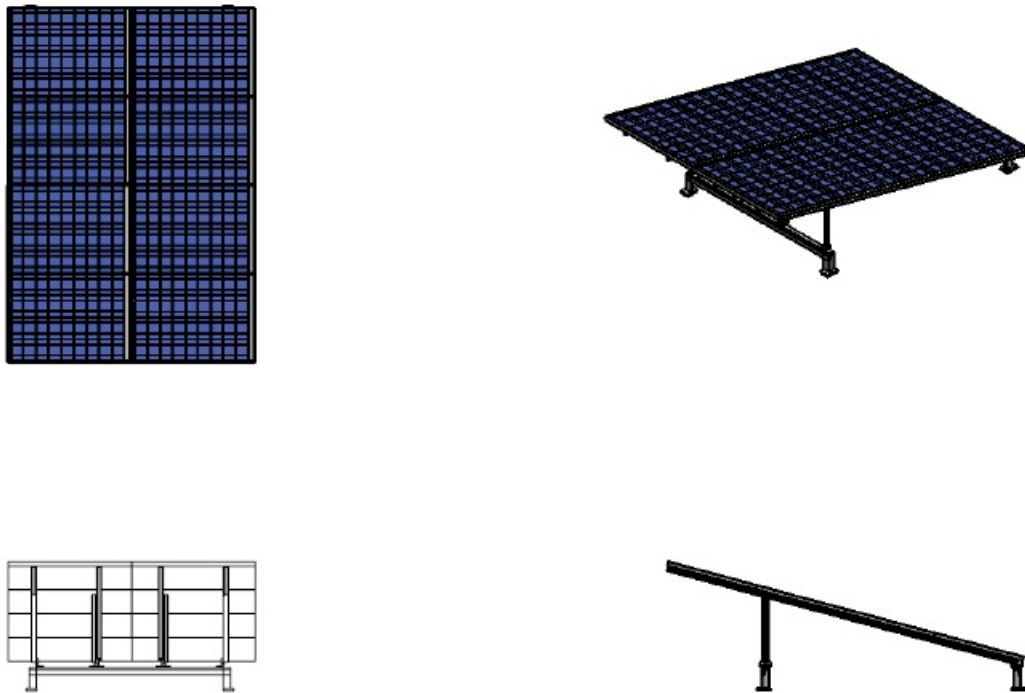


FIGURA A.3: Deshidratador solar

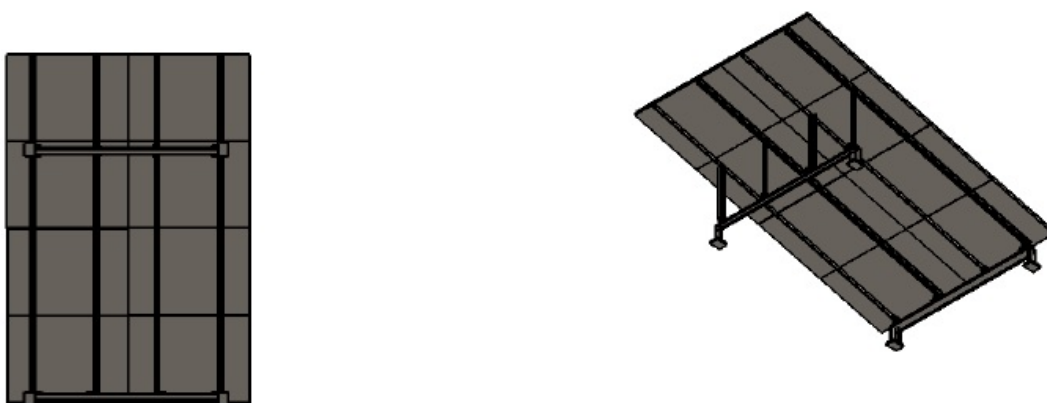


FIGURA A.4: Deshidratador solar

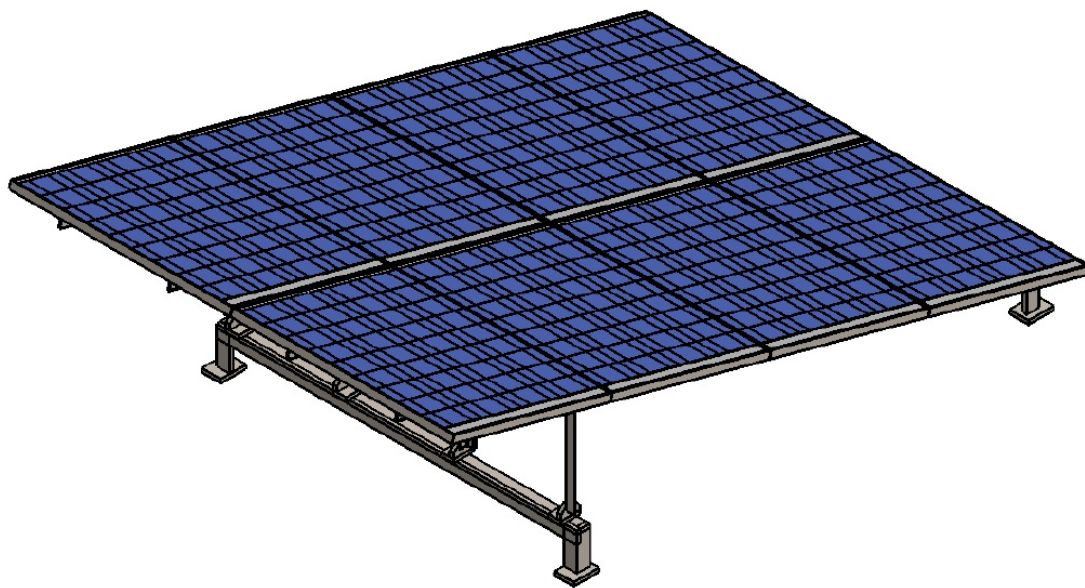


FIGURA A.5: Deshidratador solar

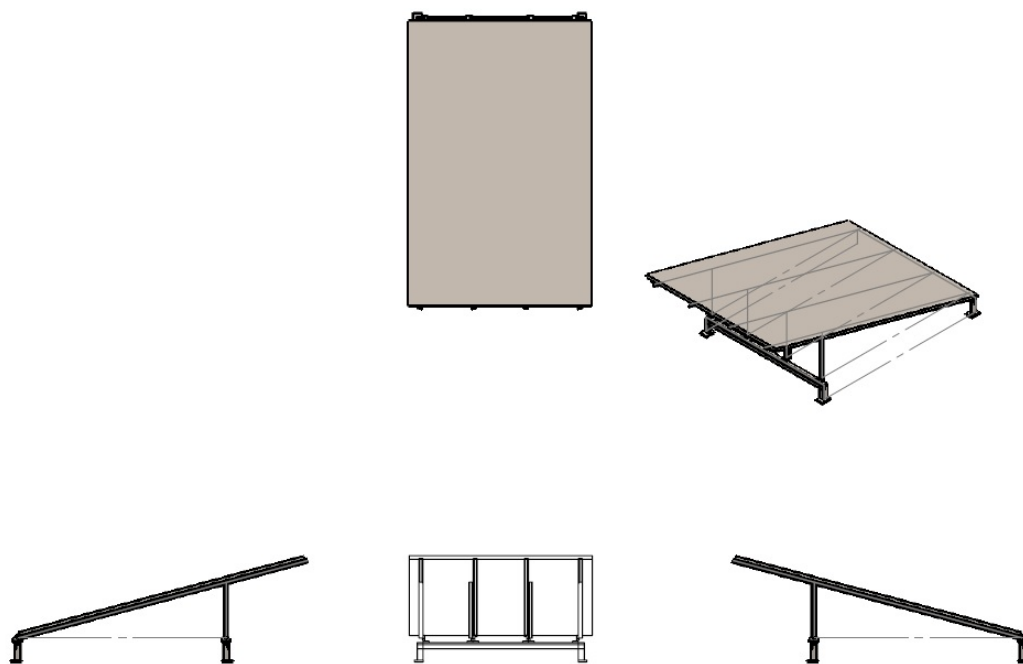


FIGURA A.6: Deshidratador solar

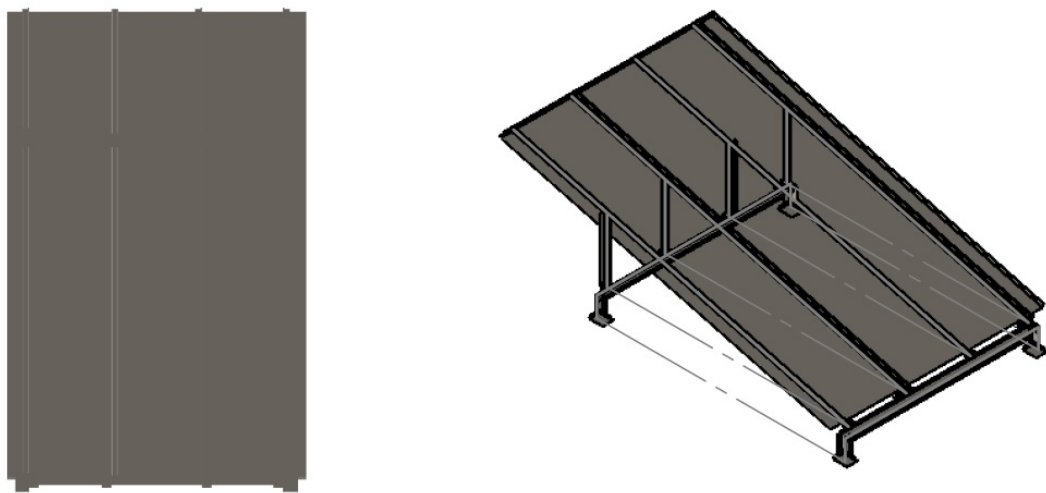


FIGURA A.7: Deshidratador solar

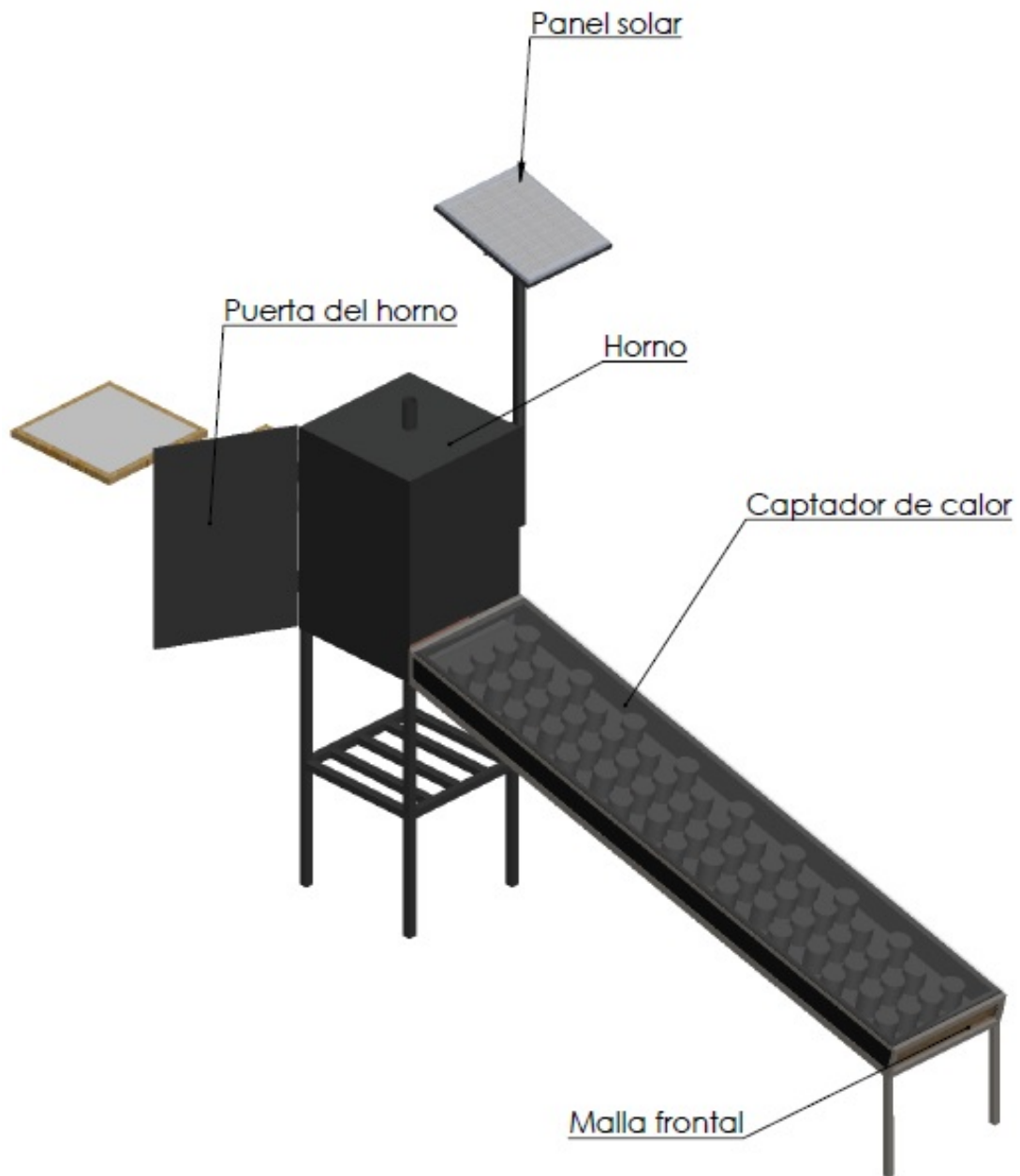


FIGURA A.8: Deshidratador vista frontal

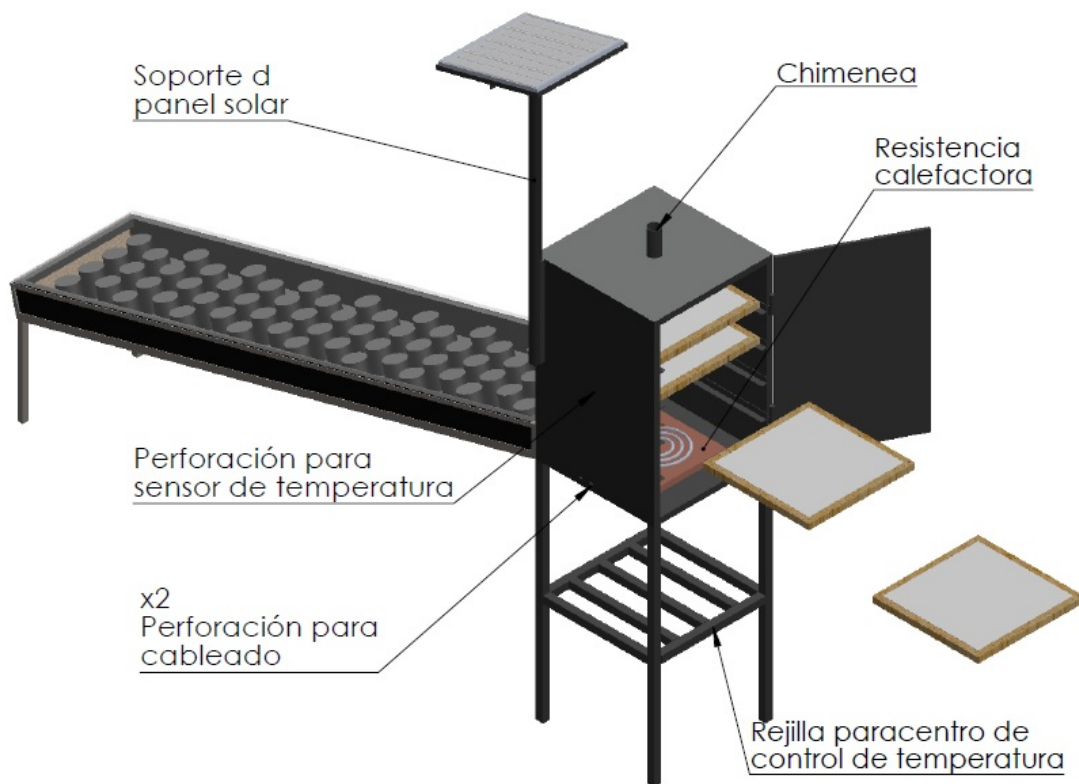


FIGURA A.9: Deshidratador vista posterior

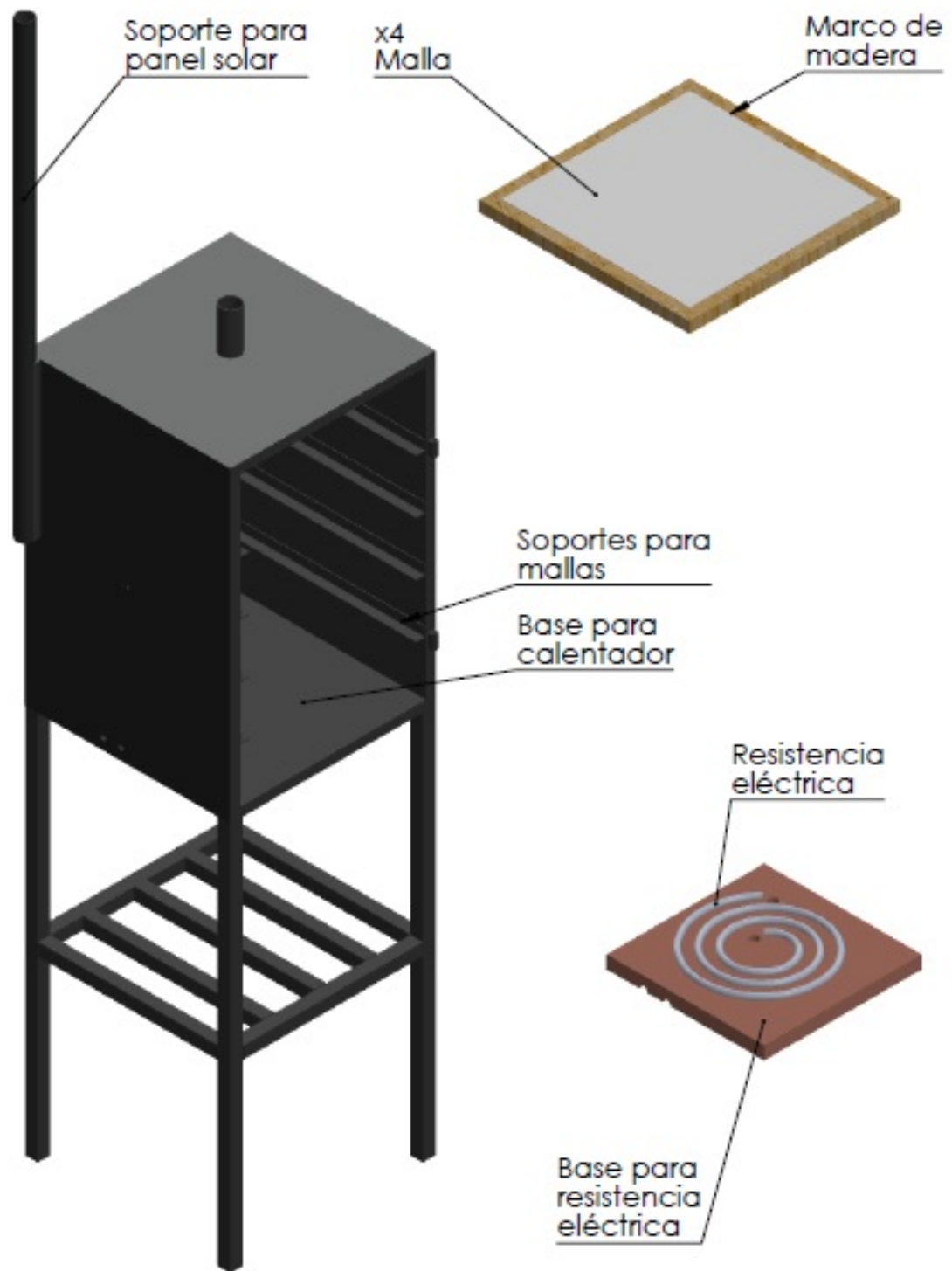


FIGURA A.10: Parte interna del horno

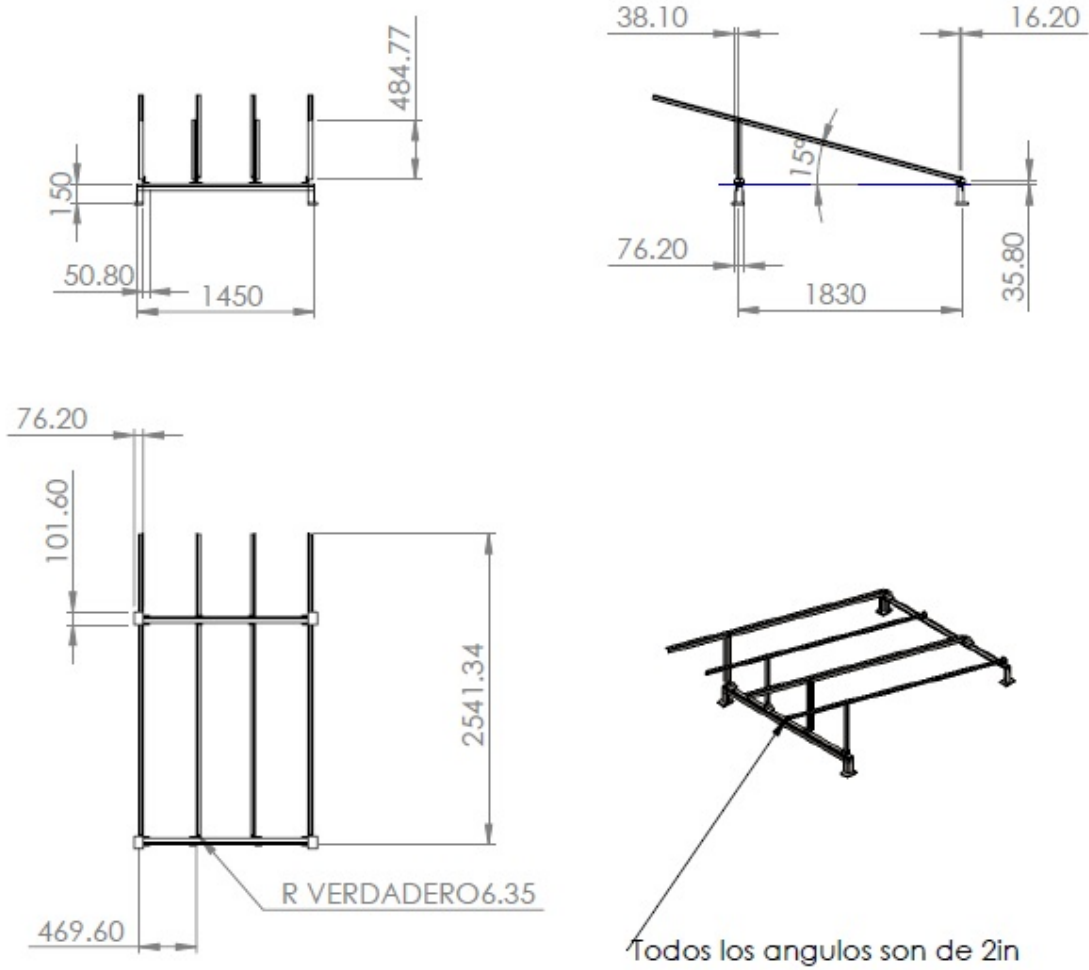


FIGURA A.11: Dimenciones de la estructura que soporta los paneles solares

Bibliografía

- [1] Julio Cesar Garcuillen. *Diseonstruccil Sistema de Adquisici Datos y Control de un Deshidratador de Charolas Giratorias*, volume 6. Universidad Tecnola de la Mixteca, Agosto del 2011.
- [2] Dra. MarPaz Echeverria. Guia de estudio de secadores sosolar para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. Fundacilestina Pz de Almada. EducaciRCOSUR UNESCO Montevideo.
- [3] C. J. Geankoplis. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, volume 2. CECSA, Marzo Tercera Edici
- [4] Peter Harriott. Warren L. McCabe, Julian C. Smith. *Operaciones Unitarias de Ingenieruca*. Mc Graw Hill, 6a edition, Septima Edici
- [5] Aleyda Pz Herrera. *Construcci un Secador de Charolas Giratorio y su Valoracin Ajo*. Universidad Tecnola de la Mixteca, Huajuapán de Lexaca, Abril 2006.
- [6] Katsuhiko Ogata. *Ingenieria de Control Moderna*. PEARSON/Prentice Hall., 3era edition, Tercera EdiciISBN: 9702607728.
- [7] Fernando O. Guzm. *Sistema de Control Elrico-Electro de Temperatura Aplicado a un Deshidratador.*, volume 104. Facultad de Ingenierlica. Universidad Michoacana de San Nicole Hidalgo., Enero 2011.
- [8] Eri Samuel Murcia Perazca Josrio D Benz. *Control Digital PID Para Sistemas Termicos Basado en Microcontrolador PIC*. Facultad de Ingenier Escuela de Electrica. Universidad don Bosco, http://www.kukarobotics.com/en/products/software/educational_framework/arm_tutorials/PSContent_ARM2.h ElSalvador – Enero2006.

-
- [9] Eduardo Garceijo. *Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC*. Alfaomega. Marcombo S.A., 2012.
- [10] Lucas J. L Enrique Palacios, Fernando Remiro. *Microcontrolador PIC16F84 desarrollo de proyectos*. Alfaomega/Ra-Ma., 2 edition, Febrero 2006. ISBN: 8448156366.
- [11] Illber Adonayt Ruge Ruge. Mdo bco para implementar un control digital pid en un microcontrolador pic para desarrollo de aplicaciones a bajo costo. In *Conferencia Digital de Microcontroladores*, page 600. Alfaomega. Marcombo S.A., 2011.