

UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

CAMPUS LOMA BONITA

Tesis profesional para la obtención del título de Ingeniero en
Mecatrónica

**Construcción e instrumentación de un secador solar tipo túnel
con temperatura controlada utilizando matlab y arduino**

Presenta:

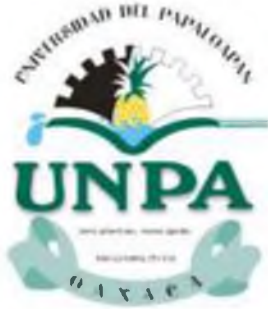
Josimar Márquez García

Asesor de Tesis: Dr. César García Arellano

Co – Asesor de Tesis: Dr. Mauro Sánchez Sánchez

Loma Bonita, Oaxaca

Octubre 2015



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

LA PRESENTE TESIS TITULADA "**CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE UN SECADOR SOLAR TIPO TÚNEL CON TEMPERATURA CONTROLADA UTILIZANDO MATLAB Y ARDUINO**", PRESENTADA POR EL SUSTENTANTE DE LICENCIATURA **C. JOSIMAR MÁRQUEZ GARCÍA**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL DR. CÉSAR GARCÍA ARELLANO, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITE EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA.

M.C. José Luis Nájera Sánchez
Jefe de la carrera de Ingeniería en
Mecatrónica

Dr. César García Arellano
Asesor de tesis

M.C. José Luis Nájera Sánchez
Presidente

Dr. César García Arellano
Secretario

Dr. Mauro Sánchez Sánchez
Vocal

LOMA BONITA, OAXACA, OCTUBRE 2015.

DEDICATORIA

En primer lugar dedico y sobre todo le agradezco a **Dios** por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre **Piedad García Morales** por haberme apoyado en todo momento, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada por su amor.

A mi padre **Raúl Márquez Celaya** por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y sobre todo por su amor.

A mi hermano **Akbar García Morales** por ser el ejemplo de un hermano mayor y del cual aprendí aciertos y a levantarme de momentos difíciles, a mis abuelos **Filogonio García Toral** y **Neli Morales Pacheco**, mi tía **Nuvia del Rosario García Morales**, así como al resto de mi familia que en las buenas y en las malas siempre me han apoyado.

A **Alma Rosa Velasco Rosales** que me ha brindado su amor, confianza y cariño incondicionales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la oportunidad de realizar este trabajo a mi Director de Tesis el **Dr. César García Arellano**, por todo su apoyo, motivación y confianza para concretar esta etapa de mi vida.

Agradezco a los técnicos de los talleres de la Universidad Papaloapan **Omar Sandoval** y **Pascual Palafox**, así como una mención especial para **Roberto Castañeda**, por el gran apoyo brindado en la construcción del secador solar.

También agradezco al **personal de mantenimiento** de la universidad por las facilidades y apoyo brindados para la construcción del secador.

Agradezco a mi Co – Director de tesis el **Dr. Mauro Sánchez Sánchez**, así como a mis revisores el **Dr. Rafael Castillo Rincón** y el **M.C. José Luís Nájera Sánchez** por sus conocimientos brindados, así como su apoyo a lo largo de la elaboración de la tesis.

Por ultimo agradezco a mis **amigos** que conocí en la universidad y con los que sigo compartiendo aventuras, risas y buenos ratos; y que fueron un gran apoyo en todo momento, con los problemas escolares, ideas o comentarios acertados.

Resumen

La presente tesis documenta la construcción, instrumentación y validación del lazo de control de temperatura de un secador solar tipo túnel con circulación de aire forzado. Las etapas del trabajo consisten primeramente en las generalidades para desarrollar la manufactura de un prototipo de secado solar, basado en un modelo preestablecido tipo indirecto; una vez construido los componentes del secador solar (túnel de secado y colectores solares, además de sus respectivos acoplamientos) la siguiente etapa consistió en la calibración de sensores e instrumentación del sistema propuesto, el desarrollo de los circuitos de adquisición de datos y las rutinas de control de un extractor de aire de corriente alterna, con el fin de llevar a cabo un lazo de control de temperatura dentro del túnel de secado. Elaborada la parte electrónica del sistema se programaron los algoritmos de adquisición de datos y activación del motor a partir de un lenguaje computacional (Matlab) combinados con el microcontrolador Arduino (en su versión mega) para la puesta en función del secador. La etapa de programación se realizó con la finalidad de obtener un control para un secado uniforme a través de la automatización, registrando las variables que interactúan en el proceso y controlando la temperatura. Por último se hicieron pruebas de secado utilizando el sistema de control propuesto; en este trabajo se emplean algunos orgánicos para su deshidratado y con ello validar el sistema de control. De la validación se obtuvieron tiempos de secado de 3 horas menos que los utilizados por medios eléctricos y en reducción de más de 10% de la energía consumida para dicho fin.

Abstract

This thesis documents the construction, implementation and validation of the temperature control loop for a tunnel type solar dryer with forced air circulation. First the generalities were established to the development and manufacture of the prototype based on an preset pattern. Once built the components of the solar dryer (drying tunnel and solar collectors), a calibration of the sensors and instruments of the proposed system was realized. Also, data acquisition circuits and control routines were built in order to implementing a temperature control loop into the tunnel by means of a AC fan. Electronic algorithms programmed on a computer language (Matlab) in order to data acquisition and motor activation was made and combined with the microcontroller Arduino (mega version) for dryer operation. With the monitoring of the variables involved in the drying process, a programming is performed in order to obtain a adequate and uniform drying through automation. Finally with the use of some organics, temperature tests controlled by the control loop were made. The resulting validation drying times were 3 hours less than used by electrical devices and a reduction of over 10 % of the energy used for that purpose was obtained.

Índice

Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Índice gráficas	VIII
Nomenclatura	IX
Introducción	XI
Antecedentes	XII
Justificación	XIII
Objetivo general	XIII
Objetivos particulares	XIV
Delimitación	XIV
1 Marco Teórico	1
1.1 Secador solar	1
1.2 Características generales del secado solar	2
1.3 Determinación de las variables de secado	3
1.4 El papel de la instrumentación y automatización en sistemas y procesos	6
1.5 Antecedentes de la instrumentación y control de temperatura en secadores solares	9
2 Construcción del secador tipo túnel	12
2.1 Componentes de un secador solar	12
2.2 Modelos de secadores solares	13
2.2.1 Secador solar indirecto	13
2.2.2 Secador solar directo	14
2.2.3 Secador solar mixto	14
2.3 Secador solar indirecto tipo túnel con circulación forzada	15

2.4	Proceso de construcción del secador	16
2.5	Diseño asistido por computadora	18
2.5.1	SolidWorks	18
2.6	Materiales y herramientas para la construcción del secador	19
2.7	Construcción de los colectores solares	20
2.8	Construcción del túnel de secado	22
2.9	Instalación del secador solar	23
3	Instrumentación del secador	26
3.1	Dispositivos de instrumentación del secador	26
3.2	Sensores de temperatura	26
3.2.1	Termopares	27
3.2.1.1	Termopar tipo J (Hierro / Constantán)	27
3.2.1.2	Amplificador de instrumentación AD594	27
3.3	Sensores de humedad	28
3.3.1	Sensor de humedad y temperatura HMP60	29
3.3.2	Sensor de humedad y temperatura HMZ-433A1	30
3.4	Sensores de presión	31
3.4.1	Sensor de presión MPX2200AP	32
3.5	Sensores de radiación solar	33
3.5.1	Piranómetro SP Lite2	34
3.6	Amplificador operacional	35
3.7	Tarjeta adquisidora de datos (Arduino)	36
3.8	Matlab	37
3.9	Motor monofásico de arranque por capacitor (Extractor de aire)	38
3.10	Calibración de los termopares tipo J	39
3.11	Comparativa de los sensores de humedad	43
3.12	Pruebas de presión	45
3.13	Acoplamiento de la señal de radiación solar	46
3.13.1	Acoplamiento de señal del piranómetro SP LITE2	46
3.13.2	Pruebas de calibración del piranómetro SP LITE2	49

3.14 Cableado del secador solar	50
3.15 Circuito de potencia	53
3.16 Circuito de adquisición de datos y control "on/off" del extractor de aire	56
3.16.1 Diagramas electrónicos	57
3.16.2 Elaboración del circuito electrónico	60
4 Programación del sistema	62
4.1 Características del arduino mega	62
4.2 Instrucciones de adquisición de datos a través de Arduino	63
4.3 Algoritmos de lectura de los sensores del secador solar	64
4.4 Control "on/off" del extractor de aire	66
4.5 Algoritmos del control "on/off" del extractor de aire	68
4.6 Lógica de programación de la adquisición de datos y el control "on/off" del extractor de aire	69
4.7 Programa de adquisición de datos y temperatura controlada en GUIDE (Matlab)	71
5 Caracterización experimental de las variables de control del secador solar	74
5.1 Determinación de humedades de los orgánicos utilizados	75
5.2 Deshidratación a través de un horno eléctrico	77
5.3 Caracterización de las principales variables del secador	79
5.3.1. Alcance de las variables en el sistema por convección natural	80
5.3.2 Alcance de las variables en el sistema utilizando una rutina de temperatura controlada sin producto	81
5.4 Prueba de la rutina de temperatura controlada para el secado de manzana	84
5.5 Prueba de la rutina de temperatura controlada para el secado de papa	86
5.6 Prueba de la rutina de temperatura controlada para el secado de	89

col (repollo)	
5.7 Comparación de secado de un orgánico sin operación de un lazo de control de temperatura	91
5.8 Comparación de la implementación del secador con el horno de eléctrico (energético)	92
Conclusiones	95
Trabajo futuro	97
Bibliografía	98
Anexo A: Planos de construcción	103
Anexo B: Diagramas electrónicos de interconexión	106
Anexo C: Programación en GUIDE (Matlab)	109

Índice de figuras

1.1 Ejemplo de secador solar casero	2
1.2 Diagrama a bloques de control automático en lazo cerrado	8
2.1 Modelo de secador solar indirecto	13
2.2 Modelo de secador solar directo	14
2.3 Modelo de secador solar mixto	15
2.4 Propuesta de diseño de un secador solar indirecto tipo túnel con circulamiento forzado de aire y circuito de calentamiento de agua	16
2.5 Diagrama del proceso de construcción del secador solar	17
2.6 Modelado de los colectores y el túnel de secado (SolidWorks)	19
2.7 Construcción de los colectores solares	22
2.8 Construcción del túnel de secado	23
2.9 Propuesta de instalación del secador solar (SolidWorks)	24
2.10 Instalación del secador solar	24
2.11 Secador solar tipo túnel instalado	25
3.1 Diagrama de conexión del amplificador de instrumentación AD594	28
3.2 Diagrama de conexión del sensor de humedad y temperatura HMP60	29
3.3 Diagrama de conexión del sensor de humedad y temperatura HMZ – 433	31
3.4 Diagrama de conexión del sensor MPX2200AP	32
3.5 Gráfica de comparación entre la diferencia de presión y el voltaje	33
3.6 Diagrama electrónico del piranómetro SP LITE2	34
3.7 Diagrama de conexión del amplificador operacional 741	36
3.8 Diagrama de conexión del Arduino mega	37
3.9 Motor monofásico de arranque por capacitor (Extractor de aire)	39
3.10 Esquema eléctrico del motor monofásico de arranque por capacitor	39
3.11 Calibración de termopares tipo J por medio de un baño térmico	40
3.12 Comparación de los sensores de humedad relativa	43
3.13 Configuración de opam no inversor	47

3.14 Diagrama digital (Proteus) de un amplificador operacional en configuración de no inversión, aumentando la señal de entrada 10 veces.	48
3.15 Pruebas de radiación solar	49
3.16 Cableado del secador	53
3.17 Diagrama digital de conexión del relevador con accionamiento a 6V	54
3.18 Diagrama de conexión del TIP122 y del diodo rectificador	54
3.19 Diagrama de conexión del circuito de potencia	55
3.20 Diagrama digital del accionamiento de un elemento resistivo de 220V CA utilizando el circuito de potencia y un interruptor	56
3.21 Diagrama digital del circuito del amplificador AD594 y el termopar tipo J	57
3.22 Diagrama digital simulando a los sensores de humedad y presión	58
3.23 Diagrama digital del sistema de adquisición de datos y del encendido del elemento resistivo (220V)	59
3.24 Circuito adquiredor de datos	60
3.25 Circuito de potencia	60
3.26 Dispositivo de adquisición de datos y control del extractor de aire	61
4.1 Diagrama a bloques del control de lazo cerrado del sistema	67
4.2 Diagrama de los dispositivos del control de lazo cerrado del sistema	68
4.3 Diagrama de flujo del programa de adquisición de datos y control "on/off" del secador solar	70
4.4 Programa de adquisición de datos y temperatura controlada del secado solar en ejecución	72
5.1 Determinación de la humedad en la col	76
5.2 Determinación de la humedad en la papa	77
5.3 Determinación de la humedad en la manzana	77
5.4 Pruebas de deshidratado en el horno eléctrico	79
5.5 Secado solar de manzana	86
5.6 Secado solar de papa	88
5.6 Secado solar de col	91

Índice de tablas

1 Contenido de humedad en algunos orgánicos y su temperatura tolerable de secado	4
2 Descripción de los materiales utilizados en la construcción del secador solar	20
3 Asignación del cableado en el secador solar	52
4 Determinación de humedades de referencia para el deshidratado	78
5 Humedad del producto en función del peso de la manzana	86
6 Humedad del producto en función del peso de la papa	88
7 Humedad del producto en función del peso de la col	90
8 Comparación de los tiempos de secado y gasto energético de cada dispositivo	94

Índice de gráficas

3.1 Lectura de los termopares en el baño térmico	41
3.2 Ajuste de calibración de los termopares	42
3.3 Registros de humedad relativa en pruebas de calibración	44
3.4 Humedades relativas con ajuste de calibración	45
3.5 Comparación entre el piranómetro SP Lite 2 con señal amplificada y una referencia	50
5.1 Temperaturas y radiación solar promedio resultante de la caracterización del secador por convección natural	80
5.2 Humedades promedio resultantes comparadas con la temperatura ambiente y la del túnel de secado, de la caracterización del secador por convección natural	81
5.3 Temperaturas y radiación solar promedio resultante de la caracterización del secador utilizando una rutina de secado a 55°C sin producto	83
5.4 Humedades promedio resultantes comparadas con la temperatura ambiente y la del túnel de secado, de la caracterización del secador utilizando una rutina de temperatura controlada (55°C) sin producto	84
5.5 Temperaturas en el secador y ambiente en comparación del peso del producto a lo largo de la rutina de temperatura controlada para el secado de manzana	85
5.6 Temperaturas en el secador y ambiente en comparación del peso del producto a lo largo de la rutina de temperatura controlada para el secado de col	87
5.7 Temperaturas en el secador y ambiente en comparación del peso del producto a lo largo de la rutina de temperatura controlada para el secado de col	90
5.8 Secado de papa sin utilizar un lazo de temperatura controlada (Pérdida de peso y temperaturas a través del tiempo de secado)	92

Nomenclatura

P_{ms}	Peso de la masa en seco
P_{hs}	Peso de la cantidad de humedad de un producto seco
Ps	Peso en seco
H_a	Porcentaje de humedad de un pesaje
T	Señal de temperatura del AD594
HR	Señal de humedad relativa del sensor HMP60
Tr	Señal de temperatura del sensor HMP60
H	Señal de humedad relativa del sensor HMZ – 433A1
P	Señal de presión del sensor MPX2200AP
TR	Temperatura de referencia
T₁	Temperatura del termopar 1
T₂	Temperatura del termopar 2
T₃	Temperatura del termopar 3
T₄	Temperatura del termopar 4
T₂[*]	Temperatura ajustada del termopar 2
T₃[*]	Temperatura ajustada del termopar 3
T₄[*]	Temperatura ajustada del termopar 4
Href	Humedad del Sensor de humedad de referencia HMP60
Hr	Humedad del sensor HMP60
H₁	Humedad del sensor HMZ – 433A1 1

H₂	Humedad del sensor HMZ – 433A1 2
H₃	Humedad del sensor HMZ – 433A1 3
H₄	Humedad del sensor HMZ – 433A1 4
H₁[*]	Humedad ajustada del sensor HMZ – 433A1 1
H₂[*]	Humedad ajustada del sensor HMZ – 433A1 2
H₃[*]	Humedad ajustada del sensor HMZ – 433A1 3
H₄[*]	Humedad ajustada del sensor HMZ – 433A1 4
P₁	Presión del sensor MPX2200AP 1
P₂	Presión del sensor MPX2200AP 2

Temp Temperatura

Hum Humedad

Rad Radiación

SP Set point

CE Consumo energético

t_{ct} Tiempo del ciclo de trabajo

P_{ot} Potencia eléctrica

V Voltaje

CA Corriente alterna

CD Corriente directa

Subíndices

Tun Túnel

Col Colectores

Amb Ambiente

Ref Referencia

Introducción

Secar es remover humedad de cierto material mediante la evaporación del agua contenida en el mismo, sin alterar su composición química durante tiempos y condiciones definidas. Representa una de las acciones térmicas básicas en la industria de procesos agroalimentarios; ya que se utiliza como una técnica de preservación de materiales orgánicos, esto se debe a que los microorganismos que efectúan la descomposición de la materia no pueden desarrollarse en ausencia de líquido [1].

Sistemas comúnmente utilizados para retirar la cantidad de agua en materiales orgánicos son los secadores solares, que aprovechan la radiación solar como fuente de energía para transferir calor a corrientes de viento con la cual se remueve la humedad del material. A este tipo de sistemas se les puede implementar dispositivos de instrumentación y control automático, para agilizar y monitorear el proceso de deshidratado.

El uso intensivo de la ciencia de instrumentación y control automático es producto de la difusión de las técnicas de medición y control. Las cuales establecen que un sistema automatizado es aquel que controla una variable física sin intervención humana; esta variable física puede ser la temperatura, velocidad, radiación solar, etc.

El control automático de sistemas se utiliza fundamentalmente porque reduce el costo de los procesos industriales, obteniendo ganancias intangibles, como por ejemplo la eliminación de mano de obra pasiva, la cual provoca una demanda equivalente de trabajo especializado; además la eliminación de errores es otra contribución positiva de su implementación.

La aparición de las computadoras analógicas y digitales ha posibilitado la aplicación de ideas de control automático a sistemas físicos que eran imposibles de analizar o controlar años atrás [2].

Antecedentes

La forma más antigua de preservar los materiales orgánicos es el secado, donde el hombre comenzó utilizando la energía del sol para extraer la mayor cantidad de agua en productos perecederos desde hace miles de años. A lo largo del tiempo, se han buscado tecnologías y procedimientos cada vez más eficientes para la conservación de materiales (cultivos, alimentos, fibras, etc.), sin embargo, es importante recordar que cada uno de estos métodos se desarrolló alrededor de los requerimientos del producto a tratar.

En la actualidad, la deshidratación de material orgánico sigue vigente por dos principales razones: la primera es la existencia de productos que si no se comercializan inmediatamente después de la cosecha, representan pérdidas para los productores y agricultores; la segunda razón son las ventajas que se obtienen al llevar a cabo este proceso, como lo son el fácil transporte (por el menor peso), la disminución de microorganismos y una mayor estabilidad física, la cual los hace más resistentes (facilitando de esta manera su almacenamiento y manipulación)[3].

Una de las formas de realizar el secado consiste en extender a lo largo de terrenos de longitudes considerablemente amplias los materiales, donde se exponen a la acción directa de los rayos solares, de tal manera que el producto reciba calor para evaporar el agua en su interior, pero tiene la desventaja de la disminución en la calidad del producto, debido al poco control de higiene, así como los efectos del clima y la contaminación. Por esta razón se han desarrollado formas alternativas de secado de productos por medio de secadores artesanales, los cuales buscan aprovechar la energía del sol para llevar a cabo este proceso,

sin embargo presentan la desventaja de que son largos los periodos de secado dependiendo de las condiciones climáticas, así como un constante censo del usuario para verificar las condiciones finales del producto. Otro gasto importante a considerar son los correspondientes a los energéticos utilizados en los procesos actuales de deshidratación artificial (hornos y estufas) [4].

Justificación

En respuesta a las desventajas que presentan el secado al aire libre y el artesanal para la conservación de alimentos en la región, así como a los altos consumos energéticos que utilizan los equipos mecánicos o eléctricos para llevar a cabo el proceso de secado, y debido a que se pretende que la tecnología de secado se presente a los usuarios como una opción sustentable y sostenible, se muestra la validación de un proceso de secado a partir de la implementación de un lazo de control de temperatura en un secador solar tipo túnel, con el objetivo de disminuir costos y/o consumos energéticos, tiempo de operación, así como una mejora en la terminación del producto final.

La incorporación de sensores e instrumentos de control en el proceso permite la medición de parámetros físicos, con lo que es posible elaborar una rutina de control automático, basado en la temperatura de la cámara de secado.

Objetivo general

Construcción mecánica, implementación de dispositivos electrónicos y programación de software, que permitan validar los parámetros de control de un sistema de secado solar tipo túnel por calentamiento solar indirecto de aire.

Objetivos particulares

- Construcción del secador solar.
- Conocer, seleccionar e implementar los instrumentos necesarios para la adquisición de datos y el control de la temperatura al interior del túnel de secado.
- Desarrollo del programa de adquisición de datos.
- Desarrollo de una rutina de secado con temperatura controlada.
- Validación de al menos una rutina de secado con temperatura controlada.

Delimitación

Este proyecto presenta la construcción e instrumentación de un secador solar tipo túnel y la implementación de un sistema de temperatura controlada basado en el producto a secar, recordando que los materiales orgánicos tienen ciertas características específicas. Para diseñar la automatización del sistema de secado, fue indispensable determinar las siguientes condiciones:

- La condición ideal de peso del material a secar.
- La delimitación de las variables de control.
- La selección de los instrumentos electrónicos.
- El diseño de la automatización de temperatura.
- La implementación de la automatización.
- El desarrollo de las pruebas experimentales en la ciudad de Loma Bonita, Oaxaca, en las instalaciones de la UNPA entre los meses de abril – junio, ya que son los meses de mayor incidencia solar.

Capítulo I

Marco Teórico

Antes de comenzar cualquier trabajo de investigación es importante conocer toda la información referente al tema, así como los antecedentes de lo que ya se ha desarrollado; en este caso se establecieron las generalidades del secador solar, así como los avances realizados en instrumentación y automatización a través de los años con este tipo de dispositivos.

1.1 Secador solar

El secado es un método por el cual se intercambian calor y masa, esto quiere decir que se realiza la transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa no saturada; para lograr la deshidratación, un orgánico húmedo se expone a una corriente de aire con determinadas condiciones de temperatura y velocidad [5].

Una manera para lograr el secado, es sometiendo el producto a deshidratar a los rayos solares, donde el material húmedo se extiende en grandes superficies y sólo se tiene que esperar a la eliminación del contenido de agua por medio del aire, sin embargo, este método presenta una variedad de deficiencias (contaminación, lluvias, insectos, etc.) que afectan la calidad del producto final.

Actualmente el aumento en el precio de la energía eléctrica y de los combustibles ha rehabilitado el interés en el secado basado en energía solar, desarrollando así una diversidad de técnicas que permiten aminorar los problemas

relacionados al consumo de energía necesaria para llevar a cabo un secado uniforme para la conservación de material orgánico.



Fig. 1.1 Ejemplo de secador solar casero [5].

En un secador solar la energía de radiación se transforma en calor útil mediante efecto invernadero, el cual incrementa la temperatura del aire contenido en una cámara donde se encuentran los materiales convenientemente colocados; el proceso de deshidratado se realiza por acción del aire caliente que circula y pasa entre los materiales, lo cual causa la evaporación del agua del producto y lleva esa humedad hacia el exterior. Un ejemplo general de secador solar se puede apreciar en la fig. 1.1 [6].

1.2 Características generales del secado solar

El secado solar se basa en dos procesos de transferencia, el primero es de energía y sucede cuando la radiación proporciona calor al aire, y el segundo que es el de masa, donde el agua del producto pasa a vapor eliminándose del material a tratar.

En general, el proceso se realiza de manera experimental efectuando pruebas en forma continua, dentro de los rangos requeridos de velocidad del aire,

temperatura y humedad relativa, además del registro de pérdida de peso de la materia a tratar.

Durante el proceso se presentan cambios significativos en las propiedades físicas del producto, que dependen de diversas condiciones para determinar los parámetros de secado:

- Características del producto (forma, tamaño, contenido de agua, etc.).
- Características del secador (modelo, temperatura de trabajo, volumen de trabajo, etc.).
- Características meteorológicas del lugar (temperatura, humedad relativa, radiación solar, etc.).
- Uso posterior del producto a secar (consumo alimenticio, agricultura, actividad diaria, etc.).

El tiempo de secado depende de factores ambientales del lugar y de la materia a deshidratar, como:

- Tipo de producto (mayor contenido de agua, mayor tiempo).
- Tamaño de los trozos del producto (más grande, mayor tiempo).
- Temperatura del aire (alta temperatura, menor tiempo).
- Humedad relativa del aire (alta humedad, mayor tiempo).
- Velocidad del aire (alta velocidad, menor tiempo) [7].

1.3 Determinación de las variables de secado

En la literatura existen cinéticas de secado que permiten el desarrollo de una óptima deshidratación. Donde se determinan las condiciones para llevar a cabo el secado de diferentes materiales orgánicos con magnitudes ya establecidas, para obtener los pesos que corresponden al material en diferentes etapas del proceso de pérdida de agua.

Tabla 1 Contenido de humedad en algunos orgánicos y su temperatura tolerable de secado [8].

Producto	Porcentaje de humedad en fresco (%HR)	Porcentaje de humedad en seco (%HR)	Temperatura máxima tolerable (°C)
Arroz	24	14	50
Maíz	35	15	60
Café	50	11	65
Papa	75	13	55
Cebolla	80	4	55
Tomate	95	8	65
Repollo	94	4	55
Zanahoria	70	5	60
Ajo	80	9	55
Durazno	85	18	70
Manzana	84	14	50
Plátano	80	15	70
Mango	85	14	65

En la tabla 1 se muestra la investigación de los porcentajes de contenido de agua de algunas legumbres, vegetales y frutos comúnmente consumibles en el día a día. En ella se establece la cantidad de agua que contiene cada producto y la temperatura máxima a la que puede ser tratado sin alcanzar su punto de cocimiento. Con los datos de la tabla 1 es posible determinar las variables de secado de los materiales [8].

Para determinar el peso de la masa sin humedad (P_{ms}) en un producto es necesario utilizar la siguiente ecuación que considera el peso en fresco (P_f) del producto y su humedad en fresco (H_f).

$$P_{ms} = P_f \left(1 - \frac{H_f}{100} \right) \quad (1)$$

Donde P_{ms} es el peso de la masa sin agua o totalmente seca y al igual que el peso fresco (P_f) están expresados en kg; en tanto que la humedad en fresco (H_f), así como todas las que se manejen en este trabajo están representadas en porcentaje (%), por lo que son unidades adimensionales.

Entonces, es posible obtener el peso de la masa en seco, esto se puede demostrar por medio de una ecuación el peso equivalente a la humedad de un producto en seco.

$$P_{hs} = P_f \left(\frac{H_s}{100} \right) \quad (2)$$

Con P_{hs} siendo el peso del agua contenida en un producto seco y H_s como la humedad en seco de determinado material.

De esta forma combinando las ecuaciones 1 y 2 se puede determinar el peso en seco de una cierta cantidad de producto.

$$P_s = P_{ms} + P_{hs} \quad (3)$$

Desarrollando la ecuación se obtiene:

$$P_s = \left[P_f \left(1 - \frac{H_f}{100} \right) \right] + \left[P_f \left(\frac{H_s}{100} \right) \right] \quad (4)$$

Donde P_s es el peso del producto seco.

Por último para calcular el porcentaje de humedad que tiene el producto en cualquier punto del proceso de secado, se utiliza una ecuación de interpolación lineal, la cual implementa las variables anteriormente descritas, y aplica el pesaje actual del material, para que, de esta forma se obtenga la cantidad de agua con la que cuenta el producto en ese instante.

$$H_a = H_s + \left[\left(\frac{H_f - H_s}{P_f - P_s} \right) (P_a - P_f) \right] \quad (5)$$

Es importante respetar la temperatura de secado y no rebasar el límite indicado (tabla 1), dado que de ocurrir esto, el material es afectado, debido a que comienza a cocerse con lo cual modifica sus propiedades y no cumple con la finalidad del deshidratado [9].

1.4 El papel de la instrumentación y automatización en sistemas y procesos

En los procesos de ingeniería es necesario monitorear y controlar magnitudes, como la temperatura, la presión, la velocidad, etc.; los dispositivos de instrumentación permiten medir la magnitud de estas variables y así poder desarrollar rutinas de control. Los sistemas son muy variados y abarcan diversidad de áreas: la fabricación de los derivados del petróleo, alimentos, la industria cerámica, las centrales generadoras de energía, la siderurgia, la industria papelera, la industria textil, etc. [10].

En el desarrollo de sistemas electrónicos o electromecánicos la instrumentación industrial es un área encargada del acondicionamiento óptimo de sensores para que desarrollen un trabajo eficaz; a partir de esto, es posible implementar un monitoreo para recolectar los datos y posteriormente convertirlos en conocimiento complementándolos con rutinas o procesos de control, todo esto con la implantación de dispositivos de automatización (PLC, Microcontroladores, Tarjetas de FPGA, Adquisidores de datos, etc.).

En países industrializados los precios bajos de la energía eléctrica y derivados del petróleo permitieron hace varias décadas el desarrollo de procesos de deshidratado artificial; en cualquiera de estos casos al día de hoy los costos por

consumo energético son muy elevados; es por ello que la incorporación de un método que disminuya el costo de producción de energía, además del impacto ambiental y a su vez permita a los usuarios de regiones apartadas acelerar el proceso, obteniendo mejoras en sus productos es una necesidad imperiosa [11].

La automatización ha desempeñado una función importante en el avance de la ingeniería, siendo pieza clave prácticamente en todos los sistemas en el que se involucre la instrumentación; además se ha vuelto una parte integral de los procesos modernos industriales y de manufactura.

Para llevar a cabo el control de un sistema es necesario conocer las variables involucradas en el proceso, con el fin de utilizar esta información para proponer una estrategia de control, así como disponer de los medios para modificarlo en el nivel de control deseado. De esta forma con la implementación de dispositivos electrónicos, mecánicos y con la automatización de sistemas, puede optimizarse el proceso de secado.

En la instrumentación y automatización de un equipo de secado solar, primeramente se deben delimitar experimentalmente las condiciones específicas a las que se someterá el secador, determinar las variables de control (temperatura, humedad, relativa, radiación solar, etc.) necesarias para llevar a cabo las cinéticas y curvas de secado de la materia a tratar. Tomando en cuenta estas variables y las condiciones de secado, se puede diseñar un método de automatización acorde con los elementos de instrumentación del secador; donde se utilice la teoría de control para manejar el sistema como lazo cerrado, debido a que en este tipo de sistemas se emplea una repetición de actividades para llegar a un fin determinado, retroalimentando el sistema constantemente.

Cuando existe un lazo cerrado, la salida $C(s)$ se realimenta al punto suma, en donde se comparará con la entrada de referencia $R(s)$, así, la salida del bloque, $C(s)$ se obtiene multiplicando la función de transferencia $G(s)$ por la entrada al

bloque, $E(s)$. Cualquier sistema de control lineal puede representarse mediante un diagrama de bloques formado por puntos suma, bloques y puntos de ramificación. Cuando la salida se realimenta al punto suma para compararse con la entrada, es necesario convertir la forma de la señal de salida en la forma de la señal de la entrada; en este caso la señal de salida será la temperatura controlada $C(s)$. La señal de salida que tiene por magnitud la temperatura, se convierte a una fuerza, posición, voltaje, corriente, etc. antes de que pueda compararse con la señal de entrada, la cual corresponde con una de estas magnitudes (fig. 1.2).

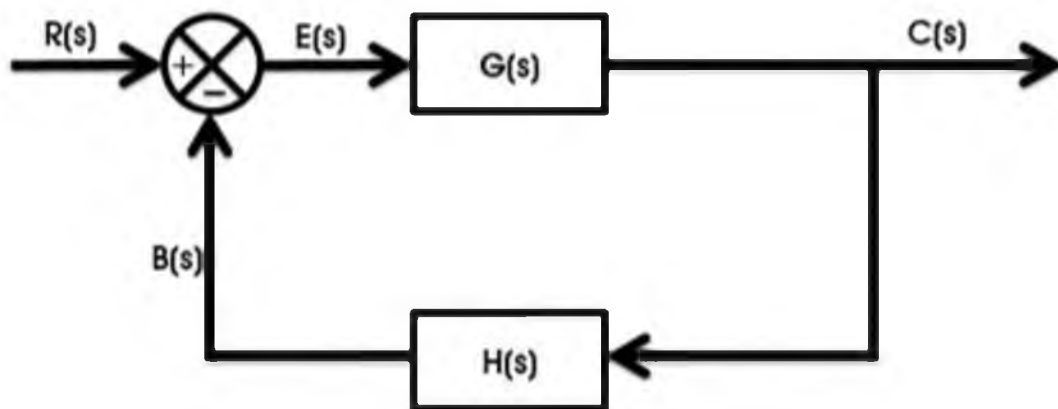


Fig. 1.2 Diagrama a bloques de control automático en lazo cerrado [12].

Esta conversión se consigue mediante el elemento $H(s)$, el cual tiene como función modificar la salida antes de compararla con la entrada, en la mayor parte de los casos el elemento de realimentación es un sensor que mide la salida de la planta, la salida del sensor se compara entonces con la entrada y se genera la señal de error. La señal de realimentación que retorna al punto de suma se compara con la entrada [12].

Un sistema automático de secado debe ser capaz de determinar el tiempo requerido para procesar el material con base en la información específica de cada producto.

1.5 Antecedentes de la instrumentación y control de temperatura en secadores solares

En las actividades diarias el hombre ha hecho necesario modificar y/o controlar el ambiente que lo rodea para ciertas tareas específicas. Esto ha sido posible gracias a los avances tecnológicos en instrumentación y control de variables físicas, como lo es la temperatura.

El primero del que se tiene referencia es Kepler, que en 1624 desarrolló un sistema de control automático de temperatura para un horno, basado en la creencia que los metales podrían transformarse en oro manteniéndolos a una temperatura constante durante extensos períodos de tiempo. Posteriormente utilizó su control de regulación calorífica para una incubadora de pollos. Años más tarde los reguladores de calor fueron estudiados por J.J. Becher (1680), y usados otra vez, en una incubadora por el Príncipe de Conti y Réaumur en 1754. Pero no fue hasta 1777, que se desarrolló el primer controlador de temperatura para uso industrial, este fue elaborado por Bonnemain, para ser instalado en el horno de una planta de calefacción de agua caliente [13].

Actualmente el control de temperatura se utiliza tanto en actividades industriales como agrícolas; tal es el caso de los sistemas de secado solar, calentadores de agua y hornos solares. Un ejemplo de esto es el presentado por Castañeda et al, en 2011 en el cual se implementa una rutina de control difuso de temperatura, en un horno para el secado de plantas y vegetales [14].

En cuanto a secadores solares se refiere existen casos como el Marrakech presentado por Häuser et al, en 1994, donde implementan la radiación solar incidente en un región de Marruecos, para controlar la temperatura dentro de un dispositivo solar, utilizando una señal de tensión, la cual está en función de un termostato remoto y un transformador de núcleo toroidal [15].

En nuestro país, en el año 2002, Elorza et al, utilizaron una PC y una tarjeta lógica programable (PCL- 812 PG de "ADVANTECH") para la implementación de un sistema de monitoreo, adquisición de datos y control de temperatura con sensores LM335Z en un secador solar tipo túnel para frutas [16].

Para el año 2005, Montero en su tesis doctoral desarrollo un modelado de un secadero solar híbrido para la deshidratación de residuos biomásicos, donde a partir de un arreglo de termopares y transmisores de humedad, determina una capacidad máxima de carga de 3 kg y un error de medida de 0.02% en dicha capacidad [17].

Ese mismo año Wibisono et al, diseñaron e instrumentaron un secador para vainilla con control de temperatura, en el que utilizaron el coeficiente negativo de temperatura (NTC) de un sensor, para controlar un nivel de temperatura predeterminado a partir de un sistema automático con un mecanismo simple de encendido – apagado [18].

Mientras que en China Fu L. S. et al. un año después diseñaron un controlador PID adaptivo tipo difuso, con el cual establecieron mejoras en la dinámica, estabilidad y contra – interferencia en comparación con controladores PID tradicionales, mejorando el índice de valor de sobre impulso y el tiempo de regulación en un sistema de secado solar [19].

Mientras tanto en Colombia se han registrado varios casos de automatización de secadores solares. En el 2007 Ibarra E. J. et al. Diseñaron y modelaron la automatización de un secador de polen, reduciendo el tiempo de secado un 300%, aplicando un control estadístico del proceso, manteniendo la temperatura de secado constante [20]. Tres años después Giraldo S. E. realizo el control de temperatura y humedad de un deshidratador solar, empleando un control "on/off" por con retroalimentación basado en un sensor SHT1X [21]. Por último también en el 2010 Echeverry O. A. desarrolló el diseño y simulación de la

automatización de un secador electromecánico de café, con base en el caudal generado por un ventilador; en donde un PLC produce una señal que aumenta o disminuye el flujo de aire, con base en la comparación de la humedad medida y una referencia del sistema [22].

Ya en el año 2013 Vallejos R.C. presento el modelo matemático de un secador rotatorio de disco, basado en las ecuaciones de conservación de la masa y la energía, aplicado a la industria pesquera, el cual se validó con datos reales de dos plantas ubicadas en el norte del Perú, donde realizó un control predictivo lineal, el cual ha sido probado para disturbios en la humedad de entrada al secador y flujo integral así como para un cambio de set point [23].

Comercialmente empresas como SAECSA han desarrollado secadores solares automatizados, para su venta al público, con precios que van desde los cincuenta mil a los quinientos mil pesos aproximadamente [24].

Después de realizar una investigación de las características del secado solar así como de la instrumentación y automatización de estos dispositivos, se procedió a construir un prototipo, basado en modelos convencionales ya establecidos.

Capítulo II

Construcción del secador tipo túnel

En este capítulo se desarrollaron las etapas de manufactura de un prototipo de secador solar, basado en un modelo preestablecido.

2.1 Componentes de un secador solar

Los secadores solares cuentan con elementos esenciales para que el proceso sea eficaz. La forma y ubicación de cada uno de estos elementos difiere en función del modelo, en algunos casos los elementos pueden estar ubicados en un mismo sitio, ser el mismo objeto o no tener delimitaciones claras entre ellos.

- Sistema de captación (recibe la radiación solar y la transforma en el calor con el cual se van a deshidratar los productos).
- Sistema de secado (Es donde se encuentra el producto a deshidratar).
- Sistema de extracción de la humedad (lugar donde el aire cargado de humedad sale del secador para perderse en la atmósfera).
- Área de entrada de aire (parte por la que entra el aire caliente que seca el material).
- Sistema de circulación del aire (forma de circulación de aire que utiliza el dispositivo).

Estos sistemas primordiales en los secadores solares suelen estar representados por dispositivos colector – cámara, los cuales se diseñan de

diferentes formas para cumplir con la captación de energía solar, circulamiento de aire y características necesarias del producto [25].

2.2 Modelos de secadores solares

Existen modelos definidos de secadores solares, desarrollados con base en los elementos descritos (subtema 2.1), las cuales se distribuyen o se combinan para realizar tareas específicas.

2.2.1 Secador solar indirecto

En este modelo los dos elementos principales del secado están separados, el colector se encarga de recibir la energía de los rayos solares, calentando el aire, mientras que la cámara de secado no permite la entrada de radiación solar, introduciendo únicamente el aire previamente calentado por el colector (fig. 2.1).

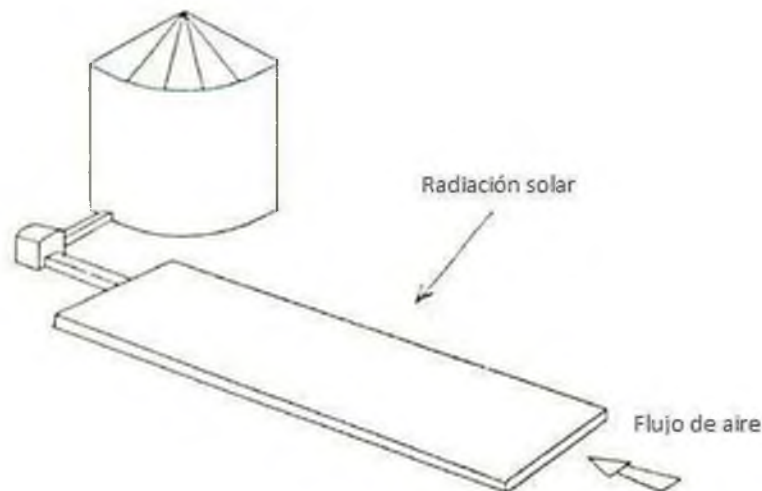


Fig. 2.1 Modelo de secador solar indirecto [26].

2.2.2 Secador solar directo

La cámara de secado además de circular el aire al producto cumple la función del colector absorbiendo la radiación, en este caso los modelos de secador pueden ser del tipo invernadero o del tipo túnel. En el tipo invernadero el material se extiende en una zona asfáltica bajo un techado del tipo invernadero donde el aire es regularmente renovado; en tanto que en el caso del tipo túnel el producto se va desplazando sobre un suelo móvil en una estructura metálica o de madera, donde el aire se introduce por un extremo y sale por el otro (fig. 2.2).

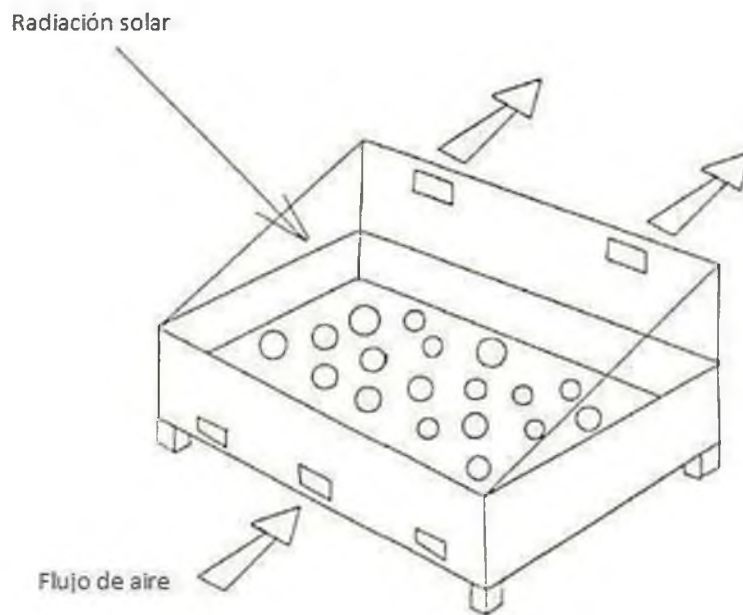


Fig. 2.2 Modelo de secador solar directo [26].

2.2.3 Secador solar mixto

Este modelo integra los anteriores modelos, donde la absorción de la radiación se realiza tanto en un colector, así como también, en una cámara de secado, con lo que el flujo de aire tiene un constante calentamiento (fig. 2.3) [26].

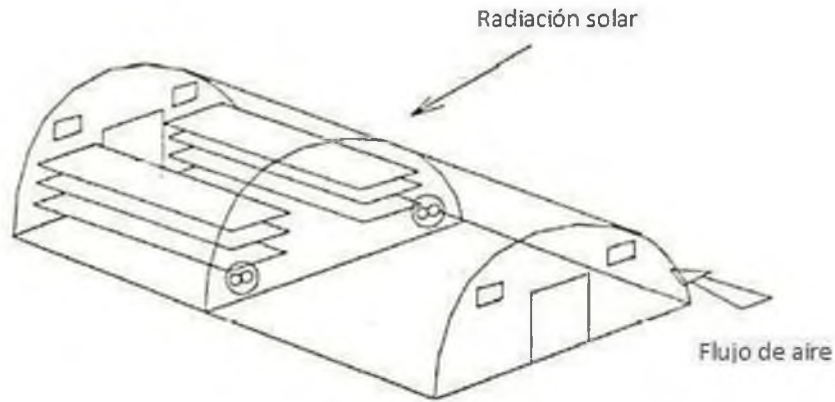


Fig. 2.3 Modelo de secador solar mixto [26].

2.3 Secador solar indirecto tipo túnel con circulación forzada.

Este modelo está constituido por un túnel horizontal elevado con una base rígida y una cobertura de larga duración (metálica o de madera regularmente), dividido en su interior en sectores alternantes, donde estos espacios son utilizados para el secado de los productos en bandejas, las cuales son removibles; también cuenta con colector (es) solar (es) que captan la radiación y calientan el aire que a su vez es inducido a través de una tubería conectada a un extractor (usualmente utiliza energía eléctrica o por combustible) que introduce este aire precalentado al túnel de deshidratado.

Este tipo de secador proporciona un producto de alta calidad, debido a que el tiempo de secado es menor por la inducción del flujo de aire forzado a través del túnel, esta disminución de tiempo, da lugar a una mayor capacidad de volumen de secado.

El secador que se desarrolló en este trabajo es de tipo túnel con radiación solar indirecta y circulación de aire forzada (fig. 2.4).

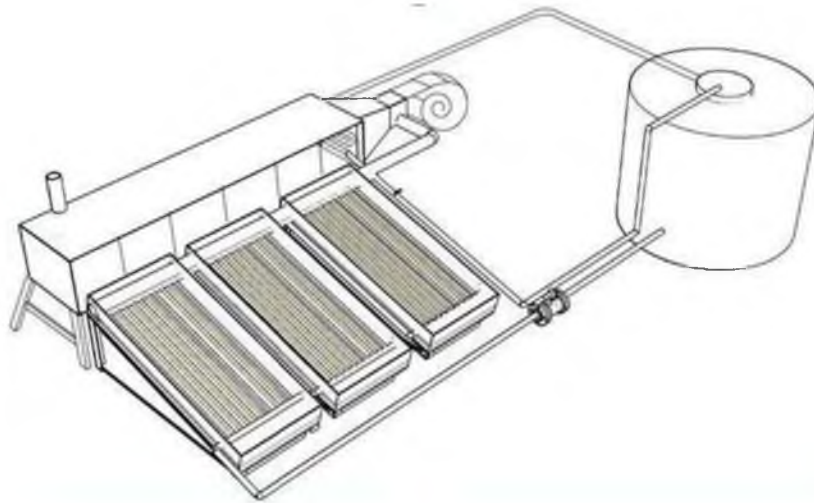


Fig. 2.4 Propuesta de diseño de un secador solar indirecto tipo túnel con circulación forzada de aire y circuito de calentamiento de agua.

2.4 Proceso de construcción del secador

Una vez seleccionado el modelo de secador y las características con las que debe estar constituido, se comenzó con la construcción del equipo.

Se planteó un proceso de construcción, el cual constó de cinco etapas donde se implementaron conocimientos, técnicas y procesos de manufactura (fig. 2.5).

La primera parte del proceso correspondió a la simulación en un software de modelado mecánico (Dibujo asistido por computadora CAD) tridimensional, cada uno de los dispositivos que debe tener un secador solar tipo túnel (colectores, túnel de secado, acoplamientos y soportes). En el software se diseñó una propuesta para cada parte del equipo, que cumplieron con las características indicadas por el modelo principal base.

En la segunda etapa se establecieron las dimensiones que necesita cada uno de los componentes del sistema, para ser plasmados en planos de

manufactura con sus correspondientes indicaciones, con el fin de construir un objeto físico en base al modelo propuesto en el Solidworks.



Fig. 2.5 Diagrama del proceso de construcción del secador solar.

Para la siguiente etapa, se realizó primero una investigación de los materiales que mejor se adapten al modelado, para posteriormente llevar a cabo una cotización, obteniendo el precio más económico de los mejores materiales

propuestos; para ser adquiridos y de esta manera llevar a cabo la construcción del secador.

La cuarta etapa consistió en implementar los materiales y herramientas adquiridos para desarrollar la manufactura de los componentes del secador. Se le dio forma física al modelo propuesto en los talleres correspondientes al manejo de metales (dentro de las instalaciones de la Universidad del Papaloapan).

Por último se llevó a cabo una revisión final del acabado de los dispositivos manufacturados, para posteriormente ser trasladados a su ubicación final, donde fueron instalados para su posterior instrumentación y programación.

2.5 Diseño asistido por computadora

El dibujo asistido por computadora (CAD), es una herramienta visual y de diseño para el desarrollo de la manufactura de productos; este tipo de aplicación tiene muchas ventajas respecto a la fabricación, reducción de coste de mano de obra o la eliminación de errores humanos. En general es el uso de programas computacionales para crear representaciones gráficas de objetos físicos ya sea en segunda o tercera dimensión que simulan el acabado de un determinado producto [27].

Para elaborar el modelado del secador solar se utilizó el software de simulación mecánica SolidWorks.

2.5.1 SolidWorks

SolidWorks es un programa de diseño mecánico en 3D, el cual es un modelador de sólidos que permite configurar visualmente piezas y conjuntos, además de extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria

para la producción. Contiene tres módulos: pieza, ensamblaje y dibujo que están asociados y vinculados entre ellos [27].

Se desarrollaron modelados tridimensionales de los dispositivos del secador con el propósito de establecer un ensamblaje y visualizar la estructura del sistema de secado solar. Posteriormente se elaboraron los planos de manufactura de cada uno de los componentes del sistema, con el fin de construirlos físicamente (fig. 2.6).

El modelado del secador está fundamentado en el flujo de aire del extractor, con el cual a partir de él, se plasmaron las medidas para desarrollar el túnel de secado.

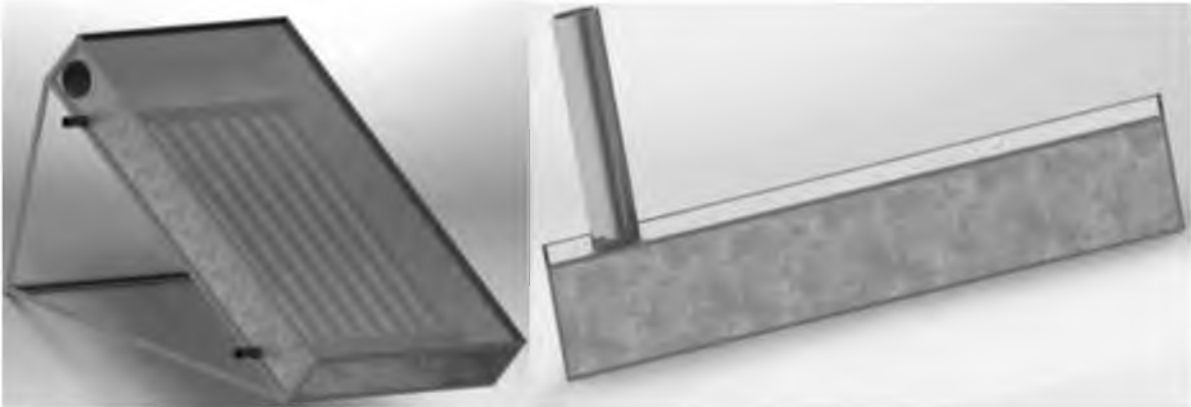


Fig. 2.6 Modelado de los colectores y el túnel de secado (SolidWorks).

2.6 Materiales y herramientas para la construcción del secador

Después de plantear el diseño a partir de modelados tridimensionales y planos de manufactura, se llevó a cabo la construcción del secador solar.

Para la construcción de los dispositivos del sistema se seleccionaron los materiales de la tabla 2 por su bajo costo, su durabilidad y su facilidad de alcance para su implementación física.

Tabla 2 Descripción de los materiales utilizados en la construcción del secador solar.

Material	Dimensiones por pieza	Dispositivo	Descripción de uso
Ángulo 3/4	3/4 x 3/4 x 236 pulgadas	Colectores Túnel	Se utilizó como estructura tanto para el túnel de secado, como para los colectores solares.
Ángulo 1 1/2	1 1/2 x 1 1/2 x 236 pulgadas	Colectores Soportes	De este material está constituida la parte inferior de soporte de los colectores, así como de toda la estructura de las bases de soporte del túnel y del motor.
Lámina galvanizada	Hoja calibre 22 236 x 118 pulgadas	Colectores Túnel	Corresponde a la cubierta con la que cuentan los colectores y el túnel de secado, además de que con ellas se elaboraron las puertas del túnel y las bandejas de secado.
Tubo de cobre	Ø 3/4 x 236 pulgadas	Colectores	Las tuberías interiores de los colectores están hechas de este material.
Tubo de PVC	Ø 4 x 236 pulgadas	Colectores	Forma la tubería de conexión por la que pasa el flujo de aire desde los colectores hasta el túnel, impulsado por el extractor.
Tubo de acero galvanizado	Ø 4 x 236 pulgadas	Túnel	Constituye a la parte de la chimenea del túnel.

En la tabla 2 se describen los materiales implementados en la construcción de los componentes del secador solar, así como su función en cada uno de ellos.

2.7 Construcción de los colectores solares

Son instrumentos que están diseñados para recoger la energía calorífica generada por los rayos solares y convertirla en energía térmica. Existen diversas variantes de estos dispositivos, como los cónicos, tubulares y planos, estos últimos

son muy comunes para el secado solar indirecto; donde el captador de energía térmica se encuentra en una caja rectangular de aproximadamente un metro de ancho y más de un metro de largo, la cara que se expone al sol se cubre de un vidrio fino o acrílico, mientras que el resto de las caras son opacas y están aisladas térmicamente [28].

Básicamente son dispositivos con los cuales se calienta aire, para posteriormente introducirlo a un túnel o una cámara de secado. Cada colector fue manufacturado en el taller de metales de la Universidad del Papaloapan a partir de los planos desarrollados a través de un modelado tridimensional.

Los colectores cuentan con una estructura metálica cubierta por lámina galvanizada adherida a partir de remaches ($\frac{3}{16}$ pulgadas de diámetro); solo en la parte superior del dispositivo está implementada una cubierta de plexiglás (material transparente que permite el paso de los rayos solares) para aumentar la temperatura del aire contenido dentro de cada colector, mientras que la cara frontal permanece descubierta para permitir la entrada de aire.

En el interior de cada uno de los colectores se adaptaron tuberías de cobre (de $\frac{1}{2}$ pulgada) en forma de rejillas (con las que se planea desarrollar un sistema de recirculación, para el calentamiento de agua para usos sanitarios en un futuro) (fig. 2.7).

Los colectores solares cuentan con una superficie de 120 cm x 90 cm y una profundidad de 20 cm, el ángulo de inclinación con el que están provistos es de 30°, debido a que en esa orientación reciben el mayor índice de radiación solar, por la ubicación geográfica de la región.

La parte de adentro de los colectores se pintó en color negro mate, de esta forma se absorbe la mayor cantidad de energía térmica proveniente del sol, calentando el aire que pasa a través de ellos.

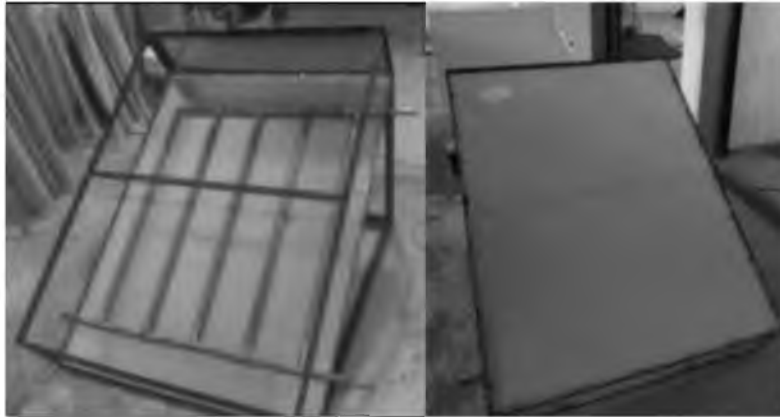


Fig. 2.7 Construcción de los colectores solares

Debido a que nos encontramos en el hemisferio norte del planeta, los colectores deben estar orientados hacia el sur, para captar mayor radiación solar durante el transcurso del día.

2.8 Construcción del túnel de secado

A partir de los planos de manufactura se construyó una estructura metálica para formar la base del túnel, donde se incluyen los compartimientos de secado del producto. Después fue cubierto con lámina galvanizada por toda la longitud y sujeta con remaches (\varnothing de $\frac{3}{16}$ pulgadas) que fijaron los pliegues a la estructura, solo dejando abierto el espacio correspondiente a las puertas, por donde se introduce el producto a la zona de secado, en donde se instalaron puertas caedizas (fig. 2.8).

Se instaló además una chimenea, la cual tiene como objeto ayudar a la evacuación del aire húmedo al interior, cuenta con un \varnothing de 4 pulgadas y una longitud de 1 m, provista en su extremo superior de una protección para la lluvia.

Por último el túnel se acopló con una campana que lo conecta con el extractor de aire y que tiene como función amplificar el flujo de aire a la entrada del túnel.



Fig. 2.8 Construcción del túnel de secado

El túnel de secado cuenta con una longitud de 3 m, con 57 cm de alto y 70 cm de espesor, y cuenta con 8 espacios para colocar bandejas de 70 x 57 cm.

El flujo de aire que el extractor de aire introduce al interior del túnel de secado corresponde a $4.1 \frac{m}{s}$ y permanece constante a lo largo del interior del túnel. Este dato fue adquirido a partir de la implementación de un anemómetro de la marca BK PRECISION.

2.9 Instalación del secador solar

Para poder llevar a cabo la instalación del secador dentro de las instalaciones de la Universidad del Papaloapan, se eligió un lugar adecuado con base en un estudio del comportamiento del movimiento solar y las posibles barreras físicas (sombras de edificios, arboles, colinas, etc.) con la finalidad de aprovechar al máximo la energía solar que impacta sobre la zona designada.

Primero se propusieron diferentes configuraciones con base en el espacio con el que se contó para maximizar el tiempo de incidencia solar, teniendo como resultado final el mostrado en la fig. 2.9.

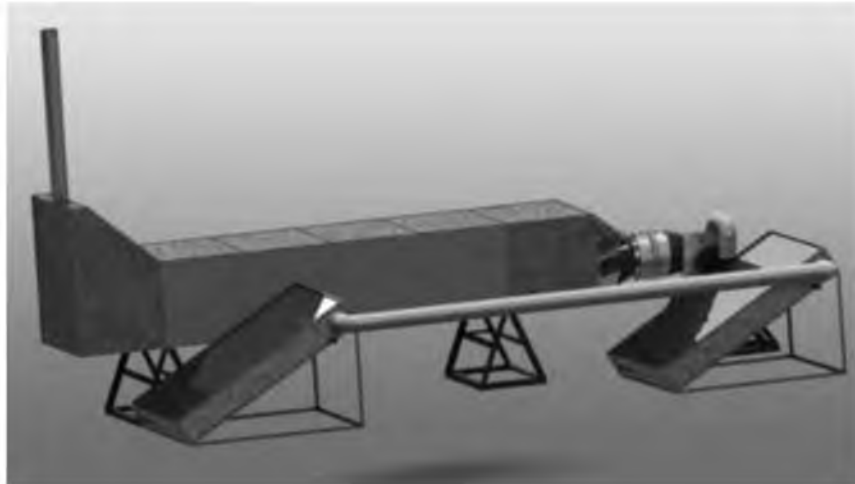


Fig. 2.9 Propuesta de instalación del secador (SolidWorks).

Dentro de las instalaciones de la Universidad del Papaloapan se designó un espacio en la parte sureste del plantel, sobre el cual se colocó todo el equipo del sistema de secado, primero se construyó una plancha de concreto para utilizarla como base del secador (esto con el fin de no colocar el secador sobre el terreno y que absorbiera la menor cantidad de humedad posible del ambiente); equipada con un tablero de conexiones eléctricas para la alimentación de los dispositivos electrónicos y mecánicos.



Fig. 2.10 Instalación del secador solar.

Sobre la plancha se perforaron espacios para colocar de manera fija (utilizando tornillos de sujeción de $\frac{1}{4}$ de pulgada) las distintas bases de los tres

componentes del secador (extractor de aire, túnel y colectores, este con las bases adheridas directamente por soldadura).

Definidas las bases, se procedió a colocar los equipos sobre ellas para evitar vibraciones durante el funcionamiento, pero esta vez con tornillos autorroscante para chapa metálica de $\frac{1}{4}$ de pulgada de ancho por una pulgada de largo. Además el motor será protegido de los rayos solares y de las posibles lluvias por una cubierta de lámina galvanizada en forma de cúpula (fig. 2.10).



Fig. 2.11 Secador solar tipo túnel instalado.

Los colectores se conectaron de forma paralela entre sí, a través de una tubería tipo T de pvc de \varnothing 4 pulgadas, que desemboca en la campana de conexión con el extractor de aire (fig. 2.10). Con esto el secador solar quedó totalmente instalado y listo para ser instrumentado y anexar el software de adquisición de datos (fig. 2.11).

Construido el secador solar la siguiente etapa consistió en la instrumentación y el desarrollo de los circuitos de adquisición de datos y control de un dispositivo de corriente alterna.

Capítulo III

Instrumentación del secador

En el desarrollo de este capítulo se presentan los instrumentos de medición seleccionados para las variables de secado, los ajustes de calibración de los dispositivos, los acoplamientos de señal del lazo de control de temperatura, para el diseño y elaboración de un circuito de adquisición de datos y control de un motor de CA.

3.1 Dispositivos de instrumentación del secador

La instrumentación del secador solar requirió de la implementación y conocimiento de dispositivos de medición, adquisición y manipulación de señales:

- Sensores (Temperatura, humedad, presión, radiación solar).
- Tarjeta adquisidora de datos.
- Software para la comunicación con la tarjeta adquisidora.
- Motor monofásico de arranque por capacitor de corriente alterna (integrado a un mecanismo de inducción de aire al túnel de secado).
- Circuito de potencia para el encendido del motor.

3.2 Sensores de temperatura

La temperatura es la medida promedio de energía cinética de las partículas en una unidad de masa, expresada en grados de una escala; tiene una

importancia fundamental en numerosos procesos industriales, es por ello, que resulta imprescindible disponer de una medición precisa. Los sensores de temperatura son instrumentos que detectan los cambios de temperatura y los convierten en señales (eléctricas, mecánicas, radiación, etc.), siendo los eléctricos los más utilizados para instrumentar; los cuales visualizan la temperatura en forma de alguna unidad eléctrica (voltaje, resistencia o intensidad) [29].

Existen tres principales sensores eléctricos de temperatura: los termistores, los RTD y los termopares (utilizados en este trabajo).

3.2.1 Termopares

El termopar es un dispositivo conformado por la unión de dos metales distintos que producen una diferencia de potencial, la cual está en función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado unión de medida o "punto caliente" y el otro conocido como unión de referencia o "punto frío". En la industria son ampliamente utilizados para medir temperatura, debido a su bajo costo y su composición que los hace intercambiables en algún momento dado de deficiencia, además que tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas [29].

3.2.1.1 Termopar tipo J (Hierro / Constantán)

Este termopar cuenta con un rango de trabajo que va de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una sensibilidad de $\sim 52\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, con el inconveniente de que es ampliamente afectado por la corrosión [29].

3.2.1.2 Amplificador de instrumentación AD594

El AD594 es un amplificador de instrumentación que compensa y linealiza la señal generada por el termopar tipo J (del orden de los μV).

Este amplificador incluye un compensador para unión fría de termopar dentro de un chip monolítico, el cual combina una referencia con el punto de congelación (0 °C) precalibrado que produce una salida de 10 mV/°C directamente de un termopar tipo J conectado.

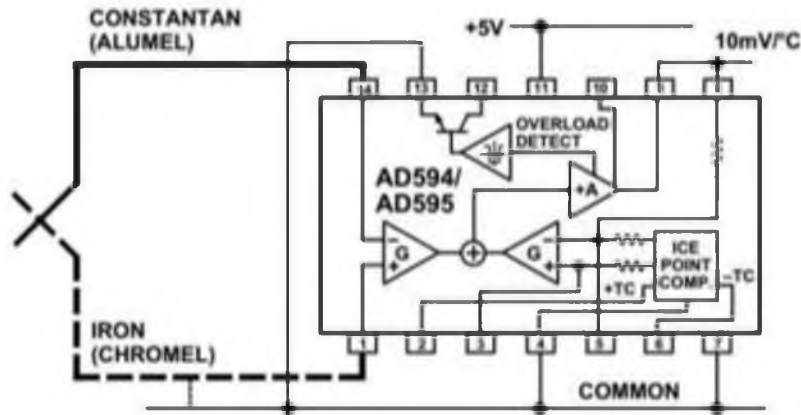


Fig. 3.1 Diagrama esquemático de conexión del AD594 [30].

La ecuación para obtener la temperatura corresponde a:

$$T = \frac{V_{89}}{0.01} \quad (6)$$

Dónde T es la temperatura detectada por el termopar y V_{89} es el voltaje de salida del AD594 tomado del pin 8 o 9, previamente conectados entre sí, como se puede apreciar en su diagrama de conexión (fig. 3.1), donde los pines 1, 4, 7 y 13 están conectados a un común (GND), mientras que la alimentación de 5V se realiza a través del pin 11 [30].

En el diagrama también se aprecia que las salidas hierro – constantán del termopar tipo j se conectan a las entradas 1 y 14 respectivamente.

3.3 Sensores de humedad

La humedad es la cantidad de moléculas de agua presentes en un determinado material, que comúnmente se visualiza en porcentaje de la masa

total de la materia; es un factor determinante para llevar a cabo una diversidad de procesos como por ejemplo el secado, por ello es que existen sensores de humedad, los cuales son instrumentos que delimitan la humedad en un área dada; con ellos se pueden realizar tareas como control, reducción o simplemente medición de esta magnitud [31].

Para reducir costos algunos dispositivos combinan sensores de temperatura y humedad, ya que la medición de cada una de estas magnitudes no afecta una de la otra.

3.3.1 Sensor de humedad y temperatura HMP60

Es un dispositivo elaborado para la medición de la humedad relativa y temperatura de una determinada área de trabajo, adecuado para aplicaciones de volumen, de metrología, integración de equipos, incubadoras, invernaderos, cámaras de fermentación y registradores de datos; está diseñado para condiciones extremas [32].

Cuenta con dos salidas de voltaje configurables con medición escalable de humedad relativa, temperatura y punto de rocío, además de que no requiere recalibración para su uso, su voltaje de operación ronda entre 5 – 28 v de entrada (fig. 3.2).



Fig. 3.2 Diagrama de conexión del sensor HMP60 [32].

El sensor HMP60 determina la humedad en una función lineal donde cada 10 mV representa una unidad de porcentaje de humedad relativa, por lo que su rango de trabajo es de 0 – 1000 mV o 0 – 1 V, delimitado por la ecuación:

$$HR = \frac{V_2}{0.01} \quad (7)$$

Donde HR corresponde a la humedad relativa en porcentaje (%) detectada por el sensor y V_2 es el voltaje de salida del pin 2.

Para la medición de temperatura se requiere de un ajuste para ser determinada, ya que la diferencia de potencial resultante no delimita linealmente la temperatura en grados Celsius, por lo que se toma en cuenta lo siguiente:

$$T = \left(\frac{V_4}{0.01} \right) - 40 \quad (8)$$

Donde T corresponde a la temperatura en grados Celsius y V_4 al voltaje de salida del sensor que es denominado por su pin 4.

3.3.2 Sensor de humedad y temperatura HMZ-433A1

Es un dispositivo híbrido con sensor de temperatura y humedad relativa integrado en un único encapsulado.

Algunas de las características considerables de este sensor son:

- Cuenta con un termistor integrado del tipo NTC.
- Su tamaño es compacto (34mm x 22mm).
- Se alimenta con 5 volts.
- Consumo bajo de corriente eléctrica (2 – 5 mA).
- La lectura de humedad es registrada en volts [33].

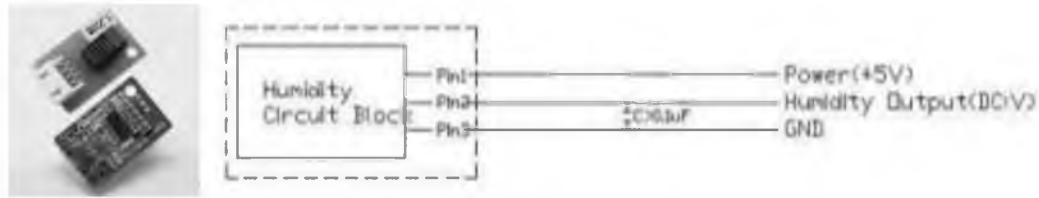


Fig. 3.3 Diagrama de conexión del sensor HMZ – 433A1 [33].

Para establecer su configuración de humedad se conecta con 5V en la entrada de alimentación, con un capacitor de $0.1\mu\text{F}$ (de poliéster) entre la salida de voltaje que representa la humedad relativa detectada (pin 2) y el común o GND (pin 3) (fig. 3.3).

En cuanto al comportamiento de su sensor de humedad relativa, la relación de la salida de voltaje con la variación de humedad detectada resulta ser lineal, estableciendo su rango de trabajo entre 0 y 3.3 V. De esta forma se establece que cada unidad de porcentaje de humedad equivale a 33 mV.

$$\text{HR} = \frac{V_2}{0.033} \quad (9)$$

Donde HR es la humedad relativa detectada por el sensor y expresada en porcentaje (%) y V_2 es la salida de voltaje del pin 2; por último respecto a este sensor se hace mención que no se utilizó para la delimitación de temperatura, ya que dichas mediciones se realizaron con los termopares tipo J (utilizando el amplificador AD59AQ) y el sensor HMP60.

3.4 Sensor de presión

La presión es una fuerza que se ejerce sobre un área determinada, esta fuerza se puede aplicar a un punto en una superficie o distribuirse sobre esta, los principios que se aplican a la medición de presión se utilizan también en la

determinación flujos y niveles de líquidos. Los sensores de presión son habituales en cualquier proceso industrial o sistema de ensayo y tienen como objetivo transformar una magnitud física en una eléctrica, en este caso transforman una fuerza por unidad de superficie en una diferencia de potencial equivalente [34].

3.4.1 Sensor de presión MPX2200AP

El sensor de presión MPX2200AP piezo – resistivo de silicio proporciona una salida precisa y lineal de voltaje proporcional a la presión aplicada; es un diafragma de silicio monolítico con medidor de voltaje y una red resistiva de película delgada integrada en un chip. Está diseñado para usarse en aplicaciones como controladores de bomba / motor, indicadores de nivel, diagnóstico médico, barómetros, etc.

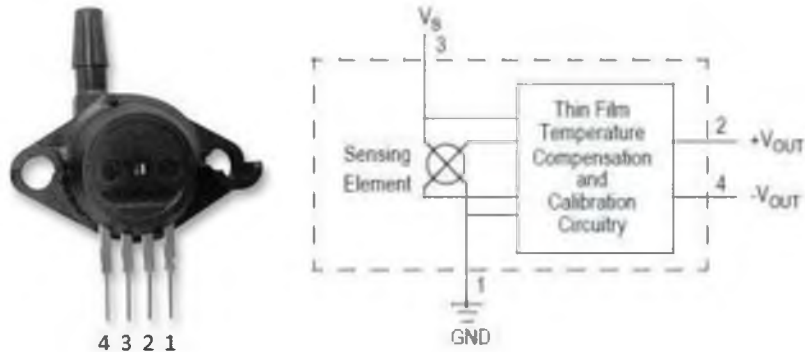


Fig. 3.4 Diagrama de conexión del sensor MPX2200AP [35].

Este sensor se alimenta desde 5 hasta 16 volts y consume 6 mA o menos, cuenta con dos salidas de voltaje, que representan una diferencia de presión; la salida 2 se conoce como positiva o de presión (P_1), en tanto que la 4 es la negativa o de vacío (P_2), aunque ambas muestren una diferencia de potencial positivo (fig. 3.4) [35].

De acuerdo a la gráfica del sensor (fig. 3.5) se calcula la presión en KPa de la siguiente forma:

$$P = 5000(V_2 - V_4) \quad (10)$$

Donde V_2 y V_4 corresponden al voltaje correspondiente al pin 2 y pin 4, mientras que P es la presión dada en KPa detectada por el instrumento.

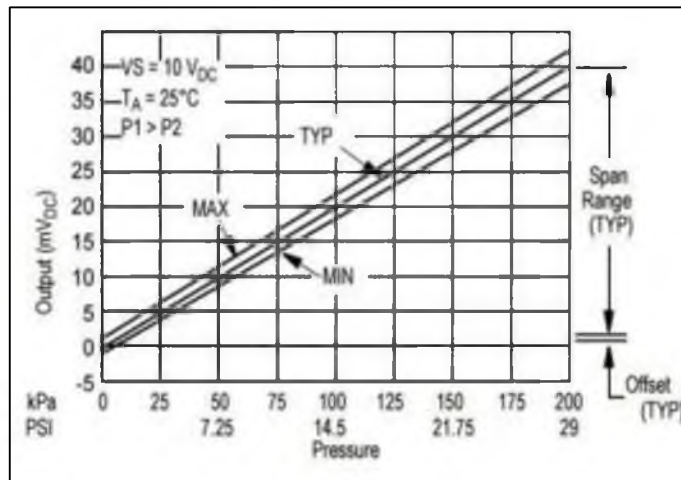


Fig. 3.5 Gráfica de comparación entre la diferencia de presión y el voltaje [35].

3.5 Sensores de radiación solar

La radiación solar resulta ser la energía electromagnética procedente del sol, dicha energía se transfiere en forma de ondas directamente hacia todas direcciones; este espectro solar se considera importante para determinar los efectos favorables o dañinos que pueda producir el sol en actividades como la biología, la medicina, la agricultura y la industria; es por ello que a lo largo del tiempo se han desarrollados dispositivos que pueden determinar el valor de esta magnitud física.

Un dispositivo que mide la radiación solar incidente sobre determinada área es el piranómetro, en el cual la energía radiante incide sobre un fotodiodo que es capaz de diferenciar el espectro solar por la frecuencia de la onda electromagnética, y de ese modo, mediante la lectura de voltaje, conocer los datos de radiación [36].

3.5.1 Piranómetro SP Lite2

El SP Lite2 es un piranómetro diseñado para monitorear módulos fotovoltaicos, la estimación de la evapotranspiración en la agricultura, calcular la dispersión de la contaminación atmosférica y la convección térmica.

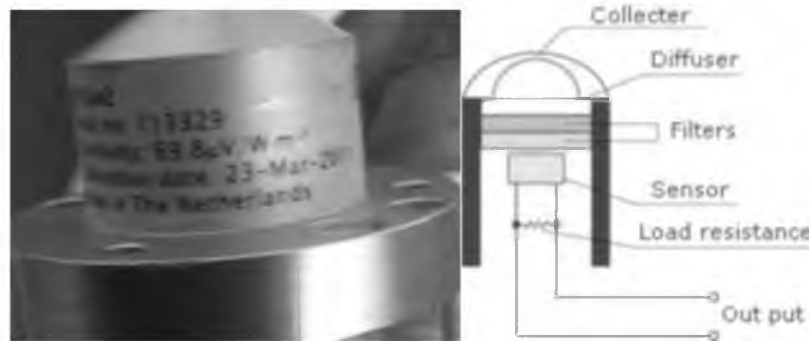


Fig. 3.6 Diagrama electrónico del piranómetro SP LITE2 [37]

El colector mide la energía solar recibida en una determinada área, a partir de un detector fotodiodo que genera una diferencia de potencial de salida proporcional a la radiación solar entrante (fig. 3.6), esta diferencia de potencial al ser dividida por el coeficiente de calibración determina la radiación solar que cae en el área. Su ecuación de trabajo corresponde a:

$$E_{\text{solar}} = \frac{U_{\text{emf}}}{S} \quad (11)$$

Dónde:

$$E_{\text{solar}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] = \text{Irradiación}$$

$$U_{\text{emf}} [\mu\text{V}] = \text{Voltaje de salida}$$

$$S = \text{Sensibilidad} \left[\frac{\text{V}}{\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)} \right]$$

S (Sensibilidad o coeficiente de calibración) es determinado por el fabricante del dispositivo, que en este caso corresponde a $S = 0.0000698 \left[\frac{\text{V}}{\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)} \right]$ o

$$S = 69.8 \left[\frac{\mu\text{V}}{\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)} \right] [38].$$

Por lo que la ecuación para determinar la radiación solar del piranómetro utilizado en este trabajo es:

$$E_{\text{solar}} = \frac{U_{\text{emf}}}{0.0000698} \quad (12)$$

3.6 Amplificador operacional

Los amplificadores operacionales son circuitos integrados analógicos lineales de propósito general, con la capacidad de amplificar señales de voltaje; cuentan con características como una alta impedancia de entrada (del orden de los $M\Omega$), así como la de salida muy baja (del orden de 1Ω o menores), la ganancia con la que cuentan es del orden 1×10^5 o mayor, además de que en lazo cerrado las entradas tanto inversora como no inversora son prácticamente iguales.

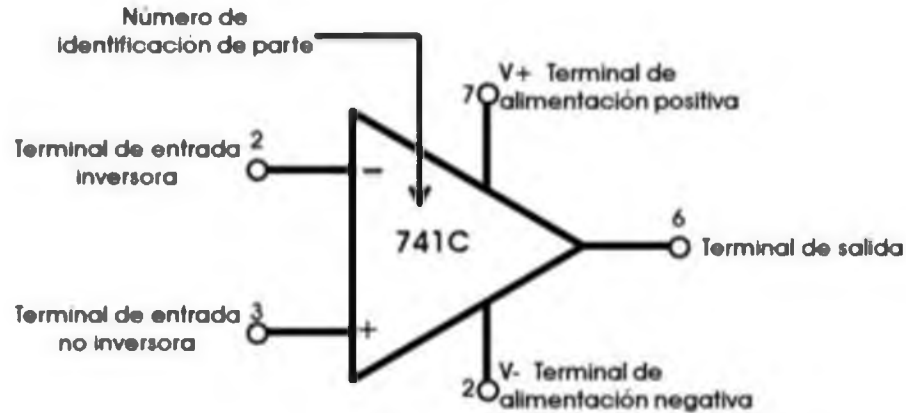


Fig. 3.7 Diagrama de conexión del amplificador operacional 741 [39].

El amplificador operacional de voltaje 741 cuenta con 8 terminales en su estructura física, cada una de las cuales cumple con una función específica que hacen posible el aumento de tensión proporcional de la salida respecto a la entrada de la señal (fig. 3.7); dependiendo del modo de trabajo (opam no inversor, seguidor de tensión, sumador, restador, etc.) la conexión de las terminales inversora y no inversora cambian o pueden combinarse entre sí [39].

Se empleó un opam UA741 en su modo no inversor para aumentar la señal de voltaje, sin cambiar la polaridad del voltaje de salida respecto a la que emite el piranómetro SP Lite2.

3.7 Tarjeta adquisidora de datos (Arduino)

Un adquisidor de datos es un dispositivo que tiene la función de calcular y registrar valores determinados por sistemas externos (sensores, computadores, fuentes de voltaje, etc.), a través de una serie de circuitos y componentes electrónicos. En este trabajo se utilizó como adquisidor de datos la tarjeta Arduino Mega 2560, que cuenta con esta función complementándose de un software auxiliar (en este caso se utilizó Matlab).

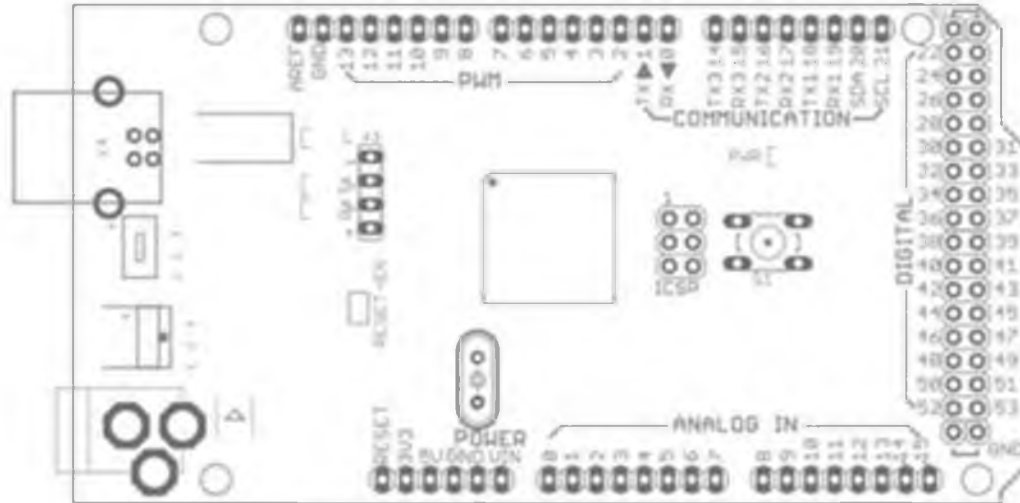


Fig. 3.8 Diagrama de conexión Arduino mega 2560 [40].

Arduino se puede definir como una plataforma electrónica basada en código abierto, desarrollada en una placa que cuenta con diversidad de entradas y salidas (analógicas y digitales), microprocesadores y dispositivos electrónicos (condensadores, leds, resistencias, etc.) que permite realizar una conexión entre el mundo físico y el virtual a través de un ordenador, logrando realizar tareas como la adquisición de datos (fig. 3.8).

Estos dispositivos se encuentran en diferentes presentaciones como el UNO, el Leonardo, el micro o el mega; debido a sus 16 entradas analógicas (máxima cantidad de entradas existentes para arduino) se determinó adquirir este último para el desarrollo del sistema de monitoreo y control del secado [41].

3.8 Matlab

Para desarrollar la adquisición de datos se implementó el software de programación matemática Matlab, el cual codifica, manipula y guarda los datos en el ordenador, a través de su comunicación serial con la plataforma arduino.

Utiliza un lenguaje de alto nivel para realizar diversidad de operaciones, las cuales integran el análisis numérico, el cálculo matricial, procesos de señales y gráficos, por medio de algoritmos, funciones y diagramas a bloques. El entorno de Matlab puede extenderse hasta desarrollar tareas específicas como lo son:

- Procesamiento de señales e imágenes.
- Diseño de sistemas de control.
- Simulación de sistemas dinámicos.
- Redes neuronales.
- Adquisición de datos, etc. [42].

Matlab cuenta con complementos de programación que le permiten elaborar diagramas de control por bloques (Simulink) y entornos gráficos e interactivos (GUIDE), este último se empleó para desarrollar el software de adquisición de datos y control del extractor de aire, ya que brinda una interfaz gráfica, interactiva y dinámica para visualizar el proceso de secado.

3.9 Motor monofásico de arranque por capacitor (Extractor de aire)

Los motores de arranque por capacitor son máquinas inductivas de corriente alterna que utilizan un condensador para llevar a cabo su encendido, debido a que se obtiene un mayor par de arranque (3.5 a 4.5 veces el par nominal) y a su reducida corriente de arranque para la misma potencia al instante. El capacitor genera un campo magnético al devanado auxiliar, lo cual lo adelanta 90° respecto al campo magnético generado por el devanado principal.

Estos motores monofásicos de corriente alterna están equipados con devanados de trabajo y arranque, además cuentan con un condensador que se conecta en serie con el devanado de arranque y el switch o interruptor, permitiendo tener mayor par de arranque. Su rango de trabajo va desde fracciones

hasta 15 HP (en este caso el motor que se utilizó cuenta 3/4 HP), y se suelen utilizar ampliamente en máquinas o herramientas como lo son los extractores de aire, pulidoras, motobombas, etc. [43].



Fig. 3.9 Motor monofásico de arranque por capacitor (Extractor de aire).

En este caso el extractor de aire está compuesto por un motor monofásico de arranque por capacitor, que al encenderse acciona un sistema de aletas que atraen el aire hacia el túnel de secado.

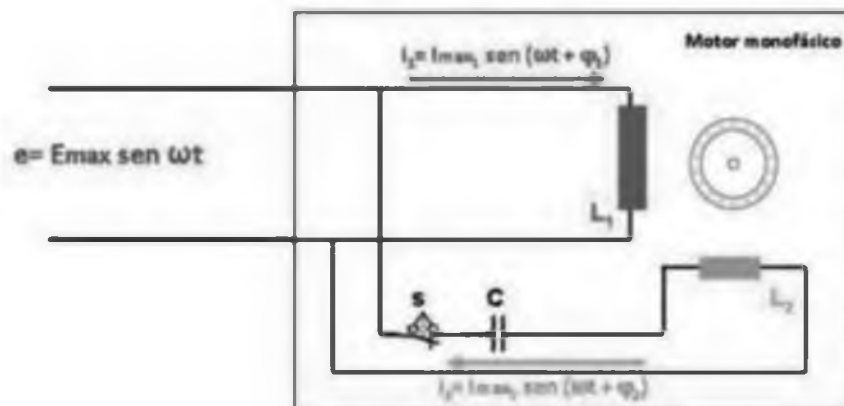


Fig. 3.10 Esquema eléctrico del motor monofásico de arranque por capacitor [43].

3.10 Calibración de los termopares tipo J

Para la obtención de señales de salida más precisas por parte de los termopares fue necesario realizar una calibración debido a la implementación de

longitudes métricas de cables para la conexión de los termopares con la tarjeta adquisidora.

La calibración de los termopares se realizó a través de un baño térmico con temperatura controlada y tomando como referencia un termistor de 2500Ω .

El baño térmico consta de un recipiente para agua que en su interior tiene una bomba de recirculación y en su parte exterior sobresale un control para el aumento de temperatura (la temperatura solo puede aumentar no disminuir).

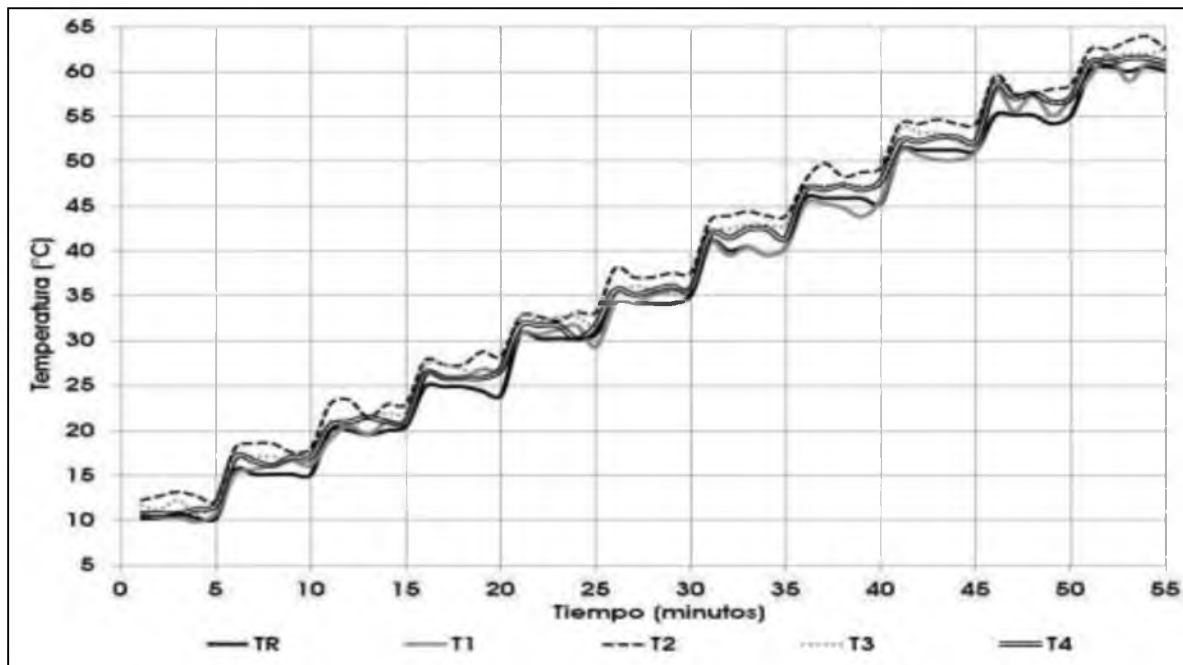


Fig. 3.11 Calibración de termopares por medio de un baño térmico.

Una vez colocados los termopares y el termistor de referencia en el baño térmico se comenzaron a tomar las mediciones de cada uno de ellos, aumentando la temperatura gradualmente. La temperatura inicial del muestreo de datos correspondió a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, con incrementos manuales (a través del control de temperatura del baño) de 5 grados hasta alcanzar $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se registraron más de 30 datos por cada temperatura de referencia, tomando intervalos de 10 segundos entre mediciones (fig. 3.11).

Para adquirir los datos de los sensores de temperatura hacia la computadora fue necesaria la implementación de la tarjeta de adquisición de datos (arduino), a la cual se le indicaron los parámetros de muestreo, para la recolección de mediciones.

Terminado el proceso de recolección de datos en el baño térmico, se visualizaron todas las mediciones obtenidas en una hoja de cálculo para determinar la diferencia de cada termopar con respecto a la referencia.



Gráfica 3.1 Lectura de los termopares en el baño térmico.

Se observó que la mayoría de las mediciones tomadas por los termopares son mayores a las realizadas por la referencia, por lo que es necesario implementar una ecuación de calibración para acercar estas medidas lo mayor posible a la referencia (TR, gráfica 3.1).

Con esto se determinó una ecuación de calibración característica para la salida de cada uno de los termopares a implementar en el sistema:

$$T_1^* = T_1 \quad (13)$$

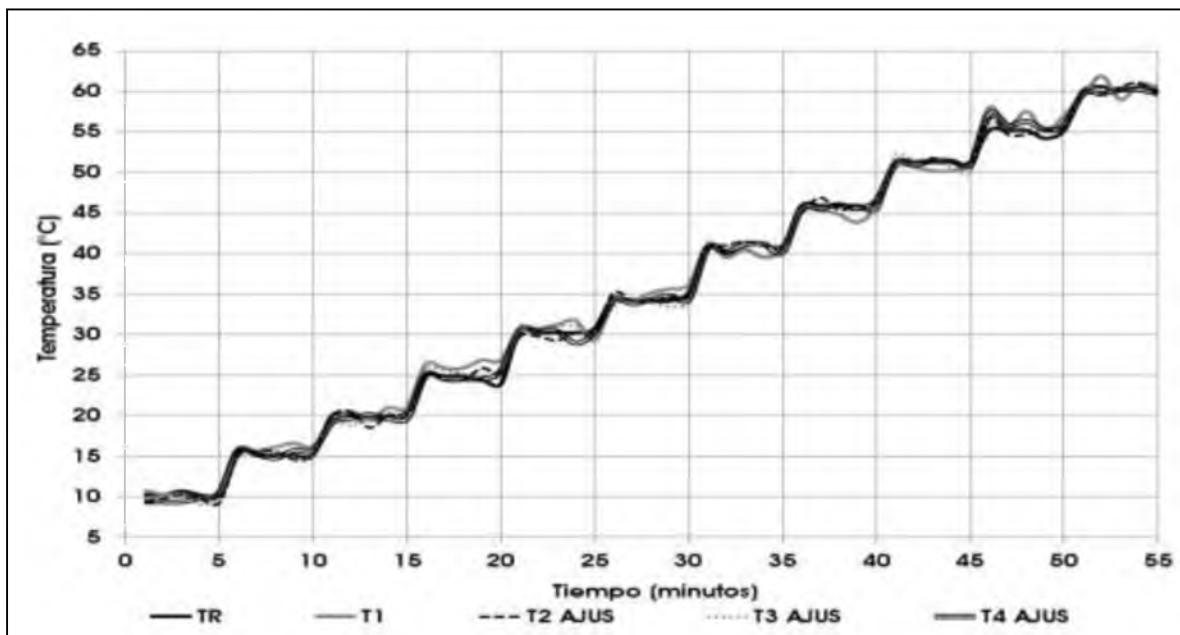
$$T_2^* = T_2 - 2.947 \text{ °C} \quad (14)$$

$$T_3^* = T_3 - 1.686 \text{ °C} \quad (15)$$

$$T_4^* = T_4 - 1.331^\circ\text{C} \quad (16)$$

Donde * indica la temperatura ajustada de cada termopar.

Los resultados de estas ecuaciones se pueden apreciar en la gráfica 3.2, donde prácticamente todos los sensores se acercaron a la referencia, disminuyendo su error de lectura.



Gráfica 3.2 Ajuste de calibración de los termopares.

En algunos casos no existió necesidad de ajuste alguno (T_1^*) ya que el error en la medición es más pequeño que el error propio del sensor en comparación con la referencia.

La calibración se realizó ya que además del error mismo del termopar ($\pm 2\%$ de la medición) este aumenta debido a la incorporación del cable de señal, por esta razón es indispensable el ajuste.

3.11 Comparativa de los sensores de humedad

La calibración de sensores de humedad relativa resulta ser más complicada que la de sensores de temperatura, por ello para esta medir esta magnitud es recomendable utilizar sensores con precalibración de fábrica. Pero en ocasiones algunos sensores muestran una señal más exacta que otros, debido a que su elemento sensible tiene menor rango de error o por su circuitería más compleja.

Para este trabajo se realizó una comparación entre los sensores de humedad HMZ – 433A1 y el HMP60, para determinar las ecuaciones de ajuste de cada sensor.

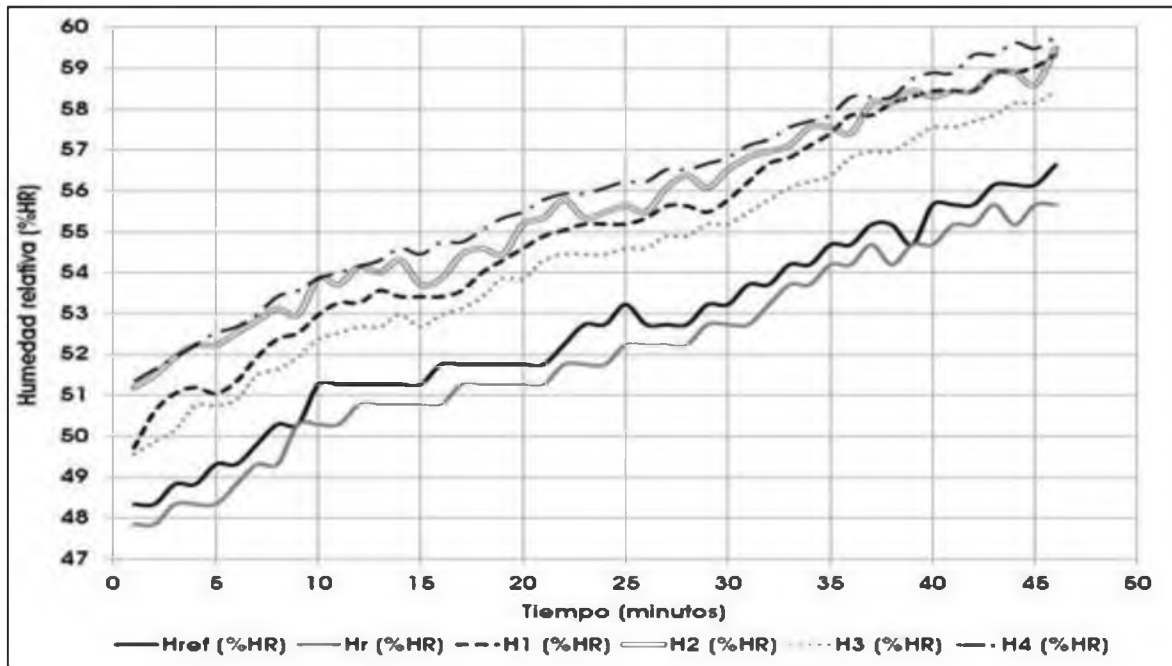
Se conectaron 2 sensores HMP60 (Href. y Hr) y 4 HMZ – 433A1 para realizar un muestreo de datos durante un periodo de 5 horas, detectando cada 10 segundos la humedad del lugar (un ambiente controlado por un aire acondicionado) (fig. 3.12).



Fig. 3.12 Comparación de los sensores de humedad relativa

En la gráfica 3.3 se puede apreciar la diferencia entre las mediciones de los sensores con respecto a la referencia, donde los HMZ – 433A1 presentaron una diferencia mayor con respecto a la referencia ($\pm 2.5\%$) en comparación con el HMP60 a utilizar en el secador, el cual determino magnitudes muy similares a las tomadas por la referencia ($\pm 0.25\%$).

El proceso para determinar las ecuaciones de calibración fue el mismo que el aplicado con los termopares, tomando en cuenta los promedios de las mediciones de cada uno de los sensores respecto a una referencia (El sensor de referencia fue Href que corresponde a un HMP60). Con lo que se determinaron las ecuaciones de calibración.



Gráfica 3.3 Registros de humedad relativa en pruebas de calibración.

Donde las ecuaciones obtenidas para las humedades ajustadas de los sensores HMZ – 433A1 a partir de las mediciones experimentales son las siguientes:

$$H_1^* = H_1 - 1.735\% \quad (17)$$

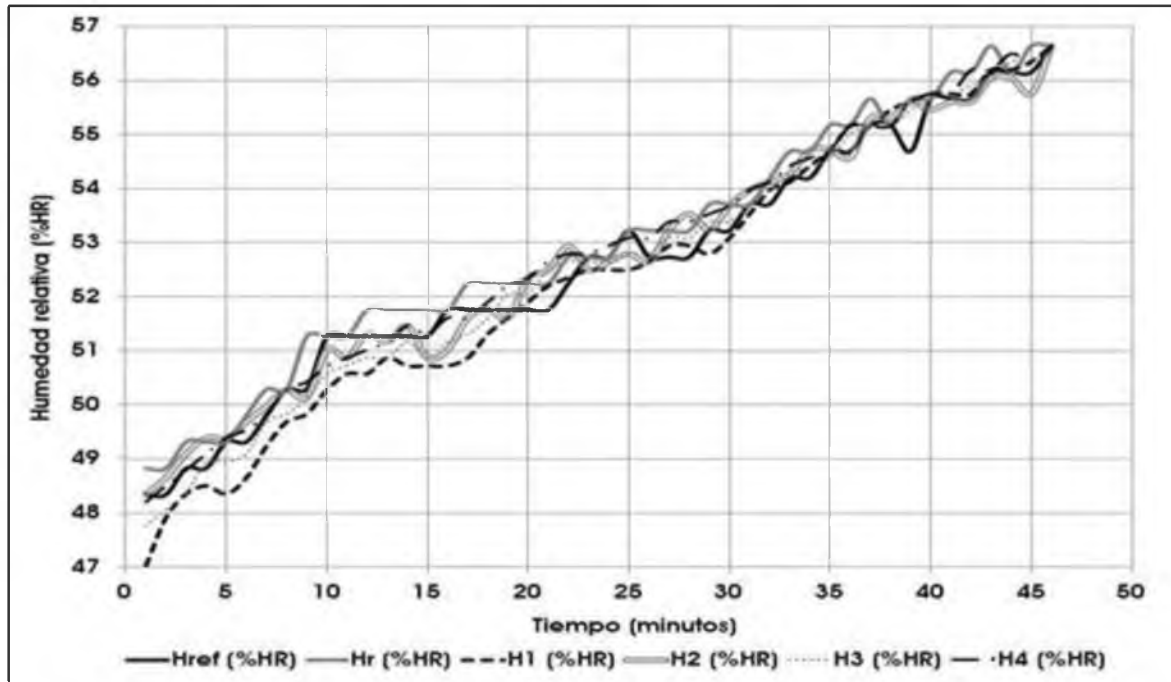
$$H_2^* = H_2 - 2.613\% \quad (18)$$

$$H_3^* = H_3 - 1.227\% \quad (19)$$

$$H_4^* = H_4 - 2.845\% \quad (20)$$

Donde * indica la humedad relativa ajustada de cada sensor HMZ – 433A1.

En la gráfica 3.4 se puede apreciar las magnitudes calibradas de los sensores HMZ - 433A1, donde el error de lectura se redujo a $\pm 0,5\%$ aproximadamente.



Gráfica 3.4 Humedades relativas con ajuste de calibración.

3.12 Pruebas de presión

Se realizaron pruebas con los sensores de presión para observar su comportamiento en un ambiente típico así como en un ambiente modificado (un recipiente cerrado al cual se le modificó la presión a través de una compresora de aire).

Las primeras pruebas se realizaron tomando una muestra cada minuto a través del arduino mega, registrando la presión ambiente de la localidad de Loma Bonita, Oaxaca entre la 1 am - 7am del 20 de febrero del 2015; donde la presión

no vario en lo absoluto manteniéndose en 100 KPa en todos los sensores implementados.

Posteriormente al día siguiente se utilizó un contenedor sellado donde se le inyectó un flujo de aire constante, para medir la presión dentro de dicho recipiente. Pero al igual que en las primeras mediciones, los resultados obtenidos por los sensores MPX2200AP se mantuvieron en 100 KPa.

Por esta razón se determinó que para que los sensores detectaran una caída o un aumento de presión, esta debe presentar un cambio considerable. En el caso del túnel de secado, el flujo de aire corresponde a $4.1 \frac{m}{s}$, que el sensor no alcanza a detectar como un cambio significativo.

3.13 Acoplamiento de la señal de radiación solar

Debido a que la señal de voltaje del piranómetro SP Lite2 es del orden de los μV , resultó necesario implementar un circuito que amplificará la señal. En este caso se configuró un amplificador operacional ua741 en modo no inversor con una ganancia de 10 para obtener un voltaje del orden de mV.

3.13.1 Acoplamiento de señal del piranómetro SP LITE2

Para elaborar el circuito fue necesario conocer la configuración de conexión del opam ua741 en su modo no inversor (fig. 3.13), así como aplicar una ecuación de análisis de circuitos para obtener la ganancia (factor de amplificación de voltaje).

$$V_{sal} = V_{ent} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \quad (21)$$

Donde V_{sal} corresponde al voltaje amplificado, V_{ent} al voltaje de entrada (en este caso la señal del piranómetro), R_1 es la resistencia de entrada y R_f es la resistencia de salida.

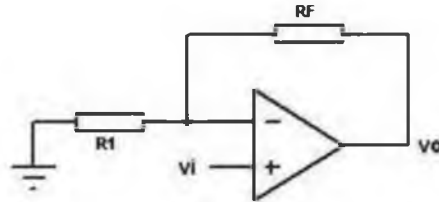


Fig. 3.13 Configuración de opam no inversor.

Utilizando la ecuación 21, se determinaron los valores correspondientes a cada resistencia, proponiendo como $R_f = 9k\Omega$ y $R_1 = 1k\Omega$, de esta manera se obtuvo una ganancia de 10, necesaria para obtener una lectura de voltaje del orden de los mV. Se utilizaron esos valores debido a la estabilidad que ofrece una alta impedancia como la del rango de los $K\Omega$ y porque los opam funcionan con alimentaciones mayores a los 9 volts, con lo que a su vez las resistencias son empleadas como reductores de la corriente de salida y protección del circuito.

Sustituyendo las resistencias propuestas y la señal de salida del piranómetro en la ecuación del amplificador no inversor se obtuvo:

$$V_{sal} = \frac{U_{emf}}{0.000698} \quad (22)$$

La ecuación anterior corresponde al acoplamiento de señal del piranómetro SP LITE2, utilizando un opam en su configuración no inversor.

Determinados los valores de las resistencias que proporcionan la ganancia del circuito, este se representó en un diagrama eléctrico por medio del programa

Proteus (Software de apoyo para simulación de circuitos electrónicos) para evaluar su comportamiento antes de llevar a cabo una prueba física (fig. 3.14).

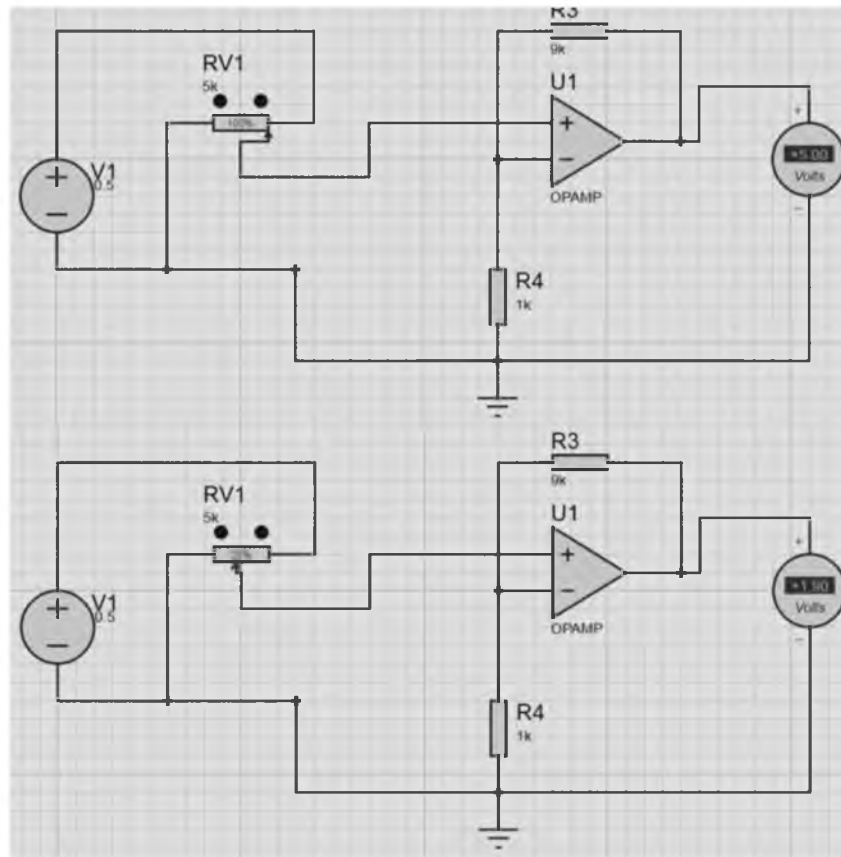


Fig. 3.14 Simulación en Proteus de un amplificador operacional en configuración de no inversión, aumentando la señal de entrada 10 veces.

Como el programa Proteus no cuenta con un dispositivo piranómetro para su simulación, este se sustituyó por una fuente de voltaje de corriente directa conectada a un potenciómetro para regular la señal de entrada y de esta manera determinar la diferencia entre la entrada de voltaje y su salida amplificada en la red de interconexiones.

En la figura 3.14 se puede apreciar el diagrama elaborado en Proteus de un circuito amplificador de tensión (10 veces la salida respecto a la entrada), en su configuración no inversor, utilizando resistencias de 1 k Ω y 9 k Ω para generar la ganancia de voltaje utilizada en el sistema de radiación solar, además cuenta con

una entrada de voltaje regulable; esto quiere decir que al subir la diferencia de potencial de entrada, la salida amplificada aumenta, en este caso como ejemplo se amplificó una entrada que voltaje de 0 – 0.5 volts.

Como se puede visualizar en la imagen (fig. 3.14), a 0.5 V la salida corresponde a 5V, mientras que a una entrada de 0.19 V le corresponde un voltaje de salida de 1.9V.

En la elaboración del circuito físico de amplificación de señal del piranómetro, se tomó en consideración que comercialmente no existe una resistencia de 9Ω en el mercado, por lo que se utilizó una combinación de 2 resistencias conectadas en serie para suplir esta desventaja (2.2 K Ω y 6.8 K Ω).

3.13.2 Pruebas de calibración del piranómetro SP LITE2

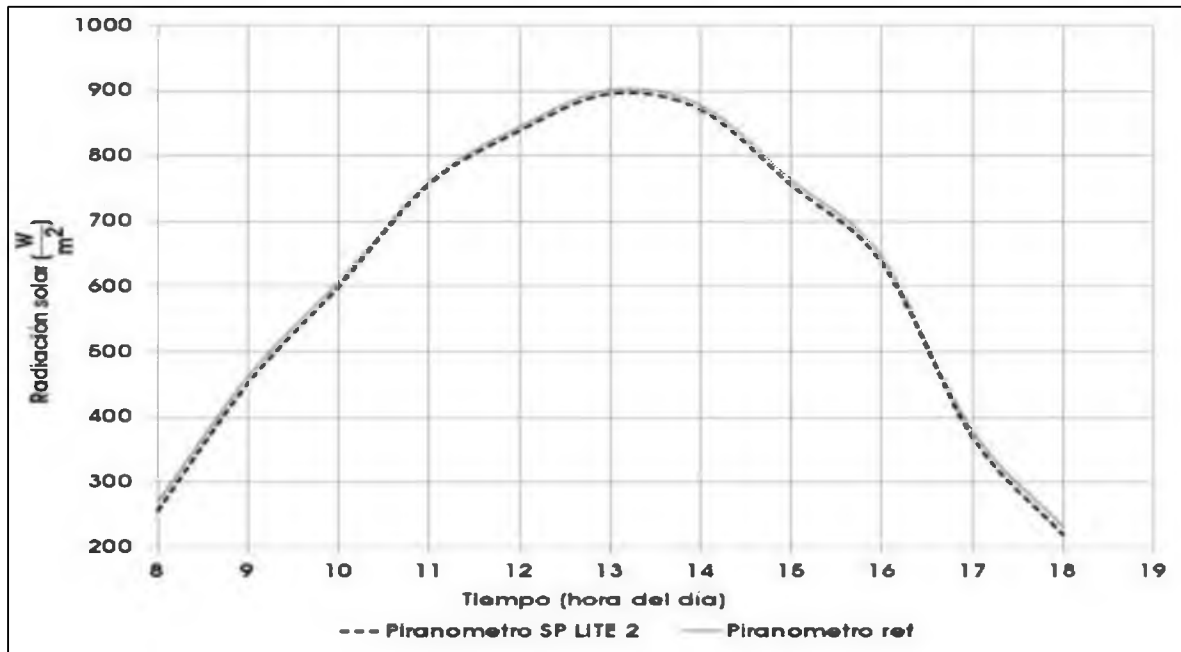
Una vez que se visualizó digitalmente el comportamiento del circuito propuesto, se realizaron pruebas experimentales para la observación funcionamiento del equipo.



Fig. 3.15 Pruebas de radiación solar.

Se llevó a cabo una comparación entre 2 piranómetros SP LITE, para visualizar que tanto diferían uno del otro durante un periodo de trabajo de 8 de la

mañana a 6 de la tarde, el primero sin circuito auxiliar conectado directamente a un adquirente de datos de la marca National Instruments (Piranómetro ref.) con un rango de lectura que comienza en el orden de μV y el segundo conectado al circuito amplificador de señal (SP Lite 2), que fue medido por el arduino Mega (los resultados se pueden apreciar en la gráfica 3.5).



Gráfica 3.5 Comparación entre el piranómetro con señal amplificada y una referencia.

Se decidió no utilizar una ecuación de ajuste de calibración ya que el rango de lectura de los piranómetros es amplio ($0 - 1200 \left(\frac{W}{m^2}\right)$), por lo que el error que se produce (menor a 14 unidades) no es significativo para el proceso de secado.

3.14 Cableado del secador solar

Antes de llevar a cabo las pruebas o ajustes de calibración fue necesario determinar la longitud del cable de conexión que debió tener cada uno de los sensores del sistema. Para lograr esto en primera instancia se designaron cada una

de las posiciones que ocuparían dentro de la máquina de secado y que tan viable sería ubicarlos en la posición deseada. Fue importante determinar por qué fueron ubicados en esas posiciones; primero se consideró el espacio de conexión del arduino mega (solo cuenta con 16 entradas analógicas), por lo que esa fue la primera restricción, posteriormente se delimitó que todos los sensores son importantes, pero los de temperatura y humedad son prioritarios para el deshidratado; por lo que se le dio prioridad a las salidas de estos dispositivos (se contaron con 4 amplificadores de la termopar tipo J, 4 sensores HMZ – 433A1, 3 sensores de presión MPX220AP con el inconveniente que necesita 2 salidas por sensor de presión y un sensor HMP60).







Considerando el número de sensores se decidieron los lugares necesarios para realizar el registro de señales (La tabla 3 describe las posiciones y los sensores con los que contó cada sección).

Cada uno de estos lugares fueron asignados debido a su estratégica posición y su práctica colocación, donde en algunos casos como en el túnel fue necesaria la elaboración de bases especiales para su sostén.

Cabe mencionar que en el túnel fue indispensable el determinar la temperatura y humedad tanto de entrada como de salida, así como censar las magnitudes de la zona de secado, además de obtener la medida de presión por lo menos con un sensor, así se utilizaron 8 pines de entrada en el arduino para el túnel de secado (ya que el HMP60 cuenta con 2 mediciones por lo tanto tiene 2 salidas de señal).

En el dispositivo las tuberías están numeradas y cada una de ellas contiene el cableado de los sensores en cada sección del secador; esto se puede apreciar en la tabla 3.

Tabla 3 Asignación del cableado en el secador.

N. de tubería	Sensores	Posición
1	Temperatura, humedad relativa y presión (Termocupla tipo J, HMZ – 433A1, MPX2200AP)	Campana de conexión entre la tubería y el extractor de aire. 
2	Temperatura, humedad relativa y presión (Termocupla tipo J, HMZ – 433A1, MPX2200AP)	Entrada del túnel de secado. 
3	Temperatura y humedad relativa (HMP60)	Salida del túnel de secado. 
4	Temperatura y humedad relativa (Termocupla tipo J, HMZ – 433A1)	Salida de los colectores. 
5	Temperatura y humedad relativa (Termocupla tipo J, HMZ – 433A1)	Zona de las bandejas. 
6	Radiación solar (SP LITE2)	Sobre el túnel de secado 

De los pines restantes se consideró 1 para el piranómetro, por lo que restaban 7 para los colectores, la tubería y la campana que conecta ambos con el extractor de aire; por consiguiente se determinó colocar en la campana de conexión sensores de humedad, temperatura y presión. Debido a que solo quedaban 3 entradas analógicas disponibles se decidió dejar libre una para trabajo futuro y utilizar las 2 restantes en la salida de los colectores y entrada de la tubería, debido a que al igual que en la campana su colocación sería más práctica y así se determinaría la humedad y temperatura tanto entrante de la tubería como la saliente de la misma (y la entrante a través de los colectores).



Fig. 3.16 Cableado del secador

Por otra parte, previendo modificaciones al sistema se incorporaron cables extras para la conexión de dispositivos electrónicos en trabajos futuros.

3.15 Circuito de potencia

La adquisición de datos y el control del extractor de aire se llevaron a cabo a través de la placa electrónica arduino, la cual con base en la programación de una computadora (En el software Matlab) registró los datos y suministró una señal de activación al motor de CA; pero para realizar esto último fue necesario acoplar un circuito de potencia que accione el dispositivo y proteja la placa.

Para lograr esta acción se utilizó un relevador, que es un dispositivo electromecánico utilizado para conmutar circuitos, básicamente son interruptores controlados por un electroimán, cuando el electroimán es sometido a una corriente se genera un campo magnético, el cual mueve un contacto permitiéndole al dispositivo abrir o cerrar un circuito de corriente alterna [44].

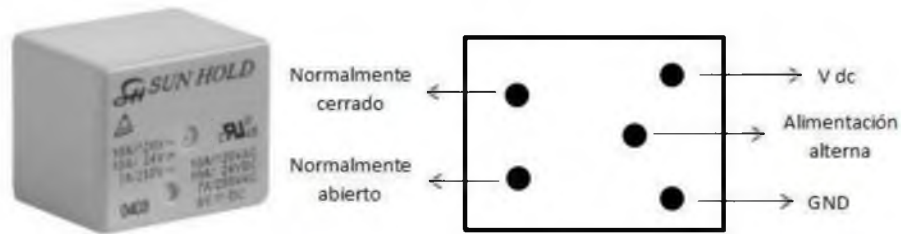


Fig. 3.17 Diagrama de conexión del relevador con accionamiento a 6 volts.

El circuito está basado en un relevador con accionamiento a 6 volts, con rango de operación de hasta 7A y 250V de CA, el cual se utilizó en su fase de normalmente cerrado (esto quiere decir que al ser excitado por una señal procedente del arduino cierra el circuito y acciona el motor del extractor de aire).

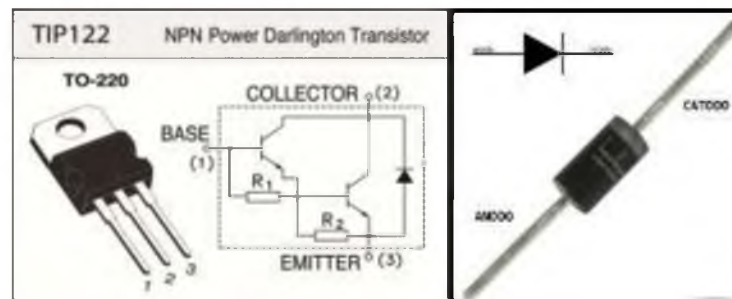


Fig. 3.18 Diagrama de conexión del TIP122 y del diodo rectificador [45].

Para la protección del arduino es necesario conectar diodos, resistencias y transistores como lo indica el diseño del circuito (fig. 3.19).

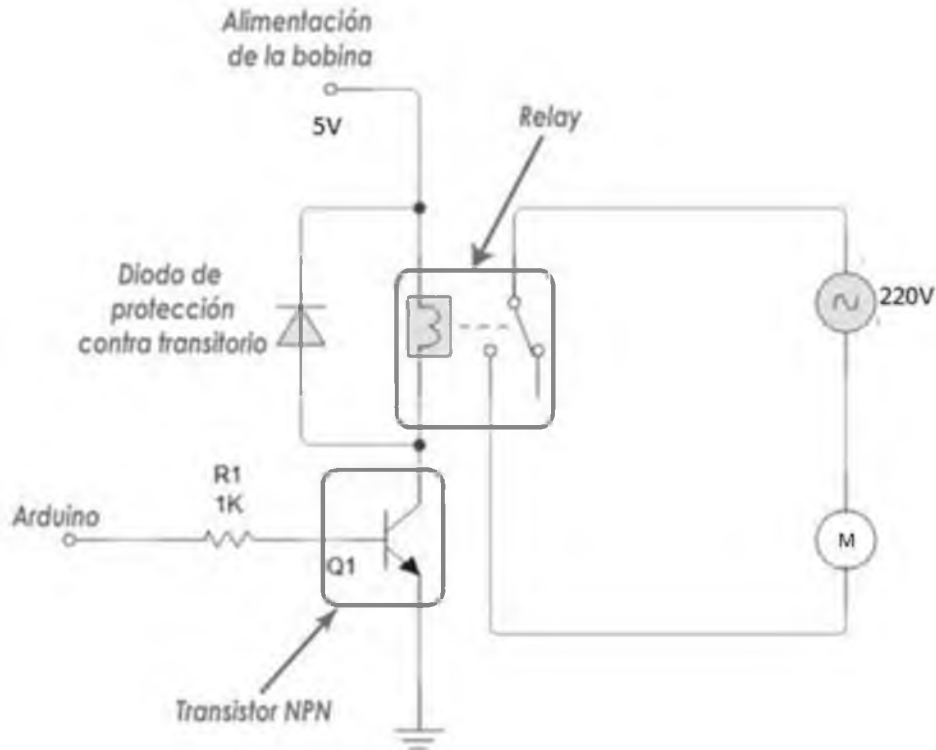


Fig. 3.19 Diagrama de conexión del circuito de potencia [45].

Se elaboró un diagrama digital de prueba del circuito de potencia en el programa Proteus, en el que se utilizó un interruptor para la activación de un elemento resistivo de 220 V de CA (se utilizó de esta forma debido a que no se encontró un motor de 220 V de CA en el software) utilizando el circuito propuesto (fig. 3.19).

En la fig. 3.20 se puede apreciar el accionamiento (de manera digital) de un elemento resistivo de 220 V a partir de la implementación de un circuito que utiliza un relevador como dispositivo principal de trabajo, el cual a partir de una señal de CD acciona un circuito de CA. En este caso el relevador es manipulado en su estado normalmente cerrado por un interruptor, que activa la bobina y cierra el circuito, al no estar apretado el interruptor el relevador regresa a su estado de normalmente abierto, abriendo el circuito y por consiguiente apagando el elemento resistivo.

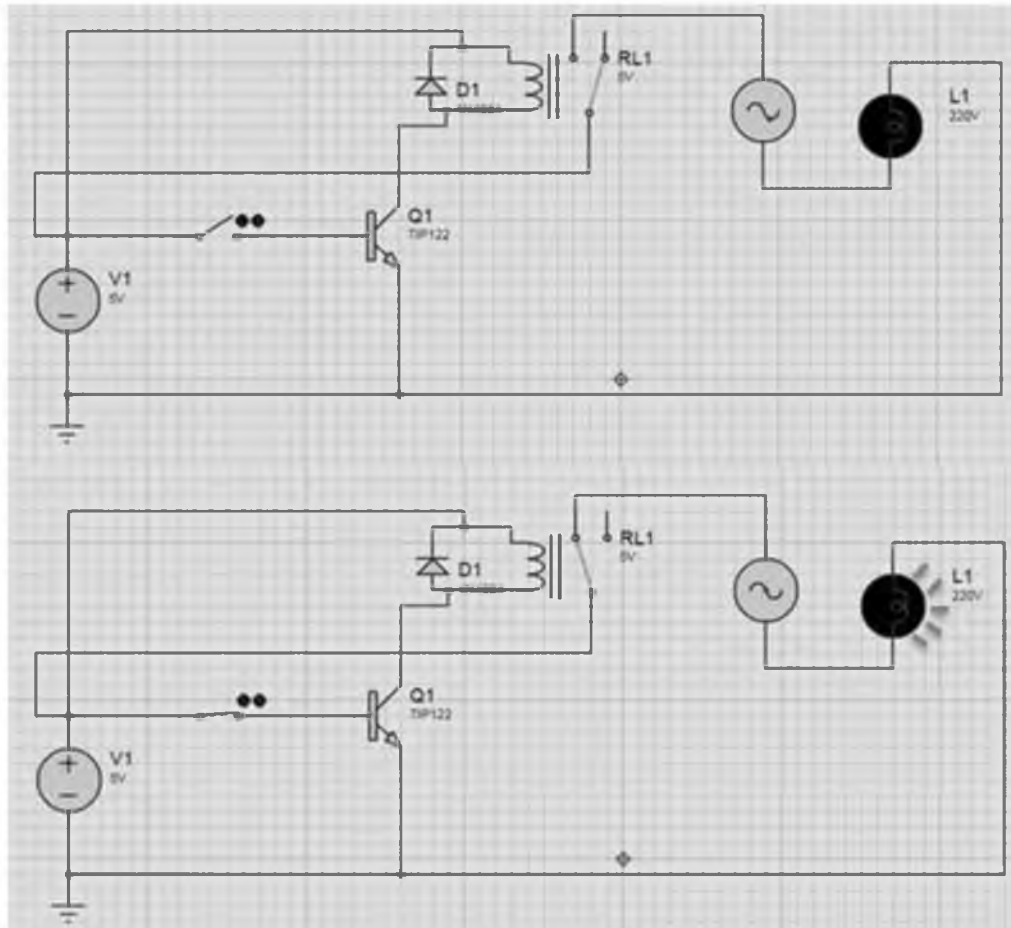


Fig. 3.20 Diagrama digital del accionamiento de un elemento resistivo de 220 V CA utilizando el circuito de potencia y un interruptor.

3.16 Circuito de adquisición de datos y control “on/off” del extractor de aire

En el desarrollo del capítulo se han establecido las configuraciones de conexión de todos los sensores, por lo que es posible elaborar un circuito para adquirir todas las señales que utiliza el sistema de secado.

Para esto en primera instancia se diseñaron los diagramas de salida de los sensores de forma individual, para posteriormente ser unificados en un solo circuito, complementándolo con el arduino y el circuito de potencia.

3.16.1 Diagramas electrónicos

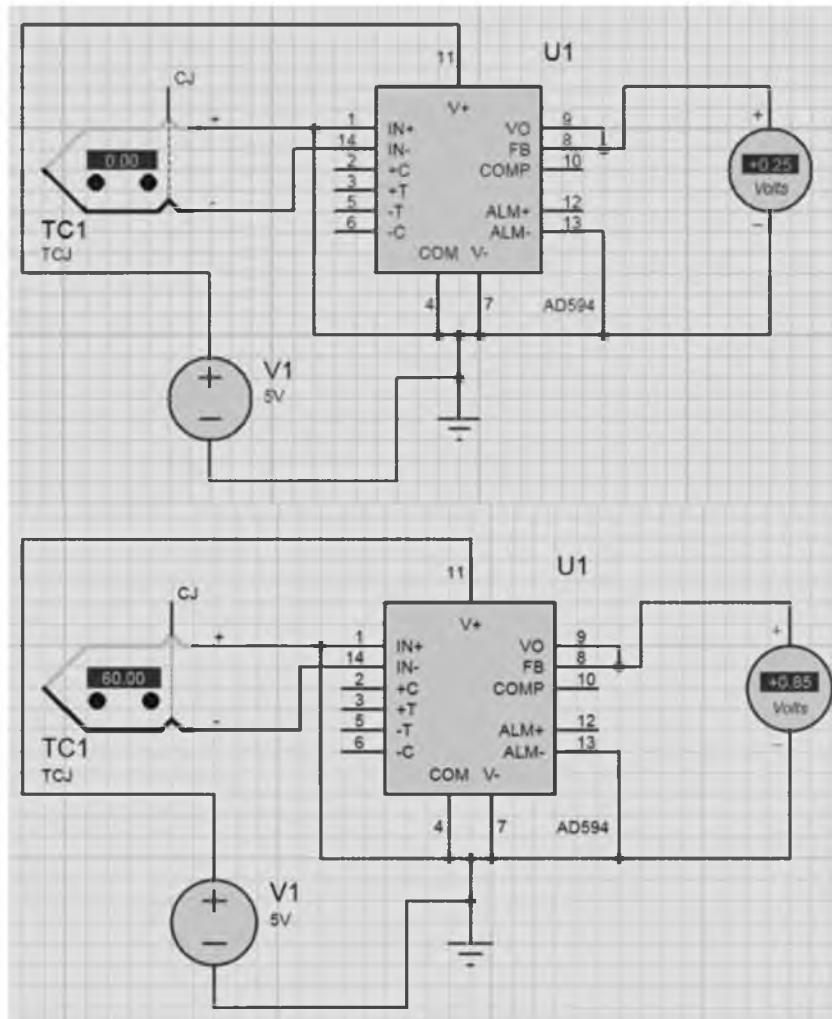


Fig. 3.21 Diagrama digital del circuito del termopar tipo J.

En la fig. 3.21 se aprecia la conexión de un termopar tipo J conectado a un amplificador de señal para instrumentación AD594, el cual compensa la señal para linealizarla y hacerla escalable en grados Celsius; se puede observar el comportamiento del termopar con 2 distintos grados detectados (la determinación de los grados se realiza a través de un par de botones con los que cuenta la sensor digital del programa). En el primer escenario el termopar indica 0 °C mientras que la amplificación establece un voltaje de 0.25 V (cabe mencionar que el AD594 digital del programa Proteus cuenta con un error de +0.25 V para la salida del

termopar por defecto), que corresponden a los grados detectados, en tanto que un segundo escenario se indican $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que su equivalente en diferencia de potencial corresponde a 0.85V .

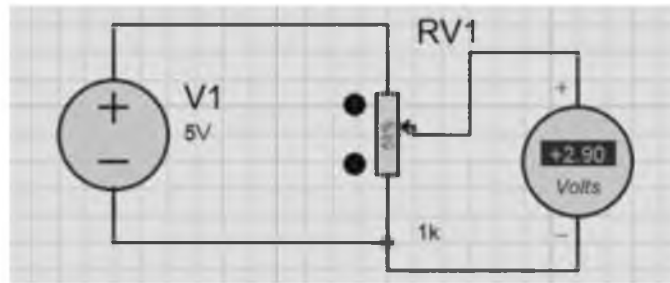


Fig. 3.22 Diagrama digital de los sensores de humedad y presión.

Como el software de simulación electrónica no cuenta con los sensores de humedad y presión con los que se implementó la instrumentación del secador, fueron sustituidos por una fuente de voltaje de 5V (se utiliza este voltaje porque es la máxima lectura permisible por el arduino) regulable gracias a un potenciómetro, en este caso si la resistencia es mayor, el voltaje de salida del circuito será menor (fig. 3.22).

La fig. 3.23 corresponde al diagrama electrónico de la implementación del arduino mega para la adquisición de señales de los 4 tipos de sensores que se utilizaron (temperatura, humedad relativa, presión y radiación solar), y del circuito de potencia para el control (encendido/apagado) del motor de CA. En la parte superior se visualiza que el termopar detecta una temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ por lo que el circuito de potencia esta desactivado, en cuanto al termopar detecta un aumento de temperatura considerable en una rutina de secado (en este caso $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondiente a la parte inferior de la fig. 3.23), activa el circuito de potencia y por ende el encendido del elemento resistivo. Es importante mencionar que además de comprobar el funcionamiento del encendido del motor, esta simulación es importante para marcar las bases de cómo se implementaron físicamente todos los sensores para ser conectados al arduino.

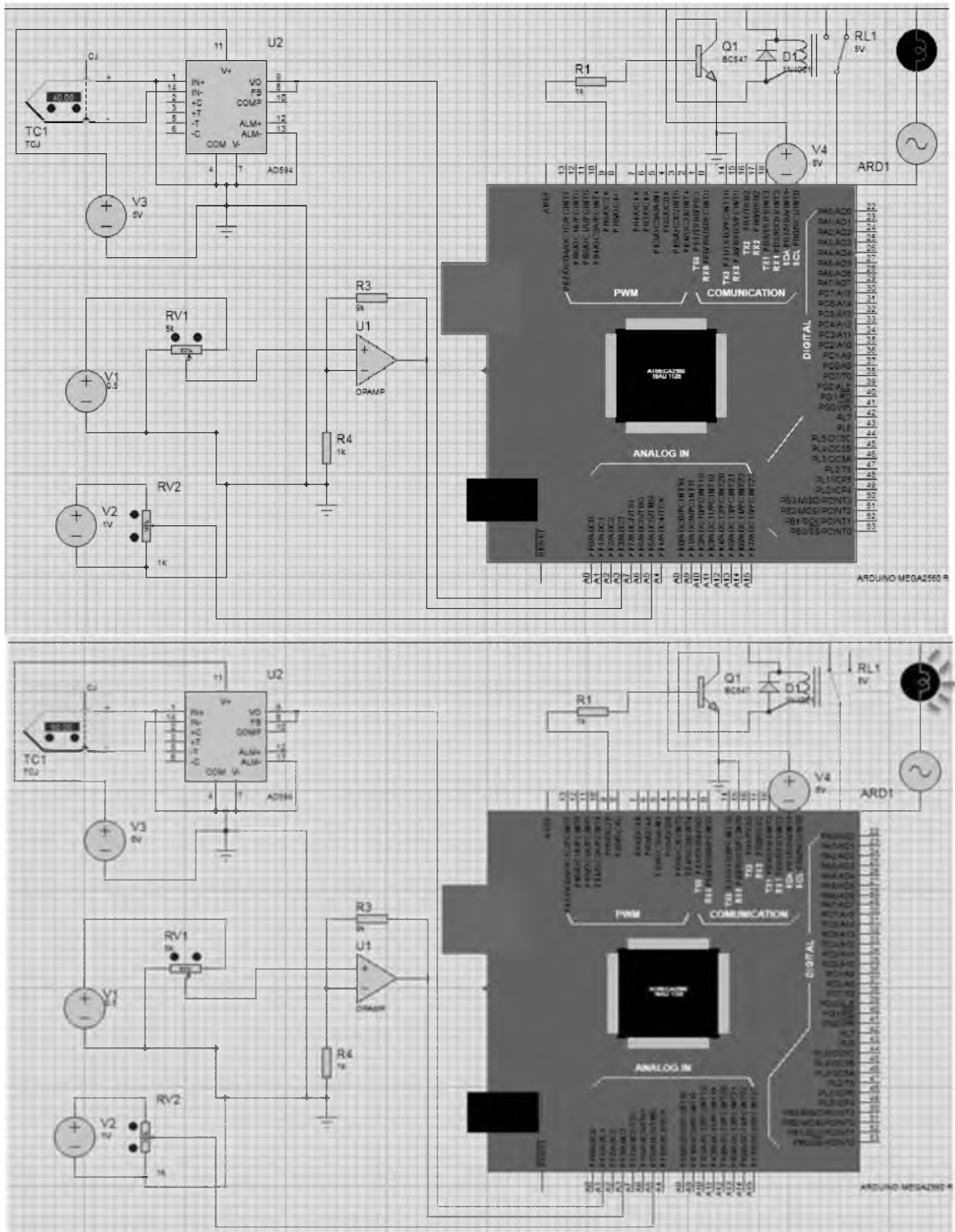


Fig. 3.23 Diagrama digital del sistema de adquisición de datos y del encendido del elemento resistivo (Proteus).

3.16.2 Elaboración del circuito electrónico.

Determinadas las configuraciones del circuito de adquisición de datos y control del motor, se elaboró físicamente la circuitería correspondiente al diagrama electrónico diseñado.

Primero se realizó el circuito de adquisición de datos, el cual conecta cada uno de los sensores con el arduino (fig. 3.24).

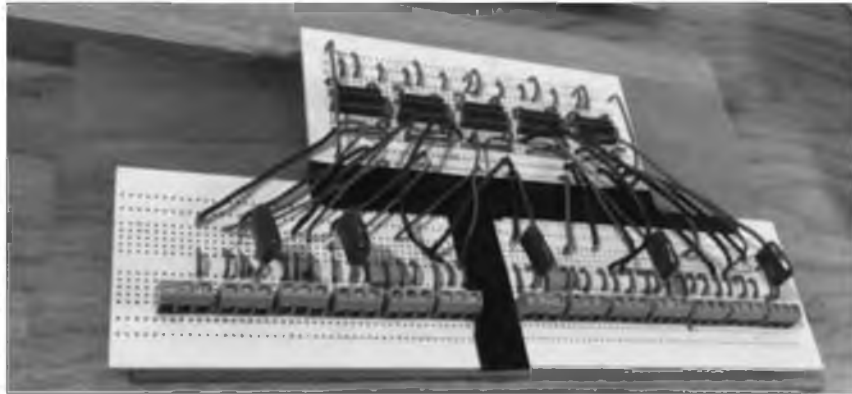


Fig. 3.24 Circuito adquisidor de datos.

De igual manera se elaboró una placa para el circuito de potencia, con la cual el arduino envía la señal de encendido al extractor de aire (fig. 3.25).



Fig. 3.25 Circuito de potencia

Terminados ambos circuitos se construyó una base para poder conectarlos entre sí, para mantenerlos fijos, evitando errores por desconexión; en este caso se

decidió incorporar toda la circuitería en un espacio diseñado para tal fin (transporte del circuito, así como la protección del mismo con el exterior y tener una práctica conexión con el cableado de los sensores, el motor, así como con el circuito adquisidor de datos) (fig. 3.26).



Fig. 3.26 Dispositivo de adquisición de datos y control del motor.

Una vez elaborado el circuito se implementaron los algoritmos de adquisición de datos y activación del motor a partir de un lenguaje computacional (Matlab) para la puesta en función del sistema de secado.

Capítulo IV

Programación del sistema

El siguiente capítulo comprende lo referente a la programación que se realizó para obtener la lógica de secado, registrando las variables que interactúan en el sistema y elaborando algoritmos de adquisición de datos y control de temperatura.

4.1 Características del arduino mega

Es un dispositivo que realiza la comunicación con una computadora a través del puerto usb, además también lo utiliza como fuente de energía para accionarlo, aunque es posible alimentarlo con una fuente de alimentación externa (transformadores o baterías) de entre 6 – 20 volts.

Contiene 256 KBytes de memoria flash para almacenar código (8KB son usados para el arranque del sistema, 8 KB de memoria SRAM y 4KB de EEPROM, a la cual se puede acceder para leer o escribir con la librería EEPROM).

Cada uno de los 54 pines digitales con los que cuenta pueden utilizarse como entradas o salidas, operando a 5 volts donde cada pin puede proporcionar o recibir una intensidad máxima de 40mA.

Sus 16 entradas analógicas van desde el puerto A0 hasta el puerto A15, cada uno de estos puertos puede tomar lecturas a través de circuito interno de conversión análogo-digital (también conocido como ADC, por sus siglas en ingles) que lee un voltaje de 0V a 5V y devuelve un número entero en una escala entre 0

a 1024, y retorna el valor del ADC que es aproximadamente proporcional al valor de voltaje aplicado al pin de entrada analógica [46].

4.2 Instrucciones de adquisición de datos a través de Arduino

Arduino es una herramienta versátil para diferentes campos de trabajo, uno de ellos es la adquisición de datos, que es posible gracias a sus entradas analógicas, utilizadas para la lectura de voltaje a través de su convertidor analógico – digital interno que lee un voltaje de 0V a 5V y devuelve un número entero proporcional y escalable entre 0 y 1024.

Entonces una vez conectada una fuente de voltaje de 5V o menor (para este sistema la salida de un sensor) a una de las entradas analógicas la lectura de esa señal es posible gracias a la función `analogRead(pin)`. La cual adquiere el voltaje de aplicación y lo divide en 1024 partes que corresponden a los 10 bits que maneja por defecto [46].

Arduino al estar ligado a Matlab debe estar referenciado a una variable declarada en principio (en este caso para el sistema se utiliza la variable `a`). Por lo que la función de lectura se establece como:

```
a.analogRead(pin)
```

Donde `pin=0,1,2,...,15` y corresponde a cada una de las entradas analógicas del arduino.

A partir de la implementación de esta función podemos determinar la conversión de las unidades de lectura de arduino con su voltaje equivalente, utilizando la ecuación:

$$V_m = a.\text{analogRead}(\text{pin})/204.8 \quad (23)$$

En dónde V_m corresponde al voltaje de la medición del arduino; esta última ecuación corresponde al equivalente en voltaje de las unidades leídas por el arduino.

Con esta instrucción de lectura de arduino y Matlab complementada por su conversión de voltaje es posible la adquisición de datos de variables físicas a través de arduino, utilizando las ecuaciones de salida de voltaje correspondientes a cada sensor.

4.3 Algoritmos de lectura de los sensores del secador solar

Para determinar digitalmente el valor de las magnitudes físicas que detectan los sensores fue necesario combinar las ecuaciones de voltaje de cada uno, con sus ajustes de calibración (en caso de ser necesario) y las funciones de adquisición de datos del arduino, para formar los algoritmos que determinaron su valor numérico y correspondiente a la magnitud medida.

El sensor de humedad y temperatura HMP60 es el utilizado como referencia por su alta capacidad de trabajo, su precalibración de fábrica y ubicación en el secador (zona de bandejas de secado).

Primero se determinó el algoritmo de temperatura, el cual toma como base la ecuación 8 del sensor HMP60. Aplicando el algoritmo de adquisición de datos del arduino en la ecuación de salida del sensor de temperatura y considerando que T_r corresponde al valor obtenido a partir del dato suministrado al pin 1 del arduino, la instrucción de adquisición de temperatura del HMP60 corresponde a:

$$T_r = (a.analogRead(1)/2.048) - 40 \quad (24)$$

Al utilizar la ecuación 7 de salida de voltaje para la humedad de este dispositivo híbrido (HMP60) y combinándola con el algoritmo de adquisición del arduino se obtiene:

$$H_r = a.analogRead(0)/2.048 \quad (25)$$

Donde H_r corresponde a la humedad relativa detectada del sensor HMP60 a través del pin 0 del arduino.

En el caso de los termopares, de igual manera se planteó la ecuación 6 que corresponde a la salida de voltaje del amplificador de señal AD594. En este caso a diferencia del sensor HMP60 se aplicaron los ajustes de calibración para cada sensor.

$$T_1 = a.analogRead(15)/2.048 \quad (26)$$

$$T_2 = (a.analogRead(11)/2.048) - 2.947 \quad (27)$$

$$T_3 = (a.analogRead(7)/2.048) - 1.686 \quad (28)$$

$$T_4 = (a.analogRead(5)/2.048) - 1.331 \quad (29)$$

Las instrucciones de adquisición de humedad relativa para el caso del HMZ – 433A1 es similar al de los termopares, ya que también necesitó de un ajuste para determinar de forma más precisa el valor de esta magnitud. Se utilizó la ecuación característica del sensor, a la que se le implementa tanto el algoritmo de adquisición de datos así como su correspondiente ajuste.

$$H_1 = (a.analogRead(14) / 6.7584) - 1.735 \quad (30)$$

$$H_2 = (a.\text{analogRead}(10) / 6.7584) - 2.613 \quad (31)$$

$$H_3 = (a.\text{analogRead}(6) / 6.7584) - 1.227 \quad (32)$$

$$T_4 = (a.\text{analogRead}(4) / 6.7584) - 2.845 \quad (33)$$

Para obtener el valor de la radiación solar, se utilizó la ecuación de señal amplificada para el piranómetro SP LITE2. Para ello se sustituyó la ecuación 22 en el algoritmo de adquisición correspondiente al pin 3.

$$\text{pir} = a.\text{analogRead}(3)/0.1429504 \quad (34)$$

Por ultimo las instrucciones de adquisición de presión están derivadas de la ecuación característica del MPX2200AP (10). Donde al sustituir el algoritmo de adquisición de voltaje en el arduino se determinan las ecuaciones correspondientes a los pines 8, 9, 12 y 13.

$$P_1 = (a.\text{analogRead}(13) - a.\text{analogRead}(12)) * 25 \quad (35)$$

$$P_2 = (a.\text{analogRead}(9) - a.\text{analogRead}(8)) * 25 \quad (36)$$

4.4 Control "on/off" del extractor de aire

Los controladores "ON / OFF" son sistemas básicos de control, estos envían una señal de activación "encendido" cuando la entrada de señal es menor que un nivel de referencia definido y desactiva la señal de salida cuando la señal de entrada es mayor que la señal de referencia [47].

En este caso se desarrolló un control "on/off" de la temperatura en el secador, debido a que el motor monofásico de arranque por capacitor que controla la inducción de aire al túnel de secado necesita tener toda la carga de

voltaje en el momento del arranque del motor (por lo que no es posible modificar su velocidad sin modificar su voltaje).

El sistema de temperatura controlada para el secado solar está determinado por los componentes del diagrama a bloques de la fig. 4.1, en donde se emplea un lazo cerrado de control para mantener estable la temperatura del túnel de secado.

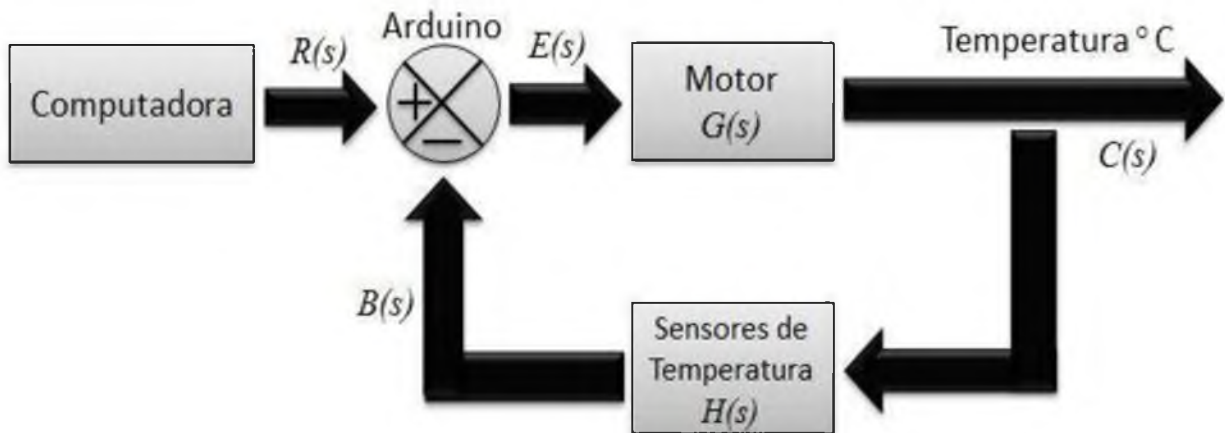


Fig. 4.1 Diagrama a bloques del control de lazo cerrado del sistema.

Donde los sensores de temperatura retroalimentan constantemente a un programa desarrollado en GUIDE (Matlab) en la computadora, que en caso de pasar de la temperatura establecida para el secado, mandan una señal por medio del arduino a un motor de CA para ser encendido. Los sensores de temperatura detectan si esta magnitud comienza a bajar del punto establecido por el programa, de ser así se envían una señal al computador que lo transforman en paro al motor. Estas acciones se repiten hasta que el producto a secar cuente con las características establecidas de secado.

Físicamente el diagrama a bloques descrito, puede implementarse con los dispositivos ilustrados en la fig. 4.2.

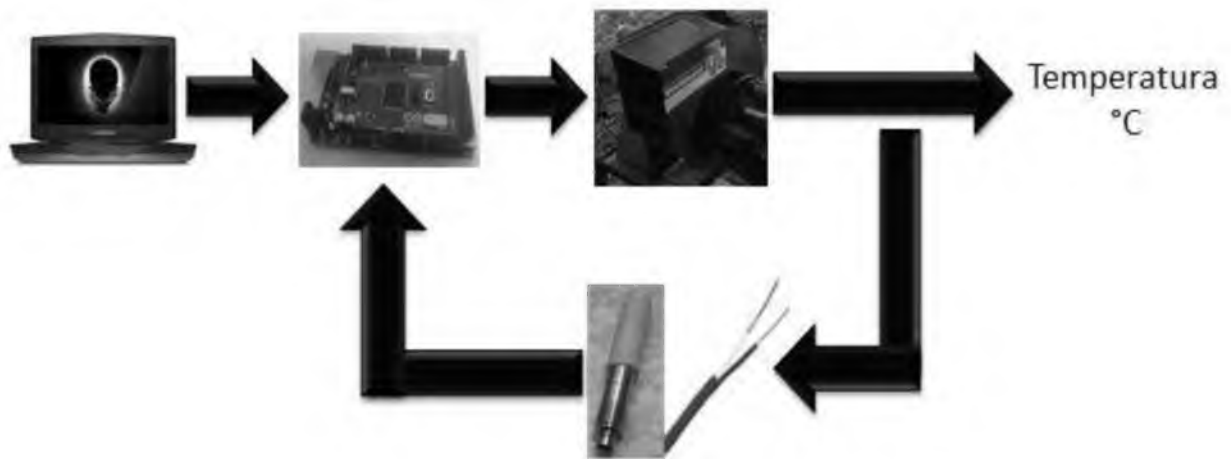


Fig. 4.2 Diagrama de los dispositivos del control de lazo cerrado del sistema.

4.5 Algoritmos del control “on/off” del extractor de aire

Una vez colocado y conectado correctamente el circuito de potencia del motor con el arduino se puede manipular el encendido del extractor de aire a partir de las siguientes instrucciones.

a.pinMode (Numerodepin, 'Mododetrabajo')

Esta instrucción es utilizada para configurar el modo de trabajo de un pin, estableciendo que puede ser input (entrada) u output (salida).

En este caso para poder mandar una señal fuera del arduino es necesario utilizar un pin en modo salida.

a.pinMode (9, 'output') Activa el pin digital 9 como salida de pulso.

Donde el pin 9 fue elegido para utilizarlo como salida aunque pudo haber sido cualquiera de los otros 53 pines de entrada / salida digital.

Determinado el modo de trabajo del pin 9 se puede utilizar de dos diferentes formas en base a un comando

a.digitalWrite(Numerodepin, Estadodefucion)

Esta instrucción es capaz de enviar un nivel alto (5 Volts) o un nivel bajo (0 Volts) a una terminal de entrada o salida digital específica.

Donde el número de puerto utilizado en la lógica de programación del secador es el 9, y el estado de función puede ser alto "1" o bajo "0" [48].

a.digitalWrite(9,1) Salida de 5 volts en el pin 9.

a.digitalWrite(9,0) Salida de 0 volts en el pin 9.

Se puede entender de esta forma que el pin 9 mandará una señal de tensión al relevador a través del circuito de potencia para determinar su estado de trabajo donde el estado "0" corresponde a la posición normalmente cerrado y "1" a normalmente abierto, excitando la bobina del relevador y cerrando el circuito de corriente alterna, encendiendo el motor.

Una vez descritas las instrucciones de trabajo para la activación del extractor de aire, se puede realizar un código para determinar en qué circunstancias es necesario encender el motor.

4.6 Lógica de programación de la adquisición de datos y el control "on/off" del extractor de aire

El funcionamiento del programa de adquisición de datos y temperatura controlada es descrito a partir de un diagrama de flujo de la fig. 4.3.

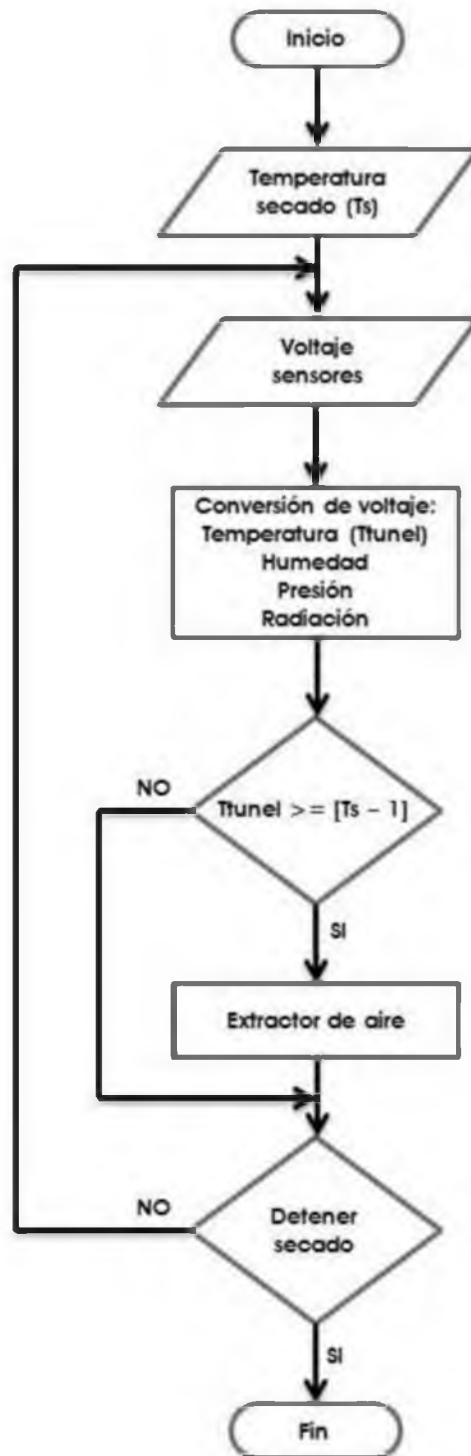


Fig 4.3 Diagrama de flujo del programa de adquisición de datos y control "on/off" del secador solar.

En el programa se ingresa la temperatura a cual se desea llevar el proceso de secado (este depende del producto a secar, pero regularmente se encuentra

entre 40 y 65 °C, debido a que al superar los 65 °C los productos pueden comenzar a cocerse). Ingresada la temperatura de secado se inicia el ciclo con temperatura controlada.

Ya dentro del ciclo de secado, a partir de las entradas analógicas del arduino se ingresan los voltajes de los sensores que registran las variables del sistema. Posteriormente estos voltajes son interpretados como las magnitudes físicas medidas a partir de los algoritmos característicos de cada sensor, implementados a partir de las ecuaciones de caracterización.

Determinadas las variables de secado, el programa evaluará la temperatura del túnel para mantenerla estable, en caso de detectar que es igual o mayor que la temperatura de referencia se activa el extractor de aire para reducir la temperatura de secado del material, este ciclo se realiza hasta que el usuario determina que el producto ya tiene el peso buscado (teóricamente calculado con la ecuación 4).

4.7 Programa de adquisición de datos y temperatura controlada en GUIDE (Matlab)

GUIDE es un entorno de programación visual disponible en Matlab para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos.

Existen diferentes lenguajes de programación que permiten crear una GUI tales como C o Visual Basic que permiten usar diferentes controles y maneras de programarlos. Matlab nos permite realizar GUIs usando GUIDE (Entorno de Desarrollo de interfaz Gráfica de Usuario).

Las interfaces graficas de usuario (GUI por sus siglas en inglés) son la forma en la que el usuario interactúa con el programa o el sistema operativo de una

computadora. Una GUI contiene diferentes elementos gráficos tales como: botones, campo de texto, menús, gráficos, etc. [49].

Un archivo .fig establece la descripción de los componentes que contiene la interface y un archivo .m contiene las funciones y los controles del GUI así como el callback.

Un callback (dentro de GUIDE de Matlab) se define como la acción que llevará a cabo un objeto de la GUI (comúnmente un botón) cuando el usuario lo active. Es la lógica del algoritmo que se ejecutará al activar un botón en una interfaz de GUIDE.

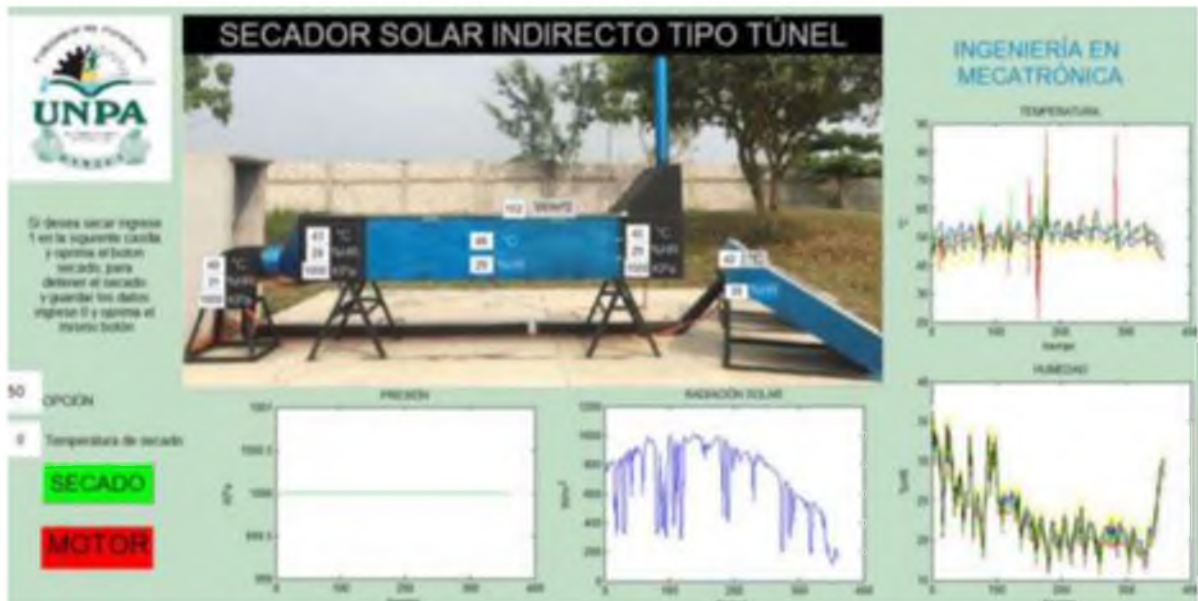


Fig. 4.4 Programa de adquisición de datos y temperatura controlada en ejecución.

El programa de secado está compuesto por un comando de control (push botton) el cual controla las acciones del sistema, denominado secado. Dentro de él se encuentra en forma de código el programa descrito en el diagrama de flujo, además de algunas acciones complementarias para visualizar los datos registrados por los sensores en casillas y en forma de gráficos. Dentro de su callback (que se encuentra dentro del archivo .m) está constituida la programación del sistema.

En la fig. 4.4 se puede apreciar el funcionamiento del programa de secado solar utilizando una temperatura de referencia de 50 °C, donde se visualizan los valores de los sensores de cada sección y el comportamiento de los mismos a través del tiempo en las gráficas (temperatura, humedad relativa, presión y radiación solar).

En general la programación es parte fundamental de este sistema, ya que le traduce al computador los datos que obtienen las mediciones de los sensores en tiempo real, además que manipulan estas variables para poder estabilizar la temperatura manteniendo un secado uniforme. Ya con el sistema en función se realizaron pruebas de secado a temperatura controlada.

Capítulo V

Caracterización experimental de las variables de control del secador solar

El capítulo contiene la documentación obtenida a partir de las pruebas de las rutinas de temperatura controlada del sistema, donde se emplearon materiales orgánicos para deshidratado.

Una vez que se instrumentó el sistema y se implementó el software de adquisición de datos, se realizó la caracterización de control; para este fin fue necesario recopilar información del sistema, el comportamiento de las variables en cada una de las secciones del secador, para posteriormente plantear las rutinas de operación del sistema a diferentes condiciones.

En primera instancia se obtuvieron registros de las variables representativas (temperaturas, humedades relativas y radiación solar) sin materia prima a secar y sin el extractor de aire encendido, esto con el fin de conocer el alcance de las temperaturas y humedades al interior de los colectores y el túnel de secado por convección natural.

Posteriormente se realizó una prueba similar pero esta vez con el extractor de aire encendido para registrar y comparar las diferencias entre las temperaturas y humedades al interior del túnel y en los colectores solares, esta prueba fue necesaria debido a la naturaleza húmeda de la región.

El flujo de aire suministrado es suficientemente para "acabar" el aire seco almacenado en los colectores solares y debido al tiempo de residencia del aire dentro del volumen de los colectores, no alcanza a retirar toda la humedad contenida en ellos. Esta es una de las razones por la cual se propone un control "on/off" para la automatización del sistema.

Finalmente se desarrollaron pruebas de secado para tres diferentes productos, incorporando la información obtenida de las dos pruebas anteriores, elaborando la automatización y el control de la temperatura al interior del túnel y así obtener un proceso de secado uniforme, además de esta manera es posible establecer un tiempo de secado promedio para cada uno de los productos utilizados.

5.1 Determinación de humedades de los orgánicos utilizados

Antes de establecer los parámetros que se pueden alcanzar con el secador, fue necesario realizar pruebas de determinación de humedad en un laboratorio para conocer las características de los productos que se van a secar. Es importante considerar la tabla 1 como referencia.

Para estas pruebas experimentales se han elegido un vegetal, un tubérculo y a una fruta:

- Col o repollo (vegetal)
- Papa (tubérculo)
- Manzana (Fruta)

Se procedió a colocar un porcentaje de los productos en una balanza determinadora de humedad, para establecer la cantidad de agua que posee cada uno de estos materiales.

Como primer caso se colocó el repollo o comúnmente denominado en esta región como col; en la tabla 1 de referencia se establece que este orgánico en su estado fresco está compuesto en un 94 % por agua y para lograr un eficiente deshidratado es necesario reducir esa cantidad de humedad al 4%.

Para 5.1 gramos de repollo, su consistencia es aproximadamente de 92% de agua, con esto se puede determinar que la muestra estaba compuesta por 4.692 g de agua y 0.408 g de masa (fig. 5.1).



Fig. 5.1 Determinación de la humedad en la col.

Para un kilogramo de col su consistencia en porcentaje de agua resulta estar compuesta de 80 g de masa y 920 g de agua.



Fig. 5.2 Determinación de la humedad en la papa.

En el caso de la papa se obtuvo el siguiente resultado, al introducir en la balanza 4.195 g se determinó que aproximadamente 74% de su consistencia es agua y el 26% restante corresponde a masa; con esto 3.1 g corresponden a agua

mientras que 1.095 g son de masa (fig. 5.2). Por lo que en un kilogramo de papa 260 g corresponden a la masa y 740 g son de agua.

Por último se colocaron 4.968 gramos de manzana que corresponden en un porcentaje de 84% a humedad dentro del producto y 16% a la masa, con lo que se determinó que 4.17g son agua y 0.798 hacen lo propio para constituir la masa (fig. 5.3).



Fig. 5.3 Determinación de la humedad en la manzana.

Entonces con este resultado en un kilogramo de manzana 840 g son de agua mientras que 160g corresponden a masa; al igual que los 2 materiales anteriores estos datos de humedad y masa son en condiciones normales con el producto fresco.

Los resultados obtenidos de las pruebas de secado en el horno arrojaron resultados lineales por esta razón se puede hacer el escalamiento de secado en las pruebas.

5.2 Deshidratación a través de un horno eléctrico

El secado no necesariamente implica la reducción total de agua de un material, sino reducirla al máximo posible sin afectar su composición de manera que los microorganismos no se puedan reproducir en ausencia de agua, es por eso que se ha establecido un mínimo de porcentaje de humedad con el que

debe de contar el producto para determinar que la deshidratación es eficiente (basado en la tabla 1)

Experimentalmente en un laboratorio se determinaron las humedades de referencia para el proceso de deshidratación. Estos resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Determinación de humedades de referencia para el deshidratado.

Producto	Humedad fresco (%HR)	Humedad en seco (Hs)
Manzana	84	14
Papa	73	13
Col	92	4

Con los porcentajes de humedad establecidos se puede obtener el equivalente de peso en seco de cada producto (utilizando la ecuación 4).

$$P_{s \text{ manzana}} = \left\{ 1000g \times \left[\frac{(100 - 84)}{100} \right] \right\} + \left[1000g \times \left(\frac{14}{100} \right) \right] \quad (37)$$

$$P_{s \text{ papa}} = \left\{ 1000g \times \left[\frac{(100 - 73)}{100} \right] \right\} + \left[1000g \times \left(\frac{13}{100} \right) \right] \quad (38)$$

$$P_{s \text{ col}} = \left\{ 1000g \times \left[\frac{(100 - 92)}{100} \right] \right\} + \left[1000g \times \left(\frac{4}{100} \right) \right] \quad (39)$$

Con el apoyo de un horno eléctrico a la temperatura específica de secado para cada caso, se colocó un kilogramo de materia y se contabilizó el tiempo necesario en horas hasta conseguir la pérdida de peso establecida por la ecuación 4.



Fig. 5.4 Pruebas de deshidratado en el horno eléctrico.

Un kilogramo de manzana pesó 300 g. después de 8hrs en el horno a 50 °C; la papa perdió 600g para establecerse en 400g pasado 9hrs en el horno a 55°C, en tanto que a esta misma temperatura la col tardo 12 horas en alcanzar los 120 g que corresponde a su peso en seco o con la mínima hidratación necesaria para su posterior almacenamiento.

Esta prueba (además de comprobar los valores obtenidos por las ecuaciones 37 – 39) fue de suma importancia ya que se determinaron las características físicas del producto en seco, como son cambio de color, de tamaño, olor característico, etc.; estas condiciones se compararon con los resultados obtenidos en las pruebas con el secador solar.

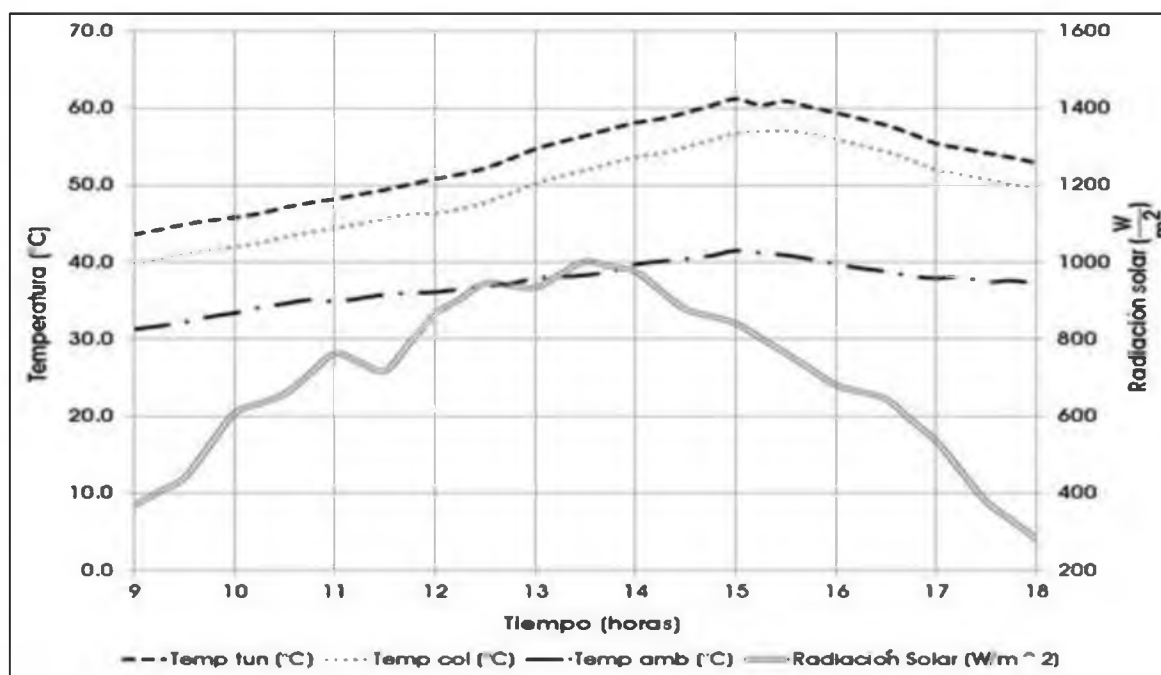
5.3 Caracterización de las principales variables del secador

Se llevaron a cabo diferentes pruebas experimentales para conocer el alcance de las temperaturas y humedades en diferentes secciones del sistema, así como la radiación solar incidente sobre los colectores. Las pruebas se realizaron durante el mes de abril de 2015. Utilizando las instrucciones de adquisición de datos y el software desarrollado (basado en el microcontrolador arduino), donde se registró el comportamiento de las variables cada 5 minutos en periodos de las 9 – 18 horas del día.

5.3.1. Alcance de las variables en el sistema por convección natural

Se registraron datos durante diferentes periodos de tiempo (se realizaron pruebas durante la primera semana del mes de abril), con el fin de encontrar valores promedio de estas variables, y así, establecer los parámetros de control (Set point alto y bajo de control).

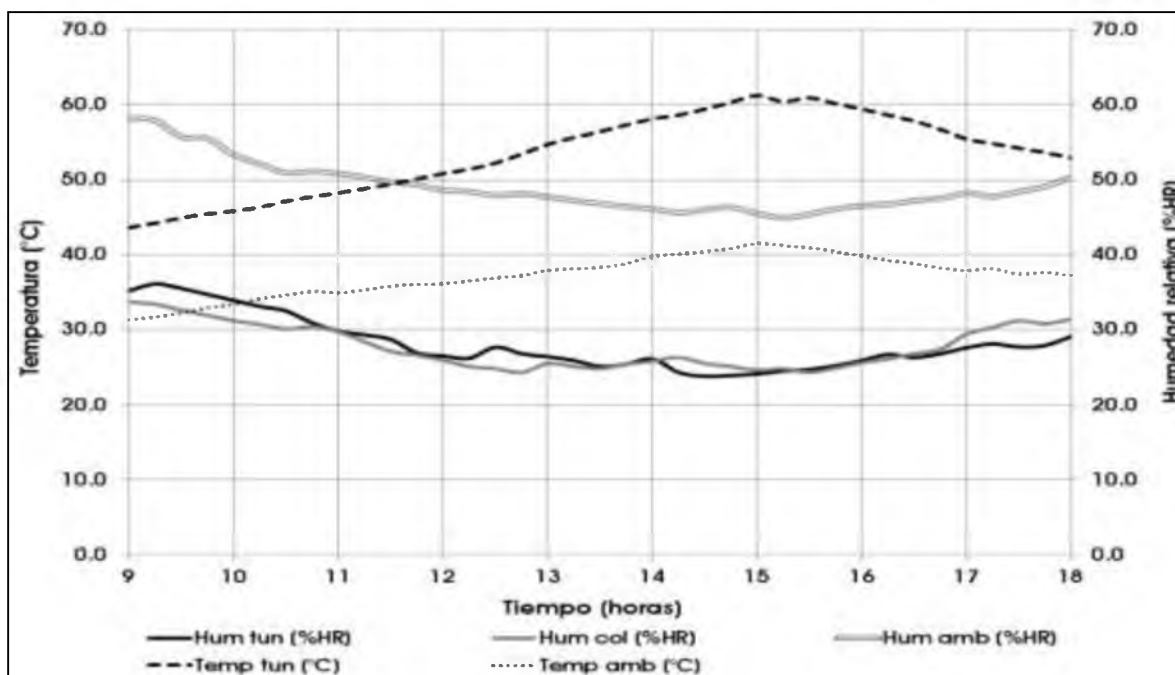
Durante la semana de pruebas se obtuvieron temperaturas mayores a los 50 °C dentro de los componentes del secador, incluso la temperatura dentro del túnel de secado rebaso los 60°C, incrementándose casi 20°C respecto a los datos del ambiente.



Gráfica 5.1 Temperaturas y radiación solar promedio resultante de la caracterización del secador por convección natural.

Las pruebas comenzaron a las 9 de la mañana, porque a que a partir de esa hora la temperatura dentro del secador aumenta por la incidencia de los rayos solares; finalizando a las 6 de la tarde porque a partir de ese momento la temperatura al interior del túnel comienza a decaer y la humedad a aumentar.

La radiación solar que se detectó durante el desarrollo de las pruebas fue de 200 – 1000 ($\frac{W}{m^2}$), siendo entre las 12 y 3 pm las horas de mayor incidencia (800 – 1000 ($\frac{W}{m^2}$)) (Gráfica 5.1).



Gráfica 5.2 Humedades promedio resultantes comparadas con la temperatura ambiente y la del túnel de secado, de la caracterización del secador por convección natural.

Ya que la temperatura de secado a la que se debe someter la manzana es de 50°C o menor, de los tres orgánicos elegidos para ser deshidratados es la que utiliza la menor, y puesto que el secador alcanza esa temperatura aproximadamente a las 12 pasado meridiano, se determinó que las rutinas de deshidratado se realizarían a partir de esa hora, ya que si la materia se introduce antes el producto ganaría humedad en vez de perderla. Los periodos de prueba finalizaron las 6 de la tarde, porque el secador comenzaba a ganar más humedad de la que perdía, además de que el ambiente se torna más húmedo conforme comienza a caer la noche.

La gráfica 5.2 presenta las humedades en comparación con las temperaturas tanto dentro como fuera del secador a través del tiempo de la prueba. Además se determina que dentro del dispositivo de secado se disminuye entre un 20 y 30 % el porcentaje de humedad en comparación con el medio ambiente donde está ubicado.

5.3.2 Alcance de las variables en el sistema utilizando una rutina de temperatura controlada sin producto

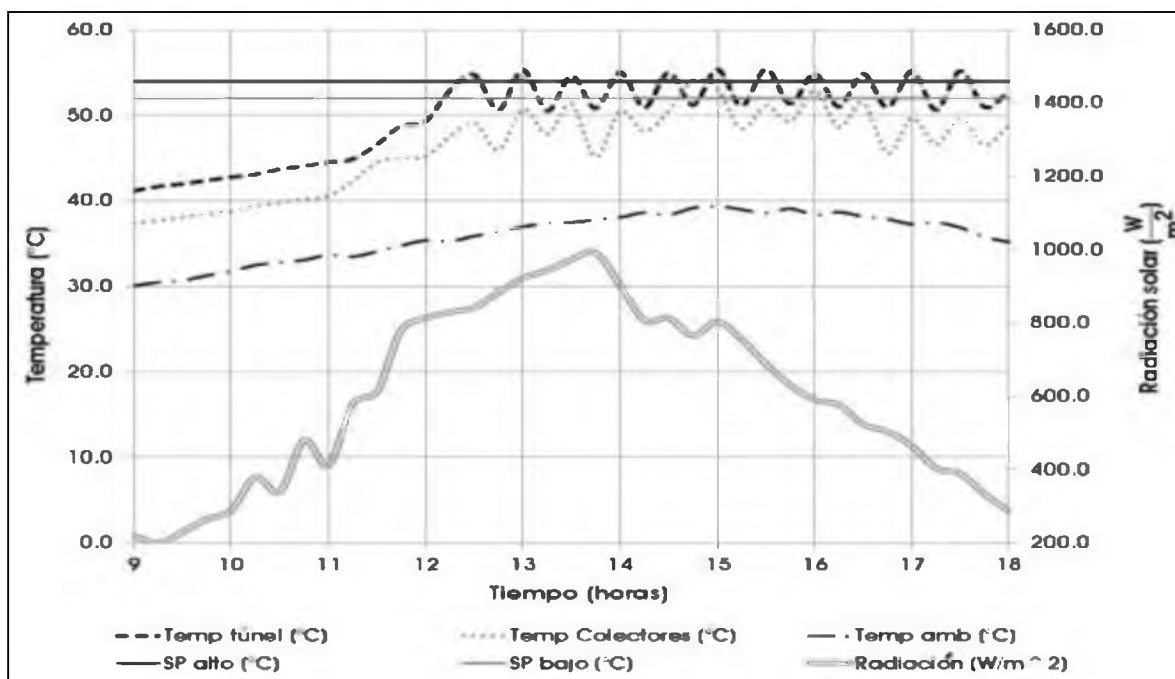
Ya realizada la prueba del comportamiento del secador sin implementar el extractor de aire, se llevaron a cabo pruebas utilizando un lazo de automatización de temperatura (empleando como temperatura de referencia 55°C, debido a que era la máxima que se iba a emplear en las pruebas posteriores con materia).

Se registraron datos durante diferentes periodos de tiempo (las pruebas durante se hicieron la segunda semana del mes de abril), con el fin de encontrar valores promedio de las variables utilizando un lazo de temperatura controlada en el secador, y así, establecer los parámetros de secado y analizar el comportamiento del sistema, además de validar el control de temperatura sin materia.

En la gráfica 5.3 se pueden apreciar las temperaturas dentro del secador utilizando una rutina de temperatura controlada, tomando como referencia 55°C. En la cual se utilizan dos puntos de referencia para el encendido y apagado del extractor denominados Set point alto y Set point bajo, los cuales en este caso corresponden a 54 y 52 °C respectivamente.

Se realizó esta prueba con el fin de observar el funcionamiento del lazo de control propuesto y la validación de la lógica de programación para el control del motor de 220V de CA; observando que la temperatura dentro del túnel se

mantiene dentro del rango deseado, con un pequeño error ($\pm 1^\circ\text{C}$) provocado por la inercia térmica que actúa tanto al encender como al apagar el extractor de aire, propiciando la elevación de temperatura, es por ello que el punto en alto se propone menor que la temperatura de secado, porque cuando se introduce un producto, esta temperatura no debe de rebasar la temperatura recomendada para el secado, debido a que la materia a tratar comienza a cocerse perdiendo así sus propiedades.

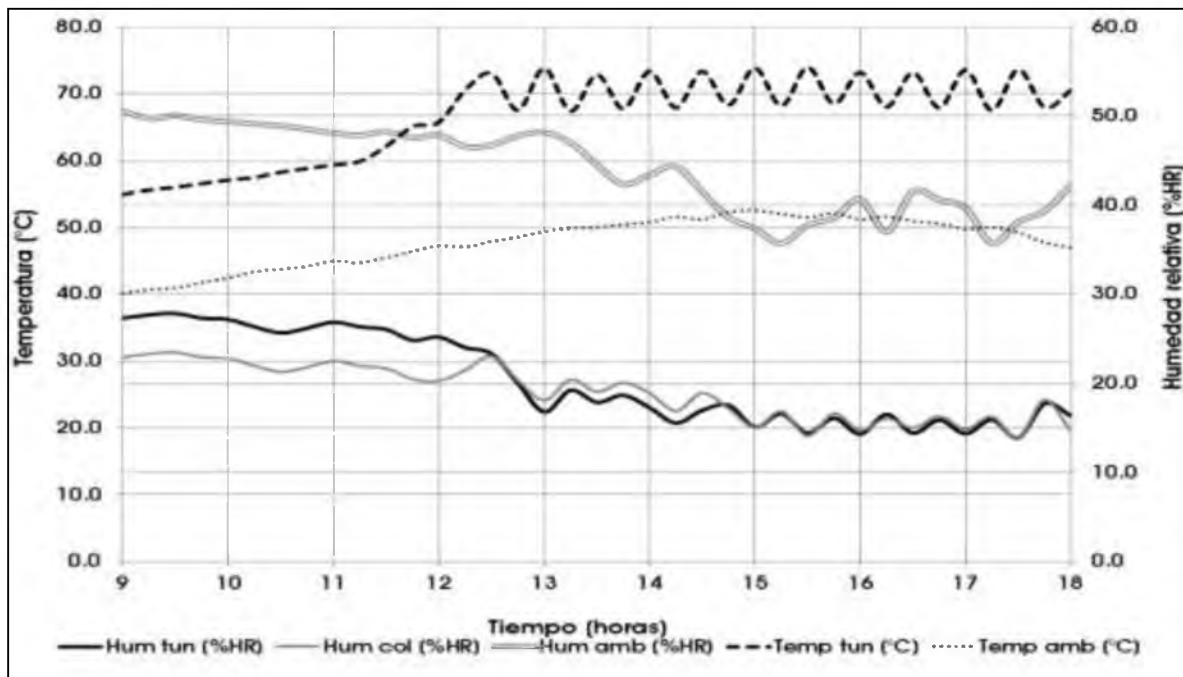


Gráfica 5.3 Temperaturas y radiación solar promedio resultante de la caracterización del secador utilizando una rutina de secado a 55°C sin producto.

En la gráfica 5.3 también se registró la incidencia de radiación solar que recibe el secador durante su periodo de trabajo, la cual demuestra que durante el periodo de las 12 – 3 de la tarde el dispositivo recibe la mayor cantidad de radiación (de $800 - 1000 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$).

Como se puede apreciar en la gráfica 5.4, antes de alcanzar la temperatura de trabajo los colectores solares contienen una menor concentración de humedad

a diferencia del ambiente (30% menor aproximadamente) y del túnel de secado (5% menor aproximadamente). Cuando se activa el lazo de temperatura controlada la humedad dentro del secador se comporta de forma contraria a la temperatura, por lo que si la temperatura aumenta, la humedad disminuye durante el periodo de tiempo que dura el ciclo de secado.

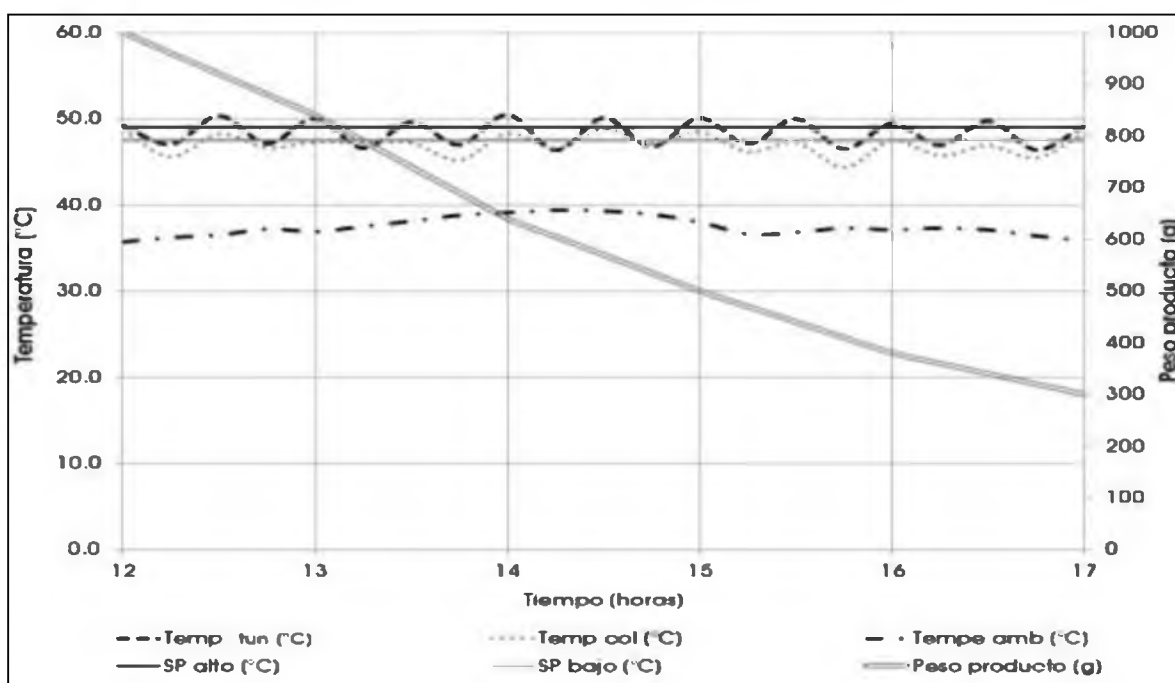


Gráfica 5.4 Humedades promedio resultantes comparadas con la temperatura ambiente y la del túnel de secado, de la caracterización del secador utilizando una rutina de temperatura controlada (55°C) sin producto.

5.4 Prueba de la rutina de temperatura controlada para el secado de manzana

En la gráfica 5.5 se puede apreciar el funcionamiento del lazo de control de temperatura que se lleva cabo en el secado solar de 1 kg de manzana, el cual mantiene estable la temperatura dentro del túnel de secado entre 47 y 50 °C, con un error aproximado de ± 1 °C debido a la inercia térmica provocada por el flujo

de aire que es extraído de los colectores solares hacia el túnel a través de un motor de CA que tiene dos puntos de accionamiento. La activación del extractor de aire se presenta cuando se detecta una temperatura mayor a 49°C (Set point alto), en tanto que el apagado del equipo de CA se logra cuando se registra una temperatura igual o menor a 47.5°C (Set point bajo). A través del ciclo de trabajo del secador se puede observar que cuando la temperatura (Temp tun) aumenta el extractor de aire se encuentra apagado, en tanto que cuando esta encendido la temperatura disminuye.



Gráfica 5.5 Gráfica de las temperaturas en el secador y ambiente en comparación del peso del producto a lo largo de la rutina de temperatura controlada para el secado de manzana.

En la gráfica 5.5 la temperatura se mantiene estable entre $47 - 50^{\circ}\text{C}$ durante un periodo de 5 horas que comprende el secado de este producto. También se puede visualizar la pérdida de peso de peso del producto en el transcurso del tiempo de deshidratado, consecuencia de la temperatura y a las corrientes de aire a la que es expuesta la materia.

A partir de la ecuación 5 es posible determinar la pérdida de humedad del producto en función del peso, como lo ilustra la tabla 5.

Tabla 5 Humedad del producto en función del peso de la manzana.

Peso producto (g)	Hum producto (%HR)
1000	84
840	68
640	48
500	34
380	22
300	14

Para llevar a cabo el secado de manzana primero se rebano lo más uniformemente posible y se pesó la cantidad a deshidratar (1 kg), después se colocó dentro de las bandejas para ser deshidratada, una vez finalizado el ciclo de secado, se sacaron las bandejas del túnel y se tomaron las muestras secas para ser guardadas en bolsas herméticas, para su conservación (fig. 5.5).

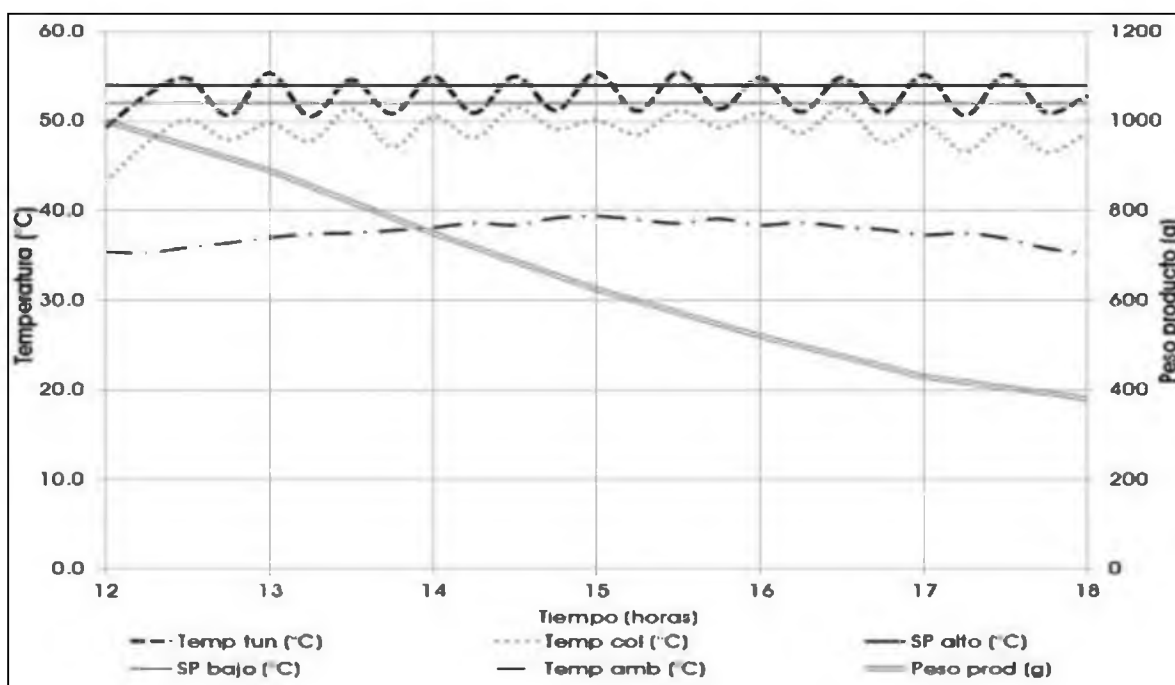


Fig. 5.5 Secado solar de manzana.

5.5 Prueba de la rutina de temperatura controlada para el secado de papa

Se llevó a cabo una rutina de temperatura controlada de 55 °C para el secado de papa. En el cual se implementa un lazo de control de temperatura para el deshidratado de 1 kg de papa, manteniendo la temperatura dentro del

túnel de secado en un rango de 52 y 55 °C, con un error aproximado de ± 1 °C debido a la inercia térmica provocada por el flujo de aire que es extraído de los colectores solares hacia el túnel a través de un motor de CA que tiene dos puntos de accionamiento. La activación del extractor de aire se presenta cuando se detecta una temperatura mayor a 54 °C (Set point alto), en tanto que el apagado del equipo de CA se logra cuando se registra una temperatura igual o menor a 52.5 °C (Set point bajo). A través del ciclo de trabajo del secador se puede observar que cuando la temperatura (Temp tun) aumenta el extractor de aire se encuentra apagado, en tanto que cuando esta encendido la temperatura disminuye (gráfica 5.6).



Gráfica 5.6 Temperaturas en el secador y ambiente en comparación del peso del producto a lo largo de la rutina de temperatura controlada para el secado de papa

En la gráfica 5.6 se puede apreciar la pérdida de peso del producto en el transcurso del tiempo de trabajo del sistema, consecuencia de la temperatura de secado y las corrientes de aire a la que es expuesto el orgánico al cual se le retira la humedad.

Con el uso de la ecuación 5 es posible determinar la pérdida de humedad de la papa en función de su peso, como lo ilustra la tabla 6.

Tabla 6 Humedad del producto en función del peso de la papa.

Peso producto (g)	Hum producto (%HR)
1000	73
890	62.4
750	48.8
625	36.7
520	26.5
430	17.8
380	13

Para el secado de la papa primero se rebano lo más uniformemente posible y se pesó la cantidad a deshidratar (1 kg), después se colocó dentro de las bandejas para ser deshidratada, una vez finalizado el ciclo de secado, se sacaron las bandejas del túnel y se tomaron las muestras secas para ser guardadas en bolsas herméticas, para su conservación (fig. 5.6).

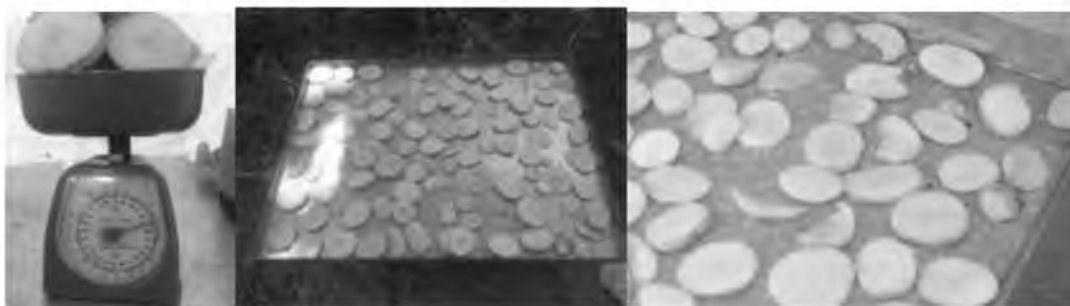


Fig. 5.6 Secado solar de papa

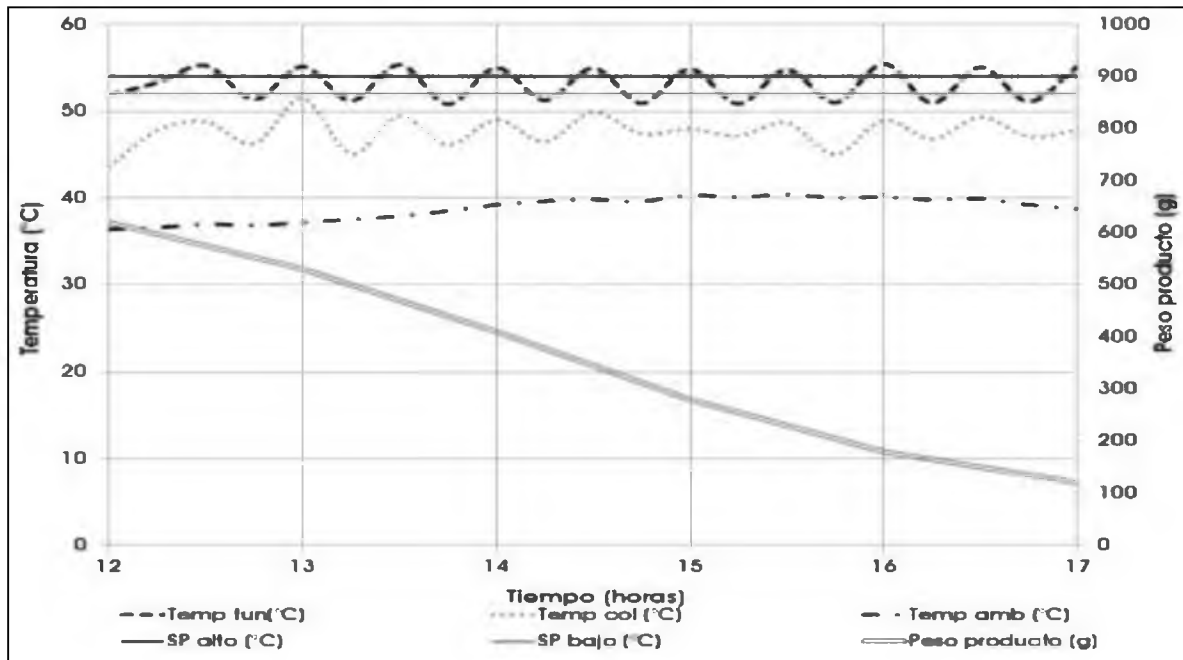
5.6 Prueba de la rutina de temperatura controlada para el secado de col (repollo)

A diferencia de la papa, el repollo necesito de 10 horas para llegar al peso y características buscados, por lo que se necesitaron dos días para alcanzar los resultados esperados; empleando 5 horas de trabajo por día.

En la gráfica 5.7 se puede apreciar el funcionamiento del lazo de control de temperatura que se lleva cabo en el secador solar para el secado de 1 kg de col, el cual mantiene estable la temperatura dentro del túnel de secado entre 52.5 – 54 °C, con un error aproximado de ± 1 °C debido a la inercia térmica provocada por el flujo de aire que es extraído de los colectores solares hacia el túnel a través de un motor de corriente alterna que tiene dos puntos de accionamiento. La activación del extractor de aire se presenta cuando se detecta una temperatura mayor a 54 °C (Set point alto), en tanto que el apagado del equipo de CA se logra cuando se registra una temperatura igual o menor a 52.5 °C (Set point bajo). A través del ciclo de trabajo del secador se puede observar que cuando la temperatura (Temp tun) aumenta el extractor de aire se encuentra apagado, en tanto que cuando esta encendido la temperatura disminuye.

En la gráfica 5.7 se puede visualizar el segundo día del periodo de secado de la col, correspondiente a 5 horas; en la cual la pérdida de peso comenzó en 650 g, y termino en 140 g, que es el peso en seco del producto para un kilogramo en fresco del producto, además se pueden observar el comportamiento de las temperaturas del túnel, los colectores y el ambiente en el transcurso del tiempo de deshidratado.

Al igual con la manzana y la papa se utilizó la ecuación 5 para determinar la humedad contenida del producto en pesajes realizados a lo largo del secado (cada hora) (tabla 7).



Gráfica 5.7 Temperaturas en el secador y ambiente en comparación del peso del producto a lo largo de la rutina de temperatura controlada para el secado de col.

Tabla 7 Humedad del producto en función del peso de la col.

Peso producto (g)	Hum producto (%HR)
650	57
530	47
410	35
280	22
180	11
120	4

En la figura 5.7 se puede apreciar el proceso de secado de col, primeramente se pesó un kilogramo de col en una báscula, posteriormente se colocaron en las bandejas para el secado dentro del túnel y finalmente se fueron retirando las rebanadas, al obtener las características y peso buscados.

Debido a la participación del extractor de aire en los procesos de deshidratado las temperaturas tanto del túnel como de los colectores tienen un

comportamiento similar, ya que existe una relación directa entre ambos componentes.



Fig. 5.7 Secado solar de col.

5.7 Comparación de secado de un orgánico sin operación de un lazo de control de temperatura

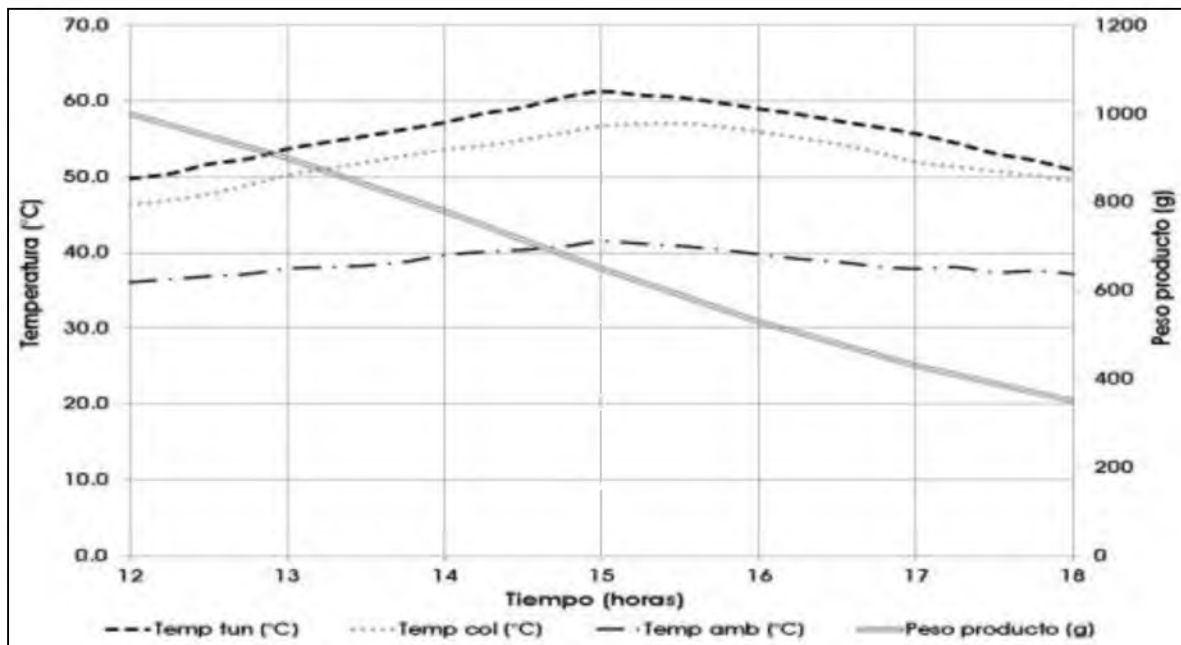
Se hizo una prueba de secado para la deshidratación de papa, donde se monitorearon las temperaturas del secador en comparación con la pérdida del peso del producto a lo largo del tiempo.

El no implementar una temperatura controlada al interior del túnel de secado implica, que el producto no se trate a la temperatura recomendada, si se rebasa el producto comienza a cocerse, si está muy bajo puede comenzar a ganar humedad en vez de perderla, al no introducir un flujo de aire para retirar la evaporación de agua el proceso puede tardar más tiempo y las características físicas del orgánico cambian.

En la gráfica 5.8 se muestra las temperaturas del secador en comparación con la pérdida de peso de un kilogramo de papa a través de un periodo de tiempo igual que el empleado cuando se utilizó un lazo de control de temperatura.

En este caso la temperatura dentro del túnel de secado rebaso la recomendada (55°C), con lo que la papa comenzó a cocerse, además el hecho

de no expulsar el vapor acumulado dentro del túnel de forma fluida propicio a que el orgánico se tornara en un tono negro grisáceo, muy diferente al obtenido utilizando un lazo de control de temperatura. Además a pesar de alcanzar mayores temperaturas no se obtuvo el peso deseado.



Gráfica 5.8 Secado de papa sin utilizar un lazo de temperatura controlada (Pérdida de peso y temperatura a través del tiempo de secado).

Con esta prueba se puede concluir que el utilizar el lazo de control de temperatura hace que el secado sea uniforme y no pierda características físicas que puedan implicar un cocimiento o descomposición.

5.8 Comparación de la implementación del secador con el horno de eléctrico (energético)

Una vez realizadas las pruebas del lazo de control de temperatura para el secado de material orgánico, se procedió a hacer una comparativa entre el deshidratado con un horno eléctrico y el secado de las pruebas.

En cuestión de tiempo se observó que el secado por medio del dispositivo solar es más rápido, debido a que implica una inducción de aire que fluye por todo el túnel, expulsando la humedad evaporada de la materia por medio de una chimenea. Lo anterior se puede observar en la tabla 8.

Otro punto importante que se obtiene de emplear el secador en lugar de un horno eléctrico es el consumo energético, en donde el gasto (energético) por parte del secador es mucho menor que el implementado por el horno, ya que la corriente a la que trabaja el horno es mucho mayor que la del extractor de aire, además los periodos de trabajo de este último no se llevan a cabo durante todo el ciclo de secado, sino que es por periodos de tiempo limitados por el alcance de la temperatura de referencia, por lo que cumple con dos funciones, la primera bajar la temperatura en el túnel de secado y la segunda retirar el vapor húmedo sustraído del producto fuera del túnel.

Para calcular el consumo energético de un dispositivo, es necesario emplear la siguiente ecuación:

$$CE = t_{ct} \left(\frac{P_{ot}}{1000} \right) \quad 40$$

Donde el consumo energético (CE) está dado en $\frac{Kw}{h}$, t_{ct} representa el tiempo de trabajo del dispositivo eléctrico en horas (h) y P_{ot} a la potencia de consumo en watts (w) [50].

Ingresando los datos de la potencia de consumo (horno eléctrico de 1900w y extractor de aire de 560 w) y del tiempo de trabajo dentro de la ecuación para cada dispositivo, se puede hallar el consumo energético de trabajo durante el secado de cada uno de los productos utilizados.

Como se puede apreciar en la tabla 8 el consumo energético del horno eléctrico es mucho mayor al del extractor de aire, debido a dos razones: la primera

es que el horno eléctrico consume el triple de potencia eléctrica y la segunda es que el extractor de aire no trabaja de manera constante dentro del ciclo de secado a diferencia del horno, que lo hace de principio a fin.

Tabla 8 Comparación de los tiempos de secado y gasto energético de cada dispositivo.

Producto	Tiempo de trabajo del horno eléctrico (h)	Tiempo de trabajo del secador solar (h)	Tiempo de trabajo del extractor de aire (h)	Gasto energético del horno eléctrico ($\frac{Kw}{h}$)	Gasto energético del extractor de aire ($\frac{Kw}{h}$)
Manzana	8	5	2.35	15.2	1.3
Papa	9.5	6	2.9	18	1.62
Col	12	10	5.85	22.8	3.3

Con lo anterior se demuestra que el secador además de llevar a cabo de forma más eficaz el proceso, también reduce el gasto de energía en comparación de otro dispositivo eléctrico.

Conclusiones

Se manufacturó y se comprobó que el prototipo de secador solar indirecto tipo túnel basado en el modelo propuesto es funcional para el secado de materia orgánica de acuerdo a las rutinas propuestas.

Con base en el estudio y pruebas correspondientes de los sensores que se utilizaron para la instrumentación del sistema, se concluyó que de los elementos seleccionados, solo los sensores de temperatura (termopares) requirieron de un ajuste de calibración utilizando una referencia externa que cuenta con un error de medición menor (termistor 2.5 Kohms), esto se debió a que la señal de salida varía por la inclusión del cable de señal, entre más largo sea el cable mayor será la pérdida de la señal.

En el desarrollo de la calibración y ajuste de señal de los sensores se observó que en el caso de los sensores de humedad no son afectados por la implementación de cables, de tal manera que es despreciable la pérdida de la señal de conexión.

Se comprobó que bajo la lógica operación que se propuso para este proyecto, el microcontrolador arduino puede utilizarse de manera conjunta como adquirente de datos y tarjeta de control; en este sentido el costo económico de usar arduino fue notoriamente menor que utilizar otros dispositivos de adquisición de datos.

Debido a que el motor del extractor de aire es monofásico y de arranque por capacitor no es posible disminuir su velocidad sin afectar el voltaje, por lo que necesita de toda la señal de energía para arrancar y evitar daños, debido a esto

se concluye que la forma adecuada de realizar el control de este dispositivo fue a través de un control on/off.

El programa de secado (adquisición de datos y control de temperatura) es gráfico y manipulable por el usuario para utilizar diferentes productos naturales.

Se determinó que las horas del día adecuadas para operar el sistema debido a las condiciones de temperatura y humedad ambiente que se presentan en la región, son de las 12 a las 18 horas, en este intervalo de tiempo se pueden alcanzar las temperaturas necesarias para el proceso de secado y funcionamiento del lazo de control de temperatura.

Se demostró experimentalmente que la utilización del lazo de control mantuvo un rango de temperatura (50-55 °C) y humedad promedio al interior del túnel (20-30%), obteniendo así un secado más eficaz que al no utilizarlo.

Se observó que al utilizar el secador se reduce el tiempo de trabajo en un promedio de 3 horas y también se disminuye el costo energético en comparación con el uso de un horno eléctrico a razón promedio de un 10% de la energía consumida por el horno.

Trabajo Futuro

Sustitución del motor monofásico por uno trifásico permitirá la implementación de un control de temperatura más eficiente con un error menor.

Implementar más colectores solares y aumentar el tamaño del ducto por el cual se ingresa el flujo de aire mejorará el funcionamiento del sistema, ya que ingresaría mayor flujo de aire caliente con lo cual el tiempo de secado disminuye.

Implementar un sistema de almacenamiento y calentamiento de agua que propicie que el sistema pase de ser de discontinuo a continuo.

La implementación de sensores más precisos como el HMP60 (humedad y temperatura) mejorarán el registro de datos en cada punto estratégico del sistema.

Bibliografía

- [1] Moreno M. G. 2004. Manual de instrumentación para una secadora solar. Seminario de proyectos UAM. México.
- [2] Guzmán H. V. M. et al. 2013. Control automático: Teoría de diseño, construcción de prototipos, modelado, identificación y pruebas experimentales. Colección CIDETEC del IPN. México.
- [3] Moreno A. et al. 2009. Estudio de la cinética fisicoquímica del mango tratado por métodos combinados de secado. *Dyna*, n 162. Pp 74 – 85. Chile.
- [4] Castellón L. J. et al. 2009. Validación del uso de un secador Solar de Café pergamino, en fincas de pequeños productores del municipio de San Rafael del Norte. Tesis de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional de Ingeniería, UNI – Norte. Nicaragua.
- [5] Solano M. M. A. 2012. Evaluación de la eficiencia de una secadora solar portátil para Biomasa, evaluada con fibra de piña, en cuatro sitios de Costa Rica. Tesis de ingeniería forestal. Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- [6] Quintanar O. J. 2014. Secado solar de madera. Desplegable para productores número 80. SAGARPA. México.
- [7] C. T. C. 2013. Secado solar. AGRO – WASTE. España.
- [8] Vázquez T. et al. 1997. Manual de secado solar técnico de alimentos. Energética y FAKT. Cochabamba, Bolivia.

- [9] Matthew G. 2001. Solar Drying Technology for Food Preservation. GTZ-GATE, Alemania.
- [10] Creus S. A. 1997. Instrumentación industrial. Sexta edición. Alfaomega, España.
- [11] Kemp I. C. et al. 2001. Methods for processing experimental drying kinetics data. Drying technology. 19(1), 15-34. Alemania.
- [12] Ogata K. 1998. Ingeniería de control moderna. Quinta Edición. Prentice Hall, USA.
- [13] Ayala M. 2008. Historia del control automático. Regulación automática con Matlab. México.
- [14] Castañeda M. A. et al. 2011. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. Universidad de Guanajuato, México.
- [15] Häuser M. et al. 1994. Solar Drying in Morocco Programme Spécial Energie (PSE) Maroc. Centre de Développement des Energies Renouvelables y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- [16] Elorza R. et al. 2002. Instrumentación y control de un secador solar de frutas tipo túnel. Ciencia UANL: 531 – 538. México.
- [17] Montero P. I. 2005. Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. España.
- [18] Gunomo D. y Wibisono Y. 2005. Design of Temperature Control Instrument in Drying Process of Vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews). Journal Teknologi Pertanian, Vol. 6 No. 2: 86 – 92.
- [19] Fu L. S. et al. 2006. Application of fuzzy adaptive PID controller in solar drying temperature control. Transactions of the CSAE. 22(7): 217–219.

- [20] Ibarra E. J. et al. 2007. Modelamiento, diseño y automatización de un modelo genérico de secador de polen. Tesis para la obtención del título de ingenieros en diseño y automatización electrónica. Universidad La Salle. Colombia.
- [21] Giraldo S. J. 2010. Control de temperatura y humedad relativa para un deshidratador solar de frutas. Tesis para la obtención de título de ingeniero en Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- [22] Alejandro E. O. 2010. diseño y simulación de la automatización de un secador electromecánico de café. Tesis para la obtención de título de ingeniero en Mecatrónica. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
- [23] Vallejos. R. C. 2013. Modelación, simulación, control PID y control predictivo de un secador rota disco en la industria pesquera. Tesis para la obtención de título de ingeniero Mecánico – Eléctrico. Universidad de Piura. Perú.
- [24] SAECSA. 2012. Catalogo Deshidratadores solares.
- [25] Saravia M. 1998. Técnicas de secado. Segunda edición. ITDG. Perú.
- [26] Corvalan R. et al. 1992. Ingeniería del secado solar. CYTED D. España.
- [27] 2012. Manual técnico de Solidworks.
- [28] Pilatowsky et al. 2013. Secador solar de alimentos. Terracota. México
- [29] Medrano G. S. 2002. Termopares. La guía metas. México.
- [30] Hoja de datos del amplificador de señal para termopares tipo J AD594.
- [31] Medrano G. S. 2008. Sensores de humedad, tipos y aplicaciones. La guía metas. México.
- [32] Hoja de datos del HMP60.

[33] Hoja de datos del HMZ – 433A1.

[34] Coach6, 2010. Manual Técnico de sensores. México.

[35] Hoja de datos del MPX2200AP.

[36] Martínez V. L. S. 1999. Diseño y construcción de un medidor de radiación solar. Tesis para obtener el grado de ingeniero en electrónica. Universidad Tecnológica de la Mixteca, México.

[37] <http://eliseosebastian.com/con-que-medir-radiacion-solar-para-fv/> Consultada el 18 de mayo de 2015.

[38] Hoja de datos del Piranómetro SP LITE2.

[39] Driscoll F. F. et al. 1993. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Prentice Hall. USA.

[40] <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=274383.0>. Consulta el 20 de mayo de 2015.

[41] Enríquez H. R. 2009. Guía de usuario de arduino. Universidad de Córdoba. España.

[42] García J. J. et al. 2005. Aprenda Matlab 7.0. Universidad Politécnica de Madrid. España.

[43] 2011. Motor monofásico con capacitor de arranque. Electroinstalador. Argentina.

[44] Muhammad H. R. et al. 1993. Electrónica de potencia. Segunda edición. Prentice Hall. USA.

[45] <http://www.varesano.net/blog/fabio/diodes-transistors-and-optocouplers-what-they-are-some-theory-and-simple-usages-examples->, Consulta el 19 de mayo de 2015.

[46] Evans W.B. 2007. Arduino Notebook: A Beginner's Reference Written and compiled. Creative Commons. USA.

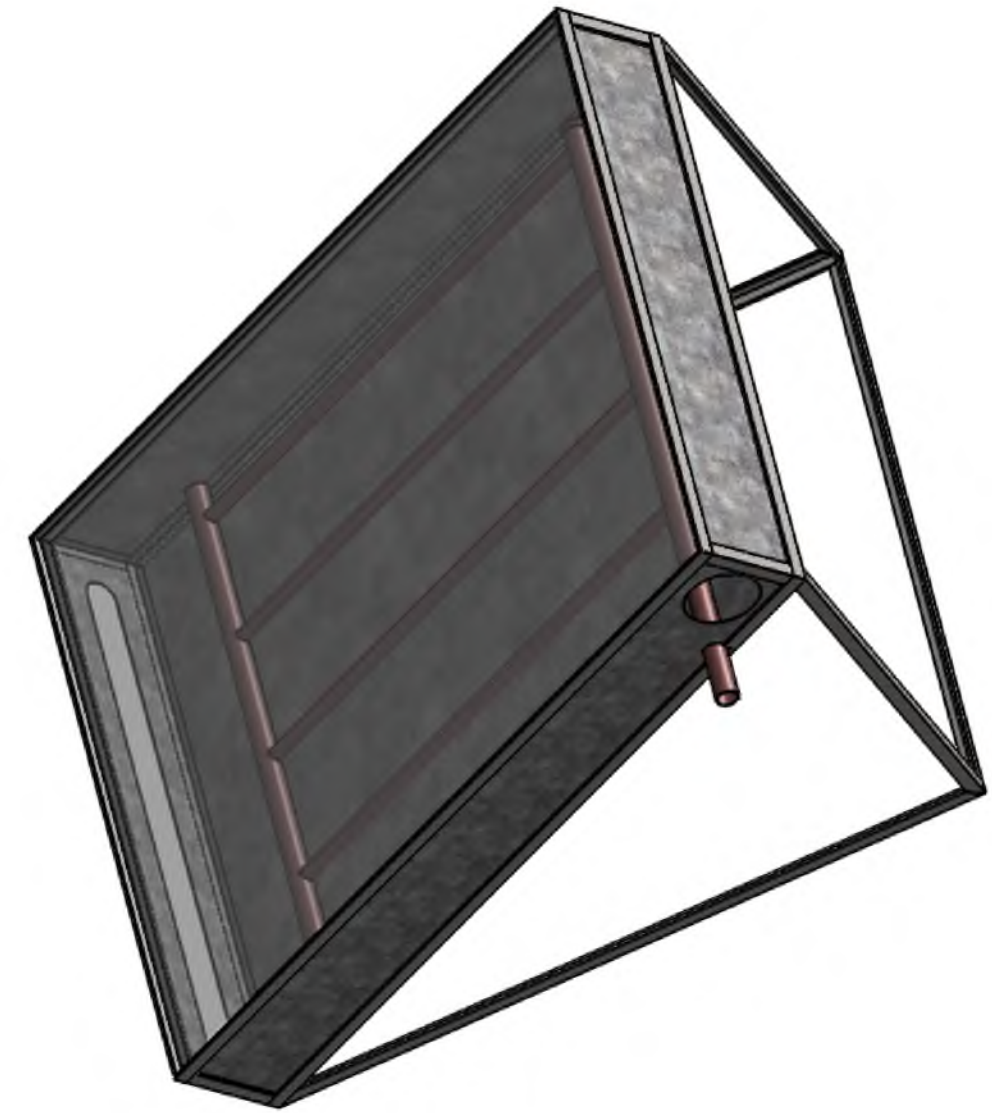
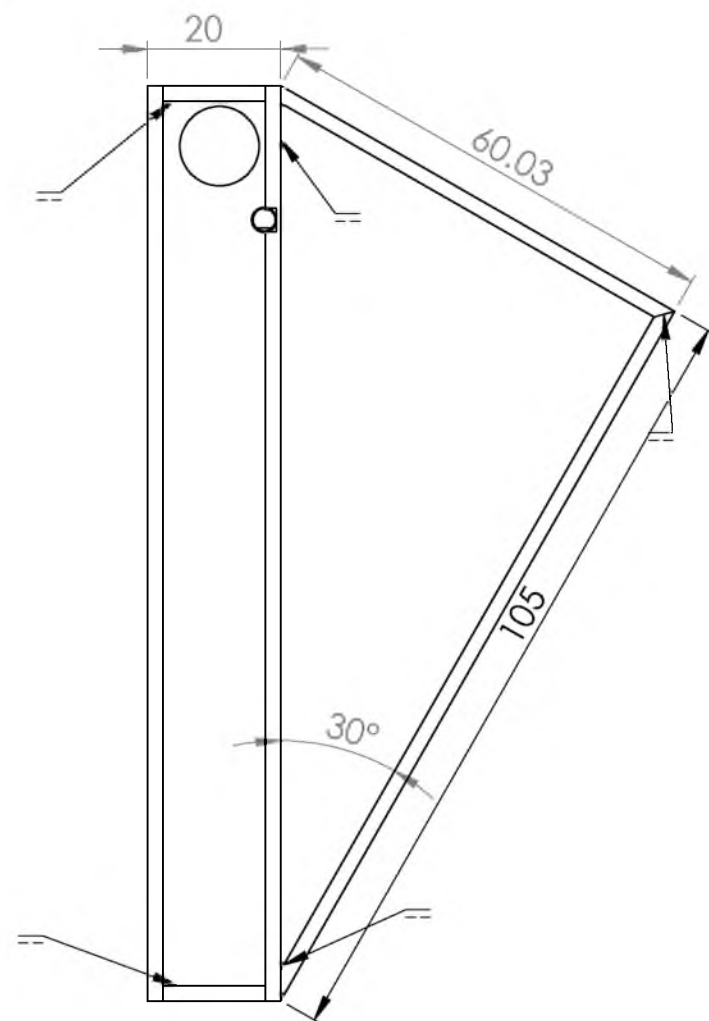
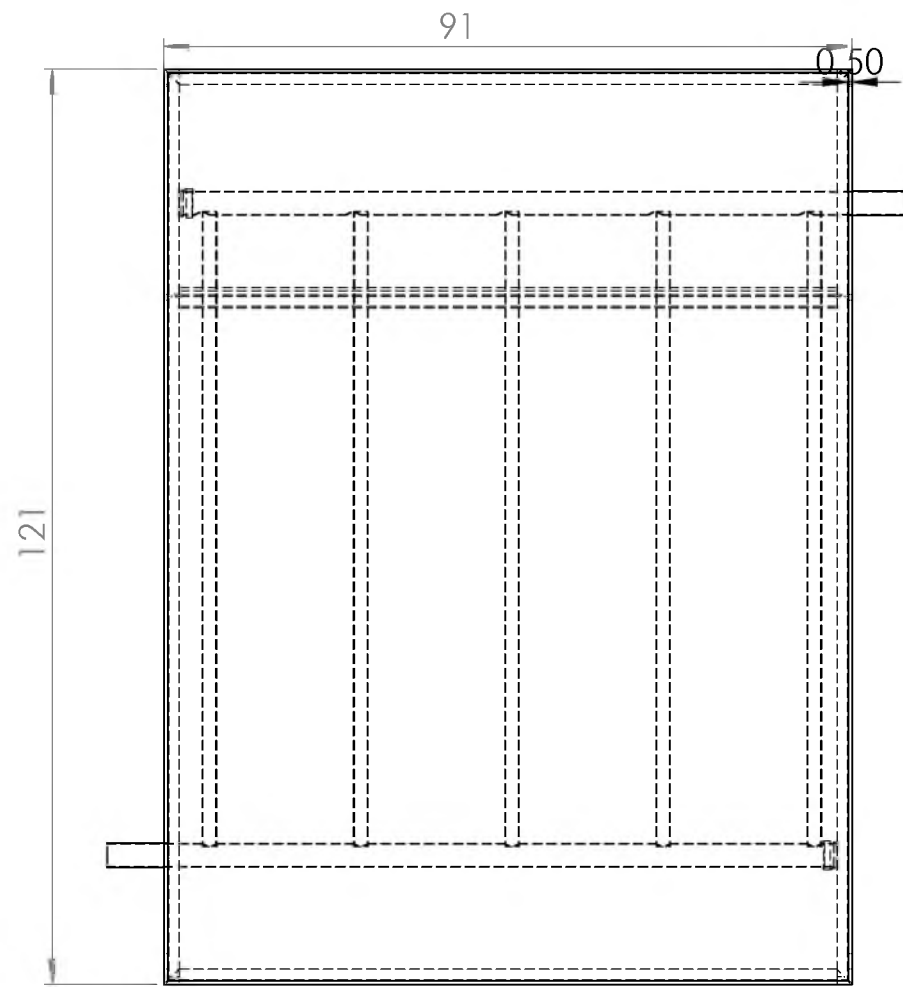
[47] Nise, S. N. 2004. Sistemas de control para ingeniería. Tercera edición. Continental. USA.

[48] <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Reference/DigitalWrite>. Consulta el 21 de mayo de 2015.

[49] Barragán G. D. 2008. Manual de interfaz gráfica de usuario en Matlab. Ecuador.

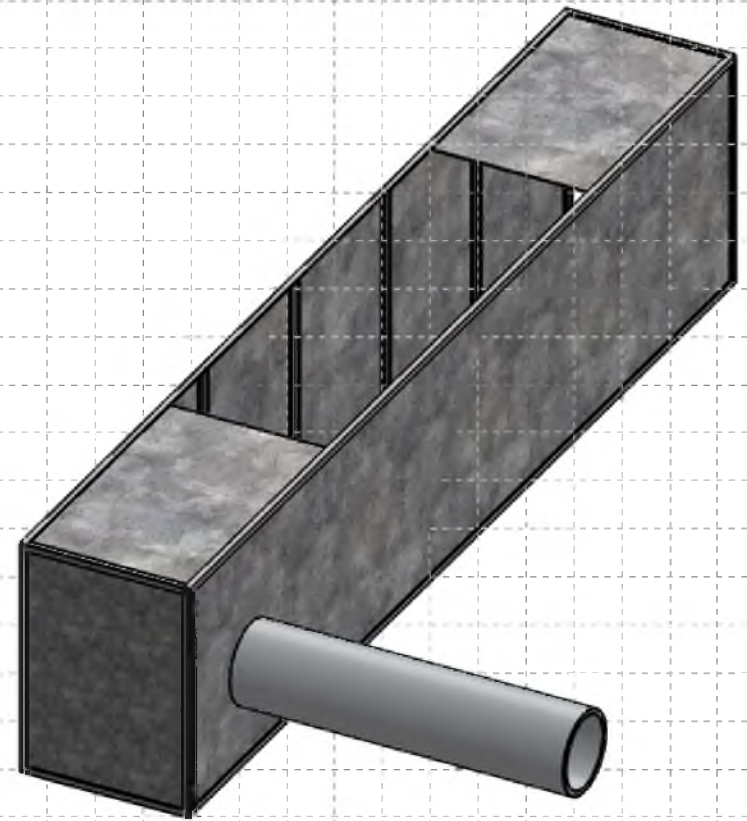
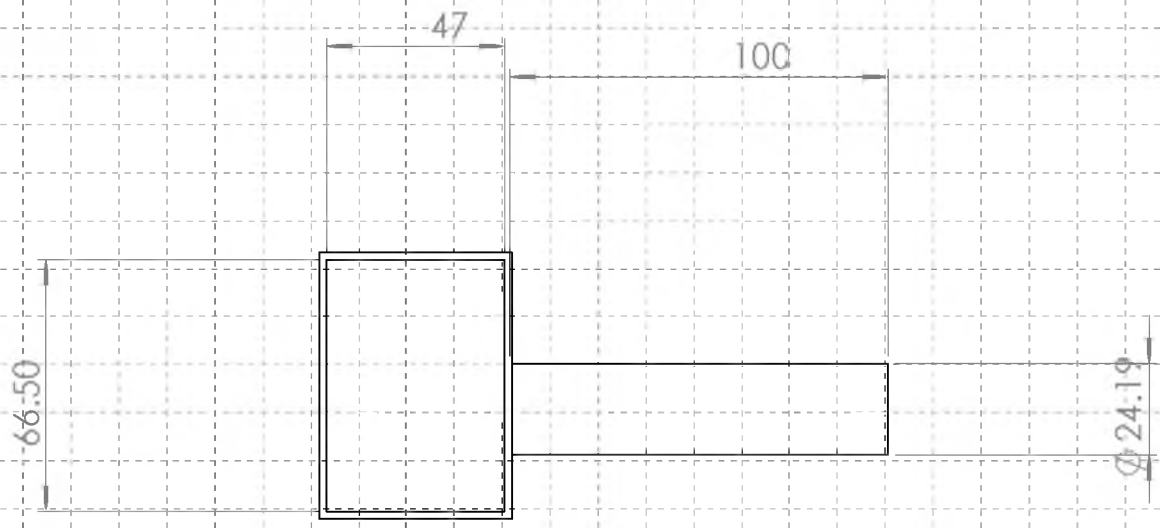
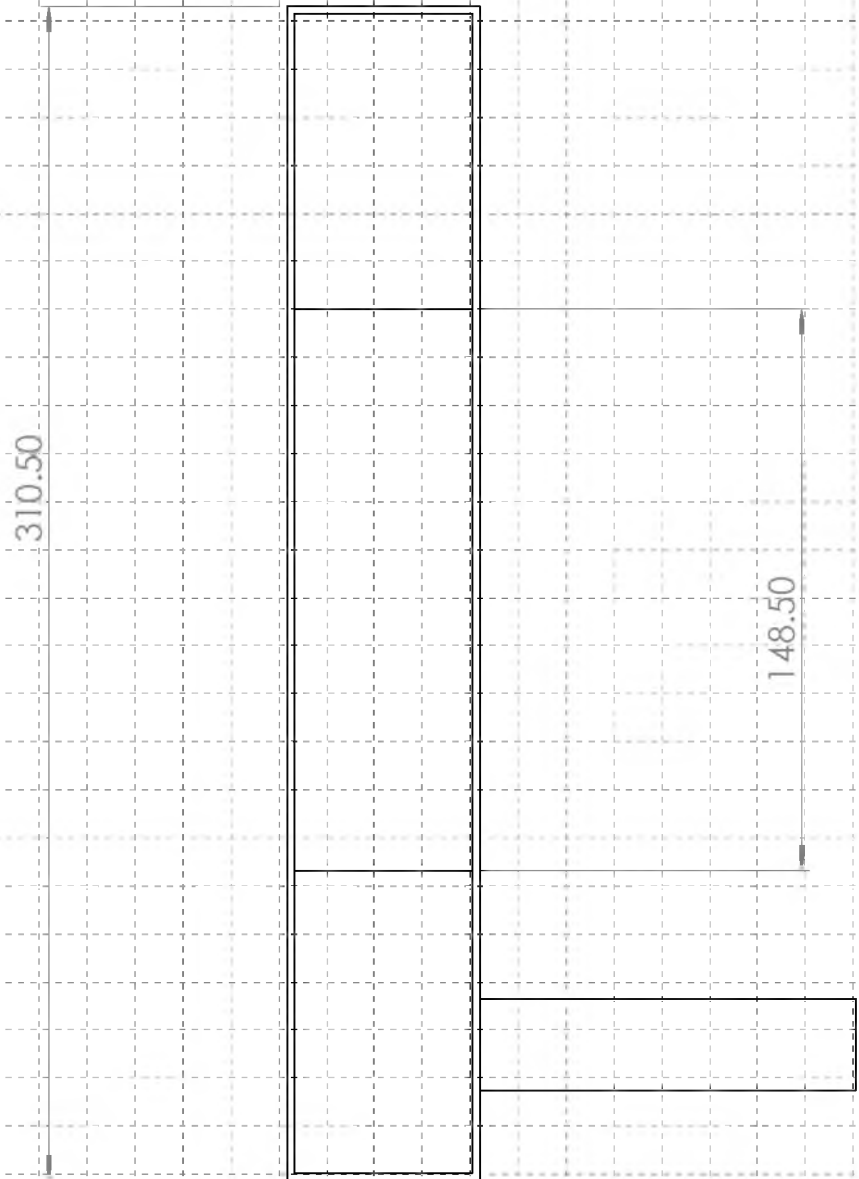
[50] www.conermex.com.mx/preguntas-frecuentes-faqs/que-es-un-kilowatt-hora11-kwh-y-cuanto-cuesta.html. Consulta el 30 de mayo de 2015.

Anexos A: Planos de construcción



Soldadura

Tolerancia: ± 0.1cm	ACABADO: Superficial		Pieza 1	REVISIÓN
	Secador solar tipo tunel			
NOMBRE Josimar Márquez García	FECHA: 20/06/2013	FIRMA:	TÍTULO: Colector solar	
Procesos de manufactura: Corte	Unidades: cm			
Soldado	MATERIAL: Angulo y lamina	N.º DE DIBUJO Dibujo 3		A4
	PESO:	ESCALA 1: 10	HOJA 3 DE 3	



Tolerancia: ± 0.1cm		ACABADO: Superficial		Pieza 2		REVISIÓN
NOMBRE Jasimar Márquez García				FECHA: 20/06/2013	FIRMA:	TÍTULO: Secador solar tipo tunel
Procesos de manufactura: Corte		Unidades: pulgadas		Túnel de secado		
Soldado		MATERIAL: Angulo de acero Lamina		N.º DE DIBUJO Dibujo 2		A4
PESO:				ESCALA 1: 20		HOJA 1 DE 3

Anexos B: Diagramas electrónicos de interconexión

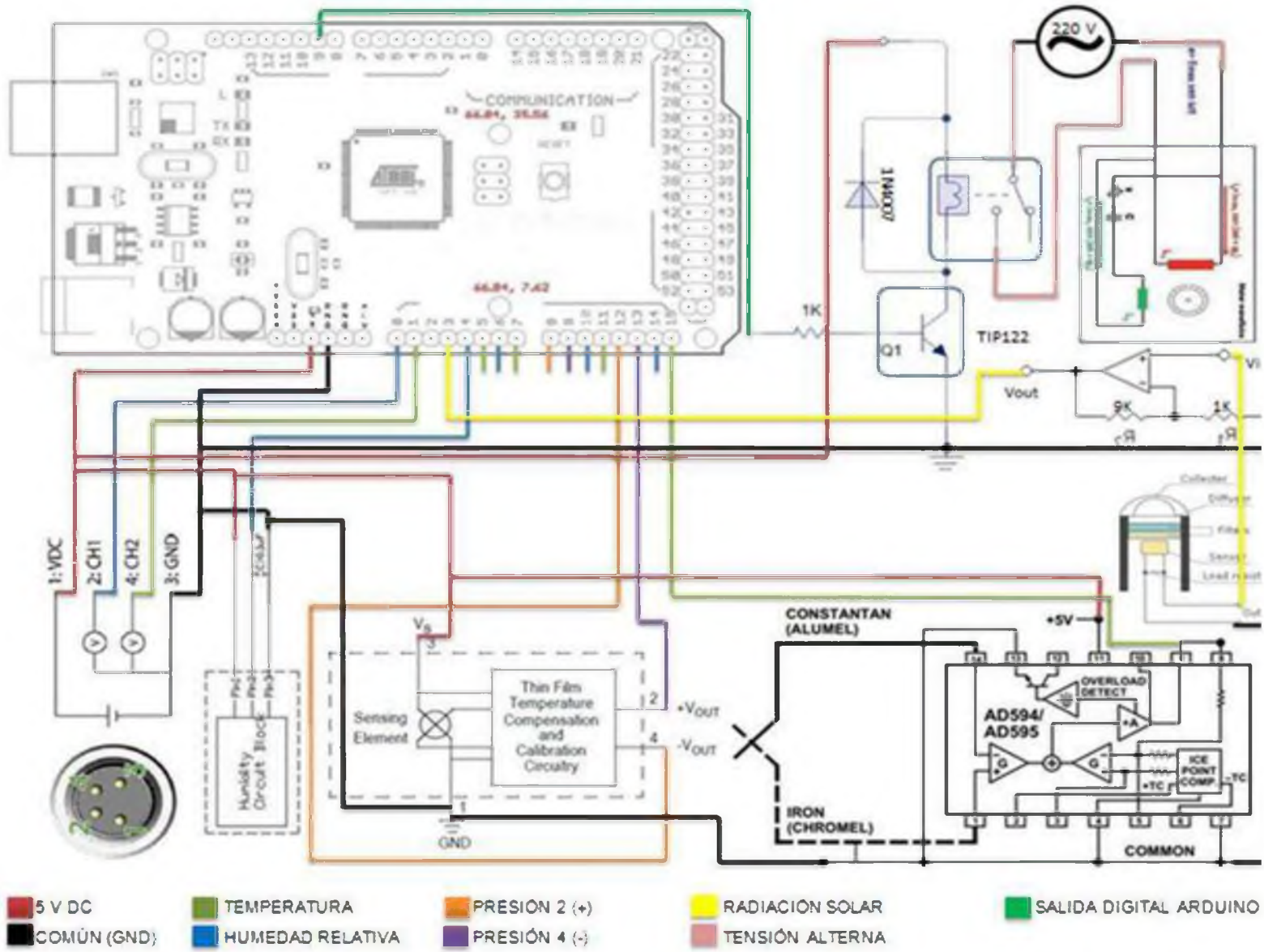
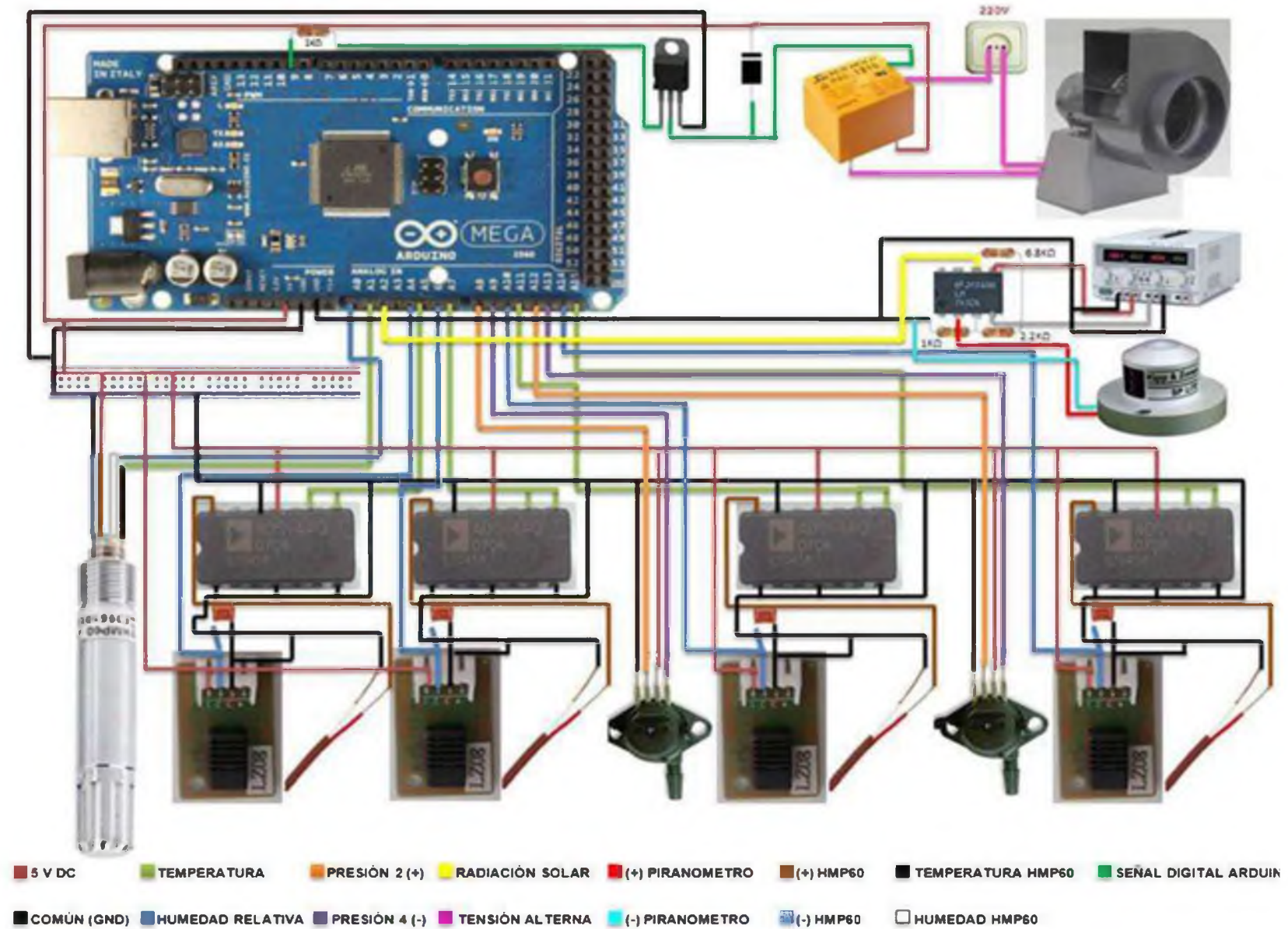


Diagrama esquemático de conexión eléctrica del circuito de adquisición de datos y control on / off del extractor de aire



Anexos C: Programación en GUIDE (Matlab)

