



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA
EL SECADOR DE MADERA A ESCALA DEL LABORATORIO DE
ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

ESTRADA CRUZ FRANCISCO ESTEBAN
este_estr@hotmail.com

VEGA PILCO ANA LUCÍA
anitaluyp@yahoo.com

DIRECTOR: FIS. MARCO VINICIO YÁNEZ SALCEDO, MSc.
marco.yanez@epn.edu.ec

CODIRECTORA: ING. ANA VERÓNICA RODAS BENALCÁZAR, MBA.
ana.rodas@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, Francisco Esteban Estrada Cruz y Ana Lucía Vega Pilco, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ana Lucía Vega Pilco

Francisco Esteban Estrada Cruz

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ana Lucía Vega Pilco y Francisco Esteban Estrada Cruz, bajo mi supervisión.

Fis. MARCO YANÉZ, MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. ANA RODAS, MBA
CODIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a Dios, a nuestras familias por su apoyo incondicional, por la comprensión en los momentos difíciles y por el infinito amor entregado.

Al Físico Marco Yáñez y a la Ingeniera Ana Rodas por su guía y aportes en la realización de este proyecto.

A la señora Graciela Molina por el cariño y la ayuda que nos brindó en el transcurso de esta difícil labor.

Ana Vega, Esteban Estrada

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, a mi papá Marcelo, a mi mamá Marianita, a mis hermanas Gabriela y Diana porque me han apoyado dándome consejos y fuerzas para seguir adelante, además siempre han estado conmigo entregándome su ternura y amor.

A Esteban por brindarme su apoyo incondicional en este proyecto y en la vida.

Ana Lucía Vega Pilco

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Jorge y a Cecilia mis padres quienes me han apoyado con su amor y comprensión durante toda mi vida y en especial en este último tramo de mi vida universitaria.

A mis hermanos Jorge y Sebastián que han sido mis amigos y me han apoyado con su alegría.

A mis amigos por la ayuda brindada a lo largo de mi vida estudiantil y porque con ellos he compartido momentos de felicidad.

A Gabriela por estar a mi lado en los últimos años dándome su cariño, su comprensión, su ternura y su amor.

Francisco Esteban Estrada Cruz

CONTENIDO

CONTENIDO	vi
RESUMEN	ix
PRESENTACIÓN	xi
CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. ENERGÍA SOLAR	1
1.2.1. RADIACIÓN SOLAR.....	2
1.3. TRANSFERENCIA DE CALOR	4
1.4. ASPECTOS GENERALES DE LA MADERA	6
1.5. SECADO DE LA MADERA	8
1.5.1. PRINCIPIOS DEL SECADO DE MADERA	10
1.5.2. TIPOS DE SECADO DE MADERA	12
1.5.3. CURVAS DE SECADO	14
1.5.4. CONCEPTOS DEL SECADO DE LA MADERA.....	16
1.6. SECADORES SOLARES	20
1.6.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	20
1.6.2. TIPOS DE SECADORES SOLARES	23
1.6.3. TIPOS DE CIRCULACIÓN DE AIRE.....	26
1.6.4. FORMAS DE OPERACIÓN.....	27
1.7. LEVANTAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA DEL SECADO DE MADERA.....	27
1.8. PROYECTO A DESARROLLAR	36
1.9. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO DEL LABORATORIO	37
CAPÍTULO 2	42
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE	42
2.1. DISTRIBUCIÓN Y APILADO DE LA MADERA.....	42
2.2. SUBSISTEMAS DEL MÓDULO	45
2.2.1. SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN	48
2.2.2. SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES.....	51
2.2.2.1. SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA	51

2.2.2.1.1. SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA	53
2.2.2.1.2. SENSOR DE TEMPERATURA.....	58
2.2.2.2. SENSOR DE VELOCIDAD DE VIENTO	65
2.2.2.3. SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR.....	70
2.2.2.4. SENSOR DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA ...	75
2.2.3. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	83
2.2.4. SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN.....	89
2.2.4.1. VISUALIZACIÓN A TRAVÉS DE UN LCD	89
2.2.4.2. VISUALIZACIÓN A TRAVÉS DEL HMI	91
2.2.5. SUBSISTEMA DE CONTROL.....	92
2.2.6. SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN	98
CAPÍTULO 3.....	100
DESARROLLO DEL SOFTWARE.....	100
3.1. DESARROLLO DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR MAESTRO.....	100
3.2. DESARROLLO DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR ESCLAVO	135
3.3. DESARROLLO DEL HMI PARA LA VISUALIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO.	156
CAPÍTULO 4.....	163
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	163
4.1. PRUEBAS PARA EL SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN	163
4.2. PRUEBAS PARA EL SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO ...	164
4.2.1. CALIBRACIÓN DE LOS MÓDULOS HTG3533 (SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA).....	164
4.2.2. CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR VANTAGE PRO 6450	175
4.2.3. PRUEBAS PARA OBTENER LA ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE VELOCIDAD MD0550	176
4.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SUBSISTEMA DE CONTROL	178
4.3.1. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA DETERMINAR EL TIPO DE VENTILACIÓN	178
4.3.2. PRUEBAS PARA DETERMINAR EL TIPO DE CONTROL	180
4.3.2.1. COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LOS VENTILADORES.....	182

4.4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROCESO DE SECADO	185
4.4.1. COMPARACIÓN DEL PROCESO DE SECADO UTILIZANDO VENTILACIÓN NATURAL Y VENTILACIÓN FORZADA.....	185
4.4.2. PRUEBA PARA ESTABLECER EL TIEMPO DE SECADO DE LA MADERA.....	187
4.4.3. PRUEBA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL.....	192
4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA DE SECADO BASADO EN ENERGÍA SOLAR.....	195
4.6. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO.....	200
CAPÍTULO 5.....	201
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	201
5.1. CONCLUSIONES	201
5.2. RECOMENDACIONES	204
BIBLIOGRAFÍA	206
ANEXOS	210

RESUMEN

En el laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional se ha diseñado el prototipo de un secador solar de madera para conocer los beneficios de tener un sistema basado en energía solar. En el presente proyecto con el fin de conocer y establecer los beneficios del proceso de secado utilizando energía solar se ha automatizado el prototipo.

La automatización del prototipo consiste en medir las principales variables que intervienen en el proceso como son: temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, radiación solar y contenido de humedad de la madera a través de sensores colocados en el prototipo, y con el análisis de estos valores dotar al mismo del control necesario para que el proceso de secado sea eficiente.

Como parte del análisis realizado para que el proceso de secado mejore se implementó un sistema de ventilación forzada, que consiste en la instalación de ventiladores dentro de la cámara de secado, en base a los datos obtenidos se diseñó un control que permite regular el voltaje de alimentación de los ventiladores dependiendo de la radiación solar que incide en el colector y de las temperaturas al interior de la cámara de secado permitiendo que el tiempo de secado de las piezas de madera sea menor.

Al ser un prototipo de laboratorio utilizado para prácticas en la cual los estudiantes observan el comportamiento del secado, en este proyecto se da la opción a los usuarios para poder comparar el proceso de secado cuando se utiliza ventilación natural y cuando se utiliza ventilación forzada, también podrán establecer el contenido de humedad de la madera a la cual se desea finalizar el proceso de secado.

El sistema de automatización implementado es controlado por dos microcontroladores ATmega 164P, los cuales son los encargados de la adquisición de los datos, el control de los ventiladores, el monitoreo del proceso de secado, la visualización de los datos y la transmisión inalámbrica de los datos

a un computador, los dos microcontroladores trabajan en comunicación maestro – esclavo.

Además del tablero de control montado en el cual se pueden observar los valores de las variables involucradas en el proceso de secado a través de un LCD también se ha diseñado un HMI que permitirá la visualización de los datos obtenidos, los cuales son enviados inalámbricamente desde la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica hasta el laboratorio que se encuentra en el segundo piso del ICB.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto estudia y analiza el proceso de secado de la madera utilizando energía solar, el escrito presentado para este proyecto está dividido en cinco capítulos los cuales son: Marco Teórico, Diseño e Implementación del Hardware, Desarrollo del Software, Pruebas y Resultados y el capítulo de Conclusiones y Recomendaciones.

En el primer capítulo se detalla de forma general la energía solar, así como también las formas de transferencia de calor, además se explica las características de la madera y la importancia que tiene el secado de la misma, dentro del secado se expone la forma en la que se realiza el proceso de secado de la madera, también se realiza un análisis de los secadores solares tema desarrollado en este proyecto.

Dentro de este capítulo se ha incluido un estudio acerca de la problemática del secado de la madera en Quito, consultando dos empresas dedicadas a esta actividad, con los datos obtenidos de esta consulta se realiza un estudio para determinar las emisiones que se producen con secadores que utilizan combustibles distintos a la energía solar. También se detalla en qué condiciones se encuentra el prototipo del laboratorio, las dimensiones y los materiales de los cuales está construido.

El segundo capítulo consta de dos partes, en la primera parte se explica la forma en la que se debe apilar las piezas de madera dentro de la cámara de secado. La segunda parte trata acerca del tipo de sensores que se van a utilizar para medir las variables que intervienen en el secado, también se indica las características de los mismos y los circuitos de acondicionamiento implementados para que las señales sean utilizadas por los microcontroladores en la adquisición, visualización y transmisión de datos. También se señala la ubicación de los sensores en el prototipo.

En el tercer capítulo se explica los programas de control desarrollados para los microcontroladores, el lenguaje de programación utilizado se lo realiza en las plataformas BASCOM AVR 2.0.7.5 y AVRStudio 5.1 programación en C, para los microcontroladores maestro y esclavo respectivamente, el sistema implementado

posee dos tipos de visualización, el primero a través de un LCD montado en el tablero de control y el segundo a través de una interfaz hombre – máquina desarrollada en la plataforma LabVIEW 2009.

En el cuarto capítulo se realiza el análisis de las diferentes pruebas desarrolladas para comprobar el funcionamiento del sistema implementado. Las pruebas realizadas permiten comprobar que las fuentes implementadas en el sistema funcionen dentro de los rangos establecidos por el fabricante de los elementos además de comprobar que entreguen el valor de voltaje necesario para el funcionamiento de los circuitos implementados, también se determinó que los sensores estén funcionando de forma correcta con un determinado margen de error, contrastando los valores obtenidos con equipos del laboratorio utilizados como referencia.

Dentro de las pruebas ejecutadas también se comprueba que el sistema implementado mejora el proceso de secado, comparando el secado de la madera utilizando ventilación natural y ventilación forzada, también se realizaron pruebas para conocer el tiempo que se demora el secado de las piezas de madera.

En el capítulo cinco se muestran las conclusiones que resultan del desarrollo del proyecto en las cuales se considera los resultados obtenidos, también se presentan recomendaciones con las cuales se podrá mejorar el estudio y el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

La utilización de sistemas basados en energías renovables ha tomado gran importancia, por tal motivo el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética, LEAEE, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional ha desarrollado prototipos basados en la utilización de energía solar. Uno de ellos es el secador de madera, prototipo utilizado para el estudio en el presente proyecto. En el cual es necesario contar con un sistema de monitoreo que recolecte datos para evaluar el rendimiento del sistema. También debe contar con un sistema de control que permita manipular las variables envueltas en el sistema, con lo que se podría mejorar el proceso de secado de la madera.

Con el estudio pertinente de este sistema se pretende dar una base práctica y teórica que pueda ser utilizada tanto en el sector industrial como en el sector artesanal. A continuación se presenta algunos fundamentos relacionados con la energía solar, transferencia de calor y generalidades de la madera en la cual se especifica el proceso de secado, con enfoque en los secadores solares.

1.2. ENERGÍA SOLAR

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de luz y calor emitidos por el sol [1].

Para entender cómo se obtiene la energía solar es conveniente conocer como el sol proporciona dicha energía, y para esto se debe conocer que es la radiación solar, los tipos de radiación que se presentan en la superficie terrestre, y la cantidad de radiación que llega a la capa externa de la tierra.

1.2.1. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas que el sol emite, siendo las radiaciones electromagnéticas una propagación de energía resultado de la combinación de los campos magnéticos y eléctricos que se encuentran oscilantes (ondas electromagnéticas), al ser oscilantes se tiene diferentes frecuencias (longitudes de onda), conformando así el espectro electromagnético como se indica en la Tabla 1.1 [2]:

Tabla 1.1 Espectro Electromagnético

Onda	Longitud de onda [m]	Frecuencia [Hz]	Energía [J]
Radio	$> 1 \times 10^{-1}$	$< 3 \times 10^9$	$< 2 \times 10^{-1}$
Microondas	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-24} - 2 \times 10^{-22}$
Infrarroja	$7 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{-22} - 3 \times 10^{-19}$
Luz visible	$4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-19} - 5 \times 10^{-19}$
Ultravioleta	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{-19} - 2 \times 10^{-17}$
Rayos X	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{-17} - 2 \times 10^{-14}$
Rayos Gamma	$< 1 \times 10^{-11}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 2 \times 10^{-14}$

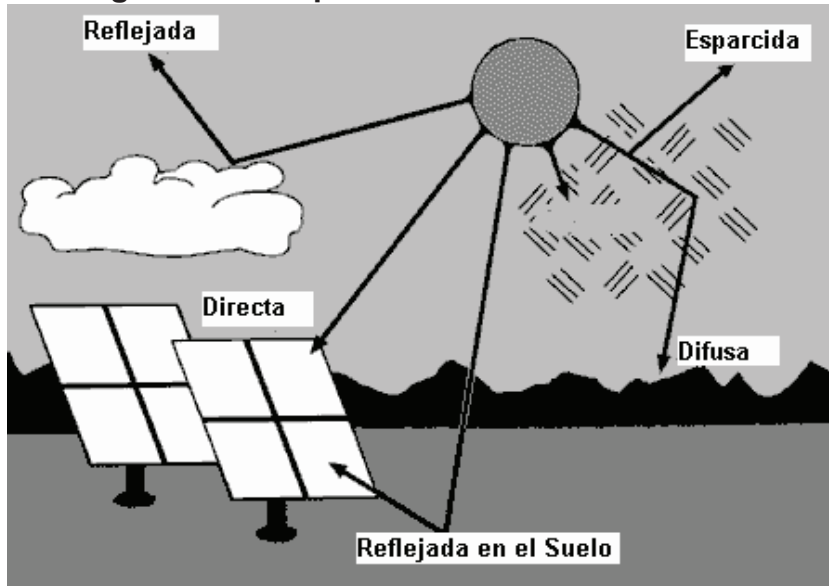
Fuente: Tomado del Libro Energías Renovables de Miño Santiago [2]

La luz visible es la mayor cantidad de energía de la radiación solar que llega a la tierra, el resto de energía representada en las diferentes formas de onda sufre cierta variación debido a la atmósfera terrestre.

A su paso por la atmósfera terrestre la radiación solar puede: ser reflejada por las nubes (Radiación reflejada), absorbida por el vapor de agua o por los aerosoles, llegar de forma directa sin verse afectada (Radiación directa), o ser dispersada por efecto de las moléculas de la atmósfera (Radiación Difusa), como se puede ver en la Figura 1.1.

Teniendo en cuenta estos cambios de la radiación solar al pasar por la atmósfera se conoce como radiación total o global a la suma de las componentes de la radiación directa, difusa y la que es reflejada por el suelo [2].

Figura 1.1 Componentes de la radiación solar



Fuente: Tomado del libro de Energías Renovables [2]

La cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a la parte externa de la tierra, conocida como constante solar puede ser calculada tomando en cuenta la radiación que emite el sol; de acuerdo a la ley de Stefan – Boltzman se tiene:

$$M = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

Dónde:

M : Densidad total de flujo radiante emitida por un cuerpo $[W/m^2]$

σ : Constante de Stefan – Boltzman = $5,67 \times 10^{-8} [Wm^{-2}K^{-4}]$

T : Temperatura del cuerpo $[K]$, para el sol $5,780 [^{\circ}K]$

$$M_{sol} = 5,67 \times 10^{-8} * 5,780^4$$

$$M_{sol} = 63.284.071,5 \left[W/m^2 \right]$$

Debido a que la radiación emitida por el sol debe ser igual a la radiación en la órbita terrestre se tiene que:

$$M_{sol} * A_{sol} = M_{tierra} * A_{sol-tierra} \quad (1.2)$$

Dónde:

$$A_{sol-tierra} = \pi r_{st}^2 \quad (1.3)$$

$$A_{sol} = \pi r_s^2 \quad (1.4)$$

Siendo $r_{st} = 149.597.870 \text{ km}$, el radio entre el sol y la tierra, y considerando el radio del sol como $r_s = 695.500 \text{ km}$.

$$M_{tierra} = \frac{M_{sol} * A_{sol}}{A_{sol-tierra}} \quad (1.5)$$

$$M_{tierra} = \frac{63.284.071,5 * \pi * 695.500.000^2}{\pi * 149.597.870.000^2}$$

$$M_{tierra} = 1.367,84 \left[W / m^2 \right]$$

Esta constante es utilizada para determinar ciertos parámetros al momento que se desarrolla sistemas basados en la energía solar.

Debido a que el Sol es la fuente principal de energía, el estudio relacionado con su uso se vuelve de mucha importancia ya que el desarrollo de sistemas basados en la energía solar, los cuales pueden ser sistemas térmicos o sistemas fotovoltaicos, se ha incrementado con el fin de dar al planeta y a sus habitantes una nueva forma de energía que sea renovable y que no provoque contaminación.

1.3. TRANSFERENCIA DE CALOR

La utilización de la energía solar permite crear sistemas térmicos o fotovoltaicos que aprovechan esta energía. En el presente proyecto se estudia un sistema solar térmico, por esto es necesario conocer la forma en la que se trasfiere el calor del elemento que lo almacena al elemento que va a utilizar esta energía.

Se considera como transferencia de calor al paso de energía térmica de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura, este proceso de transferencia se detiene cuando se alcanza el equilibrio térmico [3] [4] [5].

Existen 3 mecanismos para la transferencia de calor los cuales son: conducción, convección y radiación, los que se detallan a continuación:

Conducción:

Es la forma de transferencia de energía, desde las partículas con mayor energía a las partículas de menor energía que se encuentran adyacentes, esto se debe a la interacción que existe entre ellas; esta transferencia puede darse en sólidos, líquidos y gases.

En los líquidos y gases, por efecto de colisiones y la difusión de las moléculas por su movimiento aleatorio, se produce la conducción, mientras que en los sólidos la conducción se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas y al transporte de energía por los electrones libres [3] [5].

Convección

Es la forma de transferencia térmica entre una superficie sólida y el fluido adyacente (líquido o gas), es decir que el movimiento del fluido, junto con la conducción permiten la transferencia de calor, es decir mientras más rápido se mueve el fluido más rápido se da la transferencia de calor. Si no existe movimiento se tiene transferencia de calor por convección pura.

Existen dos tipos de convección: natural y forzada.

En la convección natural el movimiento del fluido sucede por causas naturales, mientras que en la convección forzada el movimiento del fluido es a través de métodos artificiales (ventiladores, bombas) [3] [4] [5].

Radiación

Se considera radiación a la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, a diferencia de la conducción y la convección la transferencia de calor no necesita un medio material, ya que todos los cuerpos que estén a una temperatura por encima del cero absoluto emiten radiación en forma de calor.

Se considera a la radiación como un fenómeno volumétrico ya que tanto sólidos, como líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados.

Se ha explicado de forma general que es la energía solar, la fuente de energía utilizada para el funcionamiento del secador solar de madera del LEAEE. Siguiendo con el desarrollo teórico de los temas principales relacionados con el proyecto, a continuación se darán a conocer varios aspectos generales de la madera, así como también del secador solar.

1.4. ASPECTOS GENERALES DE LA MADERA

La madera es un compuesto orgánico formado por diferentes tipos de células que se pueden asemejar a tubos huecos, en el que la pared del tubo se correspondería con la pared celular y el interior hueco con el lumen de la célula, de forma simple y general se puede decir que la madera está formada principalmente por la unión de estas células [6] [7] [8].

La madera se caracteriza por ser un material:

Anisótropo.

Higroscópico.

Con buenas propiedades mecánicas.

Resistente contra agentes degradadores.

De buenas características estéticas.

Anisotropía:

La madera al estar conformada por diferentes tipos de células que realizan diferentes funciones y que permiten que no sea homogénea, le dan la característica que dependiendo de la dirección en que se considere la madera (radial, tangencial, longitudinal) hace que sus propiedades físicas y mecánicas varíen.

Considerando que para las propiedades físicas se hace referencia a estas tres direcciones, y cuando se habla de las propiedades mecánicas sólo se habla de dos direcciones, la dirección paralela a las fibras (que coincide con la longitudinal) y la dirección perpendicular a las fibras (que engloba a la tangencial y radial, cuyas propiedades mecánicas suelen tener valores similares) [6] [8].

Higroscopicidad:

Esta es una característica que le permite a la madera intercambiar agua con el medio ambiente, es decir, absorbe o cede agua al medio ambiente dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente que la rodea. Se puede también especificar lo que es la humedad de equilibrio higroscópico, es decir que para una determinada temperatura y humedad relativa se tiene un punto de equilibrio [6] [8].

La higroscopicidad y la anisotropía de la madera le permiten a ésta poseer varias propiedades que se detallarán a continuación.

Las propiedades físicas son aquellas que determinan el comportamiento de la madera frente a factores ambientales, dentro de las cuales se encuentran el contenido de humedad, densidad, hinchazón¹, merma², etc. [9](13).

Las propiedades acústicas de la madera son: absorción del sonido, transmisión del sonido y resonancia, considerando como una de la más importante el hecho de que la madera puede amortiguar las vibraciones sonoras [9](13).

Las propiedades térmicas de la madera son: conductividad térmica, calor específico y dilatación térmica, considerando que la madera es un mal conductor del calor debido a que los átomos no se encuentran libres [9](13).

Las propiedades eléctricas de la madera dependen del contenido de humedad de la misma, ya que si la madera está seca será un buen aislante eléctrico, mientras que a más humedad la madera aumentará la conductividad eléctrica, ya que la resistencia disminuye [9] [10].

¹ Hinchazón: variación de las dimensiones de la madera debido al aumento del contenido de humedad.

² Merma: variación de las dimensiones de la madera debido a la disminución del contenido de humedad.

Las propiedades mecánicas de la madera son aquellas que indican la capacidad de resistencia de la misma frente a fuentes externas, esto debido a la anisotropía, de estas propiedades se puede nombrar las siguientes: flexión³, compresión⁴, tracción⁵, etc. [9] [10].

A continuación se explicará el proceso de secado de la madera y de los factores que intervienen en éste.

1.5. SECADO DE LA MADERA

Al ser cortado un árbol, éste posee un alto contenido de humedad, el cual varía según la época del año, región de procedencia, especie y densidad, entre otros; por tal motivo se debe extraer una gran cantidad de agua de la madera para poder utilizarla para los diversos procesos industriales.

De aquí que el secado de madera se considera un tratamiento sumamente importante y complejo.

El contenido de humedad en la madera produce variación en sus dimensiones, aparición de grietas, raspaduras o torceduras; también pueden aparecer abultamientos ya que es un material higroscópico.

Los factores que intervienen en el proceso de secado se citan a continuación:

- Factores ambientales como: la temperatura, humedad relativa del aire y la velocidad del aire.
- Características propias de la madera como: contenido de humedad, la densidad y el espesor de las piezas a secar [8] [11].

Al realizar el proceso de secado se puede enumerar varias ventajas como:

Pérdida de peso: al disminuir el contenido de humedad se facilita el transporte y la manipulación.

³ Flexión: tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.

⁴ Compresión: resistencia que opone una viga a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de la fibra.

⁵ Tracción: resistencia que opone una probeta de madera a una carga de tracción aplicada en la dirección de las fibras.

Resistencia mecánica: aumenta la fuerza y resistencia con respecto a la madera en condición verde.

Resistencia al biodeterioro: la madera correctamente secada, evita ser atacada por hongos o insectos que la deterioran.

Tratamientos de preservación: la madera presenta un buen comportamiento frente a métodos de preservación.

Adhesivos: la madera seca tendrá mejor comportamiento a la adhesión, produciendo líneas de cola más estables y resistentes.

Acabados: la madera permite ser moldeada, además de conservar los diferentes tipos de acabados.

Trabajabilidad: la madera en condición seca se volverá más “noble” para trabajar, menos propensa a producir grano vellosos⁶, grano arrancado y su pulido o lijado es de mejor calidad.

Aislamiento térmico: al ser secada, los espacios vacíos de la estructura celular son ocupados por aire, el cual no es un buen conductor de calor, por lo tanto se convierte en un buen aislante térmico.

Aislante eléctrico: conforme la madera pierde humedad, su resistencia al paso de la corriente eléctrica aumenta.

Al considerar todas las ventajas antes mencionadas se explica por qué el secado de la madera es importante, ya que éste permitirá que ésta sea utilizada de una mejor forma.

A continuación se detalla de forma más clara como se lleva a cabo el secado citando dos principios importantes en el proceso.

⁶ Grano vellosos: se produce por el levantamiento de las fibras durante el cepillado de las tablas en condición verde.

1.5.1. PRINCIPIOS DEL SECADO DE MADERA

Cuando se realiza el secado de madera, la extracción del contenido de humedad por evaporación es el único método práctico, basado en dos principios los cuales se explican a continuación.

Primer principio del secado: Evaporación y calor necesario.

Para lograr la evaporación se requiere aporte de calor, así se pasará el agua de fase líquida a vapor. Para esto se considera como referencia el punto de ebullición y el calor latente de evaporación ya que la cantidad de calor necesaria para evaporar un gramo de agua es aproximadamente de 550 calorías o 2200 joules [11].

En conclusión, el primer principio de secado dice así:

"Para secar madera (o cualquier otro material) se necesita calor".

Segundo principio del secado: Evacuación del agua evaporada y circulación del aire.

El agua que se evapora de la madera es la que se encuentra en la superficie y la que está por debajo de ésta, por tal razón el calor utilizado debe ser transportado desde la fuente hasta la superficie de evaporación. Una vez ocurrida la evaporación, el vapor obtenido ocupa un volumen mayor que el agua en estado líquido.

Es por esto que a una determinada temperatura el aire es capaz de absorber cierta cantidad de vapor agua, lo que representaría la humedad relativa, es decir, si la humedad relativa es de 100 % se dice que el aire está saturado, no puede absorber más vapor y si lo hace se produce condensación, si es del 0% el aire está seco. Además de entregar una importante cantidad de calor para evaporar el agua de la madera, se debe aportar una gran cantidad de aire, para poder llevar el calor desde la fuente hasta la superficie de evaporación.

Si el aire no estuviera en movimiento existiría saturación limitando así la evaporación.

Así el segundo principio del secado queda enunciado así:

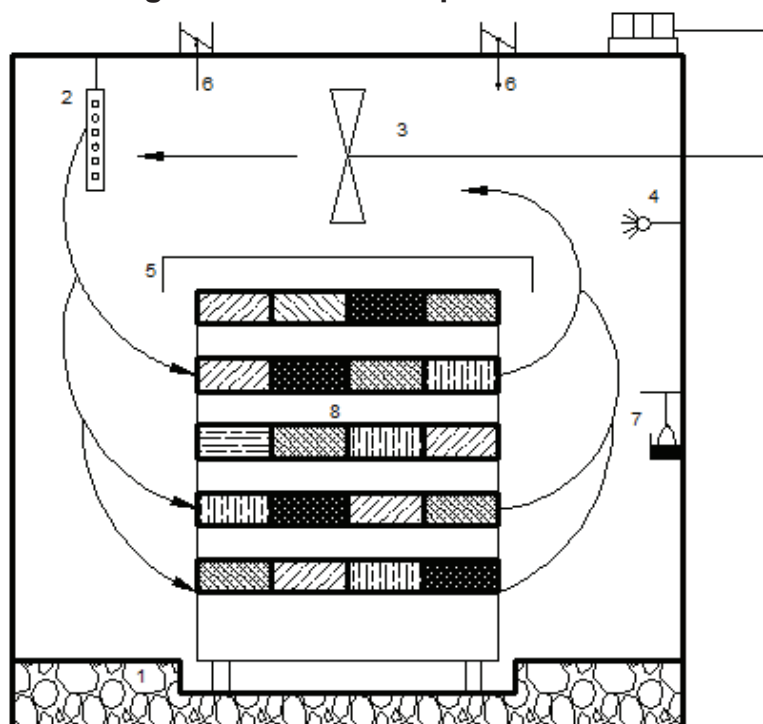
"Para secar madera se necesita aire circulando con la doble función de transportar el calor hasta la superficie de evaporación y arrastrar la humedad resultante de esa evaporación".

Es necesario que el aire circule de forma adecuada a través de la madera para que pueda absorber el agua, ya que cuando el aire pasa través de la madera y absorbe agua de ella, poco a poco se va saturando, lo que significa que debe pasar un volumen apropiado de aire; también se debe considerar velocidad del aire, características del secador y condiciones higrotérmicas del secado para que la evaporación sea más rápida al inicio del secado [11] [12].

Cualquier proceso de secado, debe cumplir los dos principios antes mencionados así como cumplir con los requerimientos de diseño, en los cuales se garantice que el secado se va a realizar de una forma adecuada.

A continuación se muestra una gráfica donde se puede observar un secador típico de madera así como también de las partes que lo conforman (Figura 1.2):

Figura 1.2 Secador Típico de Madera



Fuente: Tomada del libro Bases Físicas del Secado de Madera [11]

Las partes que conforman un secador típico de madera son: 1. Obra Civil, 2. Sistema de calefacción, 3. Sistema de Ventiladores, 4. Tubería de humidificación, 5. Deflector de aire, 6. Ventiladas de entrada y salida de aire, 7. Termómetros, 8. Apilado de madera.

Para entender el proceso de secado es necesario conocer los tipos de secado que existen, las variables que se van a controlar y en qué forma se lo puede realizar.

1.5.2. TIPOS DE SECADO DE MADERA

Los procedimientos empleados para el secado de la madera pueden agruparse en dos métodos usuales: Secado natural y Secado artificial.

A continuación se explicará brevemente cada tipo de secado.

Secado Natural.

Este tipo de secado expone la madera a la acción del medio ambiente, es decir que depende de los factores climáticos (temperatura, humedad relativa y velocidad de viento) para que exista el secado.

Además de los factores antes mencionados para un buen secado se requiere de la disponibilidad de espacio y que la madera se encuentre apilada de una forma correcta.

Tiene como ventaja que no existe coste alguno derivado del consumo de energía.

Al aplicar este método de secado se tiene como principal desventaja que no se tiene control sobre las variables que permiten el secado, y por este motivo no se puede alcanzar un contenido de humedad bajo, y la calidad del producto al finalizar el proceso no se garantiza.

Para la optimización de este método se puede sumergir la madera en agua, esto facilita el desplazamiento hacia el exterior de la savia y de los minerales, lo que propicia un secado más rápido, por lo que se lo llama secado natural acelerado, sin embargo, este procedimiento puede producir oscurecimiento de la madera.

Secado Artificial

En este método se logra el secado (extracción de agua) mediante la manipulación de los factores que intervienen, es decir, se debe controlar temperatura, humedad relativa, velocidad de viento utilizando instrumentos adecuados, así como también de instalaciones apropiadas.

Si bien el secado al aire libre (secado natural) tiene como ventajas: la simplicidad, el bajo costo energético, bajo costo de mantenimiento, mínimos requerimientos de inversión, etc.; el secado artificial usando hornos de secado permite:

- Garantizar la obtención de un producto final compatible con aplicaciones que requieren bajos contenidos de humedad.
- Mejorar el tiempo de secado.
- Optimizar el transporte de la madera al reducir el peso de ésta.
- Eliminar posibles daños en la madera.

El secado artificial puede realizarse de distintas maneras.

A continuación se detallan algunas de ellas.

Desecación al vapor de agua.

Ingresada la madera a la cámara, se realiza la eliminación de la savia, dosificando vapor de agua, el cual va aumentando su temperatura.

Este vapor disuelve y transporta la savia, condensándola en el interior.

Secado con aire caliente.

Se sustituye el vapor de agua por aire caliente impulsado por un ventilador. La circulación del aire caliente extraerá la humedad de la madera.

Secado con fuego directo.

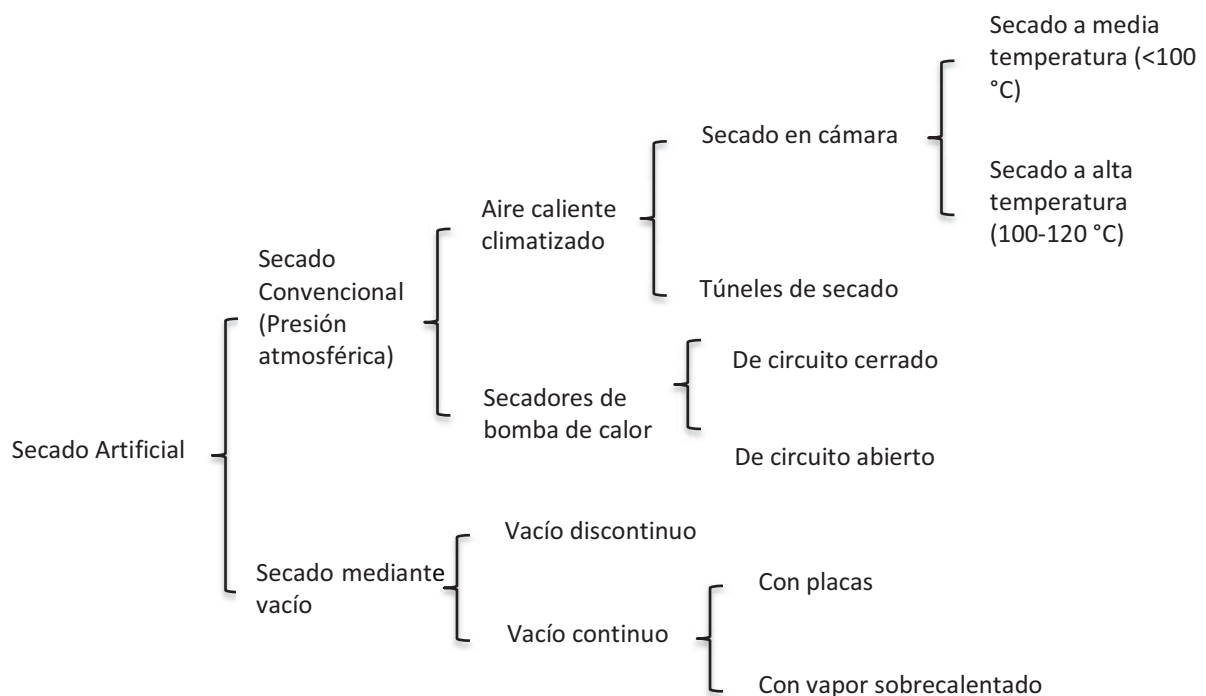
Se utiliza para maderas resinosas, ya que toleran el aire seco. La madera va perdiendo humedad a medida que aumenta la temperatura.

Secado solar

La radiación calienta el aire en el colector solar el que será dirigido hacia la cámara, donde la madera es deshidratada por el aire que pasa, en los subcapítulos posteriores se dará una explicación más detallada de este tipo de secado ya que el presente proyecto se centra en la utilización de este método para el secado de la madera.

Además de los métodos antes mencionados se tiene otras formas de secado artificial, esto se puede observar en la Figura 1.3.

Figura 1.3 Tipos de Secado Artificial



Fuente: Tomado de Aplicaciones Industriales de la Madera Pino Pinaster [13]

1.5.3. CURVAS DE SECADO

Al estudiar el proceso de secado de madera se debe analizar como éste se comporta en el tiempo, es decir cómo se relaciona la humedad de la madera con el tiempo de secado, para lo cual es necesario conocer las curvas de secado.

Las curvas de secado representan la variación de la humedad de la madera con respecto al tiempo de secado (Figura 1.4) o la velocidad de evaporación con el tiempo de secado [11].

En la curva de secado se pueden observar dos etapas características:

Etapas de velocidad de secado constante, (ver Figura 1.4, CP)

Etapas de velocidad de secado decreciente (ver Figura 1.4, PQ).

Etapas de velocidad de secado constante

Se presenta al inicio del secado, cuando la superficie de la madera se encuentra completamente húmeda.

En el secado a partir del estado verde la superficie de la madera está cubierta con una delgada película de agua líquida y la evaporación se mantiene a una velocidad constante.

Esta etapa es más larga para maderas de menor espesor y de mayor permeabilidad y es muy corta para maderas refractarias y de mayor grosor y es casi imperceptible para maderas previamente secadas o pre-secadas [11].

Etapas de velocidad de secado decreciente.

En la fase de velocidad de secado decreciente se observan dos sub-etapas:

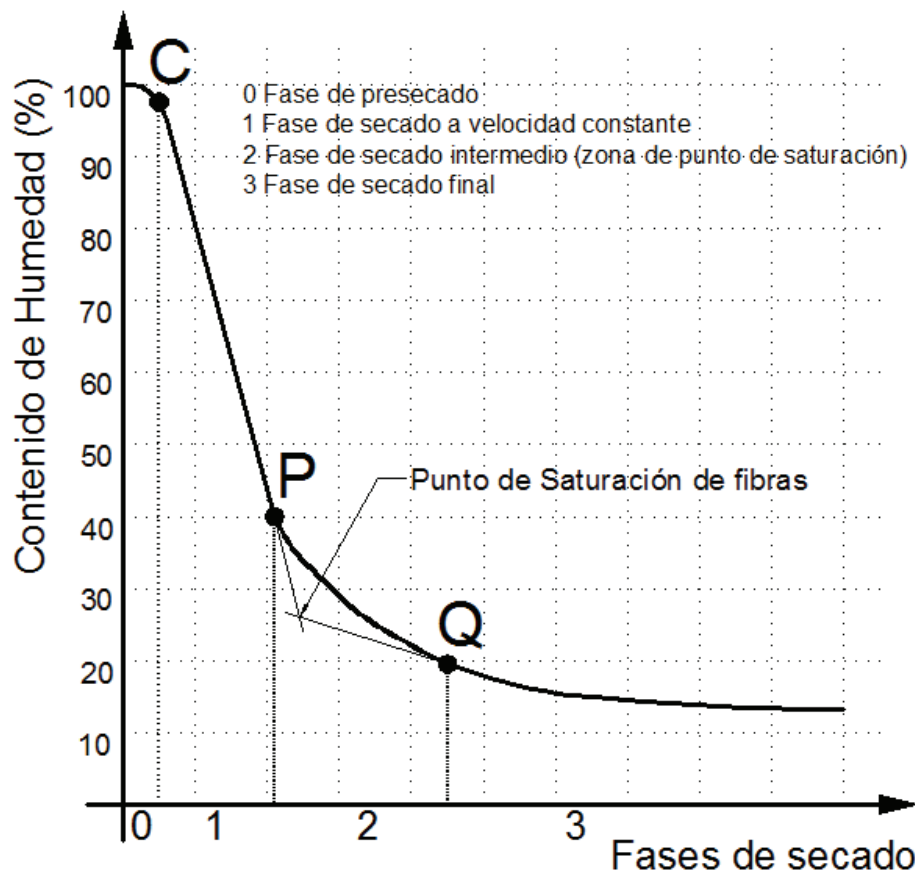
- Sub-etapa de secado con la superficie parcialmente cubierta de agua líquida, periodo que se produce cuando aparecen los primeros sectores de la superficie seca.

Esta sub-etapa puede ser también bastante corta o prolongarse hasta alrededor del punto de saturación de las fibras.

- Sub-etapa de secado por debajo del punto de saturación de las fibras.

Este periodo es gobernado por el movimiento interno de humedad, y en maderas refractarias de difícil secado puede representar prácticamente toda la curva de secado [11].

Figura 1.4 Curva de secado del Contenido de humedad vs Tiempo de secado



Fuente: Tomado del libro *Bases Físicas del Secado de Madera* y modificado por los autores del proyecto [11].

1.5.4. CONCEPTOS DEL SECADO DE LA MADERA

En este subcapítulo se dará el concepto y se explicará cómo ciertos parámetros del proceso de secado influyen para que éste se lleve a cabo, ya que conociendo que variables influyen en el secado se podrá establecer cuáles de ellas serán controladas para que el secado se haga de una manera correcta, además se entenderá un poco más lo relacionado con las propiedades y características de la madera.

Punto de Saturación de Fibras (PSF)

Cuando se realiza el proceso de secado, el agua que se encuentra en las cavidades se evapora (agua libre) hasta alcanzar un punto de equilibrio, conocido

como punto de saturación de fibras, es decir se elimina el agua libre y las paredes permanecen saturadas.

El contenido de humedad en este punto se encuentra entre el 28 y 30%, esto depende de los diferentes tipos de madera que existe, pero en promedio se utilizan los valores antes mencionados [12] [10].

Contenido de Humedad

Es la cantidad de agua contenida en la madera, y puede encontrarse en tres formas: agua libre, agua higroscópica y agua de constitución.

Agua libre: es el agua que fluye libremente a través de las células (agua en las cavidades capilares), este tipo de agua es fácil de extraer de la madera y es la primera que se pierde cuando se inicia el proceso de secado, se encuentra por encima del punto de saturación de fibras (PSF) [8] [9] [12].

Agua higroscópica: es el agua que se encuentra contenida en las paredes celulares, y mantiene un equilibrio dinámico con el ambiente que la rodea, su valor en porcentaje se encuentra entre el 8% y el punto de saturación de fibras, en el proceso de secado es la segunda forma de agua en evaporarse [8] [9] [12].

Agua de constitución: es el agua que se encuentra formando parte de la estructura molecular de la madera, y es menor al 8% de agua en la madera, este tipo de agua es difícil de extraer, ya que para conseguirlo es necesario que exista combustión de la madera [8] [9] [12].

Al conocer las tres formas en la que se encuentra el agua en la madera se puede decir que la madera presenta tres estados: verde, seco y anhidro, estos estados se los puede observar en la Figura 1.4, ya que en ésta se representa el contenido de humedad con respecto al tiempo de secado, es decir que se considera madera verde cuando ha perdido cierta cantidad de agua libre (Tramo 0 – Figura 1.4), se dice que es madera seca cuando ha perdido la totalidad del agua libre y parte del agua higroscópica (Tramo 1,2 – Figura 1.4), y se dice que es madera anhidra cuando ha perdido completamente el agua libre y el agua higroscópica (Tramo 3 – Figura 1.4) [11] [10].

Normalmente el contenido de agua se expresa en relación al peso anhidro de la madera, y generalmente se lo representa en porcentaje.

$$CH\% = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso anhidro}}{\text{Peso anhidro}} \times 100 \quad (1.6)$$

Densidad

La densidad de la madera expresa la relación entre la masa de los distintos tipos de elementos que forman la madera y el volumen que ellos ocupan. Hay que tomar en cuenta que la densidad variará dependiendo del contenido de humedad, ya que si se considera a la densidad como el resultado del volumen para el peso, se tiene que la madera después del punto de saturación de fibras varia sus dimensiones, provocando una variación del volumen, y como pierde agua en el proceso de secado también variará su peso [8] [12] [10] [14].

Debido al proceso de secado se presentan 4 tipos de densidades que se detallan a continuación:

Densidad verde: es la relación que existe entre el volumen de madera verde y el peso de madera verde.

Densidad seca al aire: es la relación entre el volumen y el peso de la madera secada al aire.

Densidad anhidra: es la relación que existe entre el volumen y el peso de la madera después de haberla secado al horno, este proceso se lo realiza hasta obtener un peso constante cuando en el horno se tiene una temperatura de 103 °C.

Densidad básica: es la relación que existe entre el volumen verde y el peso de la madera secada al horno. Está dentro de las cuatro mencionadas y es la de menor valor, y se puede decir que es un valor constante ya que el peso anhidro y el volumen verde permanecen constantes.

Tanto densidad como contenido de humedad son propiedades de la madera que en el proceso de secado van cambiando y por esto se realizó el análisis previo

para conocer cómo evolucionan o intervienen en el secado, además de estas propiedades existen factores externos a la madera que influyen en el proceso mencionado y a continuación se explica cuáles son los que influyen en mayor grado.

Temperatura

Para el secado se necesita calor, por tal motivo la temperatura es un factor que interviene de forma directa al momento de secar, ya que a un mayor grado de temperatura, las moléculas de la madera se evaporarán más rápido, es decir, a mayor temperatura la velocidad de evaporación del agua en el interior será mayor [8] [11].

Humedad relativa del aire

Se define como la cantidad de vapor de agua contenido en un volumen determinado de aire, es decir que cuando el aire está seco existe una humedad relativa de 0%, pero cuando el aire está saturado la humedad es del 100%. La humedad relativa del aire determina la velocidad de secado, es decir cuanto menor contenido de humedad del aire exista mayor será la velocidad de secado, ya que el aire tiende a absorber la humedad de la madera [8] [11].

Velocidad del aire

La circulación de aire en el secado permite dos cosas importantes:

- Transportar la energía requerida para la evaporación del agua contenida en la madera y
- Transportar el agua evaporada que sale de la madera.

Es por esto que a una mayor velocidad se aumenta la capacidad de arrastre, pero en exceso produciría un resecamiento de la madera que la dañaría o interrumpiría el proceso de secado [8] [11].

Los conceptos que se detallaron anteriormente darán una pauta para que se empiece a desarrollar el sistema de control del secado de madera, identificándolos como referencias o variables de control para el proceso.

Debido al incremento en el uso de combustibles fósiles para los procesos industriales y el correspondiente incremento de contaminación; la sociedad actual ha optado por desarrollar tecnología que utilice energías limpias y renovables, por tal motivo en el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética se desarrollan prototipos basados en este principio. El proceso de secado de madera no está exento de la utilización de estas tecnologías por lo que en este laboratorio se encuentra un secador de madera a base de energía solar y es el que se utiliza para el desarrollo del presente proyecto de titulación.

En los subcapítulos posteriores se explicará los principios del secador solar, los tipos de secadores solares, formas de operación, tipos de circulación de aire; temas que permitirán adquirir un mejor conocimiento acerca del secador solar para posteriormente desarrollar el sistema de control del mismo.

1.6. SECADORES SOLARES

Como se indicó anteriormente el secador solar de madera es un tipo de secador artificial, en el cual como fuente de energía se utiliza el sol.

1.6.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La radiación solar puede ser aprovechada en dos tipos de energía: energía solar fotovoltaica y energía solar térmica, siendo la última el tipo de sistema que se utiliza para los secadores solares, es decir éste tipo de secador utiliza la energía solar en forma de calor, este calor se utiliza para la evaporación del agua de los productos a secar [15].

El funcionamiento de este tipo de secador es sencillo ya que los rayos solares son captados en el colector solar y transformados en energía calorífica la cual calienta el aire que luego atraviesa el producto a secar extrayendo de éste la humedad contenida dentro del mismo, este aire posteriormente es evacuado por ventilas,

chimeneas o se establece una recirculación de aire. Este proceso se repite hasta que el producto es secado [16] [17].

De lo explicado antes se establece que un secador solar posee dos elementos básicos los cuales son: el colector solar y la cámara de secado.

Colector solar

Este elemento es el más importante del sistema ya que éste es el dispositivo capaz de captar la radiación solar y transformarla en energía térmica que elevará la temperatura del fluido contenido en el mismo.

El colector solar está compuesto por: placa colectora, cubierta transparente, aislamiento y carcasa. Estos elementos permiten obtener la energía térmica para calentar el fluido que secará el producto [17] [18].

Cubierta transparente: es la encargada de dejar pasar la radiación solar y evitar que ésta se disperse, es decir regrese al medio ambiente, también impide que el calor generado en la placa colectora se vaya del sistema, produciendo un efecto invernadero, generalmente los materiales utilizados son el vidrio y el plástico [17] [18].

Placa colectora: este elemento es el encargado de absorber la radiación solar de la forma más eficiente, para transformarla en energía térmica, que por convección se transferirá al fluido circundante, para este caso el aire al interior del colector.

Generalmente son placas o láminas metálicas con alto grado de absorción⁷ [17] [18].

Aislante: este elemento se coloca en la parte posterior y a los lados de la placa colectora para evitar que existan pérdidas térmicas al exterior.

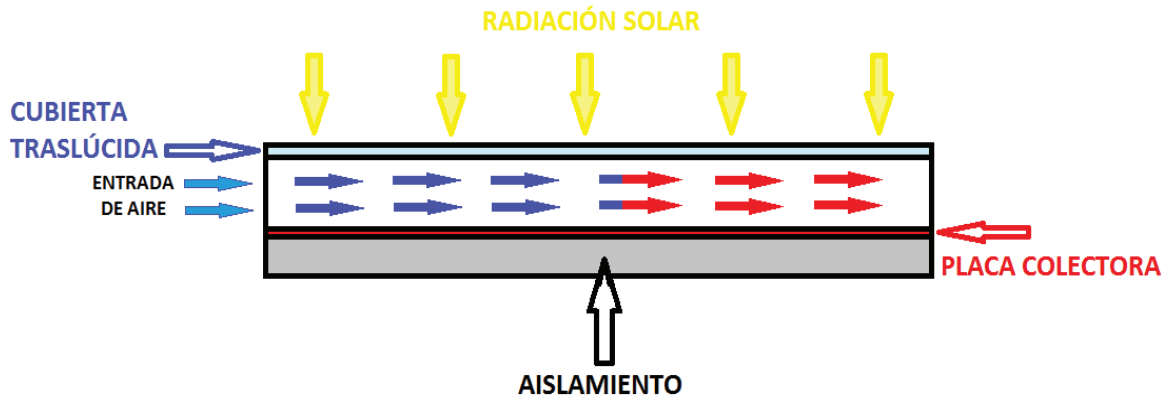
Debe resistir altas temperaturas, no deteriorarse por envejecimiento y soportar la humedad que pueda producirse en el interior del colector, por lo que generalmente se utiliza como aislantes lana de vidrio, espuma rígida de poliuretano o poliestireno expandido [17] [18].

⁷ Absortancia: representa en sí la fracción de radiación incidente que es absorbida por un material, con valores que van de 0.0 a 1.0 y depende del acabado y color del material.

Carcasa: es la encargada de contener todos los elementos del colector además de establecer un enlace entre el colector y la cámara de secado [17] [18].

Los elementos antes mencionados se los puede encontrar en la Figura 1.5.

Figura 1.5 Componentes del Colector solar



Fuente: Tomado de Modelado y Construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos.

Cámara de Secado

En este elemento es donde se coloca el producto a secar, para este caso, donde la madera será apilada [16] [17]. Las dimensiones de la cámara dependerán de la cantidad de producto que se va a secar; en la Figura 1.6 se observa una cámara de secado la cual se asemeja a la que se encuentra en el laboratorio.

Figura 1.6 Cámara de Secado



Dependiendo de la distribución del colector y de la cámara se pueden diferenciar tres tipos de secadores solares: secador solar directo, secador solar indirecto y secador solar mixto.

1.6.2. TIPOS DE SECADORES SOLARES

Secador Solar Directo

En este tipo de secador, el colector y la cámara de secado se encuentran juntos, es decir la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

En los secadores solares directos los productos al interior de la cámara de secado absorben directamente la radiación solar, lo que permite un aprovechamiento más efectivo de la energía generada por el colector solar para producir la evaporación del agua y por lo tanto el secado se acelera.

Su principal ventaja es que el costo de la implementación resulta económico para secadores de pequeño tamaño.

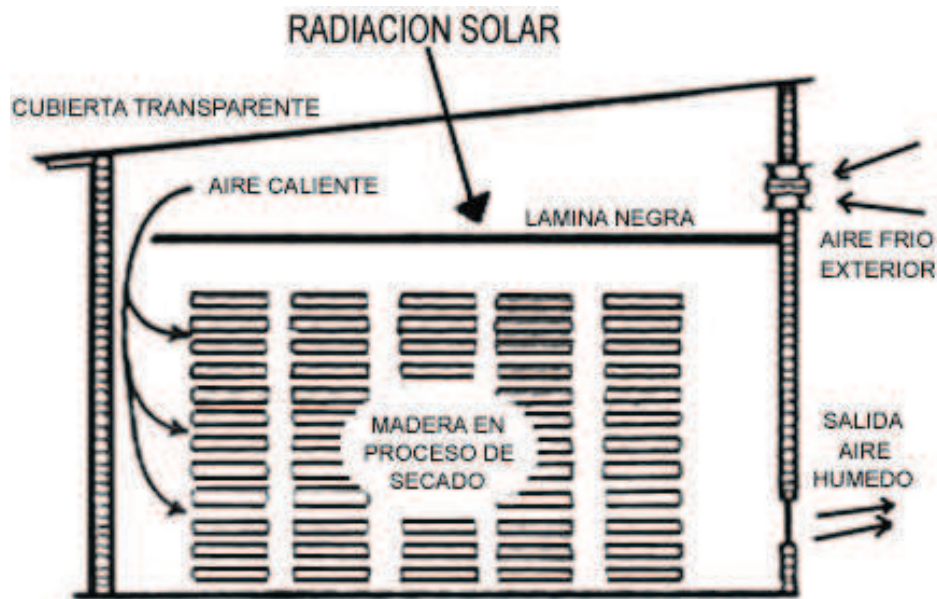
Este tipo de secadores tiene circulación de aire por convección natural, lo que provoca que a veces el control del proceso sea poco confiable.

Las características generales de operación de los secadores directos son [17] [19]:

- El agente de secado es aire calentado por radiación solar.
- El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre el aire caliente y el sólido húmedo, en donde el flujo de aire extrae el líquido vaporizado y separa el vapor.
- Un secador directo consume más energía por kilogramo de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad.
- La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del aire de entrada a una temperatura de salida constante.

En la Figura 1.7 se muestra un secador solar directo.

Figura 1.7 Secador solar directo



Fuente: Tomado de ITACAB. Secador de Madera [20]

Secador solar Indirecto

En este tipo de secador el colector y la cámara de secado están separados; es decir, el aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado directamente. La forma de este secador permite que el paso de aire caliente entre el colector y la cámara de secado sea por convección natural [17] [19].

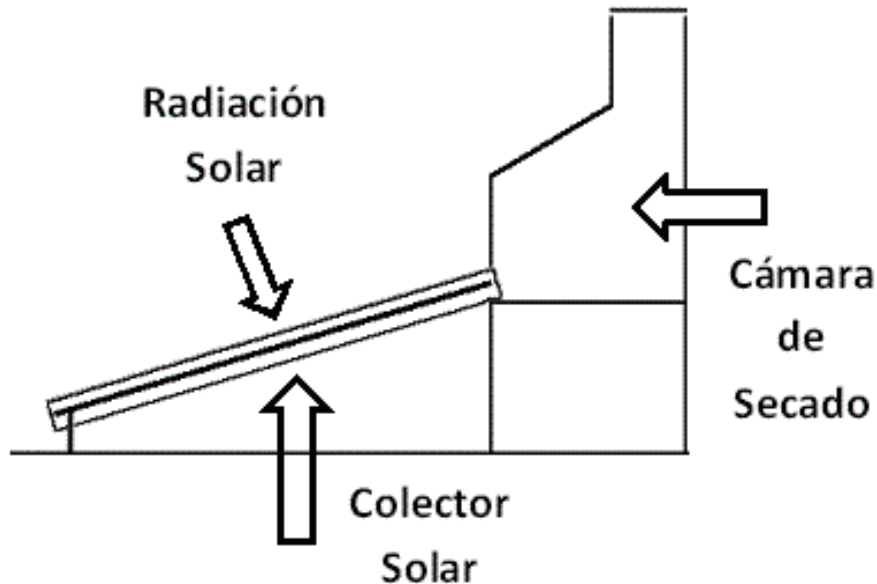
El funcionamiento de este tipo de secador es el siguiente: el colector capta la radiación solar y calienta el aire que se encuentra en su interior, ya sea por circulación de aire forzado o natural; este aire caliente pasa a la cámara de secado donde se encuentra el producto y arrastra la humedad del mismo hacia el exterior, este proceso se repite hasta que el producto esté seco.

Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente el producto para evitar los daños o pérdidas por una exposición directa al sol.

Como desventaja se tiene que para evaporar la misma cantidad de agua que en un secador solar directo se requiere mover más kilogramos de aire a mayor temperatura.

Se puede observar un secador solar tipo indirecto en la Figura 1.8, así como de las partes que lo componen.

Figura 1.8 Secador solar indirecto



Fuente: Tomado de MVT. Energías Renovables [21].

Secador solar Mixto

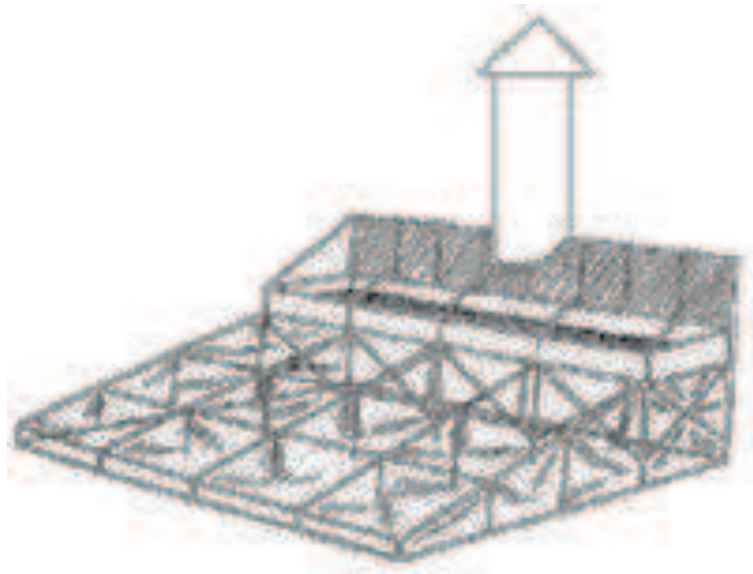
Este tipo de secador es aquel en el cual la captación de radiación solar se realiza tanto en el colector solar como en la cámara de secado, es decir el colector solar se encuentra separado de la cámara de secado, y ahí realiza la captación de radiación solar, pero al mismo tiempo la cámara de secado también realiza este proceso, siendo al mismo tiempo un secador solar directo e indirecto.

El secador solar mixto presenta ventajas como que el control del proceso es más simple y también se puede integrar de forma más fácil una fuente auxiliar convirtiéndolo en un sistema híbrido y el producto es fácil de manipular (carga y descarga) debido a que el colector se encuentra separado de la cámara.

Una desventaja de este tipo de secadores al igual que para los secadores indirectos es que al tener el colector separado de la cámara el tamaño del equipo y el costo aumentan [17] [19].

En la Figura 1.9 se muestra un secador solar mixto.

Figura 1.9 Secador solar mixto



Fuente: Tomado de Aplicación de la Energía Solar Térmica en Plantas Secadoras de Alimentos [22].

De acuerdo a los tipos de secadores solares antes mencionados hay que indicar que el producto a secar necesita del movimiento del aire calentado en el colector, y por este motivo es necesario conocer el tipo de circulación de aire que se tiene en los secadores solares.

1.6.3. TIPOS DE CIRCULACIÓN DE AIRE

El aire circula dentro del secador con el propósito de extraer la humedad evaporada del producto. Existen dos métodos: circulación forzada y convección natural.

Circulación forzada

Utilizando ventiladores, se hace circular el aire a través de la cámara, lo que implica un consumo de energía eléctrica o mecánica.

Este método facilita el control del proceso de secado y es utilizado para secadores de gran tamaño.

Como desventaja se puede enunciar el consumo de energía eléctrica para el funcionamiento de los ventiladores [19].

Circulación por convección natural

El aire circula debido a la diferencia de temperatura entre el colector solar y la cámara de secado, este método no es recomendable para secadores de gran tamaño [19].

1.6.4. FORMAS DE OPERACIÓN

Tomando el secado de productos como un proceso industrial, éste puede operar de dos formas:

Secado en tandas

En este método el producto es cargado en una sola tanda y no se retira de la cámara de secado hasta que éste se encuentre completamente seco. Además facilita el proceso de carga y descarga del producto, por lo que se recomienda para secadores pequeños y medianos [19].

Secado continuo

El producto se carga y descarga en varias tandas, motivo por el cual, en la cámara de secado el producto no está uniformemente secado. Estos secadores pueden ser de convección natural o forzada [19].

1.7. LEVANTAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA DEL SECADO DE MADERA

En los subcapítulos referentes a la madera se ha mencionado como factor importante el secado de la misma, además de los efectos que produce dicho proceso en el producto final. Dependiendo del nivel de contenido de humedad la madera puede ser utilizada para distintos procesos de transformación como: Carpintería Industrial, Carpintería exterior, Carpintería interior, Carpintería tradicional, etc.; poniendo al secado de la madera como un proceso que determina la calidad de ésta.

En Ecuador el tratamiento de la madera es un proceso que se lo realiza de forma industrial y de forma artesanal, considerando la forma industrial a las grandes empresas y la forma artesanal a las medianas y pequeñas empresas, se

desarrolla este proyecto con el fin de dar a la industria maderera una opción que permita un desarrollo sostenible para dichas empresas y para el medio ambiente.

A nivel artesanal el secado de la madera es un proceso que se lo realiza al aire libre, es decir no cuenta con un control que garantice un buen estado de la madera, un buen secado (bajo contenido de humedad), además que existe una demora considerable para obtener madera que pueda ser usada correctamente.

A nivel industrial el secado de madera es un proceso en el cual se involucra el consumo de combustibles de forma continua, lo que permite un menor tiempo de secado.

Con el fin de realizar un estudio de factibilidad para el uso del secador de madera solar a nivel artesanal, se ha visitado a distintas empresas donde se realiza este proceso con la finalidad de obtener información y datos que permitan realizar una comparación con el secador solar y así determinar si es viable o no su uso.

Además de esto se hará un análisis referente a la utilización del combustible para cada una de las empresas consultadas, es decir, se detallará la relación de consumo que existe entre combustible y cantidad de madera secada y se cuantificará las emisiones del combustible utilizado para este proceso.

Para entender lo que son las emisiones del combustible primero se dará una explicación de que son y cómo influyen éstas en el medio ambiente.

Se entiende como emisiones a los agentes contaminantes que por producto de la actividad humana se generan. Los principales son: los óxidos de Azufre (SO_x), llamados óxidos de impurezas, los óxidos de Nitrógeno (NO_x) llamados óxidos de alta temperatura y los residuos sólidos conformados por partículas totales en suspensión (PTS) representados por las cenizas u hollín [23].

A continuación se presentará los datos de las empresas consultadas y el funcionamiento del secador que poseen. Posterior a la presentación de los datos se realizará el cálculo de la relación de consumo y también el cálculo de las emisiones para el tipo de combustible utilizado en cada una de las empresas, y al final se realizará un análisis de los datos calculados de forma general.

Los datos que se solicitaron en las empresas son: tipo de secador de madera, tipo de combustible usado, sistema de control para el secado, variables que intervienen en el proceso de secado, cantidad de madera a secar, capacidad del secador, tiempo de secado y contenido de humedad final de la madera.

Se hizo la encuesta para madera en tablonces con las siguientes dimensiones:

Largo: 250cm

Ancho: 25cm

Espesor: 5cm

Zseika de madelsa

Es una empresa dedicada a la fabricación y diseño de muebles, siendo la madera uno de los componentes para dicha labor, Zseika cuenta con un secador de madera cuyas características se detallan a continuación:

Tipo de secador:	Secador tipo Caldero
Tipo de combustible:	Aserrín y desechos de madera, aproximadamente 30 m ³
Sistema de control:	Diferencia de temperaturas, entre la de bulbo seco y la de bulbo húmedo
Variables del proceso:	Temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, contenido de humedad de la madera
Capacidad del secador:	Aproximadamente 15 m ³ , que representan 500 tablonces
Tiempo de secado:	18 días
Contenido de humedad final:	12%

En este secador se utiliza como combustible para el caldero el aserrín y el desecho de la madera que no es utilizada en el proceso, el caldero mediante un

sistema de válvulas se conecta a la cámara en donde se realiza el secado de la madera, también posee un sistema de humidificación, que permite el control de humedad dentro de la cámara.

Para una buena circulación de aire se cuenta con 2 ventiladores tipo axial, y unas pequeñas salidas en la pared que sirven de ventilas. El control del secador es manual, ya que dependiendo de la presión del caldero el operario abre o cierra las válvulas que entregan vapor a la cámara; para determinar que la madera está seca se cuenta con dos termómetros: uno de bulbo seco y otro de bulbo húmedo, cuando la diferencia entre éstos llega a 30 °C se considera que la madera está seca. Una vez determinado este valor se extrae la madera del secador y con un sensor de contenido de humedad se comprueba el valor al que se debe llegar, en este caso 12%. Cabe mencionar que el proceso de secado se lo realiza dependiendo de las necesidades de la empresa como mínimo una vez al mes.

Con los valores de cantidad de combustible utilizado y cantidad de madera secada se puede determinar una relación de consumo:

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Cantidad de combustible}}{\text{Cantidad de madera secada}} \quad (1.7)$$

$$\text{Consumo} = \frac{30 [m^3]}{15 [m^3]}$$

$$\text{Consumo} = 2$$

A continuación se realizará el cálculo de las emisiones para el secado de la madera, basándose en el combustible utilizado, que para el caso del secador de Zseika serán los residuos de la madera.

Para poder realizar los cálculos de las emisiones es necesario conocer el peso del combustible utilizado, por lo que resulta necesario conocer la densidad de la madera y el poder calorífico de la misma, valores que se indican a continuación:

Volumen de carga de tablonés = 15 [m³]

Volumen de carga de combustible (residuos de madera) = 30 [m³]

Densidad del combustible = 952 [kg/m³]

Poder calorífico del combustible= 18.445,03 [MJ/ton]

Para realizar el cálculo de las emisiones se debe conocer el valor de cada una de ellas y estos valores se presentan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Factores de emisión para combustión de residuos de madera

Combustible	SO _x ⁸	NO _x ⁹	PST ¹⁰	Unidades
Residuos de madera	0,002	0,163	0,954	$\frac{kg}{1.000 * MJ}$

Fuente: Tomado de Manual de Inventario de Fuentes Puntuales [24].

Los cálculos para las emisiones se detallan a continuación:

$$Masa\ de\ la\ carga\ de\ combustible = \rho * V \quad (1.8)$$

Dónde:

ρ : Es la densidad de la madera

V : Es el volumen del combustible utilizado

$$Masa\ de\ la\ carga\ de\ combustible = 952 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 30 [m^3]$$

$$Masa\ de\ la\ carga\ de\ combustible = 28.560 [kg]$$

También es necesario calcular la cantidad utilizada por día del combustible y para eso se utiliza la siguiente fórmula:

$$Cantidad\ de\ combustible = \frac{\#Carga * Masa\ de\ la\ carga}{\#Dias} \quad (1.9)$$

Dónde:

$\#Carga$: Es la cantidad de veces que se coloca el combustible para poder secar de manera constante.

⁸ NO_x= Concentraciones de Óxidos de Nitrógeno

⁹ SO_x= Concentraciones de Óxidos de Azufre

¹⁰ PTS= Partículas Totales en Suspensión

#Días: Es el tiempo de duración del proceso de secado

$$\text{Cantidad de combustible} = \frac{1 [\text{carga}] * 28.560 \left[\frac{\text{kg}}{\text{carga}} \right]}{18 [\text{días}]}$$

$$\text{Cantidad de combustible} = 1.586,667 \left[\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right] = 1,586 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$$

Ahora se procede a calcular las emisiones debidas a la combustión de los residuos de madera, para esto se calcula la energía generada por el combustible:

$$\text{Energía del combustible} = \text{Cantidad de combustible} * PC \quad (1.10)$$

Dónde:

PC: Es el poder calorífico de los residuos de la madera

$$\text{Energía del combustible} = 1.586 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] * 18.445,03 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right]$$

$$\text{Energía del combustible} = 29.266,1 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

Ahora se calculará las emisiones debido a la utilización del combustible:

$$\text{Emisión} = Fe * \text{Energía del combustible} \quad (1.11)$$

Dónde:

Fe: Es el factor de emisión y su valor se encuentra en la Tabla 1.2

$$\text{Emisión } SO_x = 0,002 \left[\frac{\text{kg } SO_x}{1.000 * \text{MJ}} \right] * 29.266,1 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } SO_x = 0,0585 \left[\frac{\text{kg } SO_x}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } NO_x = 0,163 \left[\frac{\text{kg } NO_x}{1.000 * \text{MJ}} \right] * 29.266,1 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } NO_x = 4,77 \left[\frac{\text{kg } NO_x}{\text{día}} \right]$$

$$Emisión\ PST = 0,954 \left[\frac{kg\ PST}{1000 * MJ} \right] * 29.266,1 \left[\frac{MJ}{día} \right]$$

$$Emisión\ PST = 27,92 \left[\frac{kg\ PST}{día} \right]$$

El análisis de los valores obtenidos se realizará una vez calculados tanto el consumo como las emisiones para la otra empresa consultada, esto para que se entienda de forma más clara, ya que analizar los valores individualmente no sería conveniente.

Aserradero San Alfonso

Es una empresa dedicada al secado de la madera y posterior transformación de la misma, para lo cual cuentan con secador de las siguientes características.

Tipo se secador:	Secador tipo Caldero
Tipo de combustible:	Desechos de madera, aproximadamente 20m ³
Sistema de control:	Diferencia de temperaturas, entre la de bulbo seco y la de bulbo húmedo
Variables del proceso:	Temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, contenido de humedad de la madera
Capacidad del secador:	Aproximadamente 54m ³ , que representan 1800 tablones
Tiempo de secado:	15 días
Contenido de humedad final:	12%

En este secador se utiliza los desechos de madera como combustible para alimentar el caldero que entrega el vapor al secador, la alimentación de vapor dentro de la cámara es continuo pero la cantidad depende de la diferencia que exista entre los termómetros de bulbo seco y húmedo, es decir se entregará más vapor o se lo mantendrá constante para establecer un buen secado. El secador también posee ventiladores que permiten la circulación de aire en el mismo.

Una vez concluido el proceso de secado la madera es retirada del secador y se comprueba su contenido de humedad, que debe ser del 12%; este proceso de secado se lo realiza cada 2 o 3 meses debido al tiempo que se demora la carga y descarga de la madera en el secador.

Con los valores de cantidad de combustible utilizado y cantidad de madera secada se puede determinar una relación de consumo:

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Cantidad de combustible}}{\text{Cantidad de madera secada}}$$

$$\text{Consumo} = \frac{54 [m^3]}{20[m^3]}$$

$$\text{Consumo} = 2,7$$

A continuación se realiza el cálculo de las emisiones por el uso del combustible.

Se considerará los siguientes datos:

Volumen de carga de tablonés = 20 [m³]

Volumen de carga de combustible (residuos de madera) = 54 [m³]

Densidad del combustible = 952 [kg/m³]

Poder calorífico del combustible = 18.445,03 [MJ/kg]

Se procede a realizar los cálculos pertinentes para luego calcular las emisiones:

$$\text{Masa de la carga de combustible} = 952 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 54 [m^3]$$

$$\text{Masa de la carga de combustible} = 51.408 [kg]$$

Cantidad de combustible utilizado:

$$\text{Cantidad de combustible} = \frac{1 [carga] * 51.408 \left[\frac{kg}{carga} \right]}{15 [días]}$$

$$\text{Cantidad de combustible} = 3.427,2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right] = 3,427 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$$

Ahora se procede a calcular las emisiones debidas a la combustión de los residuos de madera, calculando previamente la energía consumida por éste:

$$\text{Energía del combustible} = 3,427 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right] * 18.445,03 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right]$$

$$\text{Energía del combustible} = 63.211,117 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

Las emisiones debido a la combustión del combustible son y se considera como factores de emisión a los valores de la Tabla 1.2:

$$\text{Emisión } SO_x = 0.002 \left[\frac{\text{kg } SO_x}{1000 * \text{MJ}} \right] * 63.211,117 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } SO_x = 0,126 \left[\frac{\text{kg } SO_x}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } NO_x = 0.163 \left[\frac{\text{kg } NO_x}{1000 * \text{MJ}} \right] * 63.211,117 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } NO_x = 10,30 \left[\frac{\text{kg } NO_x}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } PST = 0,954 \left[\frac{\text{kg } PST}{1000 * \text{MJ}} \right] * 63.211,117 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{día}} \right]$$

$$\text{Emisión } PST = 60,31 \left[\frac{\text{kg } PST}{\text{día}} \right]$$

Tomando en cuenta los valores calculados de consumo para las dos empresas se puede ver que para secar determinada cantidad de madera, la cantidad de combustible utilizado puede duplicarse, dependiendo de la cantidad a secar, como sucede en el caso del Aserradero San Alfonso.

El cálculo del consumo permite tener una idea clara de cuánto combustible es necesario para el proceso.

Se realizó el cálculo de las emisiones para conocer la cantidad de contaminantes que se producen debido al proceso de secado con la utilización de los residuos de madera como combustible determinando así que, debido a los considerables valores de óxidos de Nitrógeno (NO_x), los más perjudiciales para el medio ambiente, es necesario implementar prácticas operativas adecuadas para minimizar la carga contaminante de los agentes emitidos a la atmósfera en los gases de combustión. Para el caso de los residuos sólidos (PTS) se debe implementar un equipo de colección de partículas.

Cabe indicar que el combustible utilizado son residuos de madera que si bien, son desechos, para las empresas constituyen un material que produce emisiones contaminantes al ser quemado, como se observa en los cálculos de las emisiones de hollín.

1.8. PROYECTO A DESARROLLAR

El prototipo utilizado en el presente proyecto de titulación se encuentra en el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética, situado en la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica; fue diseñado con el propósito de conocer los beneficios de un secador basado en energía solar.

Para el proyecto se decidió implementar un sistema de control y monitoreo del prototipo, con la finalidad de automatizar el proceso de secado solar de la madera, además de permitir a los estudiantes del LEAEE contar con un sistema que les permita observar claramente cómo se lleva a cabo el secado y el beneficio que se obtiene al ser éste solar, ya que con los datos obtenidos se puede realizar estudios tanto para conocer cómo funciona este secador solar, como para saber cómo es el secado de la madera.

El desarrollo del sistema de control y monitoreo del prototipo conjuntamente con el estudio realizado en este proyecto permitirá a las empresas artesanales contar con un sistema que mejore las condiciones actuales, produciendo un beneficio económico para éstas al contar con un producto de mejor calidad y en un menor tiempo, además de que tener este tipo de sistema basado en energía solar

permite que se reduzcan las emisiones de contaminantes al medio ambiente, las cuales son producidas por otro tipo de secador.

1.9. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO DEL LABORATORIO

El prototipo utilizado en este proyecto fue diseñado por estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica para la materia de Energías Alternativas.

La ubicación del colector y la cámara en la estructura permiten tener un secador solar de tipo indirecto, ya que el colector se encuentra separado de la cámara, la transferencia de calor es por convección natural, y el fluido que pasa del colector hacia la cámara es aire caliente, previamente calentado en el colector.

En la Figura 1.10 se puede observar el plano del colector, mientras que en la Figura 1.11 se puede observar la vista frontal y la vista superior del prototipo a escala de 1:20 cm.

Figura 1.10 Vista superior del Colector Solar

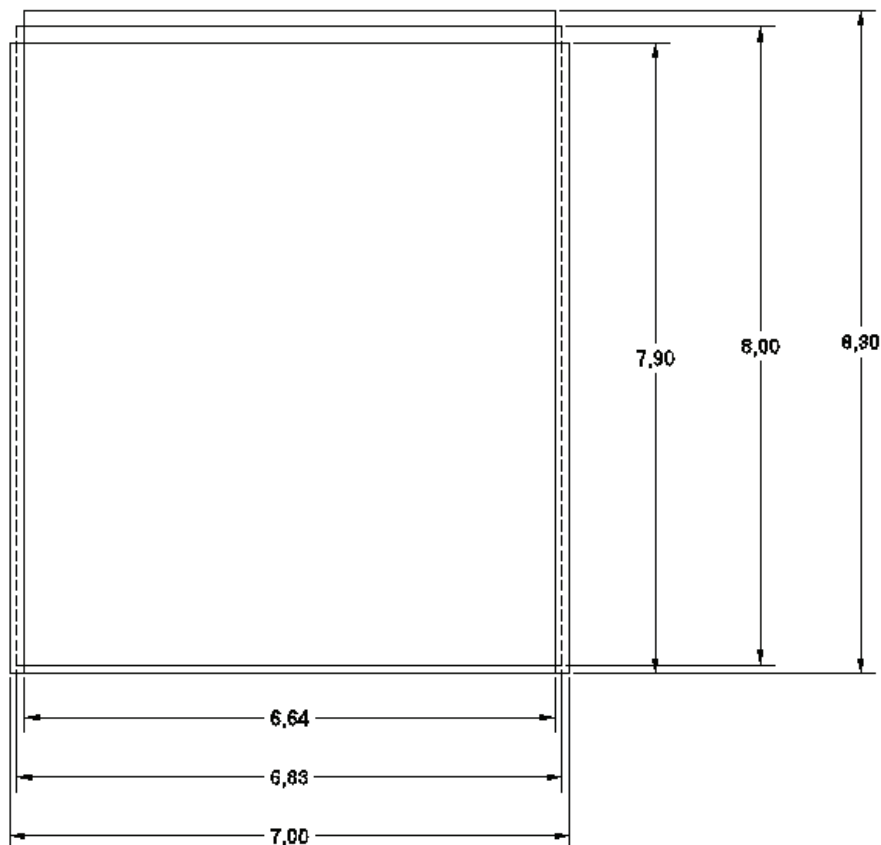
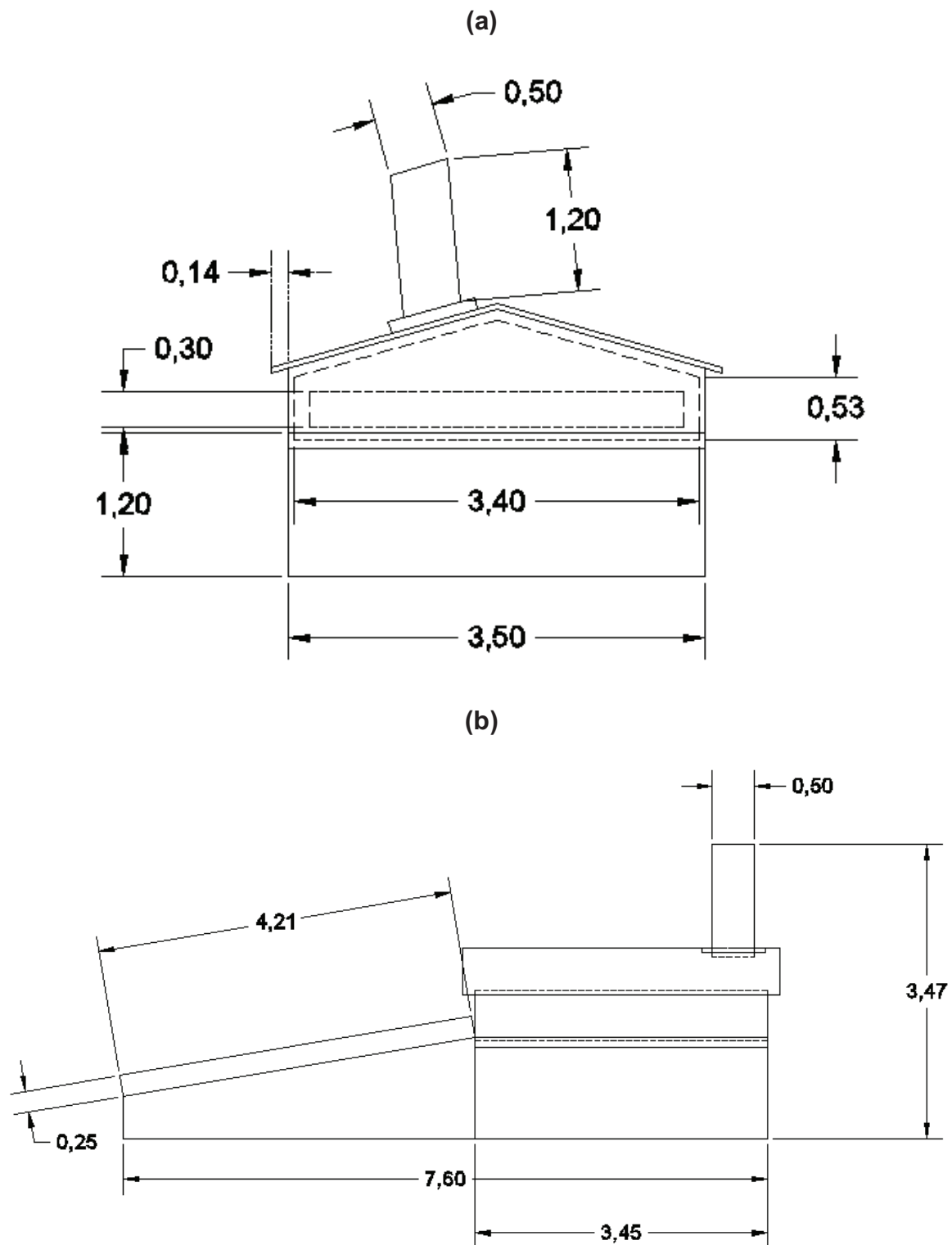


Figura 1.11 Vista frontal (a) y superior (b) del Secador de Madera



Tanto la Cámara de Secado como el Colector, se encuentran sobre una estructura metálica que sirve de soporte para las mismas; esta estructura le permite al

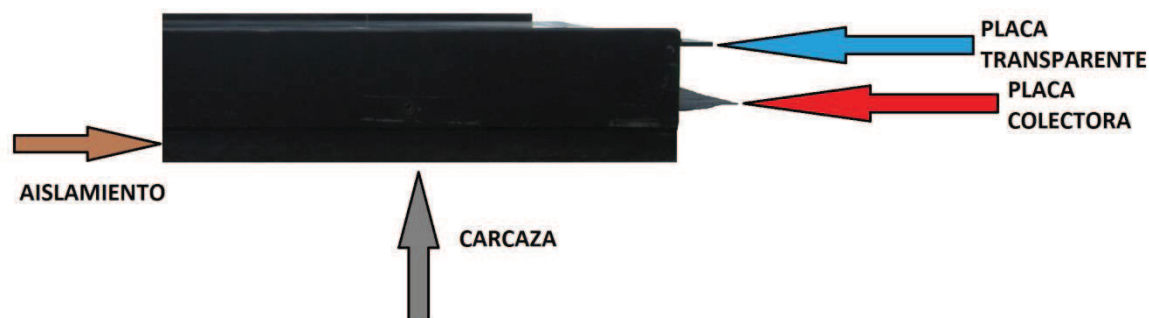
colector tener una inclinación de 10 grados con respecto a la horizontal, con el propósito de mejorar el sistema de recolección de radiación solar, ya que el ángulo de inclinación del colector influye en la captación de radiación solar.

A continuación se detallará los elementos que conforman tanto el colector como la cámara de secado.

El colector es el elemento que va a captar la radiación solar para calentar el aire, por lo tanto debe poseer componentes que faciliten dicha labor. El colector construido es del tipo Colector Solar de Placa Plana con Cubierta el cual consta de: placa transparente, placa colectora, aislamiento y carcasa o soporte.

En la Figura 1.12 se puede apreciar una parte del colector del laboratorio y en ésta se indican las partes antes mencionadas, hay que decir que el aislamiento se encuentra en la parte inferior debajo de la placa colectora.

Figura 1.12 Colector Solar del LEAEE con sus componentes



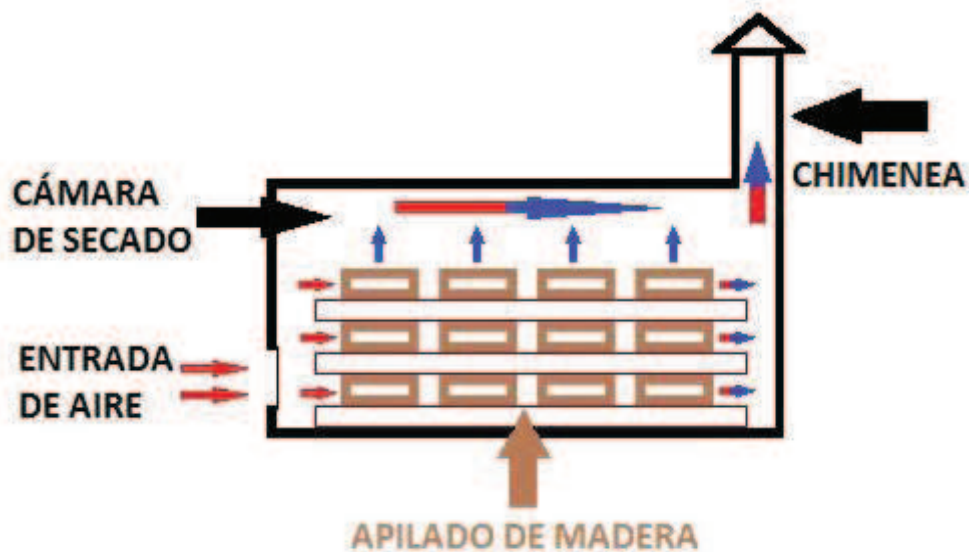
Los materiales utilizados para la elaboración del colector son: madera para la carcasa del colector, vidrio de 3 líneas para la placa transparente, espuma Flex para el aislamiento, y para la placa colectora una lámina de acero galvanizado pintada con varias capas de pintura color negro mate.

Se utilizó estos materiales porque permiten que la captación de radiación solar se haga de una forma óptima, es decir, los elementos que conforman el colector deben poseer características que mejoren el proceso de captación de radiación solar. En este caso se utilizó el vidrio porque permite el paso de radiación de onda corta y evita que salga la radiación de onda larga de la placa colectora; la placa colectora es de acero galvanizado pintada de color negro mate ya que esta

combinación permite al material tener una absorción de 0.8 a 0.9; el material aislante que se utiliza es una plancha de espuma Flex, debido a que ésta posee una conductividad térmica baja ($0,034$ a $0,045 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), además de ser fácil de conseguir en el mercado.

La cámara de secado consta de un espacio para el secado en donde se coloca el producto a secar; para este proyecto la madera es apilada de tal forma que facilite su secado, también consta de una chimenea la cual permite la salida del aire durante el secado; en la cámara de secado se produce el proceso de evaporación del agua contenida en la madera intercambiando su humedad con la del aire circundante, en la Figura 1.13 se puede ver los elementos que conforman la cámara de secado.

Figura 1.13 Cámara de secado

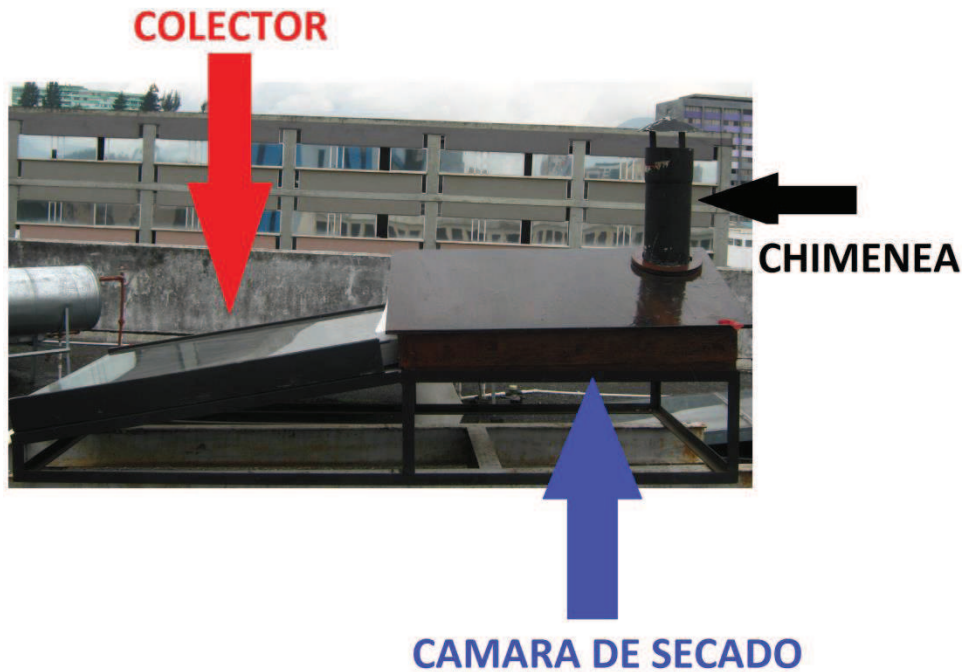


La cámara de secado fue construida en su totalidad con madera triplex, y recubierta con pintura de caucho, también se colocó una capa de sellador, todo esto para evitar daños de la cámara por cambios del medio ambiente, y para garantizar su uso al aire libre.

La chimenea es un tubo PVC de 5cm de radio, con un techo de acero galvanizado, toda la chimenea está pintada de negro.

En la Figura 1.14 se puede observar el prototipo de secador de madera utilizado en el laboratorio, y en el cual se identifican tanto el colector como la cámara de secado.

Figura 1.14 Secador de Madera prototipo del LEAEE



También se puede observar que la estructura en la que se encuentran ubicados la cámara y el colector es metálica.

CAPÍTULO 2

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

El secador de madera se puede dividir en un conjunto de subsistemas. En el presente capítulo se dará una explicación de cada uno de éstos, así como también de los elementos que se usan para el monitoreo y control del secado, es decir, se considerará: el apilado de la madera, selección y distribución de los sensores, selección y distribución de los actuadores, sistema de adquisición de datos, sistema de control y presentación de los datos mediante un HMI.

Para entender de una mejor forma se explicará cada subsistema, y al final se presentará el funcionamiento del sistema completo para el proceso de secado de madera.

Para iniciar el proceso de secado es necesario explicar cómo la madera debe distribuirse y apilarse dentro de la cámara de secado ya que una correcta ubicación permitirá un mejor secado.

2.1. DISTRIBUCIÓN Y APILADO DE LA MADERA

Un factor que se debe considerar para el proceso de secado es el apilado de la madera dentro de la cámara de secado, es decir, la distribución de la madera, separación entre tablas, utilización de separadores, dirección del apilado con respecto al flujo de aire son factores que determinaran que el secado sea óptimo, con el fin de tener un producto de buena calidad.

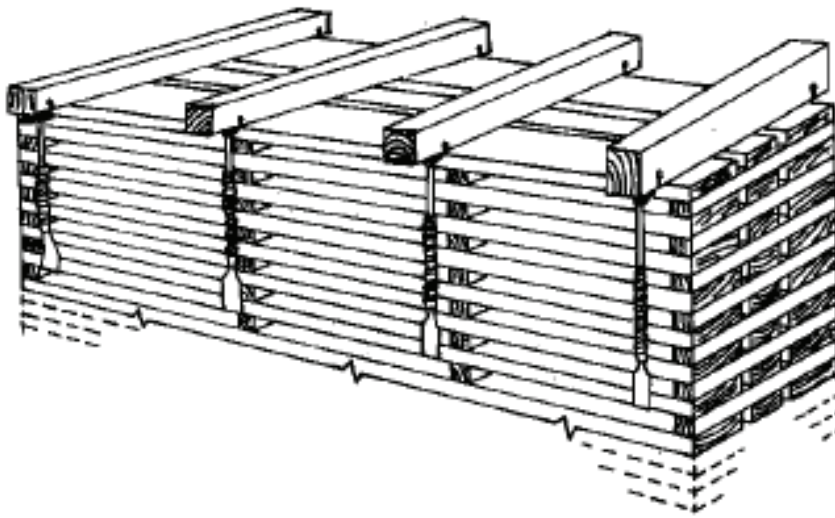
También se debe considerar que las tablas que se encuentren apiladas para el proceso de secado deben tener en lo posible el mismo contenido de humedad inicial, caso contrario esto podría provocar que la madera se deteriore (torceduras, rajaduras, etc.), o que al darse por terminado el proceso de secado ciertas tablas no lo estén [10] [13] [16] [25].

Tomando en cuenta el espacio para el secado con el que cuenta el prototipo de secador del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética, así

como también las dimensiones de las tablas a secar, se establece que el apilado a utilizar será el apilado horizontal como se indica en la Figura 2.1.

Los otros tipos de apilado no permiten secar una mayor cantidad de madera, ya que no se puede distribuir de una forma adecuada la madera dentro de la cámara de secado del prototipo.

Figura 2.1 Apilado en forma horizontal.



Fuente: Tomado del libro **Guía para el secado de la madera en hornos** [25].

Al ser un prototipo a escala, las dimensiones de las tablas a secar también deben tener una escala adecuada para ser colocadas en el secador.

Se utilizarán tablas de las siguientes dimensiones:

Largo: 0,50m.

Ancho: 0,06m.

Espesor: 0,02m.

De acuerdo a las dimensiones de la cámara las tablas cortadas con las medidas antes mencionadas permiten que exista el espacio correcto para un buen apilamiento, una correcta ubicación de los separadores y para que el flujo de aire fluya de forma adecuada dentro de la cámara.

En la Tabla 2.1 se puede observar las dimensiones que deben tener los separadores.

Tabla 2.1 Espesor y distancia entre separadores

Espesor de la madera en mm.	Espesor de los separadores en mm.	Distancia entre los separadores en cm.
18 - 20	20 - 30	30 - 50
20 - 30	20 - 30	40 - 50
30 - 40	20 - 30	60 - 80
40 - 60	30 - 40	60 - 80
60 - 80	40	90 - 100
80 - 100	45	100

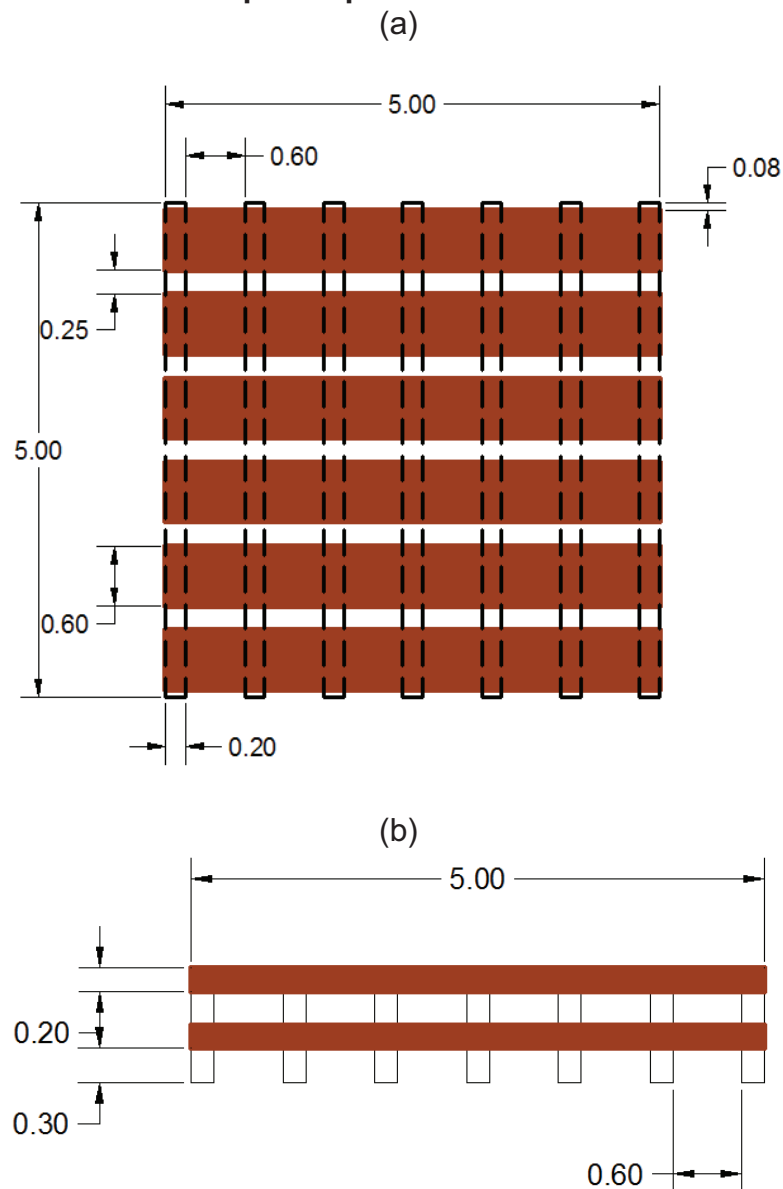
Fuente: Tomado del Documento Secado de la Madera Aserrada [26].

Considerando que el espesor de las tablas utilizadas es de 2 cm y tomando en cuenta los valores de la tabla 2.1 se determina que el espesor de los separadores será de 3 cm. De acuerdo a las dimensiones de la cámara de secado la distancia entre los separadores será de 6 cm.

De acuerdo al espacio en el interior de la cámara de secado se puede separar las tablas entre sí a una distancia de 2,5 cm, esta separación permite que el aire que pase a través de éstas arrastre la mayor cantidad de humedad, situación que no ocurre si estas se encuentran juntas.

En la Figura 2.2 se puede observar la forma en la que se va a apilar la madera dentro de la cámara de secado, también se observa las distancias entre tablas y separadores. Se debe tener en cuenta que los separadores son elementos que garantizan un secado eficiente y por lo tanto deben tener características que lo permitan, es decir, los separadores deben poseer un contenido de humedad bajo y no se debe utilizar madera que segregue resinas, esto para evitar manchas en la madera por efecto del secado.

Figura 2.2 Vista Superior (a) y Vista Frontal (b) del apilado de madera para el prototipo del LEAEE



No sólo la distribución de la madera en la cámara garantiza un buen secado sino también la ubicación de ésta dentro de la cámara, es decir, el apilado debe ser ubicado de tal forma que el aire que fluye permita un mejor secado. La forma correcta de orientar la madera es perpendicular a la entrada de viento.

2.2. SUBSISTEMAS DEL MÓDULO

Para el control del secador de madera del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN, fue

necesario diseñar e implementar 6 subsistemas, los cuales se explican a continuación:

Subsistema de alimentación: para la alimentación de los circuitos, los sensores, y los actuadores se diseñó e implementó varias fuentes reguladas de voltaje, las cuales suministran al sistema los voltajes necesarios para que funcione sin ningún inconveniente.

El subsistema tiene una regleta conectada a la red eléctrica, para la conexión del transformador que es utilizado para las fuentes reguladas y de otros elementos que necesiten estar conectados a la red de 120 V_{AC}.

Subsistema de acondicionamiento de sensores: para poder establecer el monitoreo y el control del secador de madera se utiliza sensores de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, radiación solar y contenido de humedad de la madera, las señales que entregan estos sensores son acondicionadas para que el microcontrolador las reconozca.

En el caso de los sensores de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar se diseñó un circuito para amplificar las señales que éstos entregan, mientras que para el sensor de contenido de humedad se diseñó un circuito en el cual se resta un voltaje a la señal de salida del sensor y también un circuito comparador para las señales de control del mismo sensor.

Subsistema de adquisición de datos: para la adquisición de los datos se utiliza como elemento principal un microcontrolador ATmega164p, al que llegan las señales previamente acondicionadas de los distintos tipos de sensores implementados en el sistema, para esto fue necesario utilizar un circuito, utilizando multiplexores, que permita tener las señales de los sensores de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento en un solo canal del conversor análogo – digital del microcontrolador respectivamente.

Subsistema de Control: en éste se indicará el tipo de control y las acciones que se van a implementar para permitir que el secado se realice de una forma más eficiente, es decir, utilizando los valores de los distintos sensores del Secador de Madera se establecerá la acción de control necesaria para que se cumpla el

secado, también se implementará un sensor magnético, el cual indicará el estado de la puerta de ingreso de la cámara de secado.

Subsistema de Visualización: éste consta de dos partes, la primera es una visualización a través de un LCD, el cual sirve de interfaz con el usuario para observar los valores instantáneos del proceso.

El otro sistema de visualización es un HMI desarrollado en una computadora, en el cual el usuario podrá ver los valores de los sensores y un análisis en tiempo real del comportamiento del proceso, además que el HMI generará reportes del proceso realizado que permitirán un análisis más complejo posteriormente.

Los sistemas de adquisición de datos y visualización son controlados cada uno por un microcontrolador, lo que permite establecer un sistema maestro - esclavo, en el cual el microcontrolador esclavo es el que recoge los datos (adquisición), y el microcontrolador maestro es el que recibe los datos del esclavo y los visualiza en el LCD para posteriormente enviar los datos por comunicación inalámbrica al computador del LEAEE y visualizarlo en el HMI.

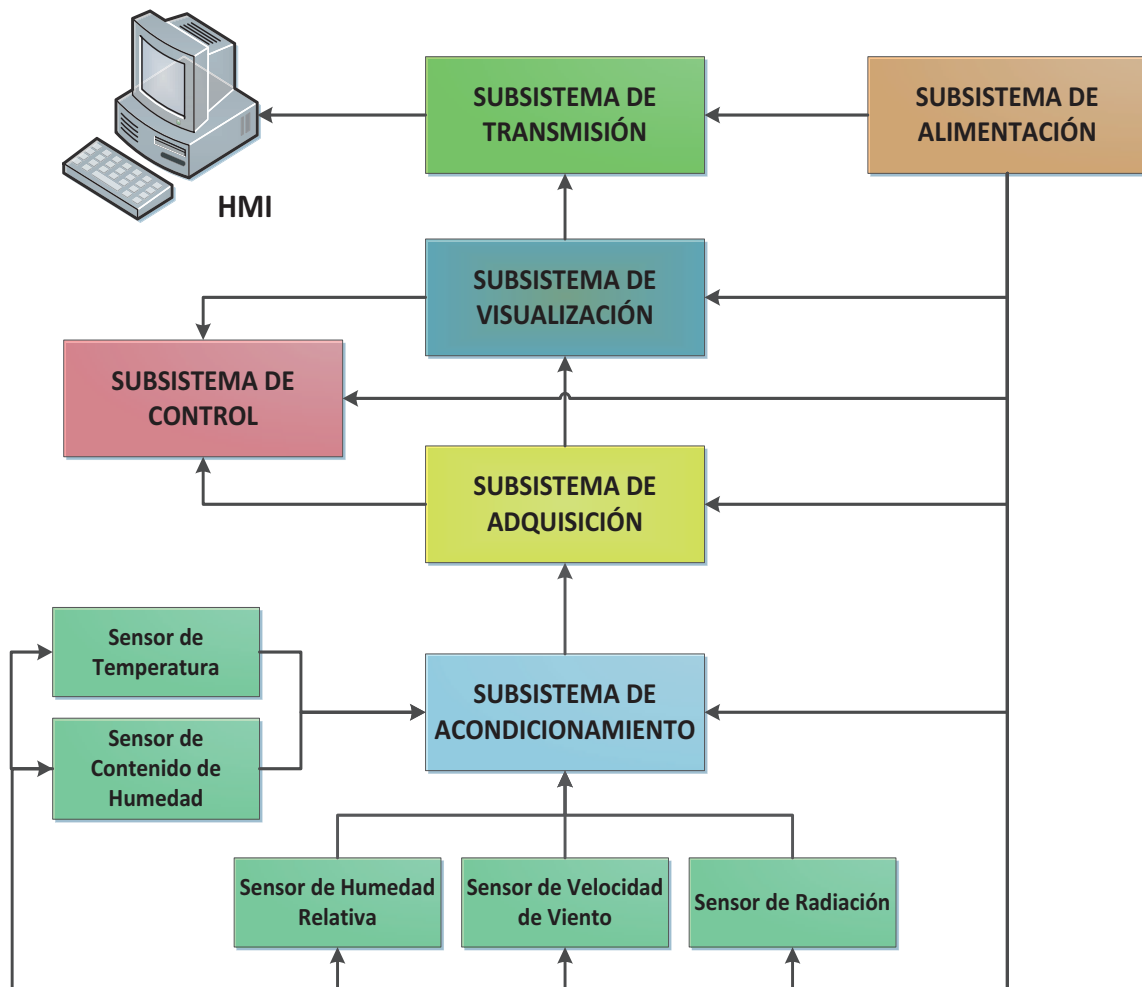
Subsistema de Transmisión: para tener los datos que serán visualizados en el HMI se implementa un sistema de comunicación inalámbrica utilizando módulos XBEE.

La forma en la que se envían los datos es por radio - frecuencia desde la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica al LEAEE ubicado en el segundo piso del Edificio del ICB, motivo por el cual se usa los módulos XBEE PRO 868 que utilizan radio-frecuencia para la distancia indicada que es de aproximadamente 200 metros.

Los datos utilizados para la comunicación inalámbrica son enviados por el microcontrolador maestro a la tarjeta de transmisión inalámbrica mediante comunicación RS232, estos datos son utilizados por el HMI implementado en la computadora del LEAEE.

En la Figura 2.3 se muestra un diagrama de bloques en el cual se puede observar cómo funciona el sistema, es decir, como están conectados entre sí los subsistemas del Secador de Madera.

Figura 2.3 Diagrama de bloques del sistema



Cada subsistema implementado en este proyecto cuenta con sus respectivos circuitos electrónicos los cuales van a ser montados en el gabinete metálico.

A continuación se detallan de forma clara cada uno de los subsistemas antes mencionados.

2.2.1. SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para alimentar los circuitos del sistema de acondicionamiento de sensores, del sistema de visualización, del sistema de adquisición y del sistema de transmisión inalámbrica se diseñó e implementó un circuito de fuentes reguladas alimentadas por un transformador de 4A conectado a una regleta de tomacorrientes de 120 V_{AC}.

Los voltajes de alimentación que se necesitan para los circuitos se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Voltajes utilizados para alimentar el sistema

CIRCUITO	VOLTAJE REQUERIDO
Sistema Visualización	5V
Sistema de Acondicionamiento de Sensores	$\pm 12V$
Sistema de Alimentación de los sensores	5V ; 3,3V
Sistema de Transmisión de datos	12V
Sistema de Adquisición de datos	5V ; 12V

En el diseño de las fuentes de alimentación se utilizan reguladores integrados de voltaje de la serie L78XX, L79XX. Los de la serie L78XX son reguladores de voltaje positivo (+12V, +5V), mientras que los de la serie L79XX son reguladores de voltaje negativo (-12V).

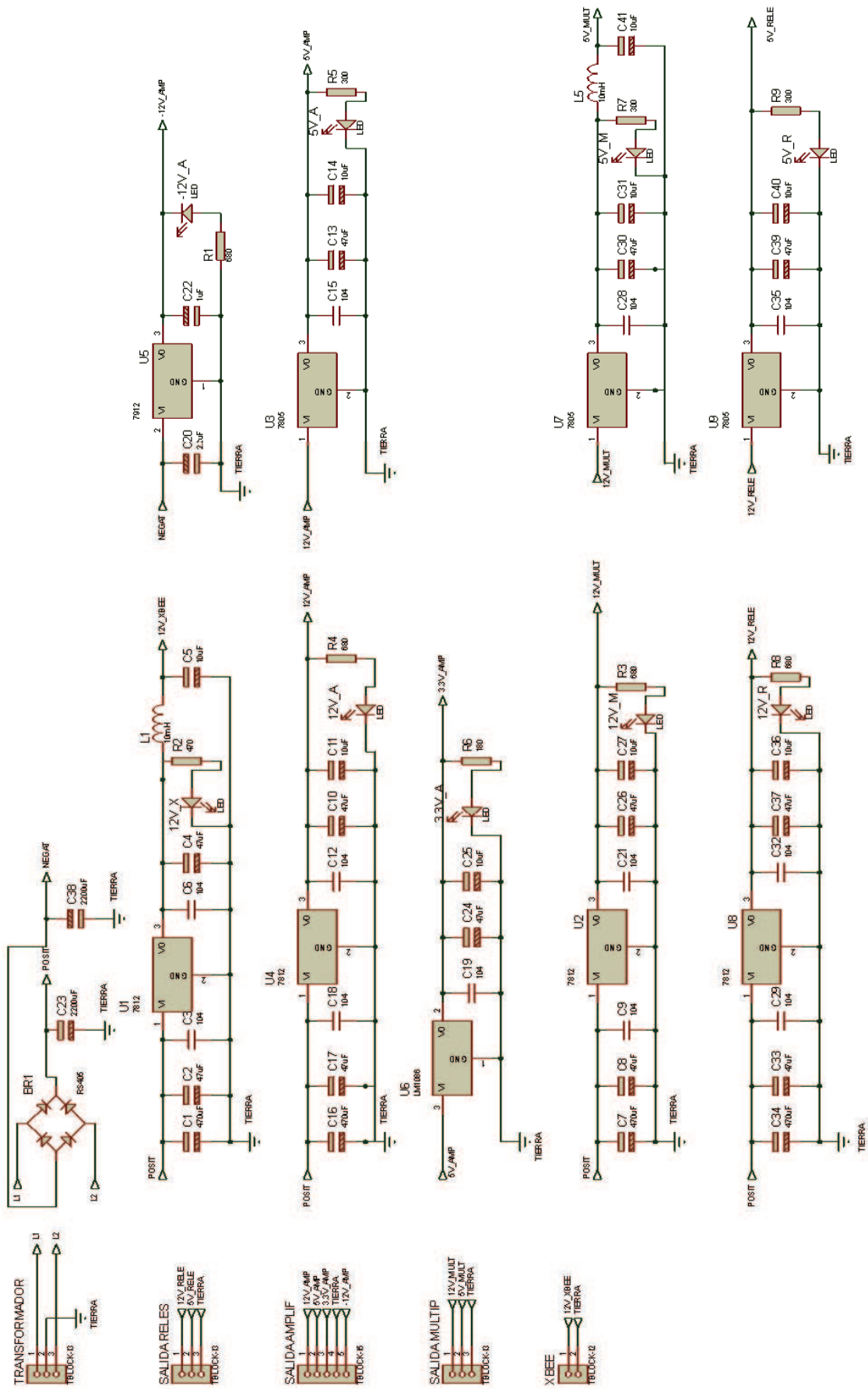
Para el caso de la fuente de 3,3V se utiliza el regulador integrado LM1086.

De acuerdo a los datasheet de los diferentes reguladores se considera que el error de voltaje de salida aceptable para las fuentes de +12, +5 y -12 voltios es de +/- 4% y para la fuente de 3.3 voltios es de +/- 1%.

El transformador que alimenta a las fuentes reguladas es conectado a la red eléctrica, y mediante un rectificador tipo puente (RS405) se obtiene el voltaje DC que luego será regulado por los distintos integrados para obtener los voltajes que se necesitan para alimentar los diversos circuitos de este proyecto. Los valores de los capacitores que van conectados en paralelo a los circuitos de alimentación se seleccionan en base a las recomendaciones de los respectivos fabricantes.

En la Figura 2.4 se observa el diagrama de conexión de las fuentes utilizadas en este proyecto, como se puede observar en la figura existen varias fuentes de 12V y de 5V, con el fin de que cada circuito posea su fuente de alimentación.

Figura 2.4 Diagrama de conexión de las fuentes de alimentación



2.2.2. SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES

Para diseñar el sistema de control del secador de madera, es necesario medir las distintas variables involucradas dentro de este proceso, por eso en este subcapítulo se detallará el tipo de sensores que se van a utilizar, así como los circuitos de acondicionamiento de éstos.

El subsistema de acondicionamiento está diseñado para que cada uno de los sensores que se tiene entregue una salida analógica de voltaje entre 0 y 5 voltios, ya que el voltaje de referencia que se va a utilizar para el conversor ADC del microcontrolador ATmega164p es de 5 voltios.

Se utilizarán 6 sensores de temperatura, 6 sensores de humedad relativa, 2 sensores de velocidad de viento, 1 sensor de radiación solar y 1 sensor de contenido de humedad de la madera. Todas las variables enunciadas intervienen en mayor o menor grado al momento del secado y por eso es necesario tomarlas en cuenta para luego proceder a implementar el sistema de control. También se podrá, con estas mediciones, realizar los estudios pertinentes para conocer la eficiencia del prototipo en cuanto a la utilización de la energía solar.

2.2.2.1. SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

La temperatura y la humedad relativa son variables directas en el proceso de secado ya que ellas intervienen tanto en el colector como en la cámara de secado. Es decir, el proceso de secado depende de estas dos variables, por tal motivo deben ser medidas en el mismo punto, para conocer la situación en ese punto, por lo que resultaría conveniente utilizar algún dispositivo que mida las dos variables en el mismo encapsulado.

Para la selección de este sensor se determinaron valores máximos y mínimos de temperatura y humedad relativa tanto en el colector como en la cámara con el sensor de laboratorio (HTA4200). De acuerdo a los valores obtenidos se estableció que los valores de temperatura tanto en el colector como en la cámara van a oscilar entre 10 y 100 grados centígrados, mientras que para la humedad relativa se estableció un rango entre 10 y 95 por ciento. Tomando en cuenta estos

valores se determinó que el sensor a utilizar es el HTG3533 PVBL, el cual entrega una salida analógica de voltaje tanto para temperatura como para humedad relativa lo que resulta fácil al momento de enviar la señal a un microcontrolador.

En la Tabla 2.3 se detallan algunas características propias de este sensor.

Tabla 2.3 Características eléctricas del sensor HTG3533

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de almacenamiento	T_{stg}	-40 a 125	°C
Voltaje de alimentación pico	V_{cc}	20	V_{dc}
Rango de operación de humedad	RH	0 a 100	%RH
Rango de operación de temperatura	T_a	-40 a 110	°C
Corriente máxima de salida	T_{peak}	3	mA
Potencia máxima	P_d	10	mW

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor: HTG series – Relative Humidity and Temperature module [27].

El sensor HTG3533 PVBL pertenece a la serie de sensores HTG3500. En la hoja de datos se tiene la siguiente nomenclatura HTG3XYZ, donde las letras indican ciertas características como se detalla a continuación:

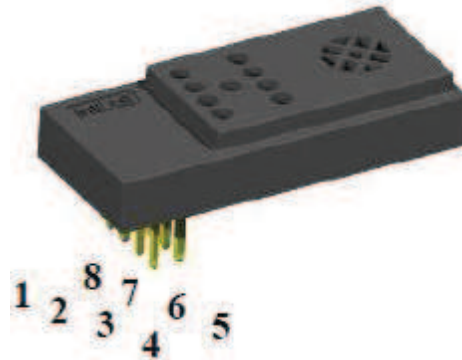
X → Tipo de salida:	4 para frecuencia
	5 para voltaje
Y → Empaquetado:	1 para montaje con tornillo
	3 con membrana PTFE
Z → Voltaje de alimentación:	3 para 3,3 V
	5 para 5 V

Al ser HTG3533 indica que la salida analógica de cada uno de los sensores (temperatura y humedad relativa) es de voltaje, también indica que la alimentación al sensor es de 3,3 V y que viene con membrana PTFE para su conexión.

La hoja de datos entrega una curva de comportamiento para la humedad relativa mientras que para la temperatura se da los valores de resistencia para determinadas temperaturas.

Las letras PVBL indican el tipo de encapsulado que es, para este caso se tiene que el sensor posee 8 pines como se indica en la Figura 2.5.

Figura 2.5 Sensor HTG3533 PVBL



Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [27].

Y en la Tabla 2.4 se indica la asignación de los pines.

Tabla 2.4 Asignación de pines del sensor HTG3533 PVBL

Pin	Función
1-8	Tierra
2-7	V_{cc} (Voltaje de alimentación)
3-6	NTC – Temperatura
4-5	V_{out} – Humedad Relativa

Fuente: Tomado del Datasheet del sensor [27].

2.2.2.1.1. SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA

El sensor de humedad relativa incorporado en el encapsulado mide la humedad basado en el principio de la variación de la capacidad de un condensador, es decir al variar la humedad cambia la constante dieléctrica y la capacidad varía, para este caso la mezcla de gas entre el agua y el aire serán el dieléctrico entre las placas del condensador [28].

Conociendo el principio de funcionamiento del sensor de humedad relativa a continuación se presenta en la Tabla 2.5 las características eléctricas para este sensor.

Tabla 2.5 Características eléctricas del sensor de Humedad Relativa

Características	Símbolo	Mín.	Típ.	Máx.	Unidad
Rango de medición de humedad relativa	RH	0		100	%RH
Precisión (10% - 95%)			±3	±5	%RH
Histéresis			±1		%RH
Impedancia de salida	Z			50	Ω
Constante de tiempo	τ		5	10	s

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [27].

La salida de este sensor es de voltaje y los valores típicos se puede observar en la Tabla 2.6 de referencia, de acuerdo a las características propias del sensor medirá la humedad relativa entre el 10 y 95 %, ya que dentro de este rango las medidas serán confiables.

Tabla 2.6 Tabla de referencia del sensor de humedad relativa

RH (%)	V _{out} (V)	RH (%)	V _{out} (V)
10	0,690	55	1,515
15	0,795	60	1,595
20	0,895	65	1,680
25	0,990	70	1,765
30	1,080	75	1,850
35	1,170	80	1,940
40	1,255	85	2,030
45	1,345	90	2,120
50	1,430	95	2,205

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [27].

Además de la tabla de comportamiento el fabricante otorga una ecuación lineal para la curva de respuesta del sensor, y es la que se va a utilizar en el microcontrolador para procesar la señal de voltaje que da este sensor.

$$V_{out} = 0,01752 * RH(\%) + 0,5541 \quad (2.1)$$

$$RH(\%) = 57 * V_{out} - 31 \quad (2.2)$$

Para acondicionar la señal de salida del sensor se debe tomar en cuenta el voltaje máximo que entrega el sensor ya que con ese voltaje se puede establecer la ganancia para el acondicionamiento.

Tomando en cuenta la fórmula (2.2), se calculó el voltaje máximo a 95% de humedad relativa y es 2,2085 V.

Para acondicionar la señal de voltaje se calcula la ganancia la cual relaciona el voltaje de salida y el voltaje de entrada como se indica en la ecuación (2.3)

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.3)$$

Dónde:

G : Ganancia

V_{out} : Voltaje de Salida

V_{in} : Voltaje de entrada

Por lo tanto para el sensor de humedad relativa se tiene que la ganancia es:

$$G_{hum} = \frac{5 [V]}{2,2085 [V]}$$

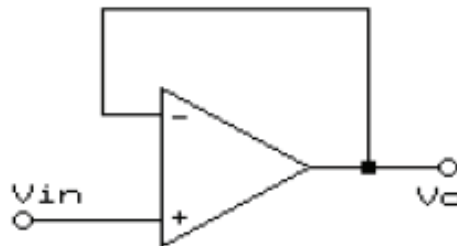
$$G_{hum} = 2,264$$

Conocida la ganancia para este sensor lo que se implementará para acondicionar la señal de voltaje es un amplificador no inversor; y para que la señal no se atenúe, primero se colocará un seguidor de voltaje ya que al ser una señal analógica la atenuación es uno de los principales problemas que se encuentra.

El seguidor de voltaje evita la atenuación de la señal, esta configuración del amplificador operacional no afecta al voltaje de entrada, es decir, el valor que entre al seguidor será el mismo que se obtenga a la salida.

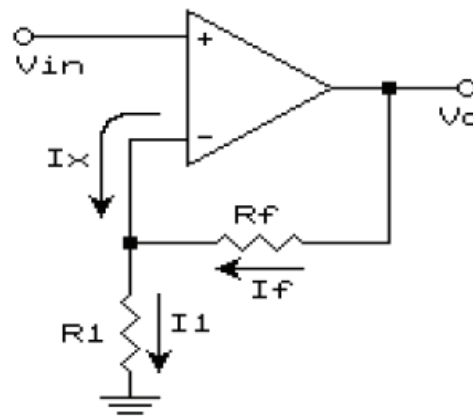
A continuación se presenta un esquema del seguidor de voltaje (Figura 2.6).

Figura 2.6 Seguidor de Voltaje



Para amplificar la señal se utiliza un amplificador no inversor cuyo esquema se presenta a continuación (Figura 2.7):

Figura 2.7 Amplificador no inversor



Los valores de las resistencias en el esquema presentado se calculan dependiendo de la ganancia que se necesite y se utiliza la siguiente ecuación:

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2.4)$$

Donde el valor de las resistencias se determinará conociendo la ganancia y asumiendo un valor para cualquiera de las resistencias, en este caso se asume el valor de la resistencia R_1 igual a $68 \text{ K}\Omega$.

Por lo tanto el valor de la resistencia R_f se calcula despejando de la ecuación 2.4:

$$R_f = R_1(G - 1) \quad (2.5)$$

$$R_f = 68[k\Omega] * (2,264 - 1)$$

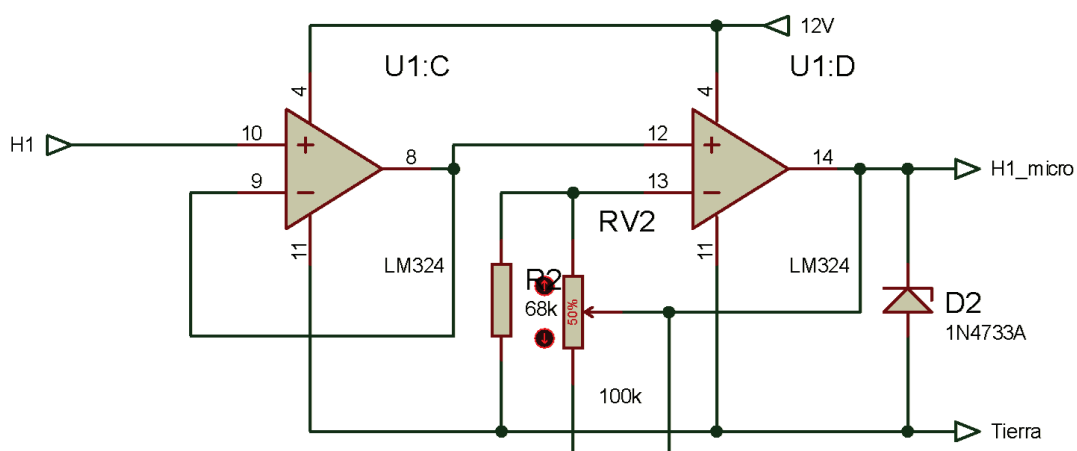
$$R_f = 85,952 [k\Omega]$$

Al no ser un valor estándar de resistencia se escoge un potenciómetro de precisión de $100 K\Omega$, esto se lo realiza debido a que los circuitos no siempre entregan los valores deseados y se necesita manipular estas resistencias para obtener el valor correspondiente a la salida.

Para el circuito de acondicionamiento se seleccionó el amplificador operacional LM324, esto debido a que su alimentación no requiere de una fuente negativa como es el caso de la mayoría de amplificadores operacionales y también se lo utilizó debido a que la señal no necesita una inversión del voltaje, es decir, sólo se trabaja con voltajes positivos.

Una vez realizado los cálculos y explicado el procedimiento en la Figura 2.8 se indica el circuito completo para el sensor de humedad relativa. Hay que notar que se coloca un zener de 5.1 V a la salida de la señal para que si por algún motivo el circuito da más de lo que se espera el zener limite esta señal y el microcontrolador no se dañe.

Figura 2.8 Circuito de acondicionamiento Sensor de Humedad Relativa



2.2.2.1.2. SENSOR DE TEMPERATURA

El sensor de temperatura incorporado en el encapsulado mide la temperatura mediante la variación de una resistencia, utiliza un sensor tipo NTC, en el cual la resistencia varía a la inversa de la temperatura; es decir mientras la temperatura aumenta disminuye la resistencia y el coeficiente que relaciona la temperatura con la resistencia es negativa, de aquí que se lo llama coeficiente térmico negativo (NTC).

A continuación se presenta en la Tabla 2.7 las características eléctricas para este sensor.

Tabla 2.7 Características eléctricas del sensor de temperatura

Características	Símbolo	Mín.	Típ.	Máx.	Unidad
Resistencia nominal @ 25 °C	R	9,9	10	10,1	kΩ
Valor de β	B	3346	3380	3414	K
Rango de temperatura	T _a	-40		85	°C
Precisión			±0,25		°C
Constante de tiempo	τ		10		s

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [27].

De acuerdo a la hoja de datos del sensor, para obtener el valor de resistencia del termistor (NTC), se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$R_t = R_N \times e^{\beta \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_N} \right)} \quad (2.6)$$

Dónde:

R_t : Resistencia NTC en ohmios a una temperatura T en °K

R_N : Resistencia NTC en ohmios a temperatura nominal

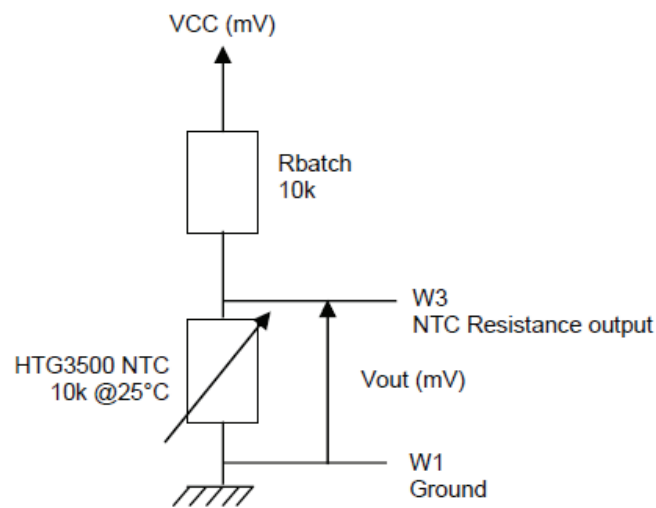
T y T_N : Temperatura en °K

β: Constante NTC

Usando esta ecuación se determinan los valores de resistencia que son expresados en la hoja de datos proporcionada por el fabricante (ver Anexo 1). Con estos datos se trabajará para diseñar el acondicionamiento respectivo.

El fabricante proporciona un circuito de conexión (Figura 2.9) con el cual se obtiene el voltaje respectivo para el valor de resistencia del termistor a determinada temperatura. Para este circuito la resistencia R_{batch} debe tener un valor de $10\text{ K}\Omega$ con una tolerancia del 1%, y el valor de V_{CC} debe ser de 5 V , estos valores permiten tener los valores indicados en la tabla de referencia 2.8.

Figura 2.9 Circuito de conexión del sensor de Temperatura



Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [27].

El circuito antes indicado es un divisor de voltaje cuya fórmula es la siguiente (ecuación 2.7):

$$V_{out} = \frac{V_{CC} * NTC_{HTG3500}}{R_{batch} + NTC_{HTG3500}} \quad (2.7)$$

Dónde:

V_{CC} : Voltaje de alimentación externa

R_{batch} : Resistencia que permite tener $V_{out} = V_{CC}/2$ en $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

$NTC_{HTG3500}$: Resistencia del termistor

Tabla 2.8 Tabla de referencia del sensor de temperatura

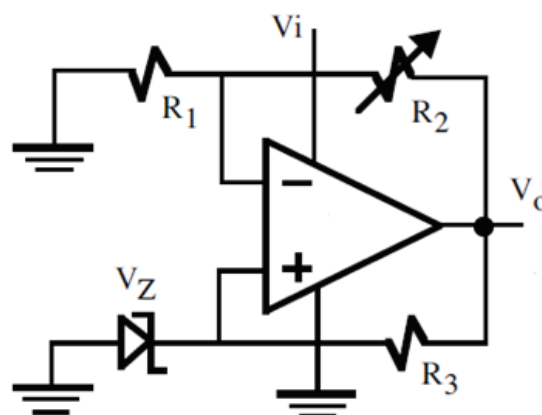
T (°C)	V _{NTC} (V)	T (°C)	V _{NTC} (V)
-40	4,574	40	1,842
-30	4,595	50	1,469
-20	4,361	60	1,158
-10	4,048	70	0,911
0	3,657	80	0,665
10	3,201	90	0,563
20	2,736	100	0,444
25	2,500	110	0,352
30	2,270		

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [27].

Para el proyecto la fuente externa de conexión de 5 V (VCC) no es la fuente principal para todos los circuitos, ya que se decidió implementar un circuito para generar un voltaje de referencia basado en un amplificador operacional, el cual permite tener 5 V.

El circuito de referencia utiliza las características del diodo zener conjuntamente con un amplificador operacional para obtener una fuente auto-regulable, este circuito permitirá tener a la salida un voltaje auto-regulable tomando en cuenta el valor del zener y el de la alimentación del amplificador operacional. En la Figura 2.10 se indica el circuito implementado y a continuación los cálculos de los valores de las resistencias del circuito [29].

Figura 2.10 Circuito de voltaje de referencia



Fuente: Tomado del Documento Reguladores de Tensión [29].

Para obtener el valor de las resistencias se considera que el voltaje de referencia que se necesita es de 5 V y el zener que se va a utilizar es de 3,3 V con lo que el valor de las resistencias se calcula de la siguiente forma (ecuación 2.8 y ecuación 2.9):

$$V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_Z \quad (2.8)$$

$$R_2 = R_1 \left(\frac{V_O}{V_Z} - 1\right) \quad (2.9)$$

Para el cálculo de las resistencias se asume el valor de R_1 igual a $33K\Omega$, y el valor de R_2 es:

$$R_2 = 33[k\Omega] * \left(\frac{5[V]}{3,3[V]} - 1\right)$$

$$R_2 = 17[k\Omega]$$

Para la implementación del circuito se coloca un potenciómetro de $100K\Omega$, para regular el valor a la salida, y también se asume el valor de la resistencia R_3 igual a $10K\Omega$.

Para establecer los valores máximos y mínimos de lectura para el microcontrolador se toma como referencia que el rango de temperatura de operación será entre 8 y 100 °C. De acuerdo a los valores dados por el fabricante el valor para 8 °C es 3,3 V, y para 100 °C se tiene un voltaje de 0,44 V.

Para realizar el acondicionamiento se toma en cuenta el valor máximo que se tiene en 8 °C, y se lo amplifica a 5 V, los cálculos para el circuito de acondicionamiento se detallan a continuación:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$G_{temp} = \frac{5 [V]}{3,30 [V]}$$

$$G_{temp} = 1,514$$

Ahora se calcularán los valores para el amplificador no inversor, en el cual se asume la resistencia R_1 con un valor de $68\text{ k}\Omega$:

$$G = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

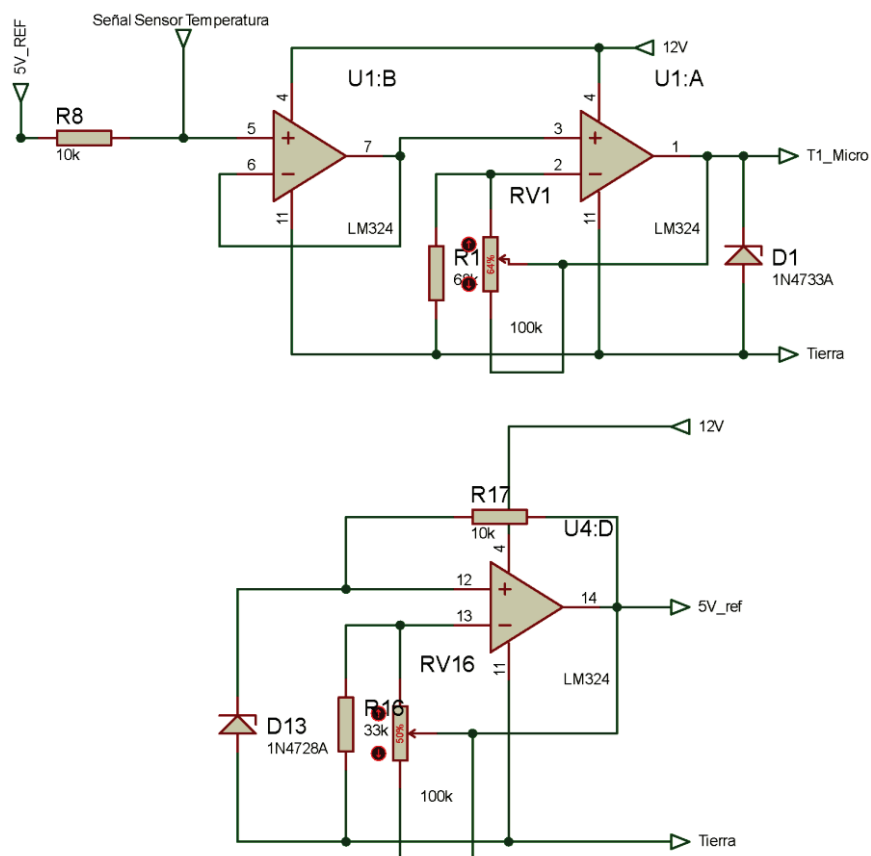
$$R_f = R_1(G - 1)$$

$$R_f = 68[\text{k}\Omega] * (1.514 - 1)$$

$$R_f = 34,952 [\text{k}\Omega]$$

Al no ser un valor estándar de resistencia se escoge un potenciómetro de precisión de $100\text{ k}\Omega$, y al igual que para el circuito de acondicionamiento del sensor de humedad relativa sirve para ajustar la ganancia en el caso que así lo amerite. Una vez realizado los cálculos y explicado el procedimiento en la Figura 2.11 se indica el circuito completo de acondicionamiento para el sensor de temperatura.

Figura 2.11 Circuito de acondicionamiento del Sensor de temperatura



Para poder utilizar esta señal de voltaje acondicionada es necesario establecer la ecuación correspondiente a la curva de reacción, debido a que el microcontrolador necesita procesar la señal generada que relaciona el voltaje de salida con la temperatura medida.

Con los datos de resistencia y la ecuación para conocer el valor del voltaje de salida dados por el fabricante, se procedió a procesar estos datos para obtener la gráfica y ecuación correspondiente.

A continuación se indica la ecuación obtenida en el análisis.

$$T = -0,1V^5 + 1,8041V^4 - 12,996V^3 + 47,606V^2 - 104,91V + 152,12 \quad (2.8)$$

Dónde:

T: es la temperatura medida

V: es el voltaje de salida para la temperatura a medir

Para el presente proyecto lo que se necesita son los valores de temperatura y humedad relativa como ya se ha explicado anteriormente, pero estos valores deben ser medidos a lo largo del proceso, es decir, se necesita varios puntos de medición, los cuales permitirán conocer cómo se va desarrollando el secado.

Estos son puntos usados para establecer el comportamiento del sistema de control, motivo por el cual se mide estas variables tanto en el colector como en la cámara.

Para este proyecto se van a utilizar 6 módulos HTG3533, los cuales fueron distribuidos de tal manera que se pueda obtener datos de temperatura y humedad relativa del ambiente, del colector y de la cámara de secado.

Para poder seguir el proceso de secado es necesario conocer el valor de estas variables dentro de la cámara, es decir conocer cómo se distribuye la temperatura y la humedad relativa a lo largo de la cámara ya que si la temperatura del aire en los puntos intermedios es próxima a la de saturación (entrada de la cámara) se puede decir que el caudal de aire es insuficiente.

Si esta temperatura disminuye gradualmente y a la salida no existe ningún cambio, entonces el caudal de aire es excesivo, y si se mantiene constante a lo largo del proceso el caudal de aire no sirve para secar.

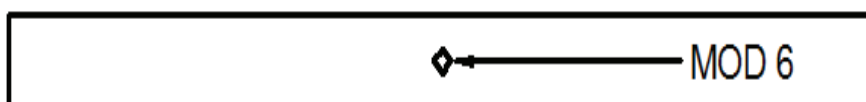
Por este motivo es necesario colocar estos módulos tanto a la entrada de la cámara, en puntos intermedios y a la salida de la misma, en la Tabla 2.9 se indica el nombre y la ubicación de los módulos.

Tabla 2.9 Nomenclatura y Ubicación de los módulos HTG3533

Ubicación	Nomenclatura
Medio ambiente	MOD4
Centro del colector	MOD6
Entrada de la cámara de secado	MOD5
Punto intermedio 1	MOD1
Punto intermedio 2	MOD2
Chimenea	MOD3

En la Figura 2.12 se puede observar el módulo y la ubicación correspondiente en el colector, tomando en cuenta que el módulo 6 (**MOD6**), se encuentra en el interior del colector justo en el centro del mismo.

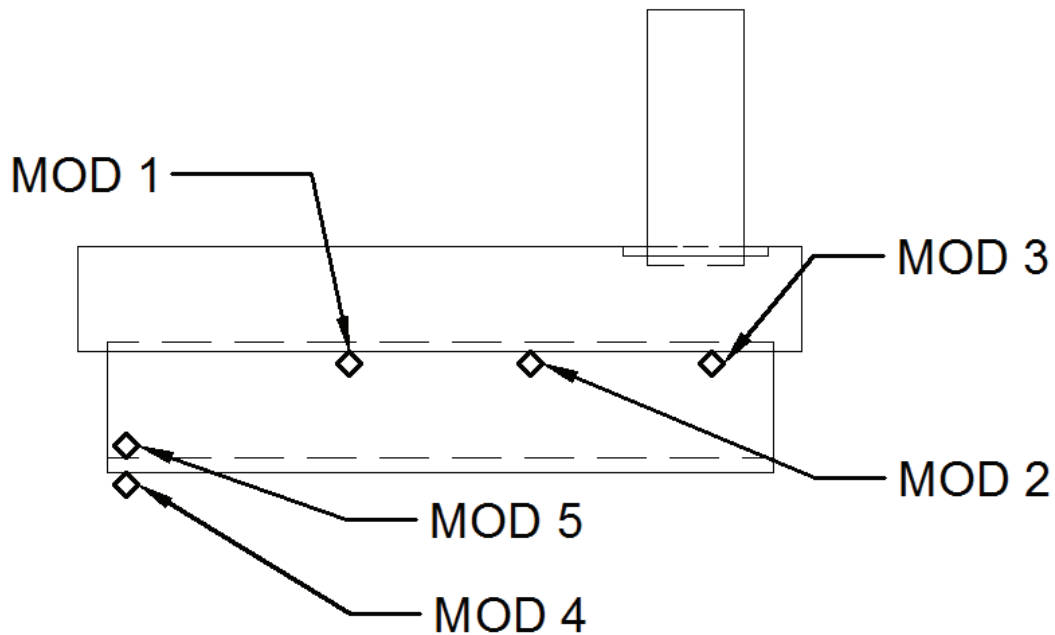
Figura 2.12 Módulos HTG3533 en el colector



En la Figura 2.13 se observa la ubicación de los módulos restantes, el **MOD4** se encuentra en la parte externa de la cámara de secado para medir el valor de temperatura y humedad relativa del medio ambiente.

Los sensores que se utilizan para el sistema de control son los módulos **MOD5**, **MOD1**, **MOD2** y **MOD3** ya que son los que se encuentran en el interior de la cámara y dependiendo de la temperatura que se encuentre en el interior se realizará el control.

Figura 2.13 Módulos HTG3533 en la cámara



2.2.2.2. SENSOR DE VELOCIDAD DE VIENTO

Medir la velocidad de viento dentro del proceso de secado es muy importante, ya que al medir esta variable se puede conocer tanto la eficiencia del sistema basado en energía solar como conocer si el proceso de secado se está realizando de forma adecuada.

Para medir la velocidad del viento, se deben conocer los valores máximos y mínimos de esta variable, los que fueron obtenidos de la página Web del LEAEE y se los puede observar en el Anexo 2.

De acuerdo a estos valores se seleccionó el sensor de velocidad de viento MD0550 de Modern Device, el cual es un anemómetro térmico o de hilo caliente cuyo funcionamiento consiste en que el elemento sensor es calentado a una temperatura constante por la corriente provista por el circuito electrónico del sensor.

El flujo de aire que va a ser medido pasa y enfría el elemento sensor, lo que obliga al circuito a entregar mayor corriente para mantener la temperatura

constante. La pérdida de calor del sensor se puede relacionar con la velocidad según la ley de King [30]:

$$Q = A + B * U^n \quad (2.9)$$

Dónde:

Q: Pérdida de calor.

A, B: Constantes que dependen de las propiedades físicas del fluido, del sensor y de las temperaturas de operación.

U: Velocidad del fluido.

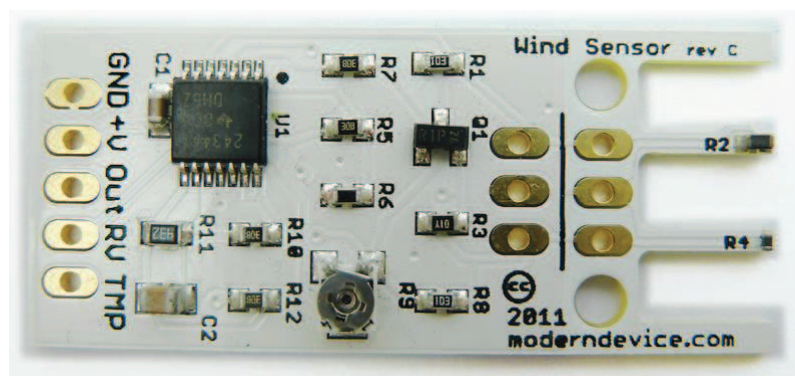
n : Constante que depende de las dimensiones del sensor.

El circuito electrónico desarrollado para el sensor MD0550 permite tener una señal de voltaje a la salida, la cual representa la velocidad de viento, es decir, mientras varía la velocidad de viento el voltaje de salida del sensor también varía.

En la Figura 2.14 se observa el sensor utilizado para medir la velocidad del viento, en la cual se puede observar claramente el elemento sensor que son dos termistores (R_2 y R_4).

Esta configuración permite medir velocidades bajas y medias, además se pueden observar los pines, de los cuales sólo es necesario conectar GND, la salida (OUT), y la alimentación (Vcc).

Figura 2.14 Sensor de Velocidad de Viento MD0550



El sensor consta de 5 pines los que se detallan en la Tabla 2.10; para el proyecto se va a alimentar al sensor con 5V, siendo éste el máximo voltaje y por lo tanto la máxima salida del sensor:

Tabla 2.10 Asignación de pines sensor MD0550

Pin	Descripción
GND	Tierra
+V	Voltaje de alimentación
Out	Voltaje de salida
Rv	Voltaje primario
TMP	Temperatura de salida

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor MD0550 [31].

Las características eléctricas del sensor se presentan en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Características eléctricas del sensor MD0550

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	V_{dd}	4 a 10	V
Rango de operación	-	-30 a 125	°C
Exactitud (Ta=25 °C)	-	0.5	m/s
Salida	V_{out}	V_{dd}	V

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor MD0550 [31].

El sensor MD0550 no posee valores típicos de voltaje para determinadas velocidades, es decir, el fabricante no brinda información sobre la relación entre el voltaje y la velocidad de viento, por lo que fue necesario establecer mediante experimentación la curva de reacción para este sensor.

Tomando como referencia las indicaciones dadas por el fabricante, se debe tener en el pin de salida de voltaje 0.5 V a 0 m/s, manipulando el potenciómetro que posee este sensor.

Para obtener la relación que existe entre la velocidad de viento y el voltaje de salida del sensor se realizaron las pruebas respectivas utilizando el túnel de viento del Laboratorio de Instrumentación Industrial y el anemómetro HTA4200 del LEAEE. Para mayor referencia revisar el Capítulo 4: Pruebas y Resultados, también se debe revisar el Anexo 2 en el cual se encuentra los valores, la curva de reacción y la ecuación correspondiente a ésta.

Para poder realizar los cálculos del circuito de acondicionamiento se ha determinado que la velocidad máxima que va a medir el microcontrolador será de 15 m/s lo que corresponde a 3 V, de este modo la ganancia que se requiere es:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$G_{VIENT} = \frac{5 [V]}{3 [V]} = 1,67$$

Se ha implementado un seguidor de voltaje para evitar atenuar la señal de salida, y un amplificador no inversor para obtener una ganancia positiva. La fórmula para la ganancia de un amplificador no inversor es:

$$G_{VIENT} = 1 + \frac{R_F}{R_I}$$

Donde se asume el valor de R_I igual a $30 \text{ k}\Omega$, y se procede a calcular el valor de R_f .

$$R_f = R_1 (G_{VIENT} - 1)$$

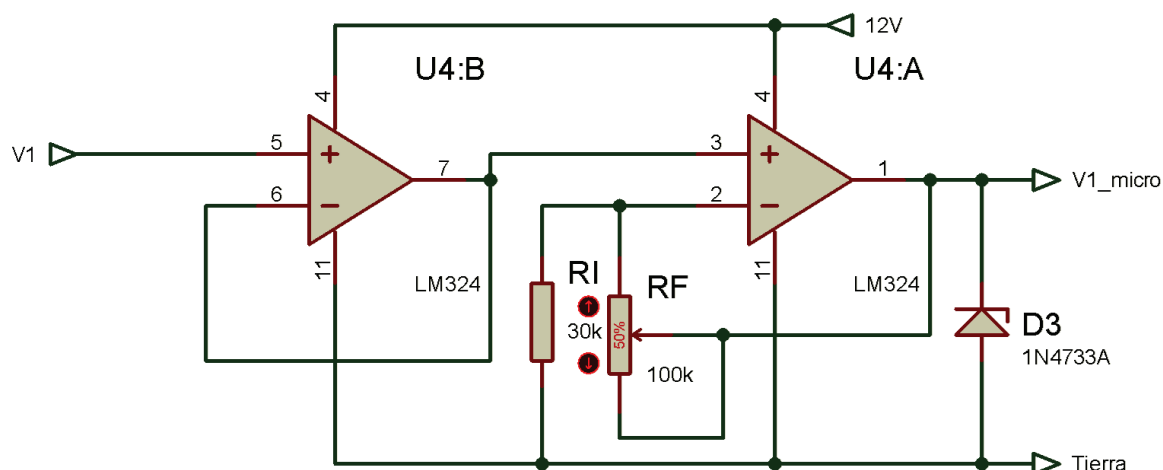
$$R_f = 30 [k\Omega] * (1,67 - 1)$$

$$R_f = 20,1 [k\Omega]$$

El valor de R_F se obtiene a través de un potenciómetro de precisión de $100 [k\Omega]$.

En la Figura 2.15 se indica el circuito de acondicionamiento implementado para el sensor de velocidad de viento.

Figura 2.15 Circuito de acondicionamiento del Sensor MD0550



La señal de salida del amplificador será enviada al conversor ADC, y el microcontrolador procesará esta señal de voltaje para tener la velocidad de viento y para eso utilizará la ecuación de la curva de reacción que se indica a continuación:

$$Vel = 0,0679 * V^5 - 0,7821 * V^4 + 3,5722 * V^3 - 7,6288 * V^2 + 7,9164 * V - 3,0853 \quad (2.11)$$

Para este proyecto se van a utilizar dos sensores de velocidad de viento, los cuales se encuentran ubicados como se indica en la Figura 2.16. Estos sensores que se encuentran tanto a la entrada como a la salida permitirán ver cómo está el proceso de secado, al conocer la velocidad con la que ingresa y sale el aire utilizado para el secado.

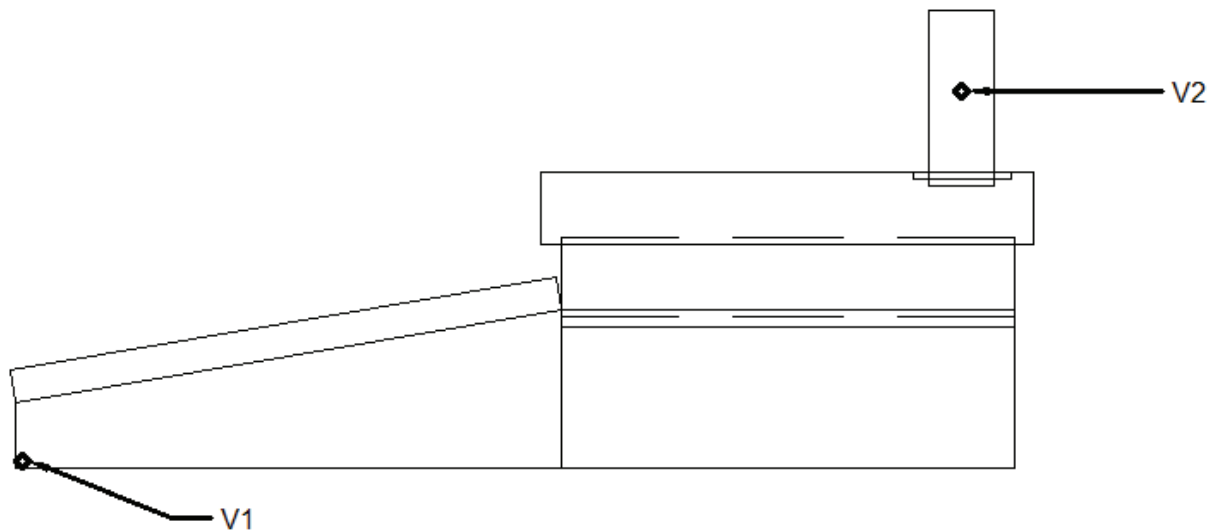
En la Tabla 2.12 se indica la nomenclatura y la ubicación de los dos sensores.

Tabla 2.12 Nomenclatura y Ubicación de los Sensores MD0550

Ubicación	Nomenclatura
Entrada del Colector	V1
Salida de la Cámara	V2

Los sensores serán colocados a la entrada del colector, y a la salida de la cámara, es decir en la chimenea ya que aquí es donde se necesita conocer la velocidad de viento.

Figura 2.16 Ubicación de los sensores de velocidad de viento



2.2.2.3. SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR

Otro valor que se necesita conocer es la radiación solar, ya que conocer este valor permite determinar cuanta energía es la que proporciona o almacena el colector solar.

Para determinar el sensor que se va a utilizar se tomó como referencia los valores promedios de radiación solar para cada mes desde abril del 2011 hasta abril del 2012, datos obtenidos de la página de internet del LEAEE (ver Anexo 3), y de acuerdo a estos valores se decidió utilizar el sensor 6450 de Davis Instruments, que mide radiación solar global.

Este sensor lo posee el LEEEA y se encuentra en un módulo ubicado en la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

El sensor de radiación solar 6450, es un piranómetro fotovoltaico, y se basa en el efecto fotoeléctrico.

La radiación solar 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 [32] [33].

Las características eléctricas del sensor se presentan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Características eléctricas del sensor de radiación solar 6405

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	V_{dc}	+3 ($\pm 10\%$)	V
Temperatura de operación	-	-40 a 65	$^{\circ}C$
Respuesta Espectral	-	400 a 1100	nm
Salida	-	1.67	mV el W/m^2
Rango de medición	-	0 a 1800	W/m^2
Precisión	-	± 5	%

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor de radiación solar 6450 [33].

El sensor de radiación solar 6450 tiene 4 salidas, las que se detallan en la Tabla 2.14:

Tabla 2.14 Asignación de pines sensor de radiación solar 6450

Salidas	Descripción
Verde	Voltaje de salida
Rojo	Tierra
Negro	Tierra
Amarillo	Voltaje de alimentación

Fuente: Tomado de la hoja de datos del sensor [33].

Debido a que el sensor se encuentra ubicado en otro módulo del laboratorio, se ha incluido para este proyecto un circuito de conmutación, diseñado con relés, esto para evitar el funcionamiento simultáneo del sensor en los distintos módulos.

El circuito diseñado permitirá que el sensor funcione cuando uno de los dos sistemas esté en operación.

Para el circuito de conmutación se ha seleccionado el relé JRC 27 F/012-S que cuenta con las siguientes características eléctricas (Tabla 2.15):

Tabla 2.15 Características del relé JRC 27 F/012-S (555)

Especificación	Valor	Unidad
Voltaje de Alimentación	12	<i>V</i>
Resistencia de la bobina	720	Ω

El circuito de conmutación completo consta de un relé y un transistor que dará el voltaje necesario para activar la bobina.

Para diseñar el circuito se requiere calcular la máxima corriente que va a pasar por la bobina.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.12)$$

$$I = \frac{12 \text{ [V]}}{720 \text{ [\Omega]}}$$

$$I = I_{C \text{ máx}} = 16,67 \text{ [mA]}$$

Dada esta corriente se utilizará el transistor 2N3904, ya que la corriente máxima que soporta en el colector es 200 mA.

Para determinar la resistencia para la base del transistor se calcula la corriente en la base:

$$I_B = \frac{I_{C \text{ máx}}}{h_{fe}} \quad (2.13)$$

$$I_B = \frac{16,66 \text{ [mA]}}{100}$$

$$I_B = 0,166 \text{ [mA]}$$

A continuación se calcula el valor de la resistencia:

$$R_{base} = \frac{V}{I_B} \quad (2.14)$$

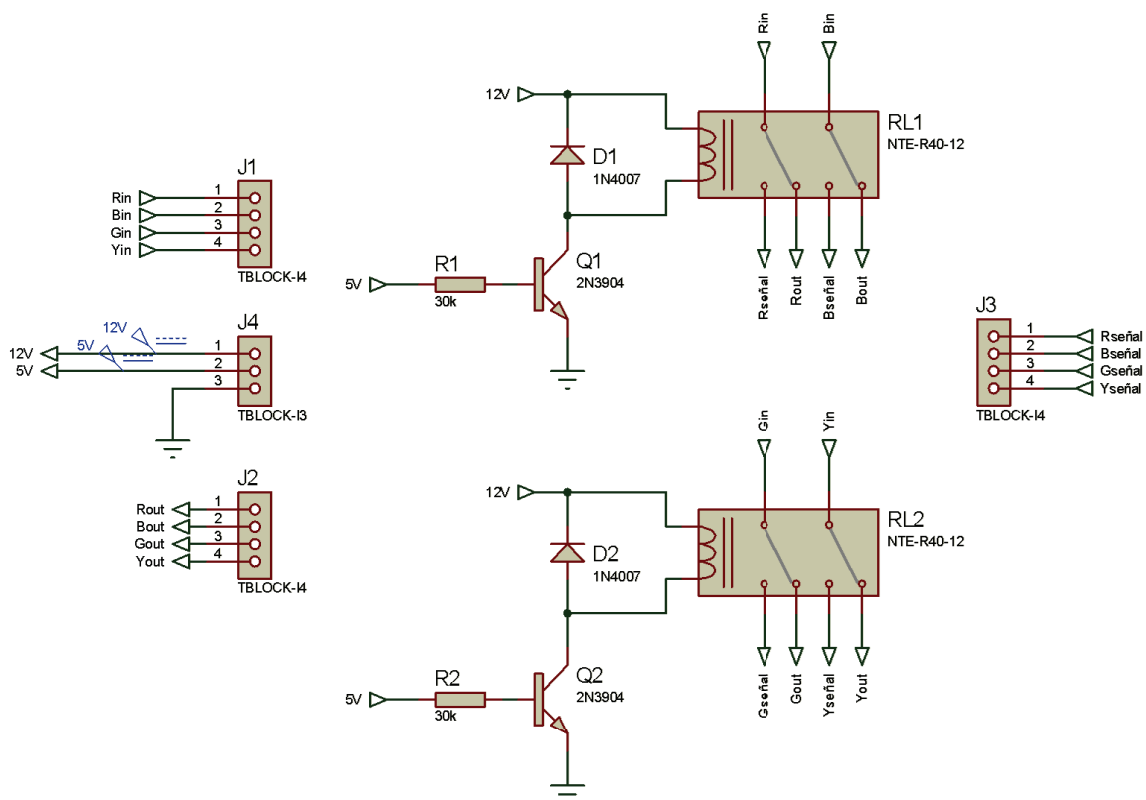
$$R_{base} = \frac{5 [V]}{0,166 \times 10^{-3} [A]}$$

$$R_{base} = 30,1204 [k\Omega]$$

La resistencia que va conectada a la base del transistor es de 30 kΩ.

El circuito de conmutación completo consta de dos relés, ya que cada uno de estos maneja solo dos señales, también se coloca un diodo 1N4007 como protección. En la Figura 2.17 se observa el circuito de conmutación implementado para poder usar las señales del sensor de radiación solar.

Figura 2.17 Circuito de conmutación para el sensor de radiación solar 6450



Para realizar el circuito de acondicionamiento del sensor de radiación solar se toma como valor máximo el valor que da el fabricante y es 1800 W/m², lo que corresponde a un voltaje de salida de 3,006 V.

De este modo la ganancia que se requiere es:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$G_{RAD} = \frac{5 [V]}{3,006 [V]} = 1,66$$

Se ha implementado un seguidor de voltaje para evitar atenuar la señal de salida, y un amplificador no inversor para obtener una ganancia positiva.

La fórmula para la ganancia de un amplificador no inversor es:

$$G_{RAD} = 1 + \frac{R_F}{R_I}$$

Donde el valor que se asume es el de R_1 y es $33 \text{ k}\Omega$, y se procede a calcular el valor de R_f .

$$R_f = R_1(G_{RAD} - 1)$$

$$R_f = 33 [k\Omega] * (1,67 - 1)$$

$$R_f = 22,11 [k\Omega]$$

El valor de R_f se obtiene a través de un potenciómetro de precisión de $100 \text{ k}\Omega$.

La señal de salida del amplificador será enviada al conversor ADC del microcontrolador, al ser una señal completamente lineal, se calcula la ecuación de la recta que permite tener el voltaje de acuerdo a la radiación solar que exista.

$$Rad = 360 * V \tag{2.15}$$

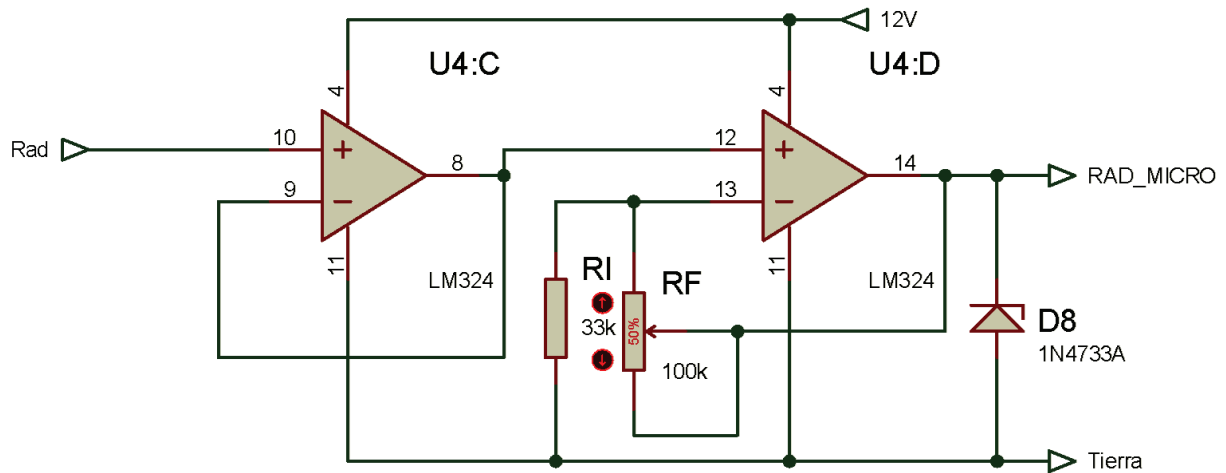
Dónde:

Rad: es el valor de la radiación solar, y

V: es el voltaje de entrada al conversor ADC

En la Figura 2.18 se indica el circuito de acondicionamiento para el sensor de radiación solar.

Figura 2.18 Circuito de acondicionamiento del sensor de radiación solar



2.2.2.4. SENSOR DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA

Un parámetro importante para el secado es el contenido de humedad de la madera, porque con este valor se puede conocer el estado de la misma mientras se está realizando el proceso de secado, es decir, al tener este valor se podrá determinar cuándo finalizar el proceso ya que la madera es utilizada para distintos procesos dependiendo del contenido de humedad que tenga.

Conocer este dato será de gran valor para el desarrollo del proyecto ya que dará la pauta de la finalización del proceso de secado con un determinado contenido de humedad.

Para poder medir el contenido de humedad de la madera existen varios métodos de los cuales se puede mencionar: el método eléctrico y la medición de la humedad por deshidratación. A continuación se explicará cada uno de ellos [34].

Método Eléctrico

Una de las propiedades eléctricas de la madera es que su resistencia eléctrica varía de acuerdo al nivel de humedad contenida en ésta, por eso se ha

desarrollado instrumentos que midan dicha resistencia eléctrica, conocidos como xilohigrómetros¹¹.

El problema con este tipo de instrumentos es que el rango de medición del contenido de humedad es reducido, se medirá en un rango del 8 al 25 % con una precisión aceptable y fuera de este rango los valores pueden no ser reales, dependiendo del instrumento y del fabricante.

El rango puede aumentar dependiendo del instrumento, pero no medirán valores por debajo del 8 %. La forma más común que utilizan estos instrumentos para la medición de la resistencia es colocar unos electrodos en la madera, los cuales permitirán, mediante un circuito electrónico tener el valor del contenido de humedad [14] [34].

Este es un método invasivo ya que daña la madera porque los electrodos son clavados en ésta, pero existe una forma que permite medir el contenido de humedad mediante la capacidad eléctrica, midiendo la constante dieléctrica de la pieza.

Para medir esta variable se utiliza como electrodos placas superficiales planas, lo que es bueno ya que no daña la madera como lo hacen los electrodos para medir resistencia eléctrica [14].

Medición de humedad por deshidratación

El método más preciso para medir el contenido de humedad es la medición por deshidratación ya que en éste se utiliza como referencia el peso húmedo de la madera y el peso anhidro de la misma.

Lo que se requiere para realizar este método son probetas, que no son más que cortes de la madera de determinadas dimensiones previamente establecidas, y que luego serán pesadas, a ésta se la conocerá como el peso húmedo, mientras que para el peso anhidro se toma una probeta previamente secado en un horno hasta llegar a un peso constante a 103 °C, también conocido como método gravimétrico.

¹¹ Xilohigrómetro: Instrumento utilizado para medir el contenido de humedad de la madera

Para la calcular el contenido de humedad de la madera con el método descrito se utiliza la Ecuación 1.6 [14].

$$CH\% = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso anhidro}}{\text{Peso anhidro}} \times 100 \quad (1.6)$$

Este método también es considerado invasivo ya que se requiere el corte de las piezas para poder obtener el contenido de humedad.

Los métodos antes mencionados son los que se utilizan en la industria maderera pero se pueden mencionar métodos como radiación infrarroja, microondas o destilación que sirven para el mismo propósito pero no son muy utilizados debido a la complejidad de su implementación.

Conociendo los métodos para la medición del contenido de humedad, en este proyecto se optó por escoger el método eléctrico en el cual se mide la resistencia eléctrica.

Para escoger el instrumento que va a ser utilizado se tomó en cuenta el costo, el rango de medición y la facilidad de implementación siendo el Moisture Meter MD 812 el xilohigrómetro que se escogió.

En la en la Tabla 2.16 se puede apreciar las características del instrumento.

Tabla 2.16 Características del Moisture Meter MD 812

Especificaciones	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	V_{cc}	9	V
Rango de medición		4-40	%
Precisión		0.25	%

El instrumento muestra el valor del contenido de humedad en un display incorporado al circuito electrónico de medición, además los electrodos también se encuentran incorporados en el instrumento y la alimentación de este circuito es mediante una batería de 9 V.

En la Figura 2.19 se puede observar el instrumento.

Figura 2.19 Moisture Meter MD 812

Para poder obtener las señales necesarias del instrumento antes mencionado se procedió a analizar la circuitería interna y luego obtener las señales apropiadas para el posterior acondicionamiento y procesamiento en el microcontrolador.

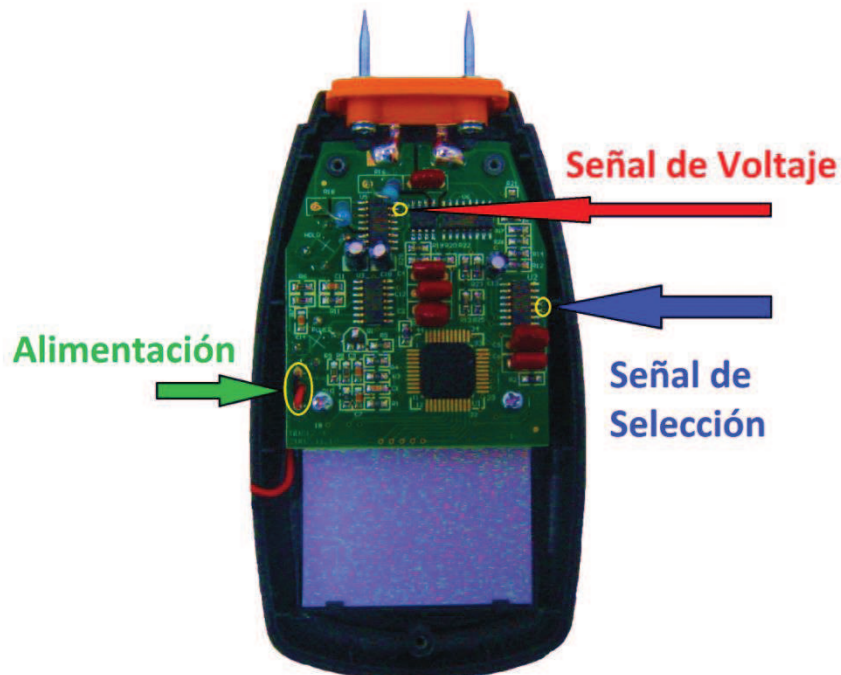
El circuito electrónico da voltaje para la medida de resistencia eléctrica. A continuación se dará una explicación del funcionamiento del instrumento y como se obtiene las señales requeridas para el acondicionamiento.

Mediante experimentación se conoce que el instrumento mide el contenido de humedad en 4 rangos diferentes los cuales son: de 0 a 10 %, de 11 a 20 %, de 21 a 40 % y mayores de 40 %; en estos intervalos se tiene rangos de voltaje que de acuerdo al valor de contenido de humedad también varían, es decir, en los distintos intervalos también existen 4 rangos de voltaje.

De acuerdo a lo indicado anteriormente se hallaron tres puntos que permiten tener la variación del voltaje y la selección de los distintos intervalos de contenido de humedad.

En la Figura 2.20 se puede observar el circuito interno del instrumento y se indican los puntos de las señales.

Figura 2.20 Circuito interno y puntos de acondicionamiento



Como se puede observar en la figura, del equipo se toman 5 señales para el acondicionamiento de las cuales dos pertenecen a la alimentación y tierra, una pertenece a la señal de voltaje y las otras dos pertenecen a las señales de selección, que dependiendo del estado lógico en el que se encuentren indicarán un intervalo de contenido de humedad.

A continuación en la Tabla 2.17 se indican los estados de las señales y el intervalo al que pertenecen.

Tabla 2.17 Estado lógico de las señales de selección

S0	S1	Contenido de Humedad
[V]	[V]	[%]
4.2	4.2	10 - 19
4.2	9	20 - 39
9	4.2	0 - 9
9	9	>40

Se analizará cómo se tratan las señales de selección indicadas en la Tabla 2.17 en donde se ven los estados lógicos y las combinaciones que permiten medir los diferentes intervalos del contenido de humedad.

Para poder establecer señales que puedan ser utilizadas por el microcontrolador lo que se diseñó fue un amplificador operacional como circuito de comparación en el cual se puede obtener estados lógicos de alto (5,1V) o bajo (0V).

En el circuito de comparación se tienen dos voltajes uno en la entrada positiva y otro en la entrada negativa, si el voltaje de la entrada positiva es mayor que el de la entrada negativa, el voltaje que se tiene a la salida será el voltaje de la fuente positiva de alimentación al amplificador operacional, caso contrario, si el voltaje a la entrada positiva es menor que el de la entrada negativa, el voltaje a la salida es el de la fuente negativa de alimentación del amplificador [35].

Tomando como referencia lo explicado anteriormente existe un voltaje fijo de referencia y se encuentra en la entrada negativa, y como se detalló en el acondicionamiento de los sensores de temperatura para tener un voltaje de referencia se implementó un circuito cuyas características son las mismas que el del circuito de acondicionamiento de los sensores de temperatura con la diferencia que el voltaje que se tiene de referencia será de 4,5V.

Para poder acondicionar la señal de voltaje se realizó varias mediciones, tomando en cuenta los rangos en los que se encontraba la medición; es decir, se midió el voltaje para cada contenido de humedad entre 0 y 40 % (ver Anexo 4) y de acuerdo a los valores obtenidos se establecieron los diferentes rangos de voltaje para cada intervalo de contenido de humedad. Se puede observar que el voltaje para cada rango varía entre 5,8 V y 9 V, conociendo esto se implementó un circuito seguidor de voltaje y un circuito restador que permite disminuir el voltaje de la señal del instrumento a un voltaje que es aceptable por el microcontrolador.

Para la implementación del circuito restador se utilizó resistencias de 10 K Ω , y el circuito de referencia es el mismo ya explicado anteriormente con un voltaje a la salida de 5,1V.

En la Figura 2.21 se indica el circuito de acondicionamiento completo de las señales del instrumento de medición del contenido de humedad, en ésta se puede observar, que además de las fuentes de alimentación necesarias para los amplificadores operacionales se implementa una fuente de 9 V utilizando un regulador 7809, esto debido a que el circuito de medición de contenido de humedad utiliza 9 V como alimentación.

Se obtuvieron valores de voltaje para los distintos intervalos, y de acuerdo a cada intervalo se estableció una curva de reacción la cual permite saber el comportamiento del sensor en cada intervalo.

Estas curvas servirán para que el microcontrolador pueda procesar la señal que ingresa al conversor ADC.

A continuación se presenta para cada intervalo su ecuación correspondiente.

Para el intervalo de 0 – 9 % de acuerdo a los datos obtenidos se tiene que:

$$CH\% = -28,088 * V^2 + 81,88V - 49,623 \quad (2.16)$$

Para el intervalo de 10 – 19 % de acuerdo a los datos obtenidos se tiene que:

$$CH\% = 4,7634 * V^3 - 27,493 * V^2 + 56,446V - 23,266 \quad (2.17)$$

Para el intervalo de 20 – 39 % de acuerdo a los datos obtenidos se tiene que:

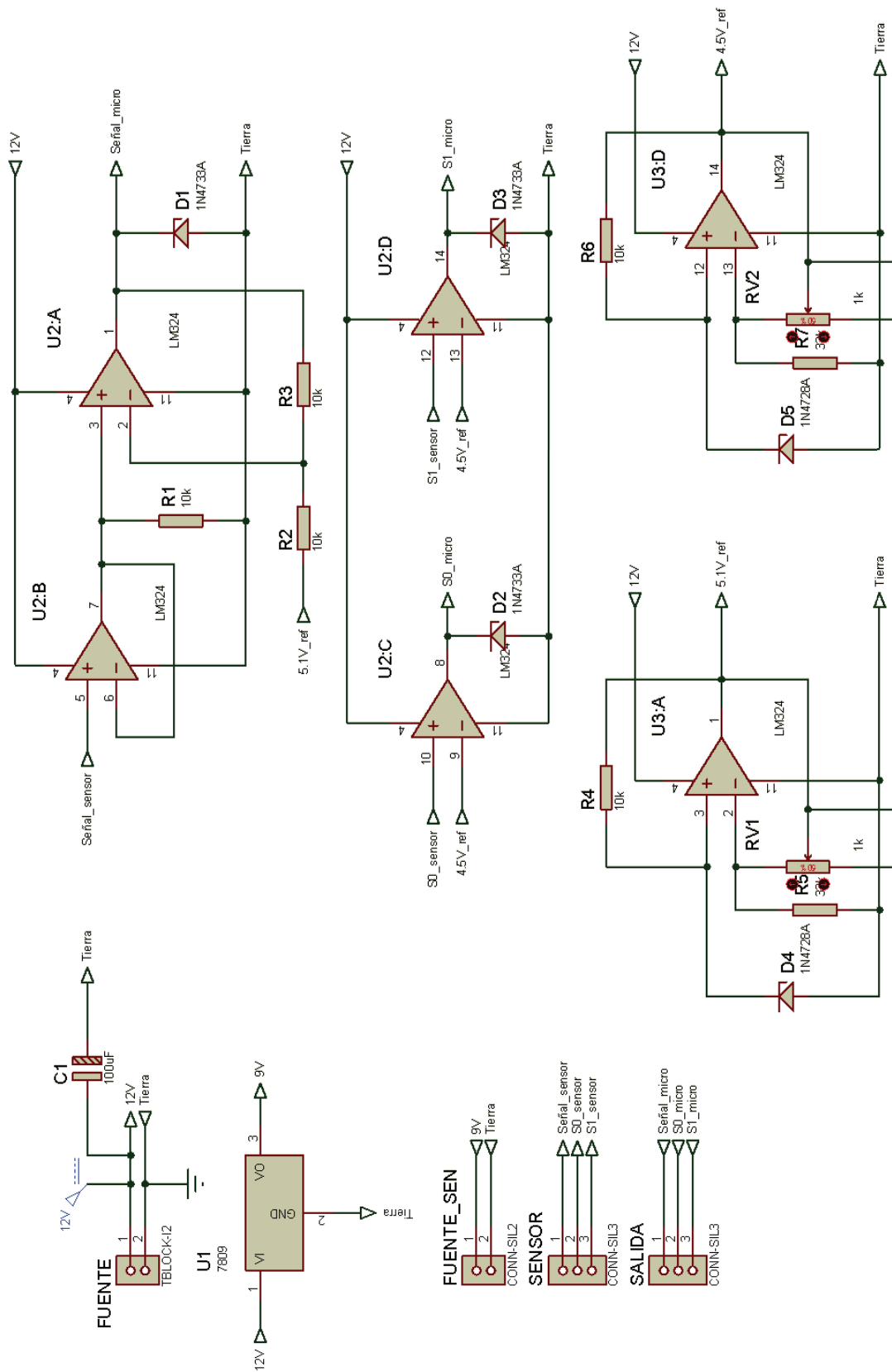
$$CH\% = -3,4776 * V^2 + 22,171V + 3,0322 \quad (2.18)$$

Para el intervalo en el que el contenido de humedad es mayor que 40 %, de acuerdo a los datos obtenidos se tiene que:

$$CH\% = 40 \quad (2.19)$$

Para el último intervalo se optó por colocar el valor máximo al que llega el instrumento, en este caso 40%, esto ya que al momento de tomar los datos, el instrumento no marcó nunca más de ese valor, por lo que la señal de voltaje será la máxima siempre que el contenido de humedad esté por encima de 40%.

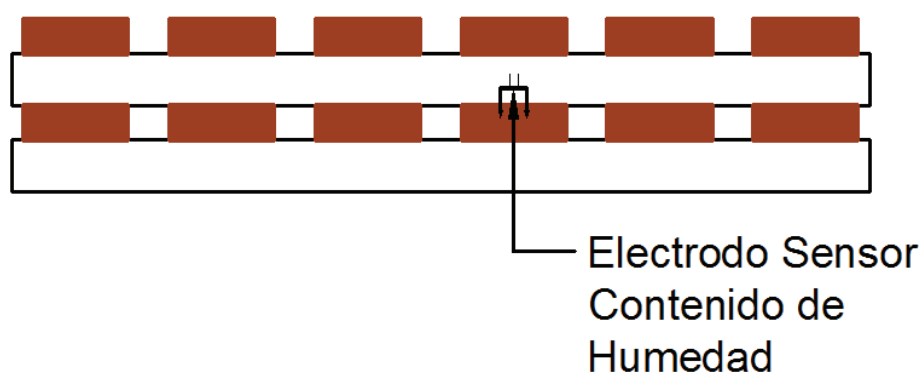
Figura 2.21 Circuito de acondicionamiento para medir contenido de humedad



Para conocer el contenido de humedad de la madera apilada, se colocará el electrodo del instrumento en una de las piezas, la cual será considerada como muestra. Es decir, la medida del contenido de humedad en esa pieza de madera determinará el estado de las otras ya que antes de iniciar el proceso todas las piezas de madera a secar deben tener un mismo contenido de humedad.

Se colocará el electrodo para medir el contenido de humedad en una de las piezas que se encuentran en la parte inferior y en el centro del apilado, ya que el proceso de secado se realiza de forma más lenta en estas piezas, es decir, cuando el contenido de humedad llegue al valor requerido en esta pieza el proceso se detendrá ya que la variación del valor de contenido de humedad no varía mucho con respecto al de las otras piezas. En la Figura 2.22 se puede observar la ubicación del electrodo para medir el contenido de humedad dentro del apilado.

Figura 2.22 Ubicación del electrodo para medir contenido de humedad



La medición del contenido de humedad se lo realiza para tener una señal de control, la cual da la pauta para la finalización del proceso.

2.2.3. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El subsistema de acondicionamiento de sensores da en su salida las señales de voltaje de todos los sensores, las cuales van a un microcontrolador quien las obtiene y procesa. La cantidad total de señales generadas por el sistema de acondicionamiento es de 16, dentro de las cuales se mide 6 valores de temperatura, 6 valores de humedad relativa, 2 valores de velocidad de viento, 1 valor de radiación solar y 1 valor de contenido de humedad, distribuidas de tal

forma que permiten conocer el comportamiento del secador de madera. Las señales son adquiridas por el microcontrolador a través de su conversor análogo – digital; el microcontrolador posee 8 entradas análogas, por lo tanto no podría adquirir las 16 señales generadas por el sistema.

Para esto se implementó un circuito con tres multiplexores, los que son capaces de adquirir varias señales de entrada y mediante una combinación en sus señales de control obtener una sola salida de datos, la cual será conectada a una entrada del conversor análogo – digital del microcontrolador. Utilizando los multiplexores se puede obtener las 16 señales de los sensores y enviarlas a 5 entradas analógicas del conversor del microcontrolador. El multiplexor utilizado para la adquisición de los datos es el HCF4051BE, que es un multiplexor analógico.

Se utilizan para la adquisición tres multiplexores, un multiplexor estará dedicado a las señales de temperatura, el otro estará dedicado a la adquisición de las señales de humedad relativa y el otro para las señales de velocidad de viento, dejando para las señales de radiación solar y de contenido de humedad entradas directas a los pines del conversor análogo – digital del microcontrolador.

Las señales de control para los multiplexores son manejadas por el microcontrolador esclavo, el cual envía la correspondiente señal de control al multiplexor correspondiente para obtener el valor que se necesita conocer. Los pines que manejan los multiplexores se indican en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18 Pines para control del multiplexor HCF4051BE

Pines del microcontrolador esclavo	Señal de control del multiplexor
PC0	A_E
PC1	B_E
PC2	C_E
PC7	ENABLE

El microcontrolador posee un conversor análogo – digital de 10 bits de resolución y posee 8 canales de conversión; además puede utilizar como voltaje de referencia un voltaje interno o uno externo. En la Tabla 2.19 se indica los pines del conversor ADC y las señales que están entrando al mismo.

Tabla 2.19 Distribución de Pines del Conversor ADC

Pines del microcontrolador esclavo	Sensor
PA0 – ADC0	Temperatura
PA1 – ADC1	Humedad Relativa
PA2 – ADC2	Velocidad de viento
PA3 – ADC3	Radiación Solar
PA4 – ADC4	Contenido de Humedad

Otra característica importante para el manejo correcto del conversor ADC del microcontrolador es establecer un voltaje de referencia fijo, estable y cuyo valor corresponda al que se utilizará en la ecuación, por tal motivo se implementó un circuito para generar un voltaje de referencia de 5 V, el cual va a conectarse al pin correspondiente del microcontrolador.

Como se mencionó anteriormente para la conversión en el microcontrolador se tiene una resolución de 10 bits, el microcontrolador transforma la señal de voltaje que tiene a la entrada del conversor en bits, es decir, para cada valor de voltaje que se tenga en el conversor le corresponde un número de bits de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$ADC = \frac{V_{in} * 1024}{V_{ref}} \quad (2.20)$$

Dónde:

ADC : Número de bits

V_{in} : Voltaje en la entrada del conversor

V_{ref} : Voltaje de referencia

Una característica del microcontrolador ATmega164p es que la conversión también se la puede realizar con una resolución de 8 bits tan solo cambiando la configuración del registro de control y estado del conversor ADC, por lo tanto la ecuación a utilizar para la conversión es la siguiente.

$$ADC = \frac{V_{in} * 256}{V_{ref}} \quad (2.21)$$

Esto se lo realiza de esta forma ya que los datos adquiridos por este microcontrolador serán enviados por comunicación serial a otro microcontrolador en el cual se realizará el proceso de visualización, la comunicación serial del microcontrolador ATmega164p soporta tramas desde 5 a 9 bits y debido a que el conversor ADC guarda los 8 bits más significativos de la conversión en un registro específico se utilizará la comunicación serial con una trama de 8 bits.

En el microcontrolador esclavo se procesa los datos obtenidos por el conversor ADC para obtener el valor real entregado por los sensores, a través de cálculos en los cuales se utilizan las ecuaciones características que da el fabricante para los sensores de temperatura, humedad relativa, radiación solar, mientras que para los sensores de velocidad de viento y contenido de humedad se halla la respectiva curva y ecuación característica.

El cálculo de estos valores en el microcontrolador le permitirá poder realizar las acciones de control pertinentes para que el proceso de secado de madera se haga de forma más eficiente. A continuación se presentará las ecuaciones utilizadas por el microcontrolador:

Sensor de Temperatura:

$$T = -0,1V^5 + 1,8041V^4 - 12,996V^3 + 47,606V^2 - 104,91V + 152,12$$

Sensor de Humedad Relativa:

$$RH(\%) = 57 * V - 31$$

Sensor de Velocidad de Viento:

$$Vel = 0,8727 * V^5 - 6,0351 * V^4 + 16,538 * V^3 - 21,191 * V^2 + 13,194 * V - 3,0853$$

Sensor de Radiación:

$$Rad = 360 * V$$

Sensor de Contenido de Humedad:

Como se explicó en el subcapítulo de acondicionamiento de sensores en la parte referente al sensor de contenido de humedad, para obtener el valor de éste se necesita de tres señales, una de voltaje y las otras dos de control, estas señales

fueron acondicionadas, la señal de voltaje ingresa a un pin del conversor ADC, mientras que las señales de control son conectadas al microcontrolador como se indica en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20 Pines para las señales de control del Sensor de Contenido de Humedad

Pines del microcontrolador maestro	Señal de control
PD6	Señal S0
PD7	Señal S1

Para obtener el valor real del sensor de contenido de humedad el microcontrolador revisa estos pines y de acuerdo a la combinación que se encuentre en éstos utiliza una de las siguientes ecuaciones para calcular el contenido de humedad.

Si S0 = 1 y S1 = 0 entonces:

$$CH\% = 0,0111 * V^2 + 1,6413V - 50,755$$

Si S0 = 0 y S1 = 0 entonces:

$$CH\% = 0,0106 * V^2 + 1,1158V - 23,744$$

Si S0 = 0 y S1 = 1 entonces:

$$CH\% = 0,0013 * V^2 + 0,4341V + 2,$$

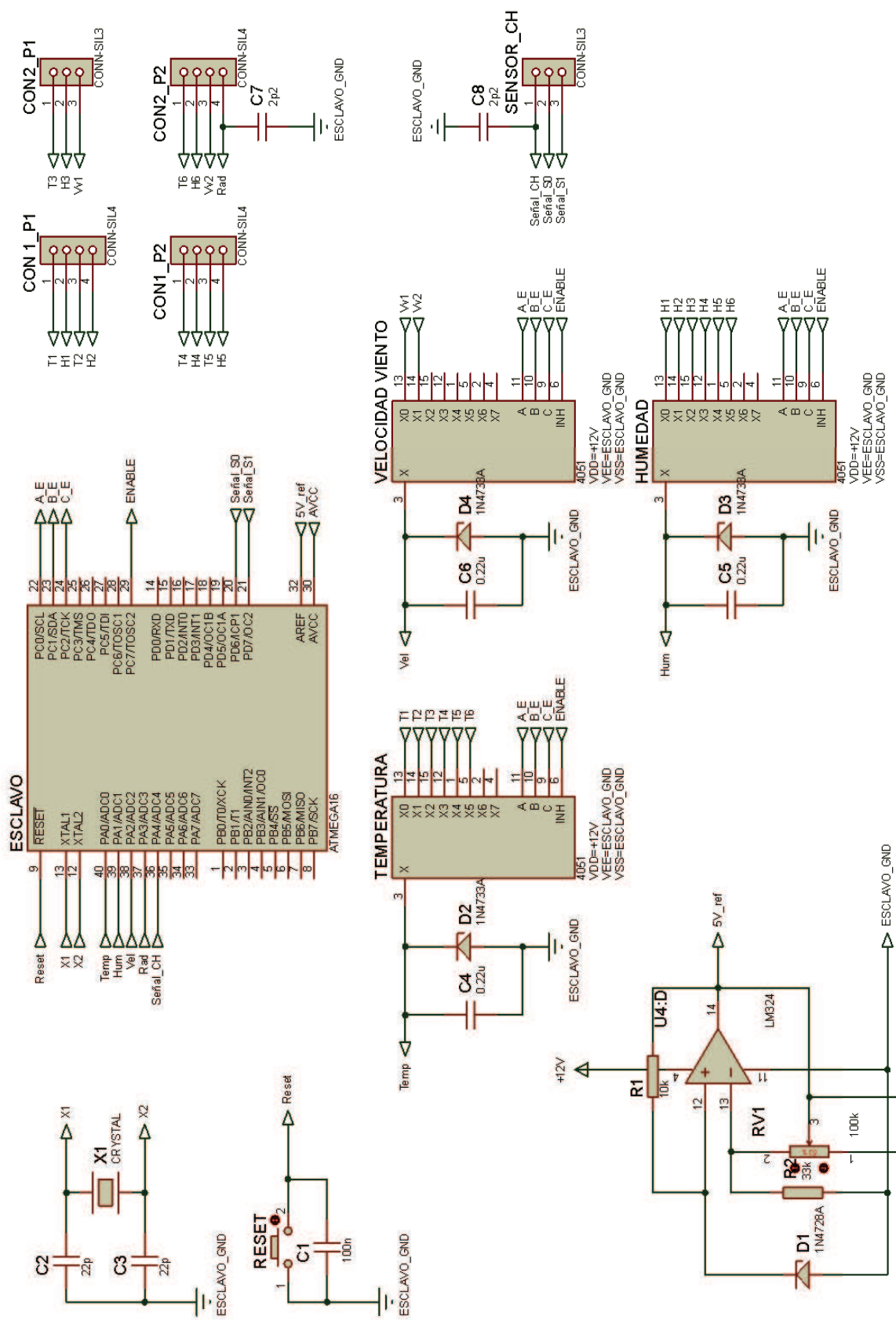
Si S0 = 1 y S1 = 1 entonces:

$$CH\% \geq 40$$

En la Figura 2.23 se indica el diagrama de conexión del sistema de adquisición, en donde los conectores representan las entradas de las señales de voltaje previamente acondicionadas.

Este diagrama tiene su propio circuito para generar un voltaje de referencia, que es conectado al pin de voltaje de referencia del microcontrolador; el cristal conectado al circuito es de 20 MHz, con el cual los procesos en el microcontrolador se hacen de forma más rápida; también cuenta con un circuito de reset.

Figura 2.23 Diagrama de conexión del Sistema de Adquisición



2.2.4. SUBSISTEMA DE VISUALIZACIÓN

Al ser un módulo didáctico utilizado para las prácticas del laboratorio, el secador de madera debe contar con un sistema en el cual se visualice los datos que el sistema de adquisición recoge.

Para este proceso se establecen dos puntos de visualización, el primero se localizará en las inmediaciones del secador de madera, es decir, se lo colocará en el gabinete metálico junto con los circuitos de acondicionamiento y de adquisición de datos, con el fin de permitirle al estudiante contar con sistema de medida que le ofrezca los datos en ese preciso instante; el segundo punto de visualización será en una computadora en la cual, mediante un HMI se verá los datos adquiridos por el sistema.

2.2.4.1. VISUALIZACIÓN A TRAVÉS DE UN LCD

Para la visualización a través de un LCD se implementó un circuito con un microcontrolador ATmega164p, el cual será el microcontrolador maestro y sirve para manejar el LCD y establecer la comunicación vía inalámbrica con el computador que se encuentra en el LEAEE.

Para poder observar los datos en el LCD se desarrolló un menú de visualización en el cual el estudiante que se encuentre realizando la práctica correspondiente al secador de madera podrá acceder a los datos de manera fácil y rápida.

En el circuito de visualización se encuentran tres pulsadores los cuales manejan el menú del LCD.

La interfaz implementada con el microcontrolador maestro cuenta con varias pantallas que de acuerdo a las indicaciones provistas en las mismas y al manejo de los pulsadores el usuario podrá movilizarse dentro de las pantallas del menú como desee, ya que en las diferentes pantallas se visualizará los datos de acuerdo a como los sensores se encuentran distribuidos en el secador de madera.

El LCD utilizado es el JHD539M8, que es un LCD de 16 columnas por 4 filas, y la distribución de pines se encuentra en la Tabla 2.21, en la cual se indica los pines que van a ser utilizados por el microcontrolador para su manejo.

Tabla 2.21 Distribución de pines para el manejo del LCD JHD593M8

Pines del microcontrolador maestro	Pines del LCD
PB0	Rs
PB1	E
PB2	D4
PB3	D5
PB4	D6
PB5	D7

Los 3 pulsadores conectados a este microcontrolador permiten el desplazamiento entre las pantallas que se generan en el LCD.

Son tres pulsadores: A, B, Enter, con los cuales se puede navegar por el menú de acuerdo a las indicaciones que van apareciendo en las distintas pantallas, la distribución de estos pines se detalla en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22 Distribución de pines para los pulsadores

Pines del microcontrolador maestro	Pulsadores
PC0	A
PC1	B
PC2	Enter

Como se mencionó antes el subsistema de visualización indica en las pantallas del LCD los datos que fueron recogidos por el subsistema de adquisición.

Para este proceso el microcontrolador esclavo del subsistema de adquisición envía los datos vía comunicación serial al puerto USART1 del microcontrolador

maestro del subsistema de visualización. La petición de datos por parte del microcontrolador maestro es aproximadamente cada minuto.

El microcontrolador maestro también procesa los datos que le envía el microcontrolador esclavo con las fórmulas descritas anteriormente y el valor calculado del sensor de contenido de humedad.

2.2.4.2. VISUALIZACIÓN A TRAVÉS DEL HMI

Los datos enviados por el microcontrolador maestro a través de comunicación inalámbrica sirven para que a través del HMI implementado en la computadora del laboratorio puedan ser visualizados, estos datos son procesados en tiempo real, es decir, mediante la configuración del HMI los datos pueden ser tratados para obtener gráficas del comportamiento del sistema, evolución del secado de la madera, o simplemente la visualización de los datos de una forma clara.

Este HMI también permite el almacenamiento de los datos para su posterior análisis, mediante la generación de reportes en los cuales se pueda realizar un análisis completo del secado de la madera.

Los datos son enviados al LEAEE por comunicación inalámbrica y para esto se utilizan módulos destinados para este propósito, la explicación de los módulos se detallará en el subcapítulo de transmisión.

Para poder enviar los datos de manera inalámbrica, el microcontrolador maestro mediante comunicación serial envía los datos a la tarjeta de transmisión del módulo de comunicación inalámbrica utilizando el puerto serial USART0.

En la Tabla 2.23 se indica los pines del microcontrolador maestro que son utilizados en la comunicación serial, al tener dos puertos de comunicación serial para este proyecto se optó en utilizar el USART1 para la comunicación maestro – esclavo y el puerto serial USART0 para la comunicación maestro – transmisión inalámbrica.

Para poder comunicar el microcontrolador maestro y la tarjeta de transmisión inalámbrica se implementa un circuito que permita la comunicación serial, en la cual se utiliza el circuito integrado MAX232 que es un convertidor de señales

RS232 a señales TTL o viceversa, es decir, señales que soporta el microcontrolador (0V – 5 V) a señales RS232 (+/- 7.5V) que son utilizadas por la tarjeta de comunicación inalámbrica.

Para este caso las señales que van a ser convertidas por el integrado son TXD0 y RXD0 correspondientes al puerto serial USART0 del microcontrolador maestro.

Tabla 2.23 Pines del microcontrolador para la comunicación

Pines del microcontrolador Maestro	Pines de comunicación
PD0 – RXD0	R1 – Max232
PD1 – TXD0	T1 – Max232
PD2 – RXD1	TXD0 - Esclavo
PD3 – TXD1	RXD0 - Esclavo

En la Figura 2.24 se indica el diagrama de conexión para el microcontrolador maestro, y en él se indican los elementos utilizados para la comunicación serial que se tiene entre el microcontrolador maestro y el microcontrolador esclavo, también la que se tiene entre el microcontrolador maestro y la tarjeta de transmisión inalámbrica.

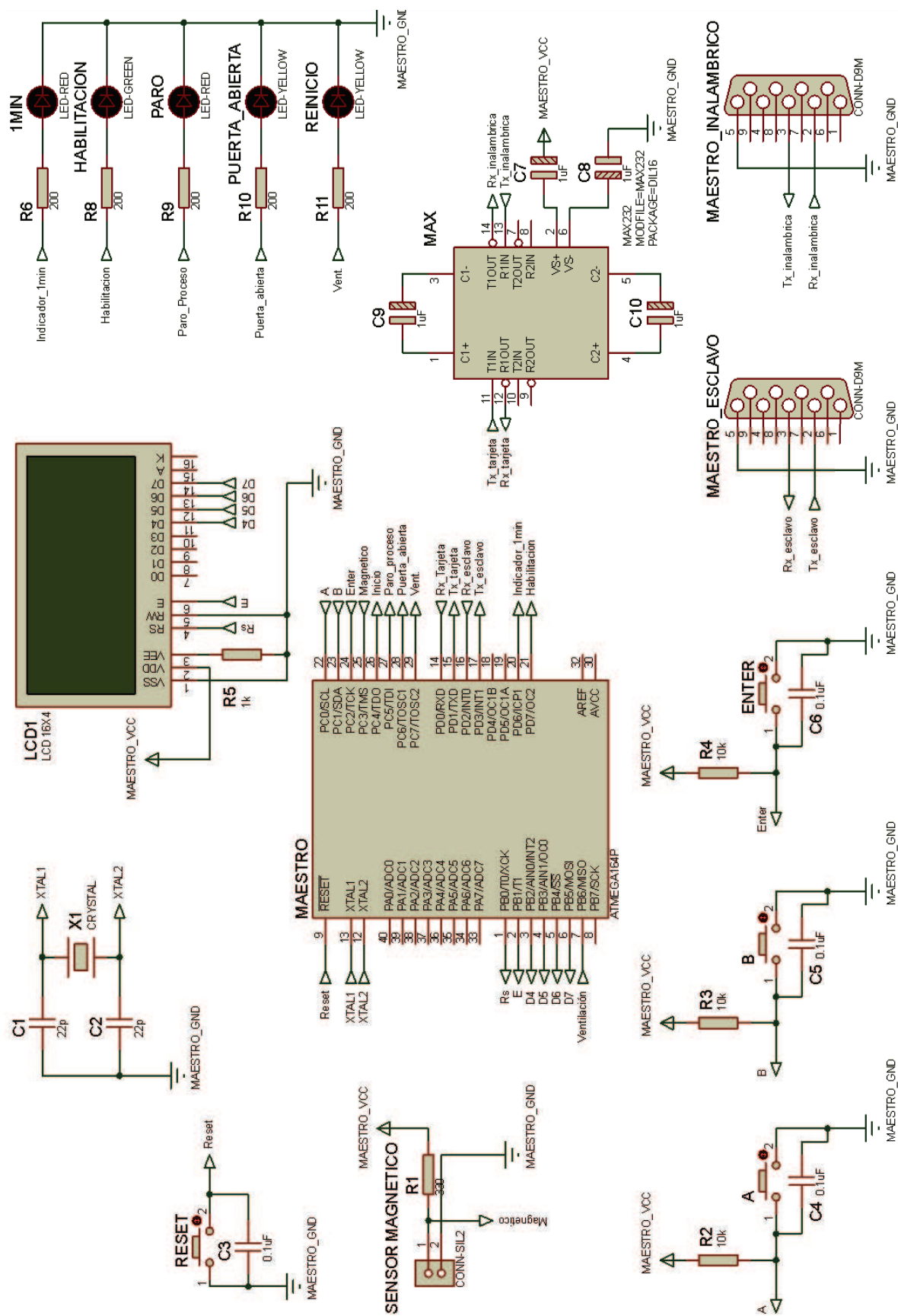
2.2.5. SUBSISTEMA DE CONTROL

El subsistema de control utiliza los datos adquiridos de los sensores que son procesados por el microcontrolador esclavo para establecer un control sobre los diferentes actuadores involucrados en el sistema con el fin de permitir que el secado se realice de la forma más eficiente.

En el sistema se han implementado varios controles que permiten que el proceso se interrumpa o finalice de acuerdo a las condiciones que se presenten mientras el prototipo está secando la madera.

A continuación se dará una explicación de la forma en la que se realiza este procedimiento.

Figura 2.24 Diagrama de conexión del microcontrolador maestro



Al ser un sistema en el cual se requiere que la temperatura, la humedad relativa y la velocidad de viento se mantengan dentro de la cámara de secado sin sufrir ningún cambio brusco, es necesario dotar al prototipo de un mecanismo que detecte el momento en el que la puerta de ingreso del producto se abre; esto se realiza mediante un sensor que detectará la apertura y mostrará en el LCD un aviso para que el usuario cierre la puerta; una vez detectada la puerta abierta se interrumpirá el proceso hasta que la puerta sea cerrada. El sensor utilizado para este propósito es un sensor magnético adaptado a la puerta del prototipo, la señal para el control está conectada a un pin del microcontrolador maestro.

En la Tabla 2.24 se indica el pin utilizado para la conexión.

Tabla 2.24 Distribución de pines para el Sensor Magnético

Pin del Microcontrolador maestro	Sensor
PC3	Magnético

Para poder manejar este sensor se implementó un circuito, el cual permite tener la señal en nivel lógico TTL, es decir, 0 lógico indica que la puerta está abierta y 1 lógico significa que la puerta está cerrada, el pin al que se va a conectar el sensor magnético se lo activa como entrada pull – up y se lo conecta directamente al microcontrolador maestro.

Otra parte importante del sistema de control es establecer en que momento debe finalizarse el proceso una vez que la madera haya alcanzado el contenido de humedad deseado. Para realizar este procedimiento el usuario deberá colocar el valor final del contenido de humedad como condición inicial del proceso, en el menú que se presenta en el LCD en donde el usuario podrá realizar esta acción usando los pulsadores. El microcontrolador maestro revisa el valor de contenido de humedad cada vez que se realice la petición de datos al microcontrolador esclavo y el momento en que llegue al valor seteado por el usuario se detendrá el proceso.

Para mejorar el secado es necesario contar con un control del flujo del aire dentro de la cámara, para esto es necesario colocar ventiladores dentro del prototipo y

mediante el control programado en el microcontrolador esclavo se podrá establecer el flujo de aire óptimo para un secado eficiente.

Debido a que el Secador Solar de Madera es un prototipo utilizado en el laboratorio para prácticas se considera permitir al estudiante que utilice ventilación natural o ventilación forzada, para que pueda observar el proceso de secado en ambas situaciones. Esto se detallará de forma más detenida en el Capítulo de Desarrollo del Software. Para habilitar tanto la ventilación forzada como para habilitar la adquisición de datos del microcontrolador esclavo se conectó dos pines del microcontrolador maestro con dos pines del microcontrolador esclavo los cuales dependiendo de las condiciones establecidas activarán permitiendo estas acciones, en la Tabla 2.25 se indican los pines a los que están conectados los microcontroladores para realizar estas acciones.

Tabla 2.25 Pines de Conexión de los Microcontroladores para activar la adquisición y la ventilación forzada.

Pines del Microcontrolador Maestro	Pines del Microcontrolador Esclavo	Acciones a realizar
PC4	PC4	Activación de la Adquisición de Datos
PB6	PC5	Activación de la Ventilación Forzada

Para este proyecto se considera como factores importantes en el manejo de los ventiladores la radiación solar y la temperatura que se encuentra en el interior de la cámara, es decir, dependiendo de la radiación solar la temperatura en el interior de la cámara cambia, a mayor radiación solar mayor la temperatura en el interior será. Tomando en cuenta este criterio se analiza cómo se comporta la temperatura al interior de la cámara. Si la temperatura en los puntos intermedios es casi igual a la de la entrada se puede decir que el flujo de aire es insuficiente, pero si se tiene que la temperatura a la salida no experimenta un descenso considerable con respecto a la entrada se puede decir que el flujo de aire está dimensionado en exceso y si estas temperaturas se mantienen constantes se puede decir que el aire utilizado no sirve para secar la madera. Tomando en cuenta estas condiciones de radiación solar y temperatura se realizarán el control de los ventiladores utilizando el microcontrolador esclavo. Se decidió utilizar dos

ventiladores de alimentación DC, controlados por los pines del microcontrolador esclavo correspondientes a las salidas PWM del TIMER1. En la Tabla 2.26 se indica la distribución de los pines del microcontrolador esclavo y en la Figura 2.25 se indica el circuito implementado para activar los ventiladores mediante el microcontrolador, este circuito permite tener un control del voltaje con el que están alimentados los ventiladores, la forma en la que se realiza el control es mediante la variación del ancho de pulso del PWM, es decir, con cada variación se tendrá diferentes voltajes de alimentación a los ventiladores.

Tabla 2.26 Distribución de pines para el control de los ventiladores

Pines del Microcontrolador esclavo	Ventiladores
PD4 – OC1B	Vent2
PD5 – OC1A	Vent1

En la Figura 2.26 se indica la ubicación de los ventiladores en el interior de la cámara de secado, uno de los ventiladores (**Vent1**) se encuentra en la salida, es decir, en la chimenea, mientras que el otro ventilador (**Vent2**) se encuentra ubicado en el techo de la cámara.

Figura 2.25 Circuito de Accionamiento de Ventiladores

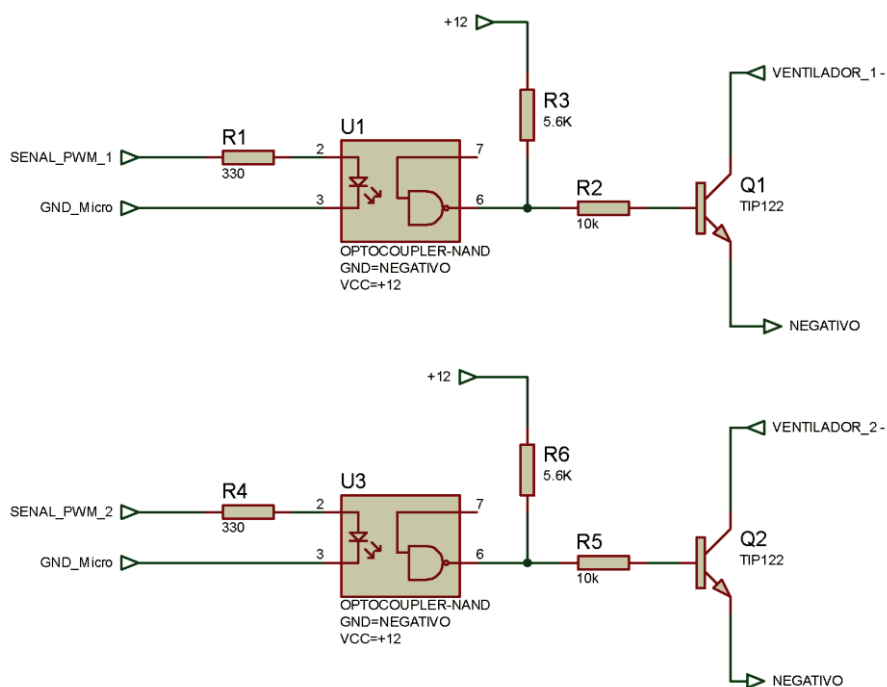
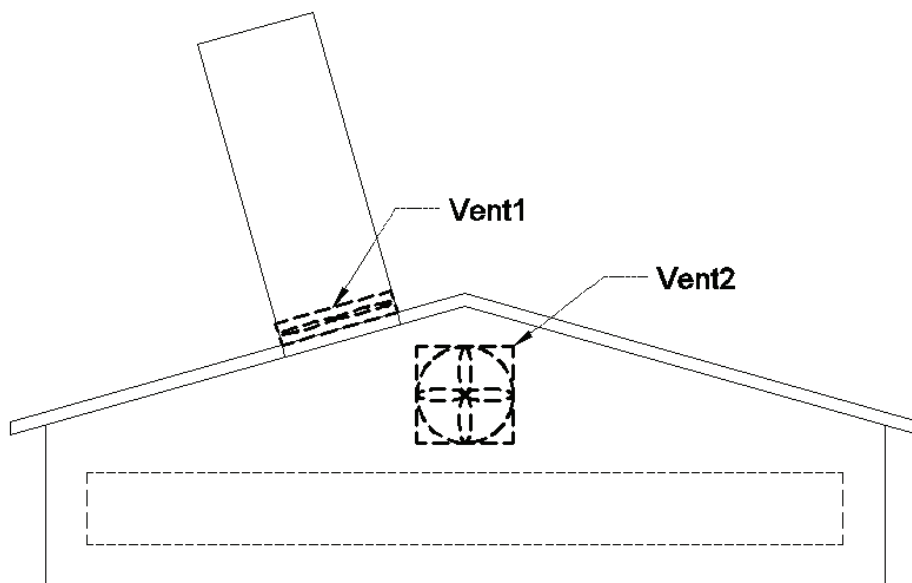


Figura 2.26 Ubicación de los Ventiladores en la Cámara de Secado



Como parte del control se incorpora al sistema LEDs indicadores, los cuales permiten al usuario conocer cómo se encuentra el proceso. Existen LEDs que indican si el proceso está habilitado o si el proceso está detenido.

También existe un LED que indica cuando el microcontrolador maestro solicita los datos al microcontrolador esclavo, en este caso este LED se prenderá cada 54 segundos. El sistema posee un LED que indica si la ventilación forzada es habilitada, es decir, si el LED se encuentra encendido quiere decir que la ventilación es forzada y si el LED se encuentra apagado la ventilación es natural. A continuación se indica la distribución de pines del microcontrolador maestro para el manejo de los LEDs (ver Tabla 2.27)

Tabla 2.27 Características de los módulos XBEE PRO 868

Pines del Microcontrolador maestro	LEDS
PC5	Proceso detenido
PC6	Puerta Abierta
PC7	Activación de Ventilación Forzada
PD6	Recolección de datos
PD7	Proceso Habilitado

Una vez que se inicia el proceso de recolección de datos se enciende el LED Proceso Habilitado, y cada 54 segundos se encenderá el LED de Recolección de Datos, los demás LEDs indican si la Puerta se encuentra Abierta, o si se habilita la ventilación forzada. El sistema también cuenta con un LED que indica si el proceso se ha detenido, es decir, el LED se encenderá cuando el contenido de humedad de la madera medido por el sensor es igual al seteado por el usuario.

2.2.6. SUBSISTEMA DE TRANSMISIÓN

Los datos proporcionados durante el proceso de secado no sólo deben ser visualizados en el LCD incorporado en el sistema, también deben ser enviados al LEAEE para su posterior procesamiento, para esto se implementó un sistema de transmisión inalámbrico ya que la distancia entre el Laboratorio y el lugar donde se encuentra el prototipo es considerable.

En este proyecto se utilizan los módulos XBEE PRO 868 de radio frecuencia, los cuales pueden transmitir datos vía inalámbrica a grandes distancias. Estos módulos trabajan en la banda de 868 MHz y pueden establecer una comunicación punto a punto o punto a multipunto, es decir, se puede conectar varios transmisores a un solo receptor. En la Tabla 2.28 se indican las características principales de estos módulos de transmisión.

Tabla 2.28 Características de los módulos XBEE PRO 868

Rendimiento	
Interior/Rango Urbano	550 m
Rango en línea de visión	40 km – 80 km
RF Data Rate	24 kbps
Sensibilidad del Receptor	-112 dBm
Date Rate	1200 – 230400 bps
Alimentación	
Voltaje	3 – 3.6 VDC

Corriente de operación	500 – 800 mA.
General	
Frecuencia de banda de operación	869.525 MHz

Fuente: Tomado de la hoja de datos del módulo [36].

Para utilizar los módulos de transmisión inalámbrica es necesario contar con tarjetas para el montaje de los mismos, estas tarjetas permiten tener una conexión USB o RS232 dependiendo del tipo de conector que se vaya a usar, para este proyecto se montó el módulo de transmisión en la tarjeta con el conector RS232 porque permite la comunicación con el microcontrolador, mientras que el módulo de recepción se monta en la tarjeta con conexión USB ya que ésta va a ir conectada al computador en el laboratorio.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE

Todos los sistemas que componen el Secador de Madera son manejados por dos microcontroladores ATmega164p. En este Capítulo se explicará los programas que se implementaron para este sistema mediante diagramas de flujo y se detallará la forma en la que se realiza el HMI.

Los programas se desarrollaron en las plataformas BASCOM AVR 2.0.7.5 y AVRStudio 5.1 programación en C, mientras que el HMI se lo realizó en el programa LabView versión 2009 de National Instruments.

3.1. DESARROLLO DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR MAESTRO

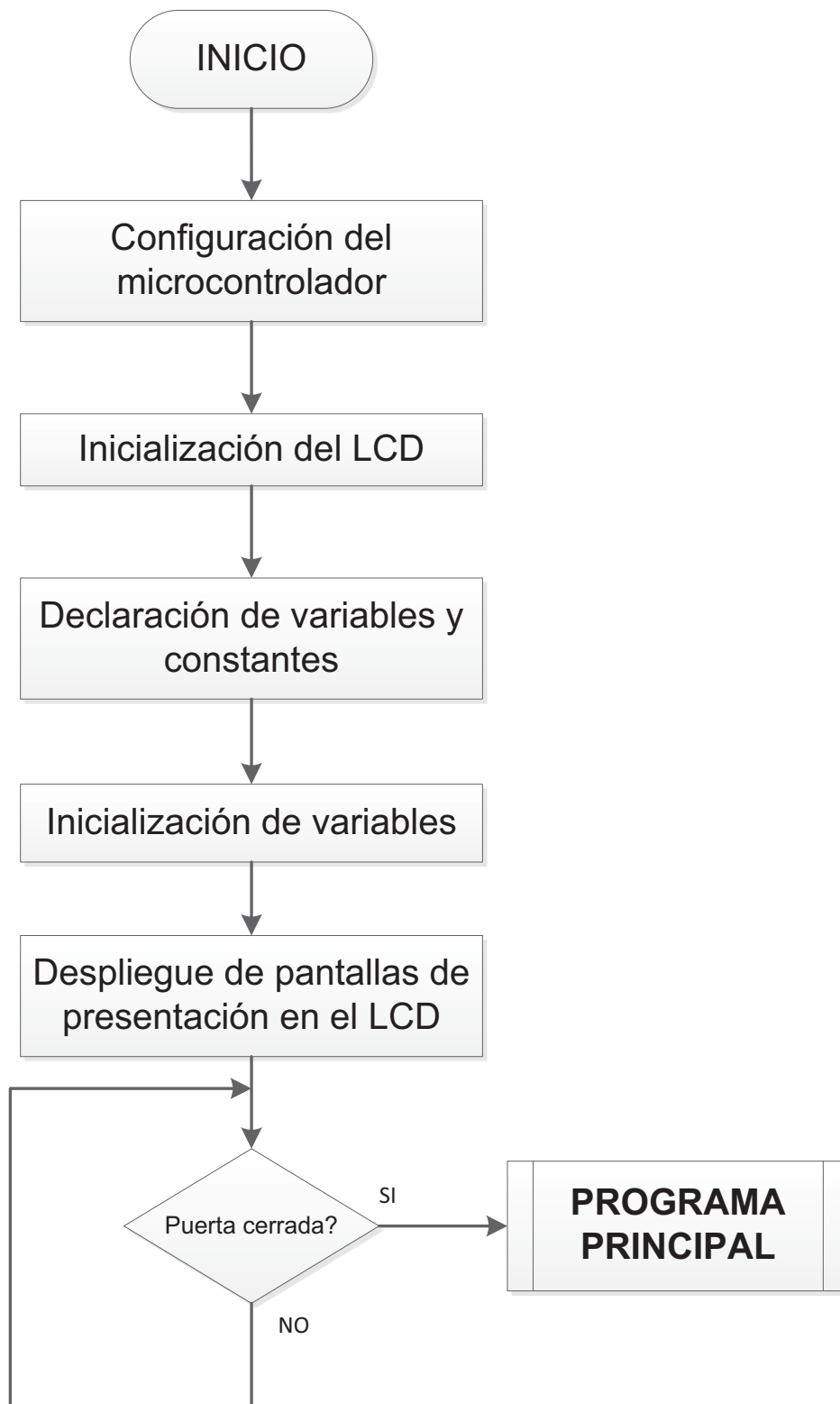
El microcontrolador maestro tiene como función principal la de visualizar los datos que adquiere el microcontrolador esclavo y enviarlos vía comunicación inalámbrica a la PC que se encuentra en el Laboratorio para su posterior procesamiento en el HMI.

También cumple con la función de permitir al usuario un manejo fácil del módulo, es decir, a través de los elementos que conforman el sistema el usuario puede supervisar el proceso de secado, e incluso interactuar en el mismo.

El programa desarrollado para el microcontrolador maestro se lo ha realizado en la plataforma BASCOM AVR 2.0.7.5, y consiste en mostrar en el LCD las pantallas, las cuales se van desplegando de acuerdo a las instrucciones que se detallan en las mismas.

A continuación se indican los diagramas de flujo del programa desarrollado.

En la Figura 3.1 se puede observar la forma en la que se configura el microcontrolador maestro para establecer tanto la comunicación con el microcontrolador esclavo, como con la tarjeta de transmisión inalámbrica, también se indica la configuración del LCD para la visualización.

Figura 3.1 Diagrama de flujo de Inicialización del Microcontrolador Maestro

A continuación se explica en lenguaje estructurado las tareas indicadas en el diagrama de flujo.

Configuración del microcontrolador:

Configuración del cristal externo a 20 MHz.

Configuración del puerto serial USART0 (comunicación con el sistema de transmisión inalámbrica) a una velocidad de 2400 bps, transmisión asíncrona, sin paridad, 1 bit de parada, 8 bits de datos.

Configuración del puerto serial USART1 (comunicación con el microcontrolador esclavo) a una velocidad de 19200, transmisión asíncrona, sin paridad, 1 bit de parada, 8 bits de datos.

Habilitación de la interrupción por recepción de los puertos serial USART0.

Configuración de puertos como entradas y/o salidas.

Fin Tarea**Inicialización del LCD:**

Inicialización del LCD 16x4 con bus de datos de 4 bits.

Fin Tarea**Inicialización de variables:**

Se determina el valor inicial de las siguientes variables: Finalización para establecer la comunicación inalámbrica, Contador para el valor inicial del contenido de humedad de la madera, Aux y Aux1 para la posición de las pantallas y Tiempo para el valor inicial de la generación de 1 minuto.

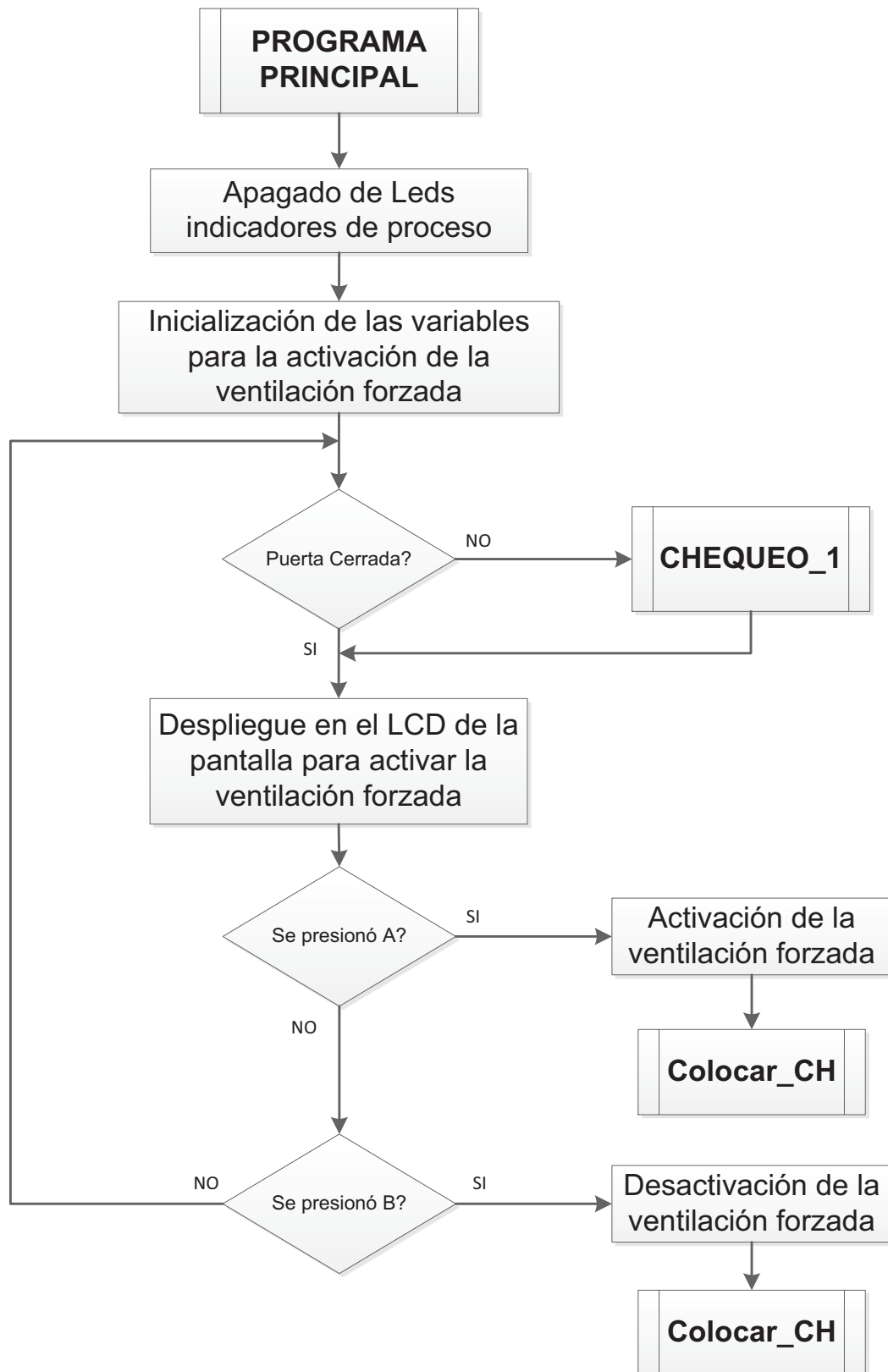
Fin Tarea

El proceso de Inicialización del microcontrolador termina después de que se hayan desplegado todas las pantallas de presentación y se haya revisado el estado en el que se encuentre la puerta de ingreso de la madera.

Para que el proceso continúe la puerta del módulo debe estar cerrada, caso contrario se indicará en el LCD una pantalla en la cual se visualiza el mensaje de que se debe cerrar la puerta para continuar con el proceso.

En la Figura 3.2 se indica el diagrama de flujo del segmento de programa PROGRAMA_PRINCIPAL, en el cual se solicita al usuario si éste desea activar o no la ventilación forzada, es decir, si desea que el proceso de secado utilice el sistema de control o no, esto se lo realiza para que el usuario pueda comparar el proceso de secado si en éste se utiliza los dos tipos de ventilación que son la ventilación natural (sistema de control apagado) y la ventilación forzada (sistema de control encendido).

Figura 3.2 Diagrama de flujo del Segmento de Programa PROGRAMA_PRINCIPAL



A continuación se indica en lenguaje estructurado las tareas del diagrama de flujo.

Apagado de LEDS indicadores de proceso:

Se apaga LED de Proceso Habilitado.
Se apaga LED de Puerta Abierta.
Se apaga LED de Paro de Proceso.
Se apaga LED de Ventilación Forzada.
Se apaga LED Indicador de 1 minuto.

Fin Tarea**Inicialización de las variables para la activación de la ventilación forzada:**

Se determina el valor inicial de las variables: Control para activar o desactivar la ventilación forzada y Ventilación para indicar en el HMI si está habilitada o no la ventilación forzada.

Fin Tarea**Activación de la ventilación forzada:**

Se coloca el pin de activación en bajo para indicar al microcontrolador esclavo que se ha activado la ventilación forzada.
Se determina el valor de la variable Ventilación igual a "a" para que el HMI reconozca que se ha activado la ventilación forzada.
Se enciende el LED Vent para indicar que la ventilación forzada está activada.

Fin Tarea**Desactivación de la ventilación forzada:**

Se coloca el pin de activación en alto para indicar al microcontrolador esclavo que se ha desactivado la ventilación forzada.
Se determina el valor de la variable Ventilación igual a "b" para que el HMI reconozca que se ha desactivado la ventilación forzada.
Se apaga el LED Vent para indicar que la ventilación forzada está desactivada.

Fin Tarea

En la pantalla que se despliega en el LCD se solicita al usuario que presione los pulsadores A o B, si presiona A se activará la ventilación forzada, es decir, se activará los ventiladores y funcionarán de acuerdo a las condiciones establecidas, si se presiona la tecla B no se activarán los ventiladores y el sistema sólo recolectará los datos para el análisis posterior.

Dentro de este diagrama de flujo se tiene una subrutina en la cual se chequea el estado de la puerta, si ésta se encuentra abierta se despliega en el LCD un mensaje indicando que se debe cerrar para continuar, en la Figura 3.3 se indica el diagrama de flujo de dicha subrutina.

Una vez que se ha seleccionado si se desea o no la ventilación forzada el programa salta al segmento de programa Colocar_CH en el cual el usuario deberá establecer el contenido de humedad al que desea secar las piezas de madera en la Figura 3.4 se indica el diagrama de flujo de este segmento de programa.

En esta subrutina se revisa el estado de la puerta de ingreso de la madera, ya que si está abierta el proceso no puede continuar y en el LCD se desplegará el mensaje de cerrar la puerta para continuar y se encenderá el LED indicador de Puerta Abierta, una vez cerrada la puerta regresará al punto del programa en el cual se quedó y el LED indicador se apagará.

Figura 3.3 Diagrama de Flujo de la Subrutina CHEQUEO_1

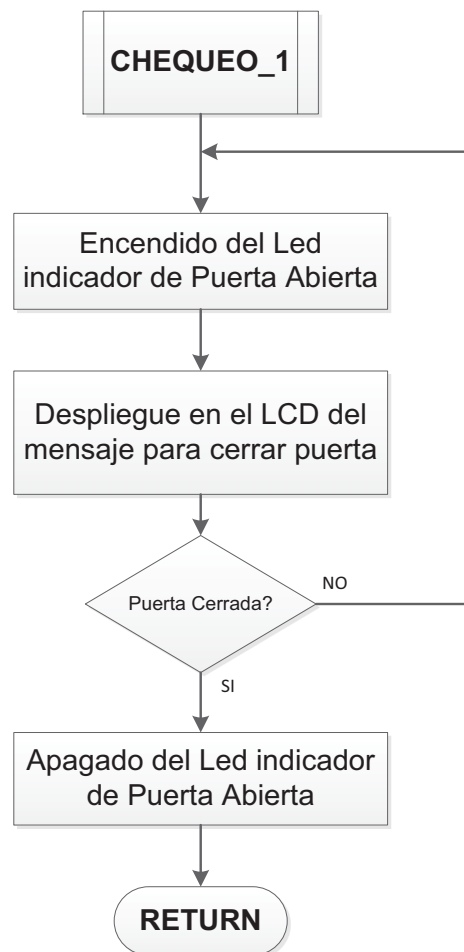
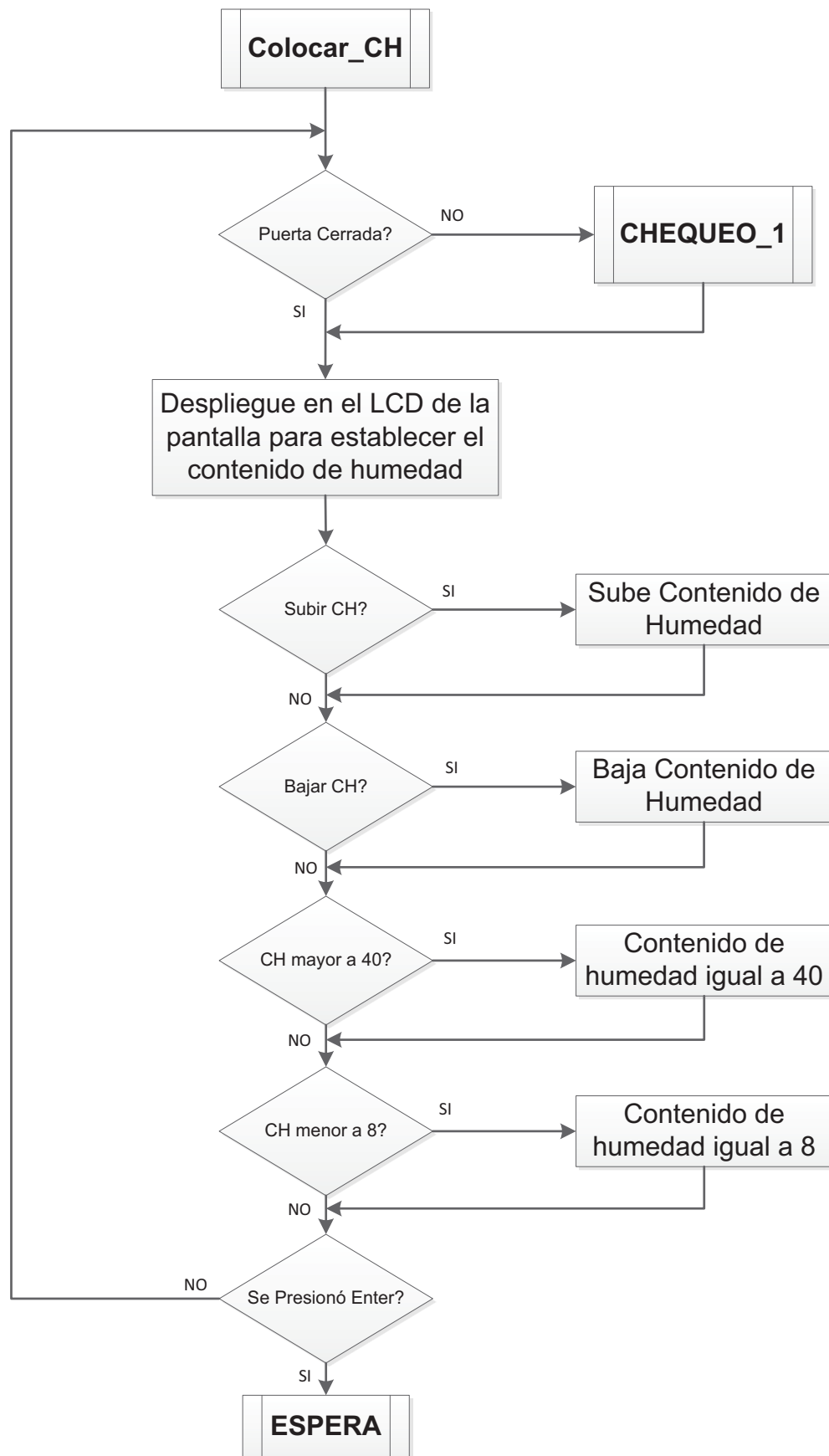


Figura 3.4 Diagrama de Flujo del Segmento de Programa Colocar_CH



A continuación se indica en lenguaje estructurado las tareas del diagrama de flujo.

Sube Contenido de Humedad:

Tecla A: Se aumenta el contenido de humedad.

Fin Tarea

Baja Contenido de Humedad:

Tecla B: Se disminuye el contenido de humedad.

Fin Tarea

Contenido de Humedad igual a 40:

Si el contenido de humedad es igual a 40% se deja en 40%.

Fin Tarea

Contenido de Humedad igual a 8:

Si el contenido de humedad es igual a 8% se deja en 8%.

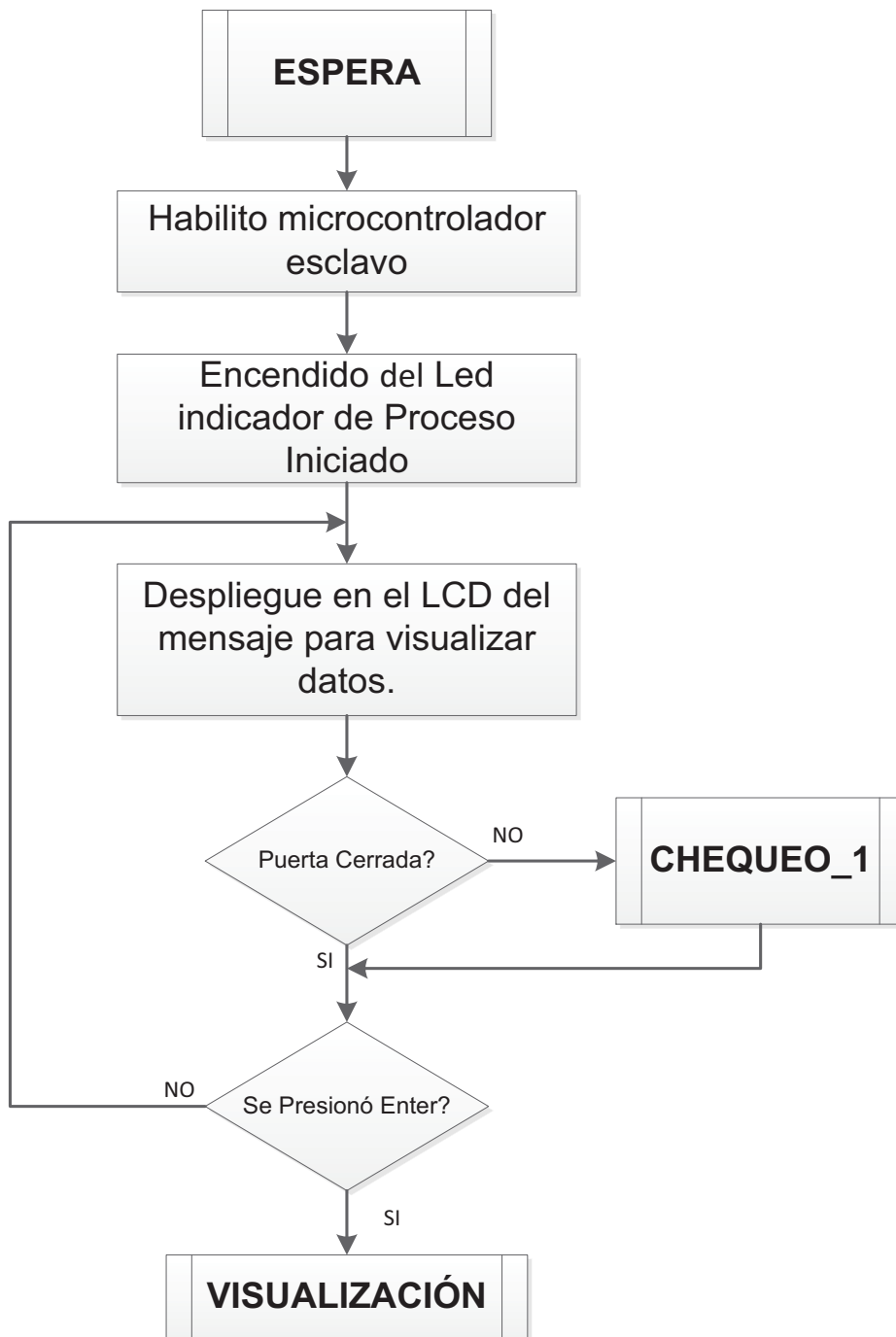
Fin Tarea

Al igual que en el diagrama de flujo de la figura 3.2 el segmento de programa chequea si la puerta de ingreso de la madera está abierta, si este es el caso se ejecutará el segmento de programa CHEQUEO_1 hasta que la puerta de ingreso se encuentre cerrada.

Luego de esto se despliega en el LCD el mensaje en el cual se solicita que se establezca el contenido de humedad y para esto se deben utilizar las teclas A y B de la placa del microcontrolador maestro para subir o bajar el contenido de humedad, una vez establecido el contenido de humedad al que se desea llegar el usuario deberá presionar la tecla ENTER con lo cual finaliza este segmento de programa.

Una vez finalizado esta parte del programa se ejecuta el segmento de programa ESPERA en el cual el microcontrolador maestro activa mediante un pin de conexión el microcontrolador esclavo para que éste comience con la adquisición de los datos; en la Figura 3. 5 se muestra el diagrama de flujo.

Figura 3.5 Diagrama de Flujo del Segmento de Programa ESPERA



Se detalla las tareas del diagrama de flujo en lenguaje estructurado.

Habilito microcontrolador esclavo:

Se coloca en alto el pin conectado al microcontrolador esclavo para habilitar la recolección de datos.

Fin Tarea

Al igual que en el anterior segmento de programa se revisa el estado de la puerta ya que si está abierta el proceso no puede continuar y salta a **Chequeo_1**.

Para continuar con el proceso de secado en el LCD se desplegará un mensaje que solicita se presione la tecla ENTER para continuar con la visualización de los datos adquiridos por el microcontrolador esclavo. Una vez realizado este paso se finaliza el segmento de programa ESPERA y se continúa con el segmento de programa VISUALIZACIÓN.

En este segmento se habilita la comunicación inalámbrica con la PC instalada en el LEAEE, para que el HMI solicite los datos al microcontrolador maestro.

También solicita al microcontrolador esclavo mediante comunicación RS232 por el puerto serial USART1 los datos adquiridos de los diferentes sensores para su posterior visualización.

Además se activa el TIMER1 para generar tiempo, en este caso de un minuto, tiempo en el cual el microcontrolador maestro volverá a pedir los datos al microcontrolador esclavo.

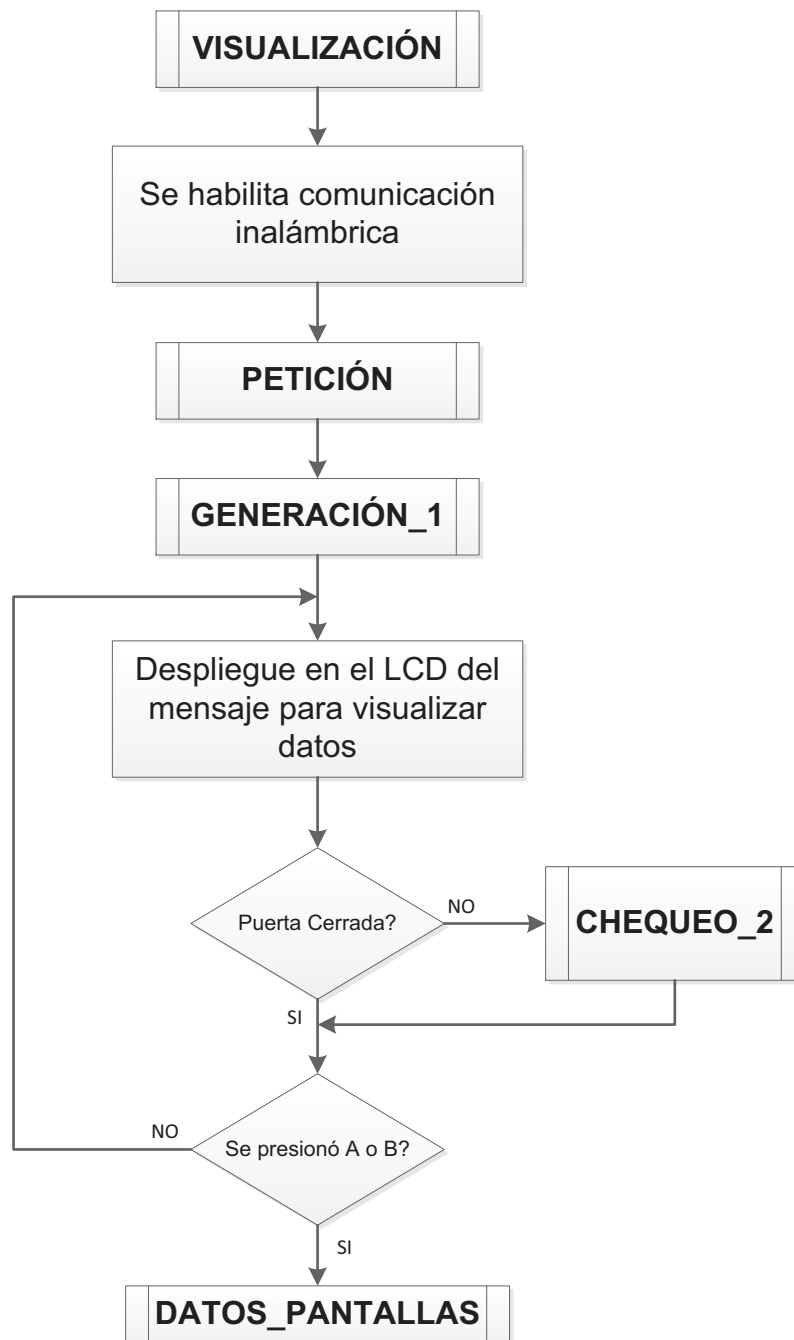
Este proceso se repite cada minuto; el diagrama de flujo se observa en la Figura 3.6.

Las funciones de pedir los datos al microcontrolador esclavo y activación del TIMER1 son subrutinas dentro de este segmento y se puede observar sus diagramas de flujo en la Figuras 3.7 y Figura 3.8 respectivamente.

Además de lo mencionado anteriormente se desplegará en el LCD dos mensajes, el primero indica al usuario cuales son las variables que se están midiendo en el sistema. Pasado un tiempo se despliega otro mensaje en el cual se pide al usuario que presione las teclas A o B para desplegar los datos.

Si se presiona la tecla A las pantallas que contienen los datos se moverán hacia la izquierda mientras que si se presiona la tecla B las pantallas se desplegarán hacia la derecha, dando al usuario un sistema de visualización en el cual pueda observar las distintas variables de acuerdo al lugar en el que se encuentren en el proceso.

Figura 3.6 Diagrama de Flujo del segmento de programa Visualización



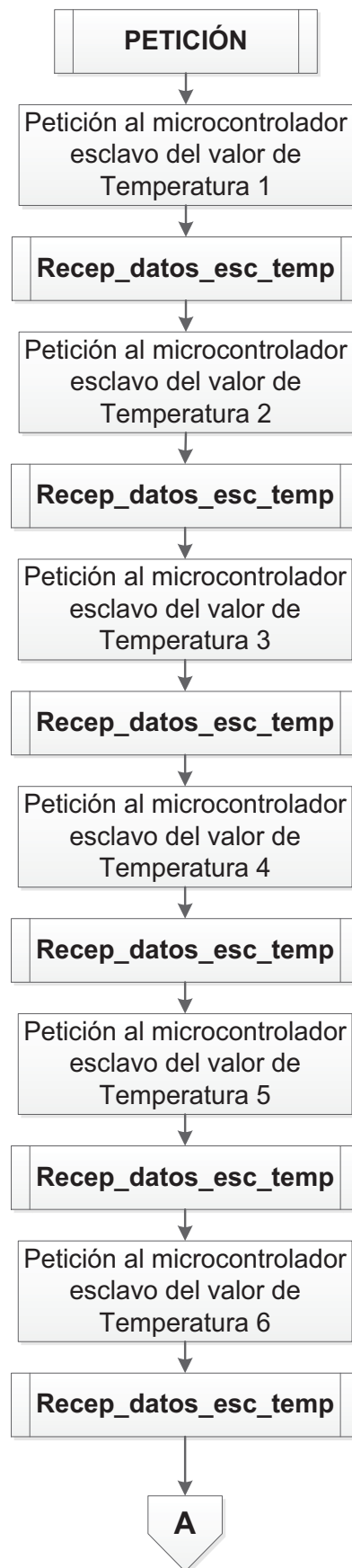
A continuación se detalla el diagrama de flujo en lenguaje estructurado.

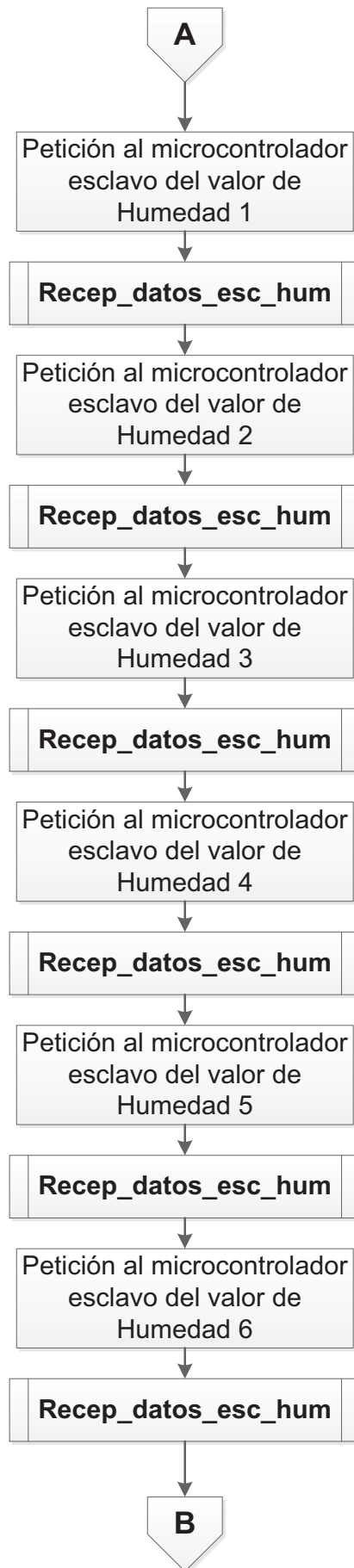
Se habilita comunicación inalámbrica:

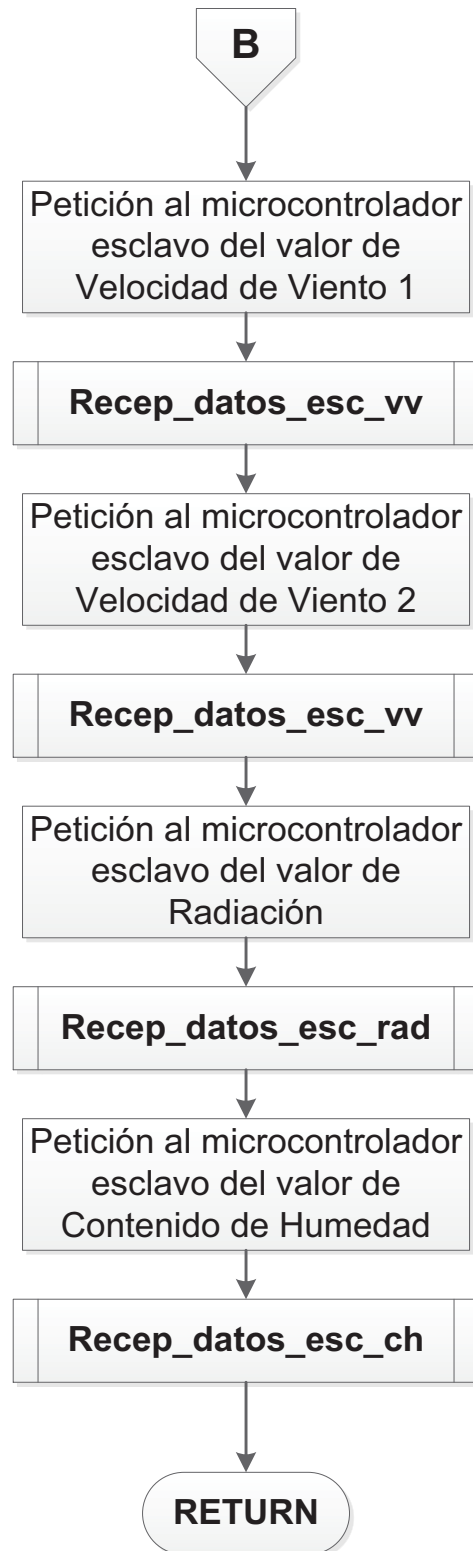
Se envía por el puerto serial USART0 la letra X para activar la adquisición de datos en el HMI.

Fin Tarea

Figura 3.7 Diagrama de flujo de la subrutina PETICION







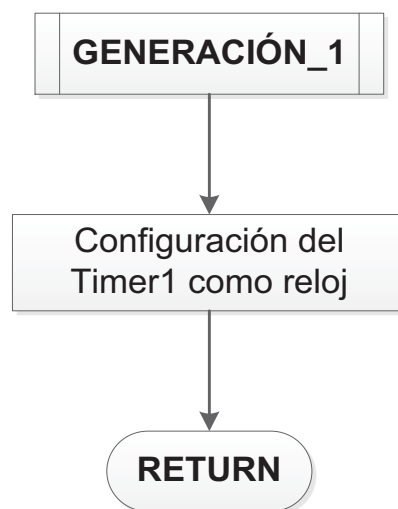
En la subrutina de petición de datos, el microcontrolador maestro solicita los datos al microcontrolador esclavo mediante el envío de letras, es decir, cada letra enviada es reconocida en el microcontrolador esclavo y a su vez éste envía el

dato del sensor correspondiente a esa letra, el valor que envía el microcontrolador esclavo es el número de bits correspondiente a la medición de cada sensor.

Esto lo hace para las 6 temperaturas, las 6 humedades, las 2 velocidades de viento, la radiación solar y el contenido de humedad de la madera, después de que el microcontrolador maestro solicita los datos salta a una subrutina en la cual los datos obtenidos son guardados en un arreglo de dimensión 6 para las temperaturas, para las humedades y en un arreglo de dimensión 2 para las velocidades de viento, mientras que los valores de contenido de humedad y radiación son guardados en sus respectivas variables. Esto se puede observar en las subrutinas **Recep_datos_esc_tem** (Figura 3.9), **Recep_datos_esc_hum** (Figura 3.10), **Recep_datos_esc_vv** (Figura 3.11), **Recep_datos_esc_rad** (Figura 3.12), **Recep_datos_esc_ch** (Figura 3.13).

A continuación se explica el diagrama de flujo de la subrutina **GENERACIÓN_1**, en la cual se configura el **TIMER1**.

Figura 3.8 Diagrama de flujo de la subrutina **GENERACIÓN_1**



Detallando en lenguaje estructurado:

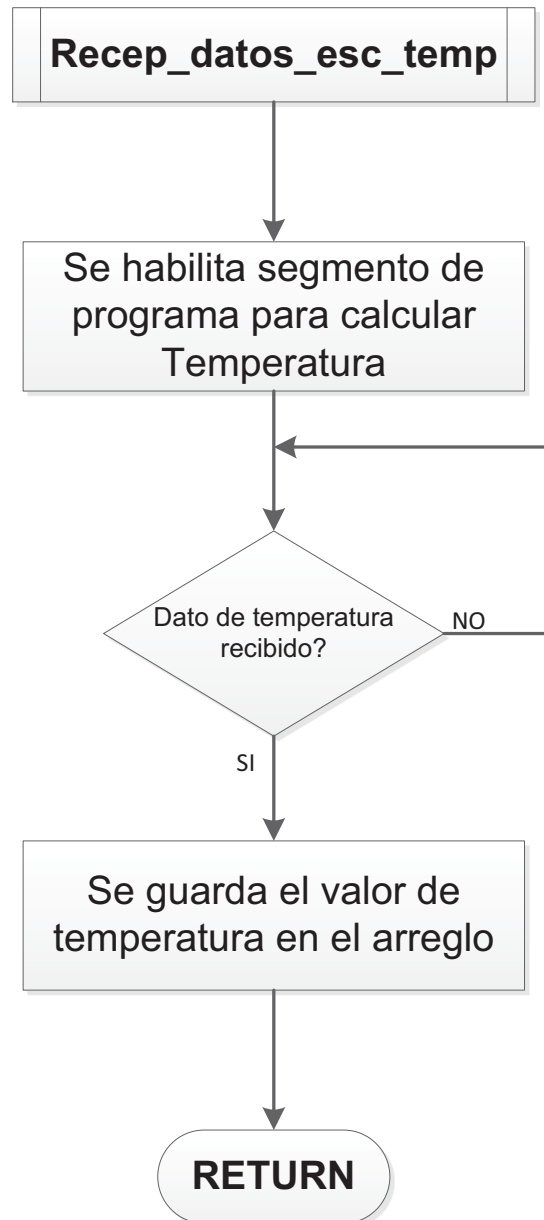
Configuración del Timer1 como reloj:

Se configura el **TIMER1** como Timer en modo **CTC**, con pre-escalador de 1024, se habilita la Interrupción por overflow del Canal A y se inicia el **OCR1A** con el valor 58600.

Fin Tarea

En los siguientes diagramas de flujo se indican las subrutinas de guardado de los valores obtenidos del microcontrolador esclavo.

Figura 3.9 Diagrama de Flujo de la subrutina para guardar los datos de temperatura.



Detallando en lenguaje estructurado se tiene:

Se habilita segmento de programa para calcular Temperatura:

Se asigna el valor de 1 a la variable Cte que permitirá calcular los valores de temperatura de acuerdo al valor obtenido del puerto serial.

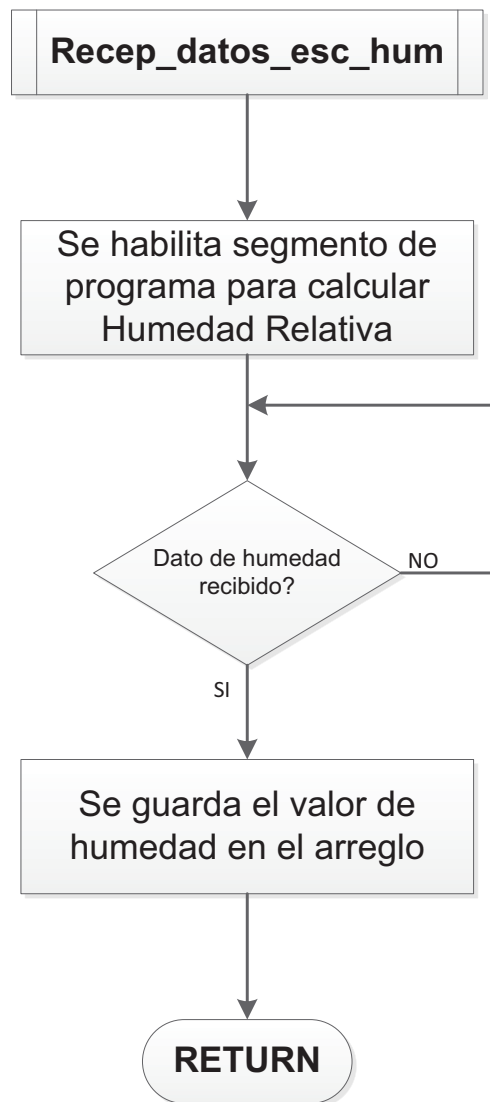
Fin Tarea

Se guarda el valor temperatura en el arreglo:

El valor obtenido de temperatura se guarda en el arreglo de Temperaturas.

Fin Tarea

Figura 3.10 Diagrama de flujo de la subrutina para guardar los datos de humedad



Detallando en lenguaje estructurado se tiene:

Se habilita segmento de programa para calcular Humedad Relativa:

Se asigna el valor de 1 a la variable Chu que permitirá calcular los valores de humedad relativa de acuerdo al valor obtenido del puerto serial.

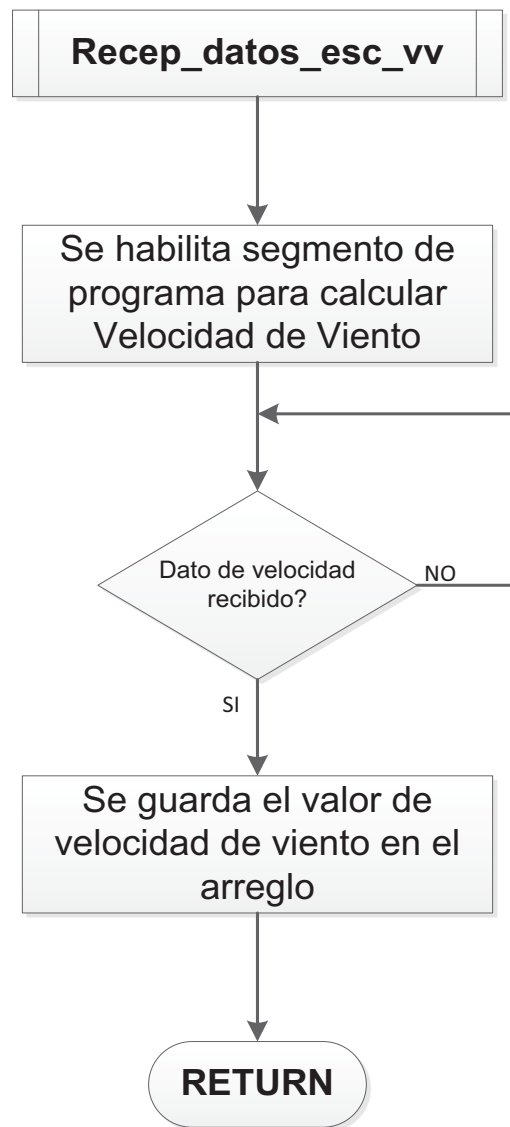
Fin Tarea

Se guarda el valor de humedad en el arreglo:

El valor obtenido de humedad se guarda en el arreglo de Humedades.

Fin Tarea

Figura 3.11 Diagrama de flujo de la subrutina para guardar los datos de Velocidad de Viento



Detallando en lenguaje estructurado se tiene:

Se habilita segmento de programa para calcular Velocidad de Viento:

Se asigna el valor de 1 a la variable Cv_v que permitirá calcular los valores de velocidad de viento de acuerdo al valor obtenido del puerto serial.

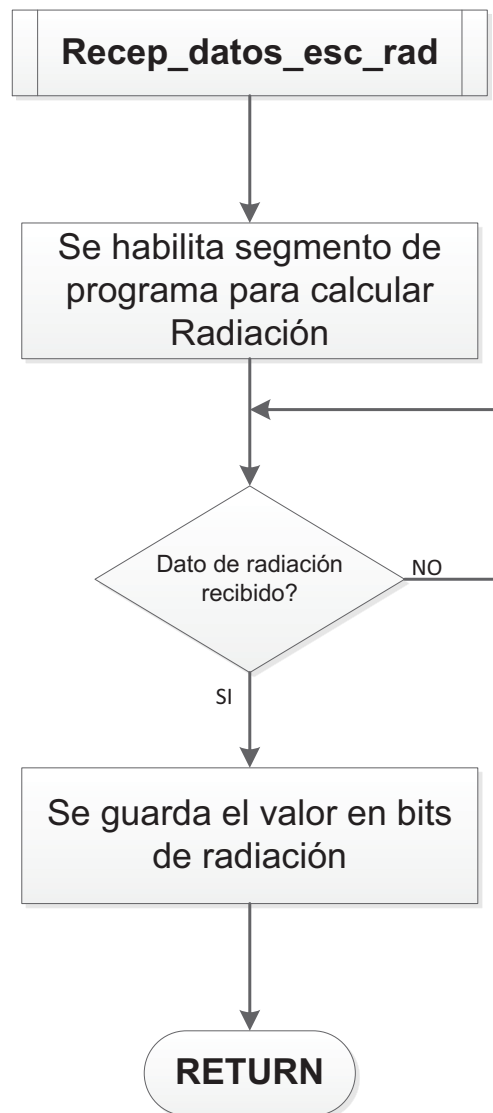
Fin Tarea

Se guarda el valor velocidad de viento en el arreglo:

El valor obtenido de humedad se guarda en el arreglo de Velocidades.

Fin Tarea

Figura 3.12 Diagrama de flujo de la subrutina para guardar el dato de Radiación Solar



Detallando en lenguaje estructurado se tiene:

Se habilita segmento de programa para calcular Radiación Solar:

Se asigna el valor de 1 a la variable Crad que permitirá calcular los valores de radiación de acuerdo al valor obtenido del puerto serial.

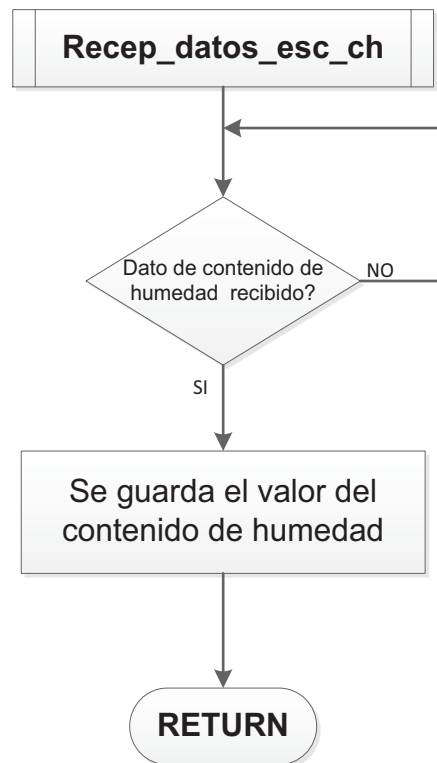
Fin Tarea

Se guarda el valor radiación:

El valor obtenido de radiación se guarda en variable Radiación.

Fin Tarea

Figura 3.13 Diagrama de flujo de la subrutina para guardar el dato de Contenido de Humedad de la Madera



Detallando en lenguaje estructurado se tiene:

Se espera hasta que el dato de contenido de humedad haya llegado.

Se guarda el valor de contenido de humedad:

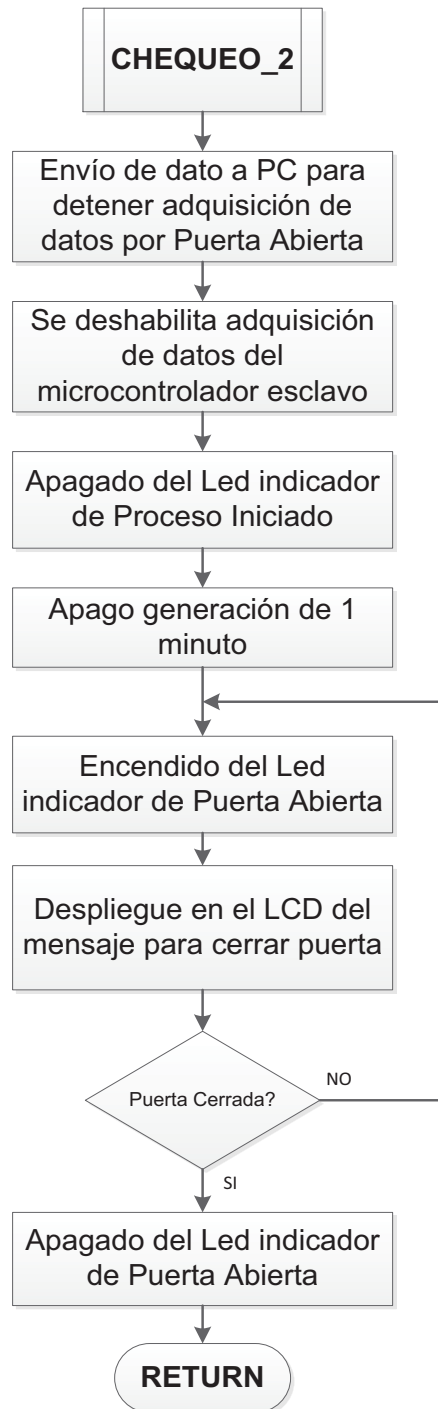
El valor obtenido de Contenido de Humedad se guarda en la variable Cont_Hum.

Fin Tarea

Dentro del segmento de programa VISUALIZACIÓN se chequea el estado de la puerta de ingreso de la madera y si está abierta se ejecuta la subrutina CHEQUEO_2, en la Figura 3.14 se puede observar el diagrama de flujo de esta subrutina.

En esta subrutina se procede a detener el proceso de adquisición de datos y a informar al usuario que el proceso se detuvo ya que si la puerta se abre puede influenciar en los datos que se han obtenido hasta ese momento, perjudicando así el posterior análisis que se realice.

Figura 3.14 Diagrama de Flujo de la subrutina CHEQUEO_2



En lenguaje estructurado se tiene:

Envío de dato a PC para detener adquisición de datos por Puerta Abierta:

Se envía la letra Y a la PC para que se pare el proceso debido a que la puerta se encuentra abierta.

Fin Tarea**Se deshabilita adquisición de datos del microcontrolador esclavo:**

Se coloca en 1 la variable Inicio para indicar al microcontrolador esclavo que ya no se desea recoger datos.

Fin Tarea**Apago generación de 1 minuto:**

Se coloca en 0 los registros TCCR1A, TCCR1B, OCR1A para desactivar el TIMER1.

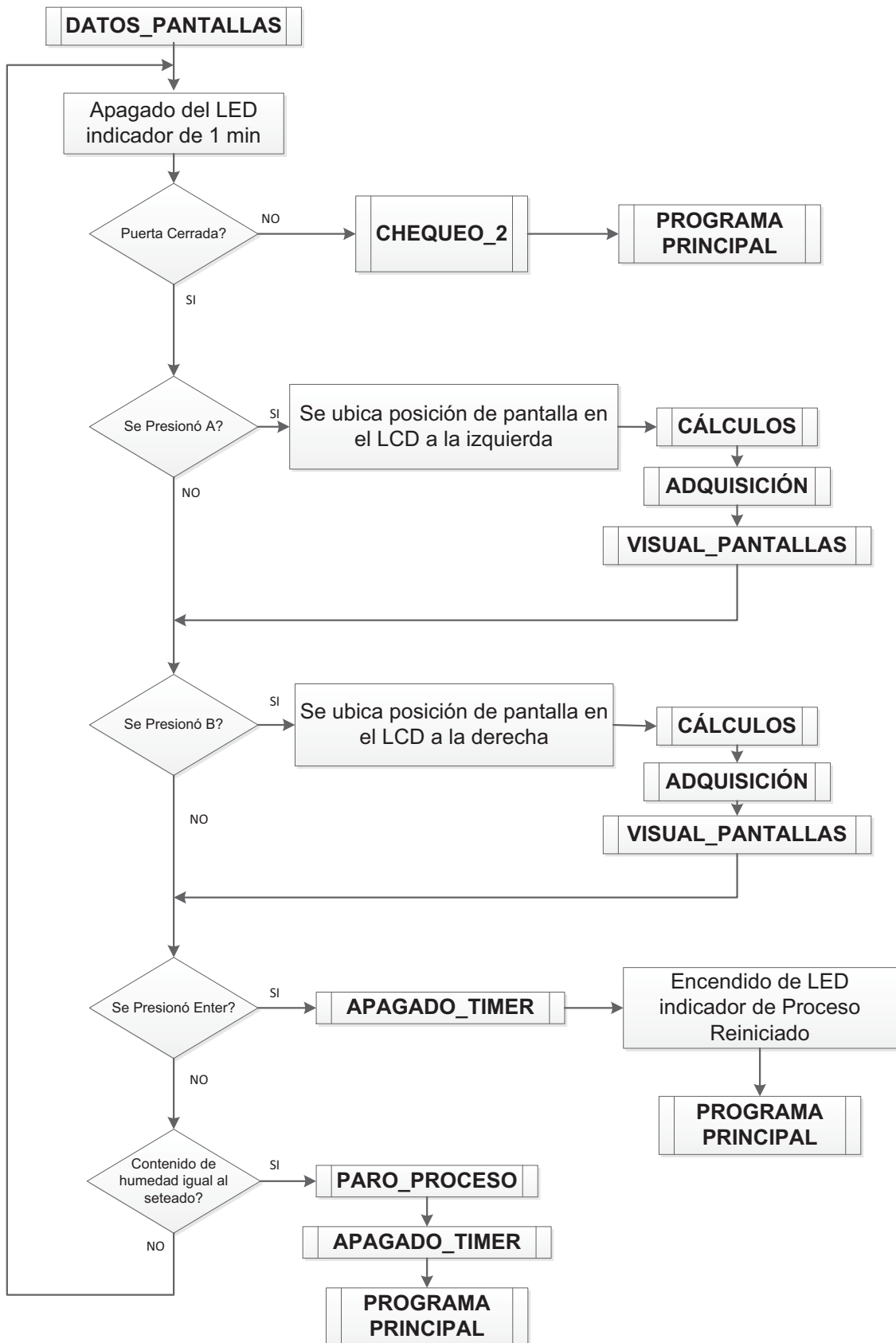
Fin Tarea

Después de ejecutar las subrutinas antes mencionadas el segmento de programa VISUALIZACIÓN termina cuando el usuario haya presionado las teclas A o B, con lo cual se da paso al siguiente segmento de programa en el cual se muestra los datos obtenidos en diferentes pantallas.

En la Figura 3.15 se puede observar el diagrama de flujo del segmento de programa DATOS_PANTALLAS.

Este segmento de programa permite visualizar los datos obtenidos en distintas pantallas, las cuales se despliegan cada vez que se presione las teclas A o B, si se presiona la tecla B las pantallas se despliegan hacia adelante tomando como referencia los valores del Colector como la pantalla inicial, luego se desplegarán las pantallas para los valores de Medio Ambiente, Entrada de la Cámara, Puntos Intermedios de la Cámara, Salida de la Cámara, datos de Radiación y Contenido de Humedad de la madera y por último la pantalla en la que se da la opción al usuario de detener la Adquisición de los datos; al presionar la tecla A las pantallas se despliegan hacia atrás, es decir se toma como referencia la pantalla que contiene los valores del Colector y se desplegará la pantalla con el mensaje para detener la Adquisición de los datos y así sucesivamente.

**Figura 3.15 Diagrama de flujo del segmento de programa
DATOS_PANTALLAS**



Detallando el diagrama de flujo en lenguaje estructurado.

Se ubica posición de pantalla en el LCD a la izquierda:

Si se presionó la Tecla A se incrementa la variable Aux para seleccionar la posición de la pantalla en el LCD.

Fin Tarea

Se ubica posición de pantalla en el LCD a la izquierda:

Si se presionó la Tecla B la variable Aux disminuye con lo cual se selecciona la posición de la pantalla en el LCD.

Fin Tarea

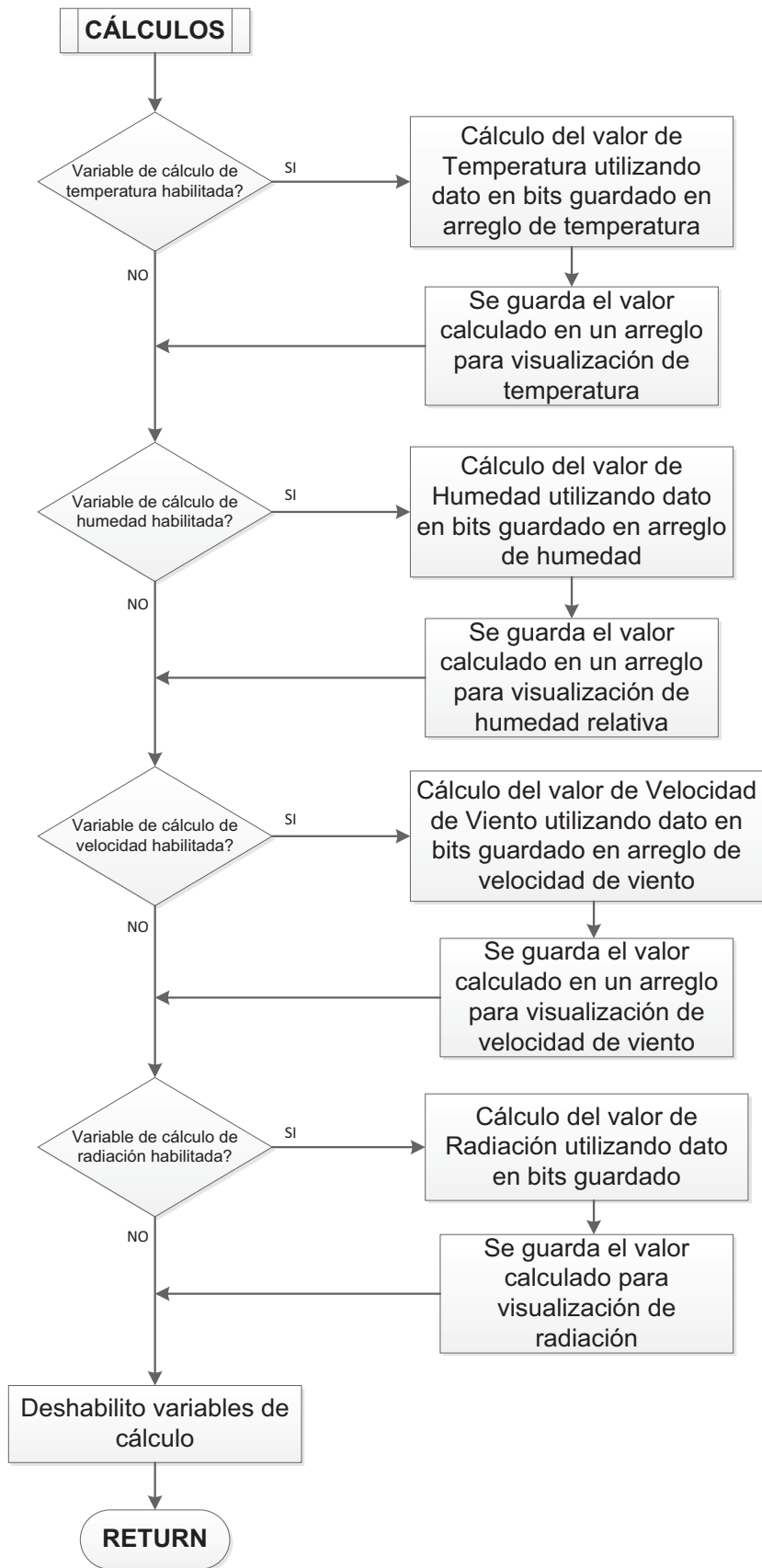
En la pantalla que se indica al final de la visualización de los datos se puede observar un mensaje en el cual se da la opción al usuario para detener el proceso de adquisición de datos si se presiona la tecla ENTER, con esto el proceso de secado se detendrá y se ejecutará la subrutina APAGADO_TIMER.

Para poder visualizar los valores de los sensores en el LCD es necesario realizar los cálculos de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación, ya que los datos obtenidos del microcontrolador esclavo están en bits, por lo que se necesita transformar ese valor a voltaje y así realizar los cálculos para tener el valor real, por lo que en este segmento de programa se recurre a la subrutina CÁLCULOS (ver Figura 3.16), los valores antes calculados son guardados en arreglos por lo que es necesario ubicarlos en variables para la visualización y se ejecuta la subrutina ADQUISICIÓN (ver Figura 3.17).

La visualización de los valores de los sensores montados en el sistema es continua, es decir, siempre se podrá visualizar los datos a menos que se haya presionado la tecla ENTER o el valor del contenido de humedad de la madera sea igual al establecido por el usuario en cuyo caso el proceso se detendrá y se ejecutará la subrutina PARO_PROCESO (ver Figura 3.20).

En este segmento de programa también se chequea el estado de la puerta y si está abierta se ejecutará la subrutina CHEQUEO_2, reiniciando el proceso de secado.

Figura 3.16 Diagrama de flujo de la subrutina CÁLCULOS



En las subrutinas de recepción de datos se colocó en 1 las variables Cte, Chu, Cvv, Crad. Estas variables permiten que este segmento de programa calcule los valores de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación respectivamente, es decir, que si estas variables no son puestas en 1 no se hará los cálculos respectivos.

Los valores obtenidos de los cálculos son guardados en diversos arreglos; se tiene un arreglo para los valores calculados de temperatura, para los valores calculados de humedad relativa, para los valores calculados de velocidad de viento y una variable para el cálculo de la radiación, se realiza esto para poder manipular de una forma más sencilla estos valores, una vez realizado los cálculos se deshabilita las variables Cte, Chu, Cvv, Crad y la subrutina finaliza.

Después de que la subrutina CÁLCULO fue ejecutada se inicia con otra subrutina llamada ADQUISICIÓN y su diagrama de flujo se observa en la Figura 3.17, y una vez finalizada esta subrutina se ejecuta la subrutina VISUAL_PANTALLAS cuyo diagrama de flujo se observa en la Figura 3.18.

En estas subrutinas se chequea el estado de la variable Aux, dependiendo del valor en el que se encuentre ésta se escogerá la pantalla de visualización (VISUAL_PANTALLAS) y por lo tanto que variables van a ser visualizadas en esa pantalla (ADQUISICIÓN).

La subrutina ADQUISICIÓN permite colocar los valores calculados y guardados en los distintos arreglos de la subrutina CÁLCULOS en las variables respectivas para la visualización de los mismos.

Mientras que en la subrutina VISUAL_PANTALLAS se selecciona la pantalla para visualizar los datos calculados.

Una vez terminadas estas subrutinas se regresa al segmento de programa DATOS_PANTALLAS y este segmento de programa se ejecuta hasta que se presione las teclas A o B o ENTER, si se presiona las teclas A o B en el LCD se despliegan las diferentes pantallas con los distintos valores calculados y si se presiona la tecla ENTER se reiniciará el proceso.

Figura 3.17 Diagrama de flujo de la subrutina ADQUISICIÓN

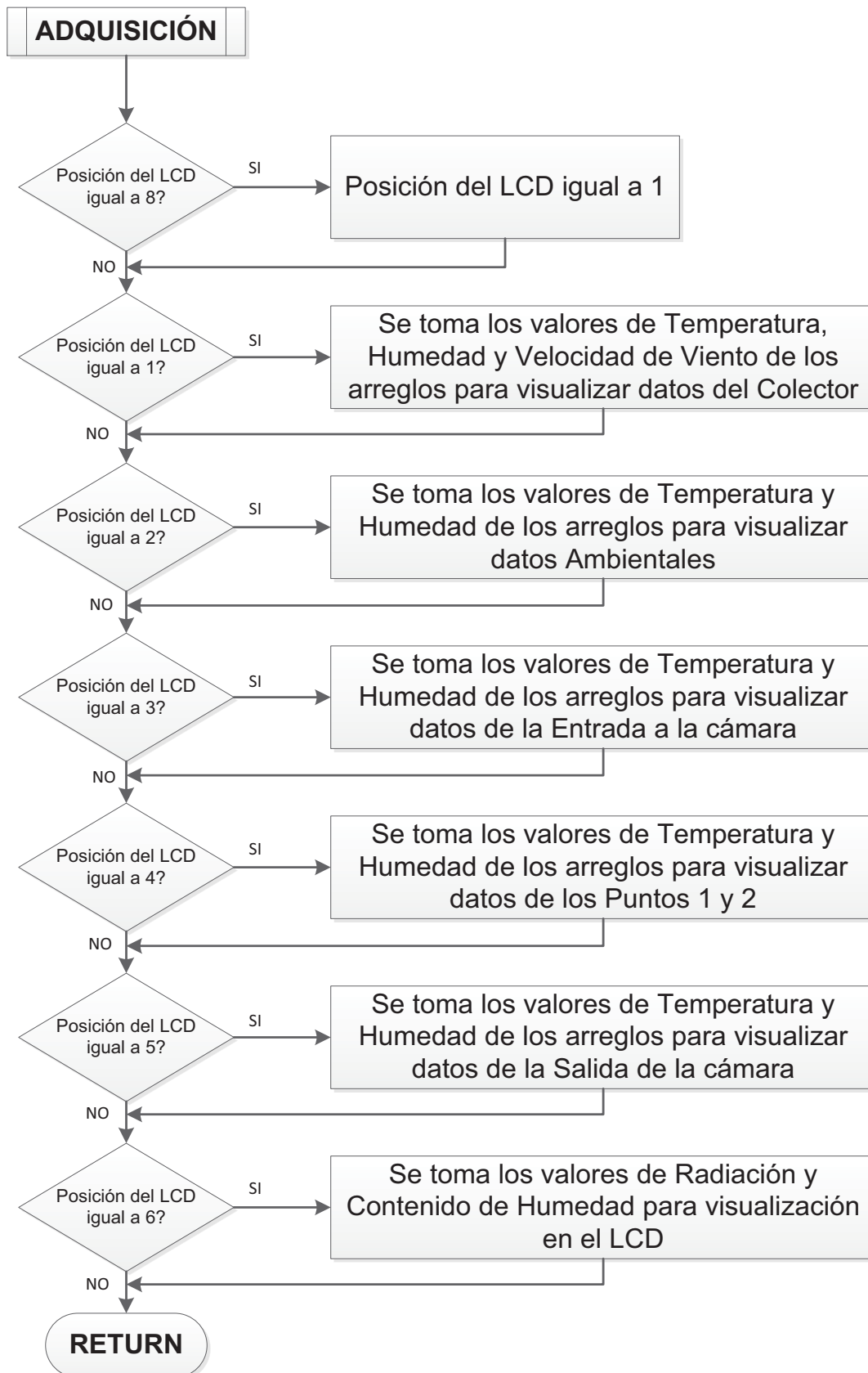
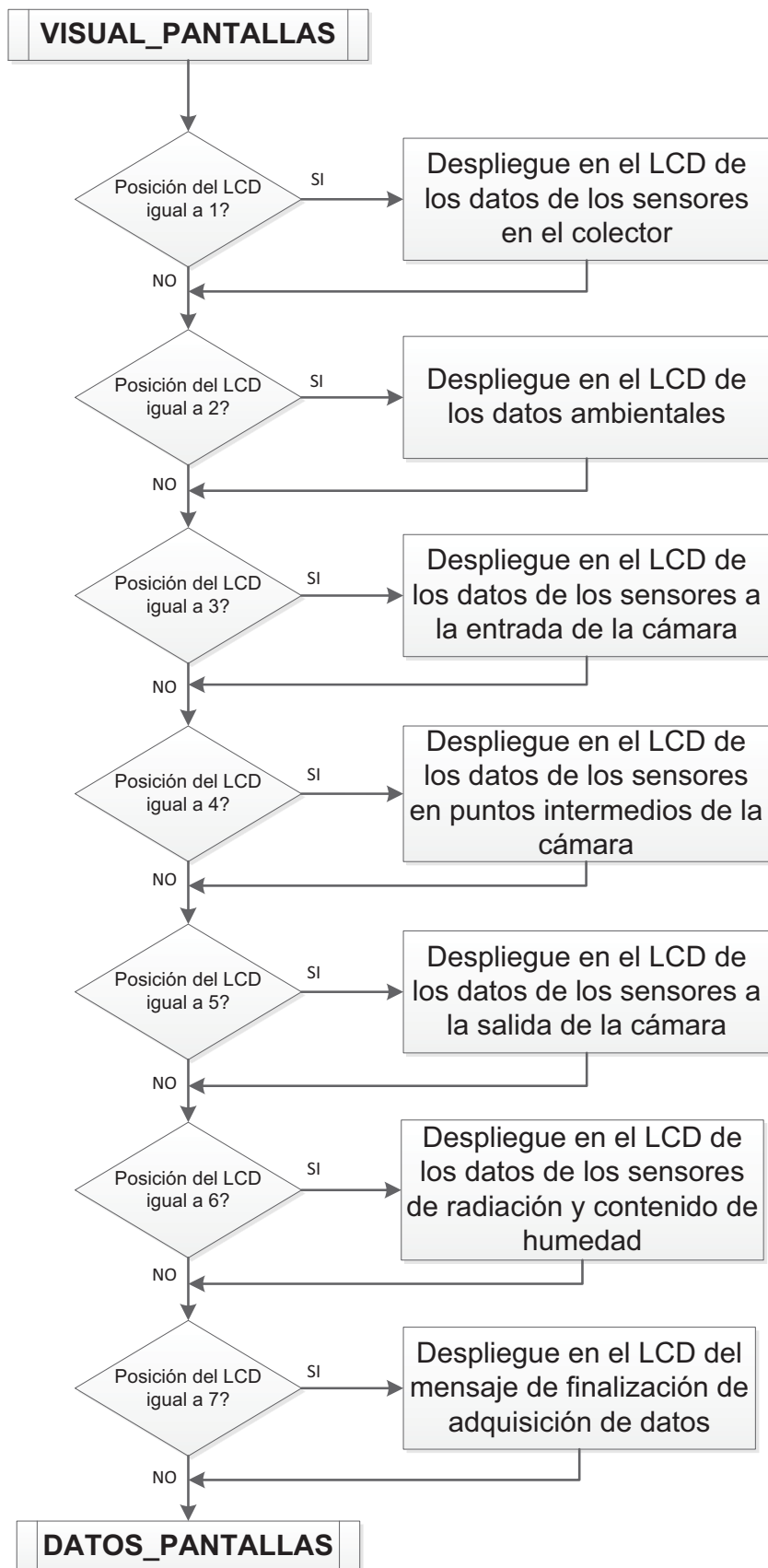


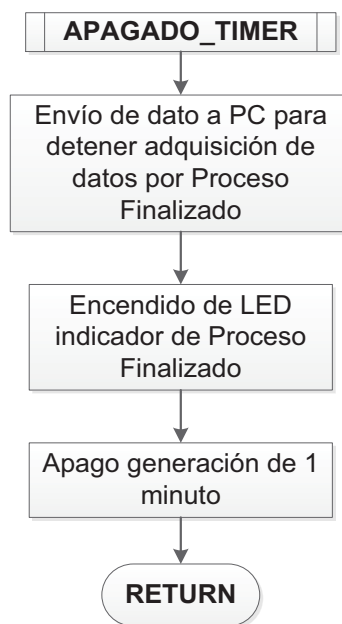
Figura 3.18 Diagrama de flujo de la subrutina VISUAL_PANTALLAS



Existen tres maneras de parar el proceso de recolección de datos: la primera es si la puerta de ingreso se abre, si ocurre esta condición se ejecuta la subrutina CHEQUEO_2 (ver Figura 3.14), la segunda es que el usuario decida detener el proceso presionando la tecla ENTER, si ocurre esta condición se ejecuta la subrutina APAGADO_TIMER (ver Figura 3.19), y la tercera es si el contenido de humedad medido en la madera es igual al seteado por el usuario, si ocurre esta condición se ejecuta la subrutina PARO_PROCESO (ver Figura 3.20).

En la subrutina APAGADO_TIMER se detiene la generación de un minuto y se envía a la PC un dato que indica que el proceso ha finalizado, también se indica que el proceso está detenido porque se enciende el LED indicador de Paro de Proceso.

Figura 3.19 Diagrama de flujo de la subrutina APAGADO_TIMER



En lenguaje estructurado se tiene.

Envío de dato a PC para detener adquisición de datos por Proceso Finalizado:

Se envía la letra Z por el puerto serial USART0 al HMI para indicar que el proceso de recolección de datos ha finalizado.

Se deshabilita al microcontrolador esclavo colocando un 1 en el pin PC4 correspondiente a la activación de la adquisición de datos.

Fin Tarea

Apago generación de 1 minuto:

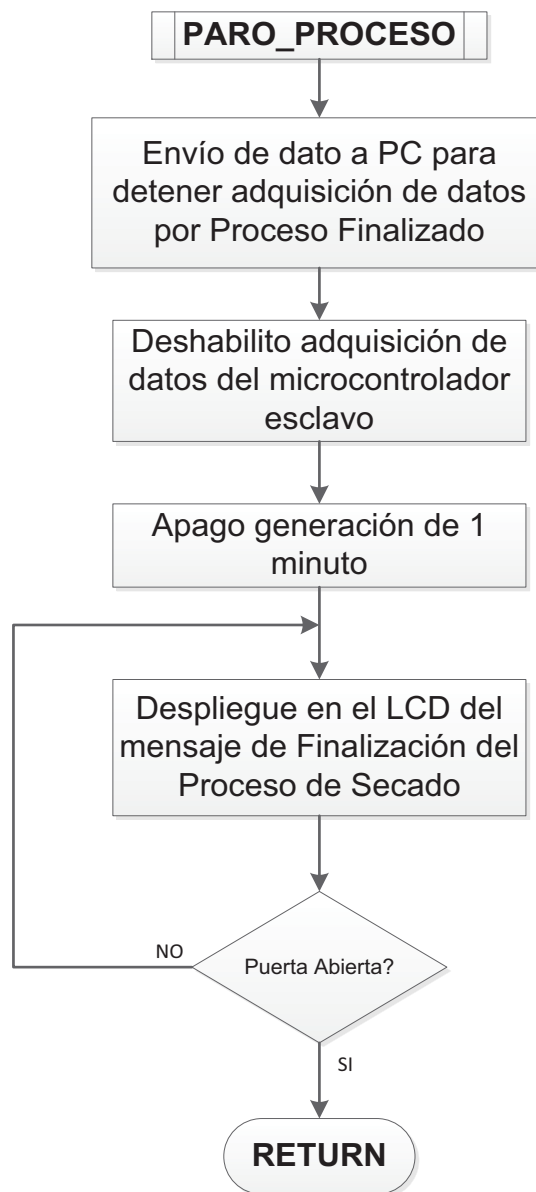
Se coloca en 0 los registros TCCR1A, TCCR1B, OCR1A para desactivar el TIMER1.

Fin Tarea

Una vez ejecutada esta subrutina se regresa al programa principal para que el usuario pueda comenzar con un nuevo proceso de secado.

En la subrutina PARO_PROCESO se envía las señales respectivas para que se detenga la adquisición de datos en el microcontrolador esclavo y en el HMI.

Figura 3.20 Diagrama de flujo de la subrutina PARO_PROCESO



Detallando el diagrama de flujo en lenguaje estructurado se tiene.

Envío de dato a PC para detener adquisición de datos por Proceso Finalizado:

Se envía la letra Z por el puerto serial USART0 al HMI para indicar que el proceso de recolección de datos ha finalizado.

Fin Tarea

Deshabilito adquisición de datos del microcontrolador esclavo:

Se coloca en uno la variable Inicio para indicar al microcontrolador esclavo que no se desea seguir con la adquisición.

Fin Tarea

Apago generación de 1 minuto:

Se coloca en 0 los registros TCCR1A, TCCR1B, OCR1A para desactivar el TIMER1.

Fin Tarea

Una vez el proceso se ha detenido en el LCD se despliega un mensaje que indica que el proceso ha finalizado y se solicita al usuario que retire la madera, es decir, el proceso finalizó debido a que la madera llegó al valor que se estableció al inicio del proceso por lo tanto es necesario retirar la madera de la cámara.

Una vez realizada esta labor la subrutina PARO_PROCESO finaliza y regresa al programa principal.

De cualquier forma en la que se finalice el proceso de adquisición de datos el microcontrolador maestro volverá a ejecutar el segmento de programa PROGRAMA_PRINCIPAL para comenzar un nuevo proceso de secado estableciendo siempre el contenido de humedad de la madera al cual se desea llegar.

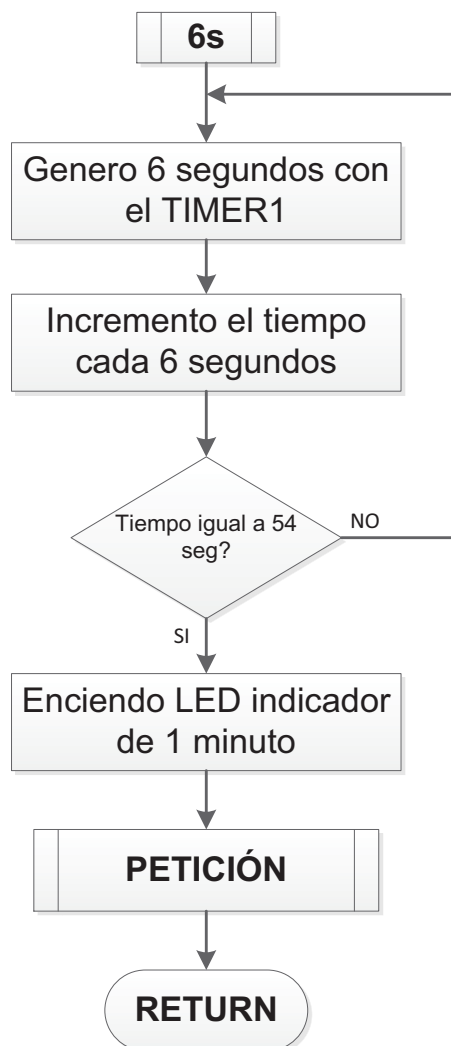
Dentro del programa del microcontrolador maestro se tienen varias interrupciones que son ejecutadas el momento en el que se las requiere, en este caso se tiene dos interrupciones: la primera es la interrupción que se genera cuando se

configura el TIMER1 y la segunda interrupción se genera cuando se configura la comunicación serial USART0.

A continuación se explica de forma detallada las interrupciones antes mencionadas.

De acuerdo a la configuración del TIMER1 y al valor colocado en el OCR1A se generan 6 segundos, tiempo en el cual la interrupción se habilita y se incrementa un contador. Cuando se genera 54 segundos, el microcontrolador maestro solicita datos del microcontrolador esclavo ejecutándose la subrutina PETICIÓN, también se encenderá el LED indicador de 1 minuto. En la Figura 3.21 se puede observar el diagrama de flujo de la interrupción.

Figura 3.21 Diagrama de flujo de la interrupción 6s



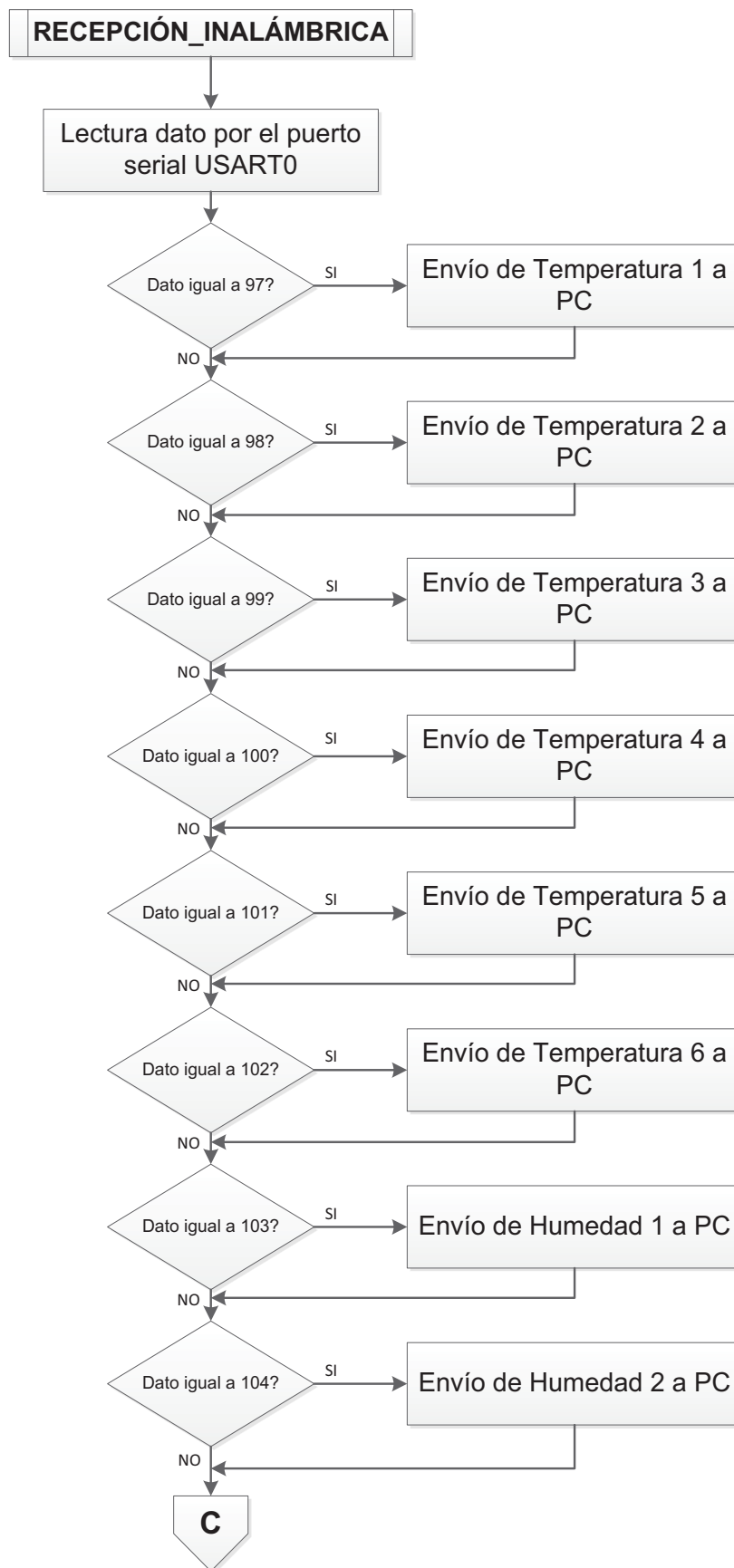
La interrupción configurada para la comunicación serial es la Interrupción por Recepción; cada vez que la PC pida un dato al microcontrolador maestro esta interrupción es habilitada.

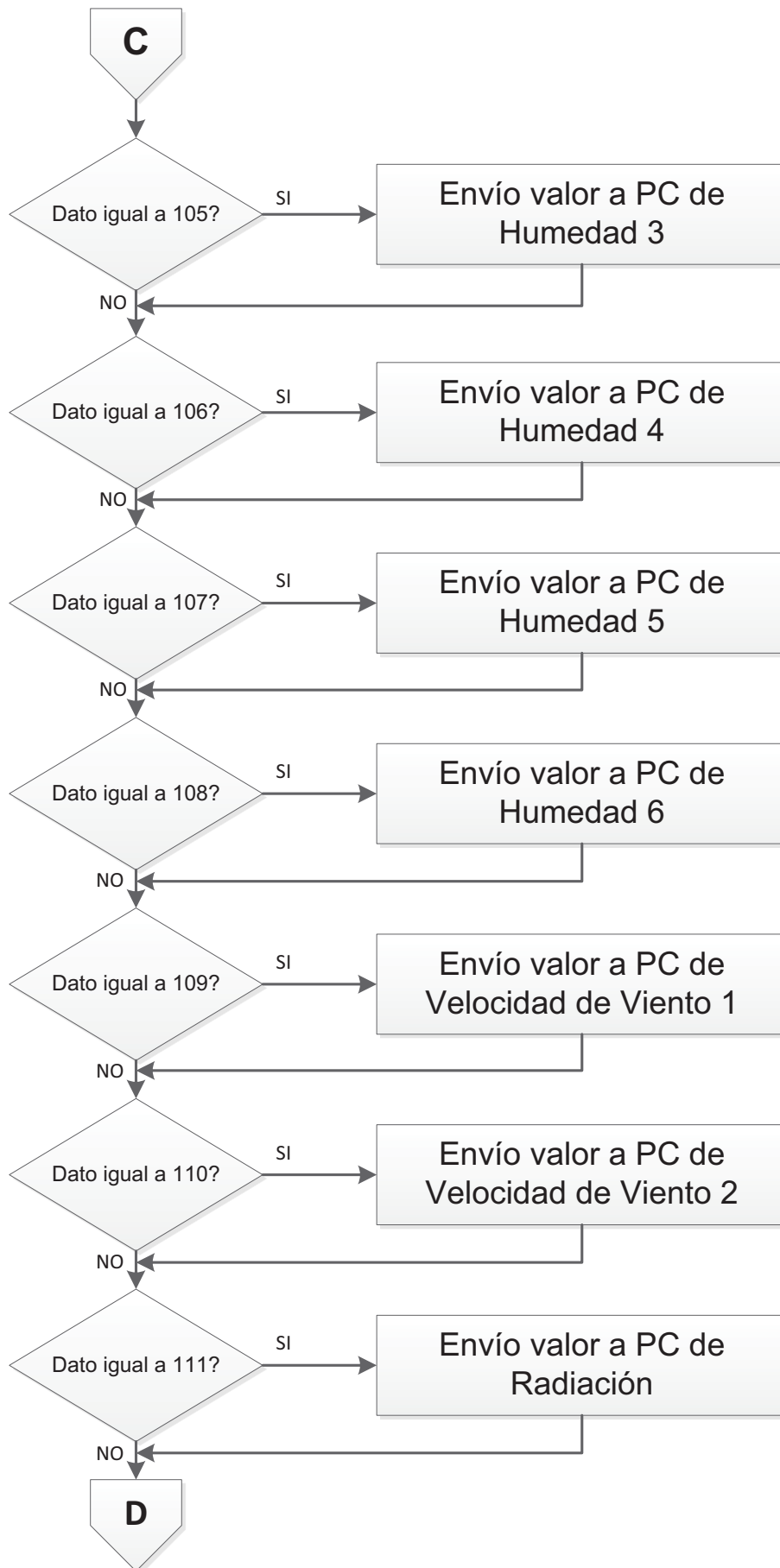
El HMI implementado en la PC solicita 19 datos en total, de los cuales 6 son de temperatura, 6 de humedad relativa, 2 de velocidad de viento, uno de radiación solar, uno de contenido de humedad de la madera, uno del valor seteado de contenido de humedad de la madera para finalizar el proceso, el otro indica el estado en el que se encuentra el proceso de secado, es decir, si el proceso se ha paralizado o finalizado, el último dato pedido por la PC al microcontrolador maestro sirve para conocer si se ha activado la ventilación forzada o no. En la Figura 3.22 se observa el diagrama de flujo de la interrupción llamada RECEPCIÓN_INALÁMBRICA, en este segmento de programa el microcontrolador maestro recoge el valor que se encuentra en el buffer de la comunicación serial y lo guarda en una variable, después comienza una comparación para saber que dato es el que está pidiendo la PC.

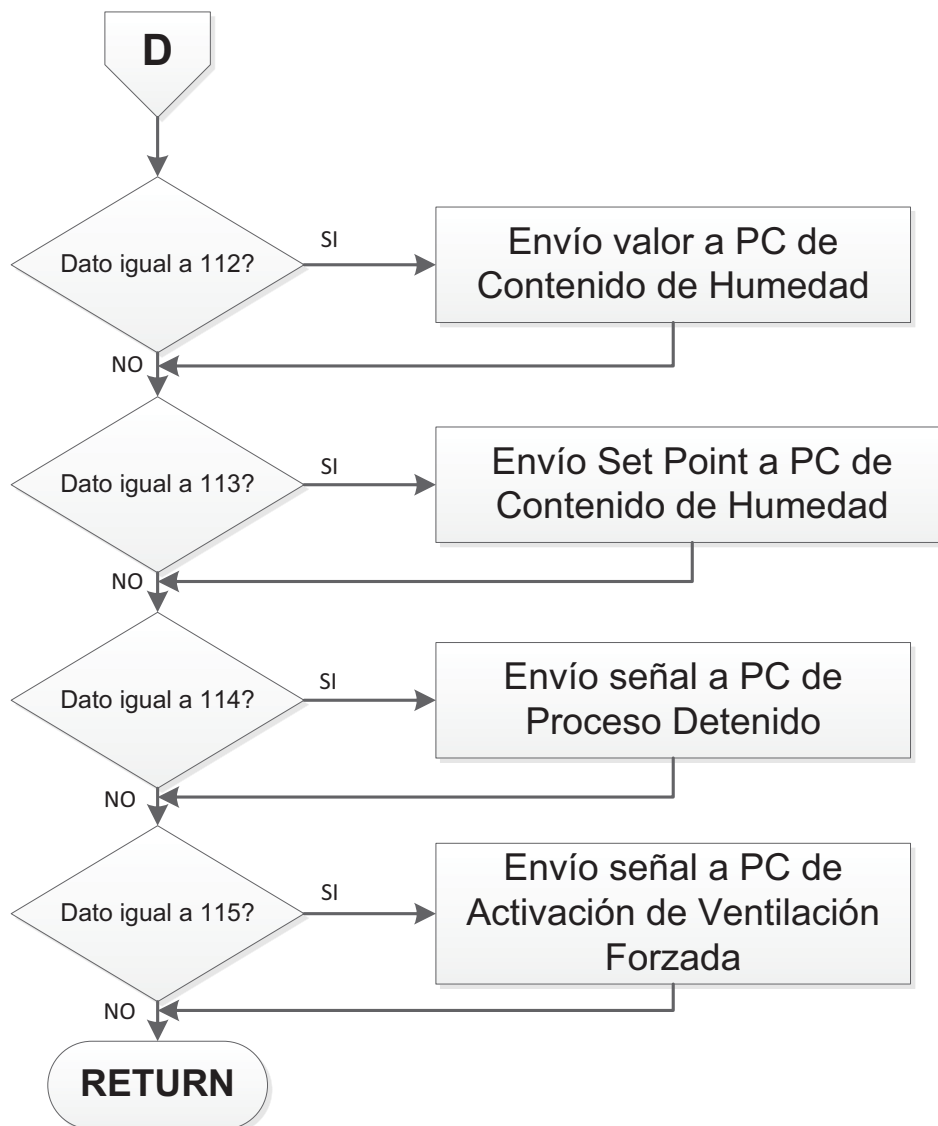
La PC envía letras desde la A hasta la S, desde la A hasta la F son datos para la recolección de los valores de temperatura, desde la G hasta la L son datos para la recolección de los valores de la humedad relativa, la M y la N son datos para la recolección de los valores de velocidad de viento, la O es para adquirir el dato de radiación solar, la P es para adquirir el dato de contenido de humedad de la madera, la Q es para recoger el dato del valor seteado de contenido de humedad de la madera, la R es para reconocer en qué estado está el sistema y la S indica la activación de la ventilación forzada.

Cuando el microcontrolador maestro recibe la letra R puede enviar tres datos dependiendo del estado en el que se encuentre el proceso de secado, si está funcionando el sistema de recolección de datos se envía la letra X, si el proceso fue detenido por que se reinició o porque se abrió la puerta de ingreso el dato enviado será la Y, si el proceso se ha detenido por que el contenido de humedad es igual al seteado, es decir, el proceso ha finalizado se enviará la letra Z. Cuando el microcontrolador maestro recibe la letra S puede enviar dos datos dependiendo si se ha activado la ventilación forzada o no, si está activada envía la A y si esta desactivado envía la B.

Figura 3.22 Diagrama de flujo de la interrupción RECEPCIÓN_INALÁMBRICA







Los diagramas de flujo antes explicados son correspondientes al programa del microcontrolador maestro.

A continuación se explica el programa del microcontrolador esclavo y también se indica los diagramas de flujo de este programa.

3.2. DESARROLLO DEL PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR ESCLAVO

El microcontrolador esclavo tiene como funciones principales la adquisición de los valores de los sensores de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, radiación solar y contenido de humedad de la madera los cuales se encuentran

implementados en el sistema; también es el encargado del control de los ventiladores ubicados en la cámara de secado.

El programa desarrollado para el microcontrolador esclavo se lo realiza en la plataforma AVRStudio 5.1 programación en C.

El programa en el microcontrolador esclavo además de adquirir las señales de los sensores realiza los cálculos necesarios para tener los valores de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento, radiación solar y contenido de humedad de la madera utilizando las fórmulas detalladas en el capítulo anterior.

La adquisición de los valores de los sensores se lo realiza en bits, motivo por el cual es necesario transformar ese valor a voltaje para poder utilizar las fórmulas antes mencionadas para cada uno de los sensores.

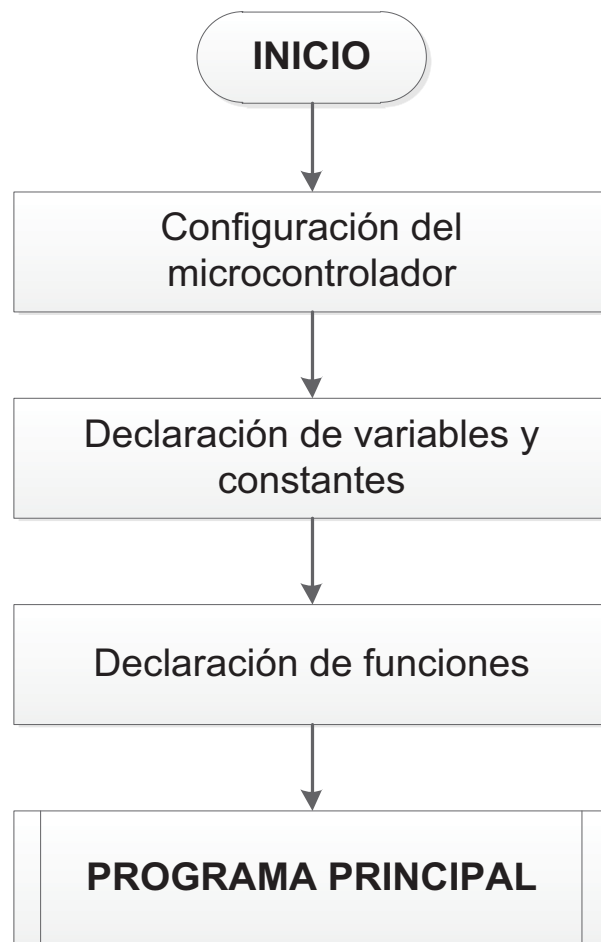
Estos valores son utilizados para establecer el tipo de control y que el proceso de secado se realice de forma más eficiente, comparándolo con el sistema sin que exista el sistema de ventilación forzada a través de los ventiladores implementados en el sistema.

El microcontrolador esclavo tiene dos pines conectados al microcontrolador maestro y de acuerdo al estado en el que se encuentren estos pines será capaz de adquirir los datos para procesarlos y también podrá activar el control de los ventiladores.

Uno de los pines permite que el sistema de adquisición de datos sea activado una vez que el microcontrolador maestro lo pida, mientras que el otro pin sirve para indicar al microcontrolador esclavo si el proceso de secado se va a realizar con ventilación forzada (sistema de ventilación encendido) o con ventilación natural (sistema de ventilación apagado).

En la Figura 3.23 se puede observar el diagrama de flujo en el cual se indica la configuración del microcontrolador esclavo, es decir, en este diagrama se explicará la forma en la que se configura los diferentes recursos como: el conversor análogo – digital ADC, la comunicación serial, los Timers y los diferentes puertos como entrada o salida.

Figura 3.23 Diagrama de flujo de inicialización del microcontrolador esclavo



A continuación se detalla el diagrama de flujo en lenguaje estructurado:

Configuración del Microcontrolador:

Configuración del cristal interno a 20Mhz.
 Habilitación de bibliotecas internas a utilizarse.
 Configuración de puertos como entradas y/o salidas.
 Configuración de los puertos USART0, a una velocidad de 2400bps, transmisión asíncrona, sin paridad, 1 bit de parada, 8 bits de datos.
 Configuración del Conversor Análogo-Digital, factor de división del preescaler 128, voltaje de referencia AVCC, resultado ajustado hacia la izquierda.
 Configuración interrupción USART0_RX, para recepción de datos del microcontrolador maestro.

Fin de tarea

Declaración de Funciones:

Configuración de la función para utilizar el conversor ADC.

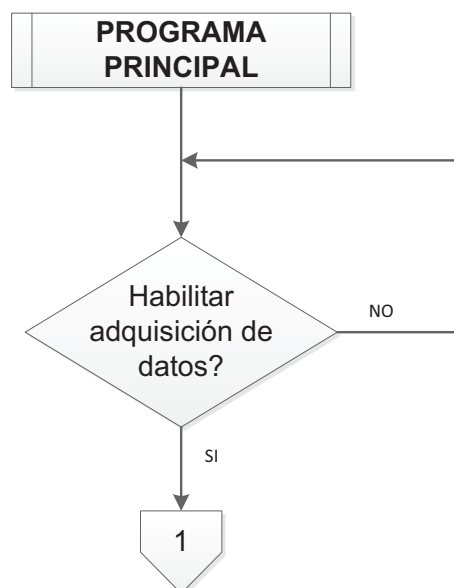
Configuración de la función para calcular y guardar el valor de Temperatura de los diferentes sensores.
Configuración de la función para calcular y guardar el valor de Humedad Relativa de los diferentes sensores.
Configuración de la función para calcular y guardar el valor de Velocidad de Viento de los diferentes sensores.

Fin Tarea

Una vez configurado el microcontrolador esclavo se comienza con el programa principal del microcontrolador esclavo para la adquisición de los datos y el control del proceso de secado, en los siguientes diagramas de flujo se detalla el programa y también se explica los procesos realizados.

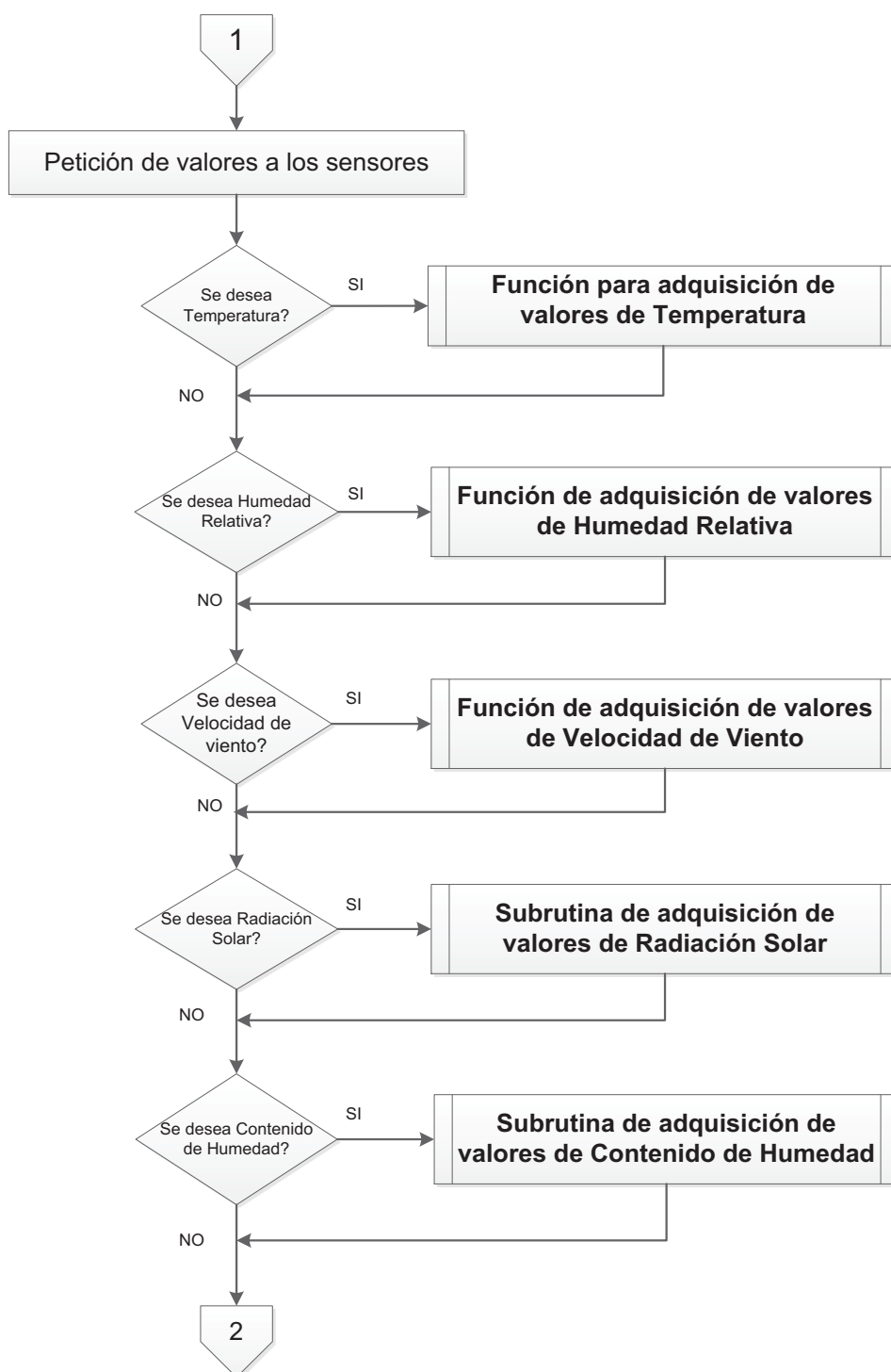
Como se explicó en los diagramas del microcontrolador maestro existe un pin que une los dos microcontroladores y permite que exista una comunicación entre los mismos, es decir, si el microcontrolador maestro necesita comenzar con la adquisición de los datos habilita este pin, esta condición es chequeada por el microcontrolador esclavo si este pin está en alto se realiza los procesos de recolección de datos en el conversor ADC, los cálculos pertinentes y también el control de los ventiladores implementados en el sistema, caso contrario el microcontrolador esclavo sigue revisando el estado de este pin, en la Figura 3.24 se observa el diagrama de flujo del programa antes explicado.

Figura 3.24 Diagrama de flujo del programa principal del microcontrolador esclavo



Una vez habilitado el microcontrolador esclavo se continúa con el programa para la adquisición de los valores de los sensores desde el conversor ADC y realizar los cálculos correspondientes, en la Figura 3.25 se observa el diagrama de flujo del programa principal.

Figura 3.25 Diagrama de flujo del programa para la obtención y cálculo de los valores de los sensores



Dependiendo de la variable requerida el programa ejecuta las distintas funciones programadas, las cuales permiten además de adquirir el valor del conversor ADC, también calcular el valor real utilizando las fórmulas antes descritas, tanto los valores del conversor ADC como el de los cálculos realizados son guardados en un arreglo, en las siguientes figuras se indica las diferentes funciones y se explica cada una de ellas.

En la Figura 3.26 se observa el diagrama de flujo del programa de la función para obtener los datos de temperatura.

En la Figura 3.27 se observa el diagrama de flujo del programa de la función para obtener los datos de humedad relativa.

En la Figura 3.28 se observa el diagrama de flujo del programa de la función para obtener los datos de velocidad de viento.

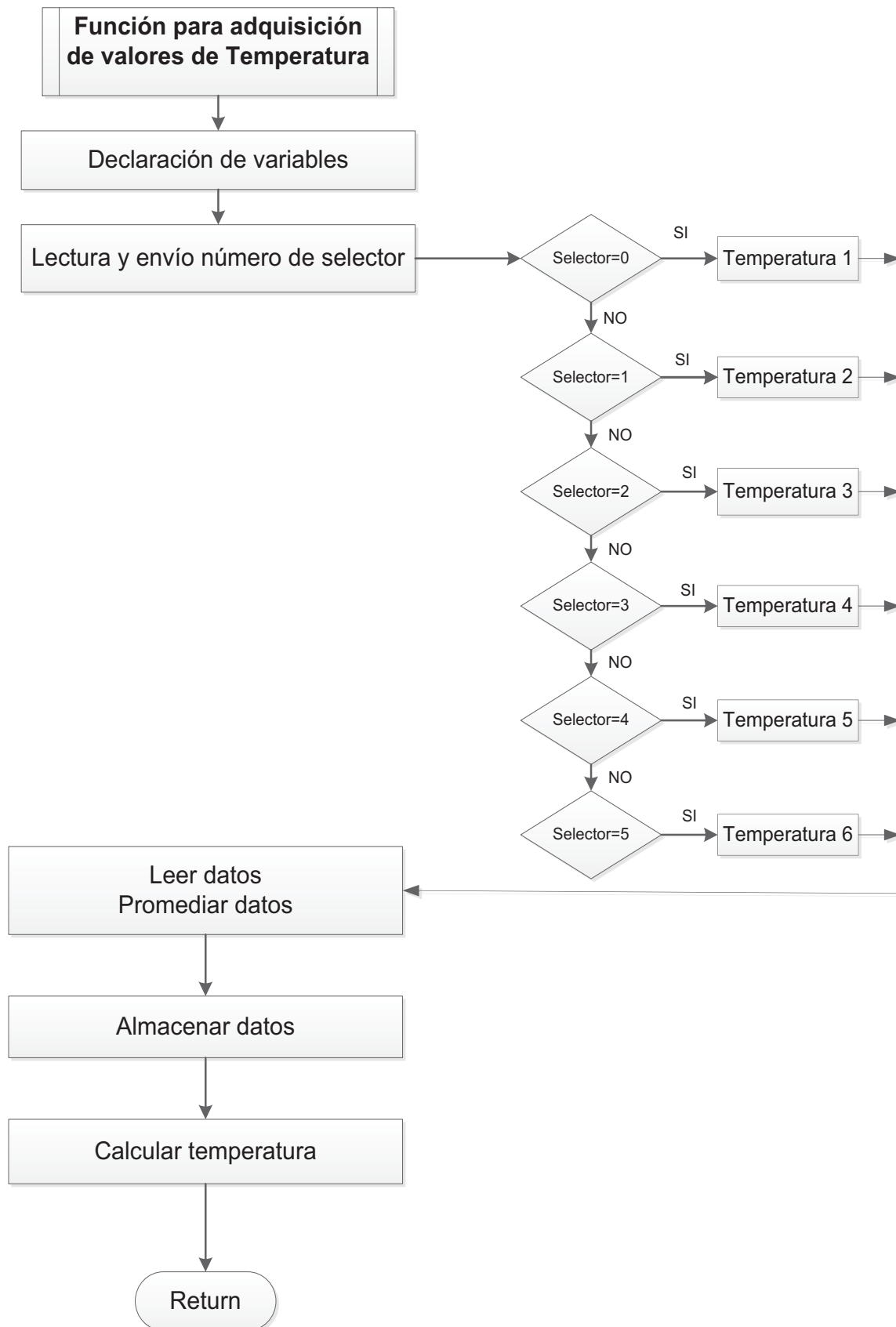
Las funciones antes mencionadas permiten obtener el valor de cada una de las variables del sistema, al utilizar multiplexores para adquirir los valores de los sensores es necesario establecer un control sobre ellos y es por eso que el microcontrolador esclavo maneja los pines del multiplexor y habilita y deshabilita cada uno de éstos dependiendo de las variables que se necesitan, es decir, el microcontrolador escoge que multiplexor va a ser habilitado y que sensor va a ser leído, en estas funciones se programa estas acciones que van a ser ejecutadas una vez se ingrese en ellas.

En la Figura 3.29 se muestra el diagrama de flujo del segmento de programa para obtener el valor de la radiación solar.

En la Figura 3.30 se indica el diagrama de flujo del segmento de programa para obtener el diagrama de flujo del contenido de humedad de la madera.

Para los valores de radiación solar y contenido de humedad de la madera el programa habilita el pin del conversor en el que estén y adquiere el valor luego realiza el cálculo para obtener el valor real, en el caso del contenido de humedad chequea los pines del selector y dependiendo del estado de éstos realiza el cálculo necesario.

Figura 3.26 Diagrama de flujo de la función para adquirir y calcular los datos de temperatura



En lenguaje estructurado se tiene:

Declaración de variables:

Se configura las distintas variables para utilizar en la función.

Fin Tarea

Lectura y envío número de selector:

Se envía el valor del selector al multiplexor, dependiendo de la temperatura que se desee leer.

Selector=0 para Temperatura 1
Selector=1 para Temperatura 2
Selector=2 para Temperatura 3
Selector=3 para Temperatura 4
Selector=4 para Temperatura 5
Selector=5 para Temperatura 6
Se habilita el multiplexor.

Fin de Tarea

Leer datos y promediar datos:

Seleccionar el canal del conversor análogo-digital, en (0), y leer el dato que se encuentra en ese momento.

Promediar los valores obtenidos en la lectura.

Fin Tarea

Almacenar datos:

Enviar el dato obtenido en la lectura del conversor análogo-digital a un arreglo.

Fin Tarea

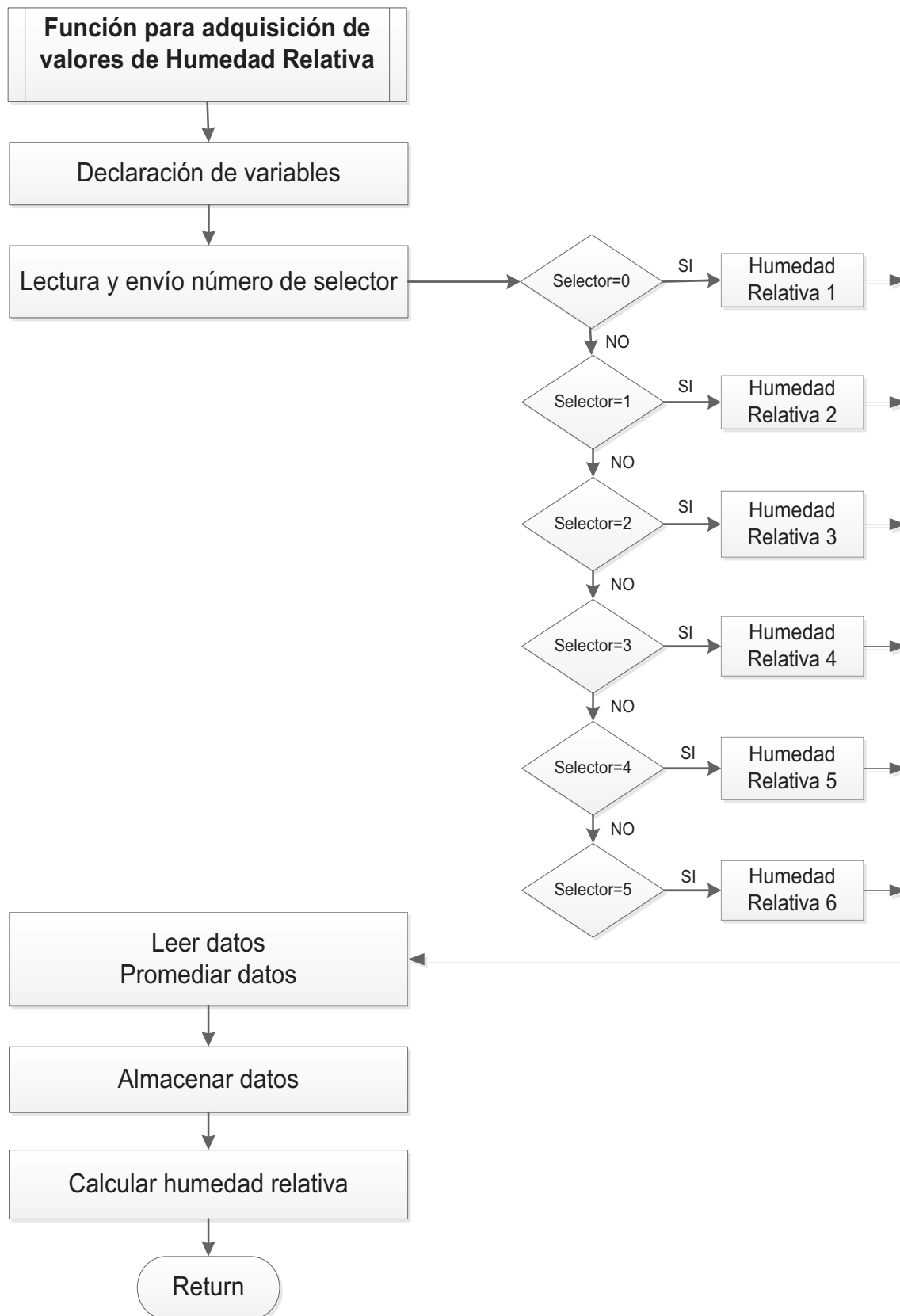
Calcular temperatura:

Calcular el valor de la temperatura de acuerdo a la ecuación obtenida por la curva de reacción del comportamiento del sensor.

Deshabilitar el multiplexor.

Fin Tarea

Figura 3.27 Diagrama de flujo de la función para adquirir y calcular los valores de Humedad Relativa



A continuación se detalla el diagrama de flujo en lenguaje estructurado.

Lectura y envío número de selector:

Se envía el valor del selector al multiplexor, dependiendo de la humedad relativa que se desee leer.

Selector=0 para Humedad Relativa 1

Selector=1 para Humedad Relativa 2

Selector=2 para Humedad Relativa 3

Selector=3 para Humedad Relativa 4

Selector=4 para Humedad Relativa 5

Selector=5 para Humedad Relativa 6

Se habilita el multiplexor.

Fin Tarea

Leer datos y promediar datos:

Se selecciona el canal del conversor análogo-digital, en (1), y se lee el dato que se encuentra en ese momento.

Se promedia los valores obtenidos en la lectura.

Fin Tarea

Almacenar datos:

Se envía el dato obtenido en la lectura del conversor análogo-digital a un arreglo.

Fin Tarea

Calcular temperatura:

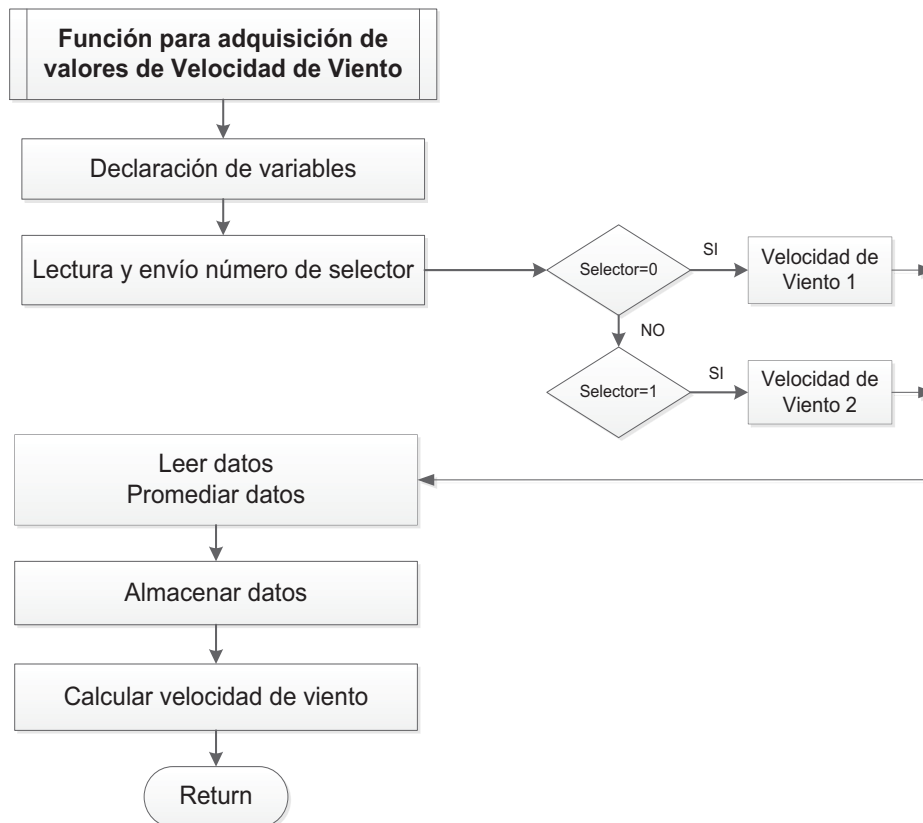
Se calcula el valor de la humedad relativa de acuerdo a la ecuación obtenida en el datasheet del sensor.

Deshabilitar el multiplexor.

Fin Tarea

Los valores de humedad relativa y temperatura de cada uno de los 6 sensores es almacenado en un arreglo para cada variable, para su posterior utilización, es decir, se utiliza los datos guardados en los arreglos para enviarlos por el puerto serial USART0 cuando el microcontrolador maestro lo solicite, esto se detalla en los párrafos siguientes, cuando se hable de los diagramas de flujo de las interrupciones.

Figura 3.28 Diagrama de flujo de la función para adquirir y calcular los valores de velocidad de viento



A continuación se detalla el diagrama de flujo en lenguaje estructurado:

Lectura y envío número de selector:

Se envía el valor del selector al multiplexor, dependiendo de la velocidad de viento que se desee leer.

Selector=0 para Velocidad de viento 1

Selector=1 para Velocidad de viento 2

Se habilita el multiplexor.

Fin Tarea

Leer datos y promediar datos:

Se selecciona el canal del conversor análogo-digital, en (2), y se lee el dato que se encuentra en ese momento.

Se promedia los valores obtenidos en la lectura.

Fin Tarea

Almacenar datos:

Se guarda el dato obtenido en la lectura del conversor análogo-digital a un arreglo.

Fin de tarea.

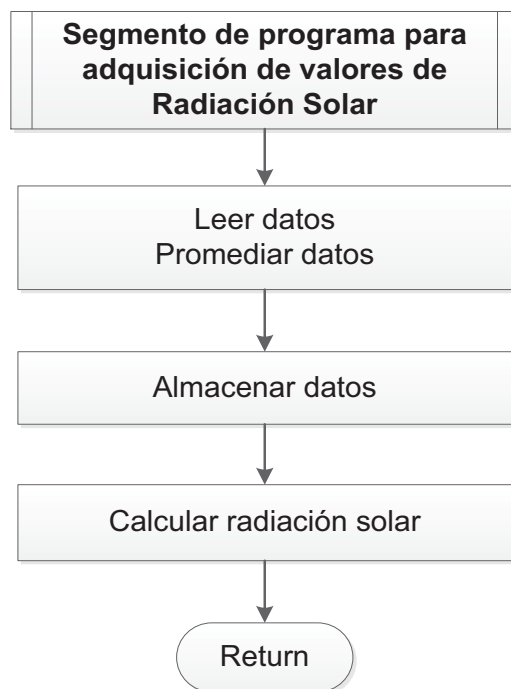
Calcular velocidad del viento:

Se calcula el valor de la velocidad de viento de acuerdo a la ecuación obtenida por la curva de reacción del comportamiento del sensor.
Se deshabilita el multiplexor.

Fin Tarea

Después de realizar las funciones para obtener los valores de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento, para obtener los valores de radiación y contenido de humedad de la madera el programa se ejecuta y dependiendo de la lectura del conversor ADC se realiza las acciones pertinentes.

Figura 3.29 Diagrama de flujo del segmento de programa para adquirir y calcular la Radiación Solar



A continuación se detalla el diagrama de flujo en lenguaje estructurado:

Leer datos y promediar datos:

Se selecciona el canal del conversor análogo-digital, en este caso (3), y se lee el dato que se encuentra en ese momento.

Se promedia los valores obtenidos en la lectura.

Fin Tarea

Almacenar datos:

Se guarda el dato obtenido en la lectura del conversor análogo-digital a un arreglo.

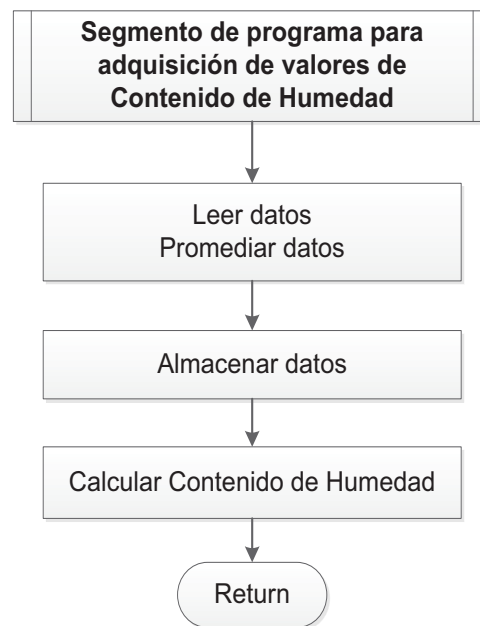
Fin Tarea

Calcular radiación solar:

Se calcula el valor de radiación solar de acuerdo a la ecuación obtenida en el datasheet del sensor.

Fin Tarea

Figura 3.30 Diagrama de flujo del segmento de programa para adquirir y calcular el Contenido de Humedad de la madera



A continuación se detalla el diagrama de flujo en lenguaje estructurado:

Leer datos y promediar datos:

Se selecciona el canal del conversor análogo-digital, en este caso (4), y se lee el dato que se encuentra en ese momento.

Se promedia los valores obtenidos en la lectura.

Fin Tarea

Almacenar datos:

Se guarda el dato obtenido en la lectura del conversor análogo-digital a un arreglo.

Fin Tarea**Calcular contenido de humedad:**

Se calcula el valor de contenido de humedad de acuerdo a las ecuaciones obtenidas por las curva de reacción del comportamiento del sensor.

Fin Tarea

Los diagramas de flujo del programa del microcontrolador esclavo antes explicados son parte de la adquisición de datos, es decir, esta parte del programa corresponde a la de recoger los datos de los distintos sensores y luego calcular el valor real de los mismos para poder a través de estos cálculos establecer el control de los ventiladores implementados en el sistema.

La activación o no de la ventilación forzada se la realiza en el microcontrolador maestro y a través de un pin de comunicación se da la señal al microcontrolador esclavo, si el pin está en alto no se activan los ventiladores, pero si el pin está en bajo se activan los ventiladores y el control de éstos se lo realiza de acuerdo a las condiciones que se explican a continuación.

Para el manejo de los ventiladores se utiliza como punto de control el estado en el que se encuentren las temperaturas al interior de la cámara, es decir, se compara las temperaturas en el interior y dependiendo de cómo éstas se encuentren se activará los ventiladores, para que se cumpla con las condiciones establecidas en el programa.

Para garantizar un proceso de secado óptimo, el control se debe cumplir con las siguientes condiciones: la temperatura a la entrada de la cámara debe ser mayor a la temperatura en los puntos intermedios ($T_{en} > T_{int}$) y la temperatura en los puntos intermedio debe ser mayor que la temperatura a la salida de la cámara ($T_{int} > T_{sal}$), al haber dos ventiladores el control se lo hace por separado. En la Figura 3.31 y Figura 3.32 se observa el diagrama de flujo del segmento de programa correspondiente a este control.

Figura 3.31 Diagrama de flujo del Control de los ventiladores (1)

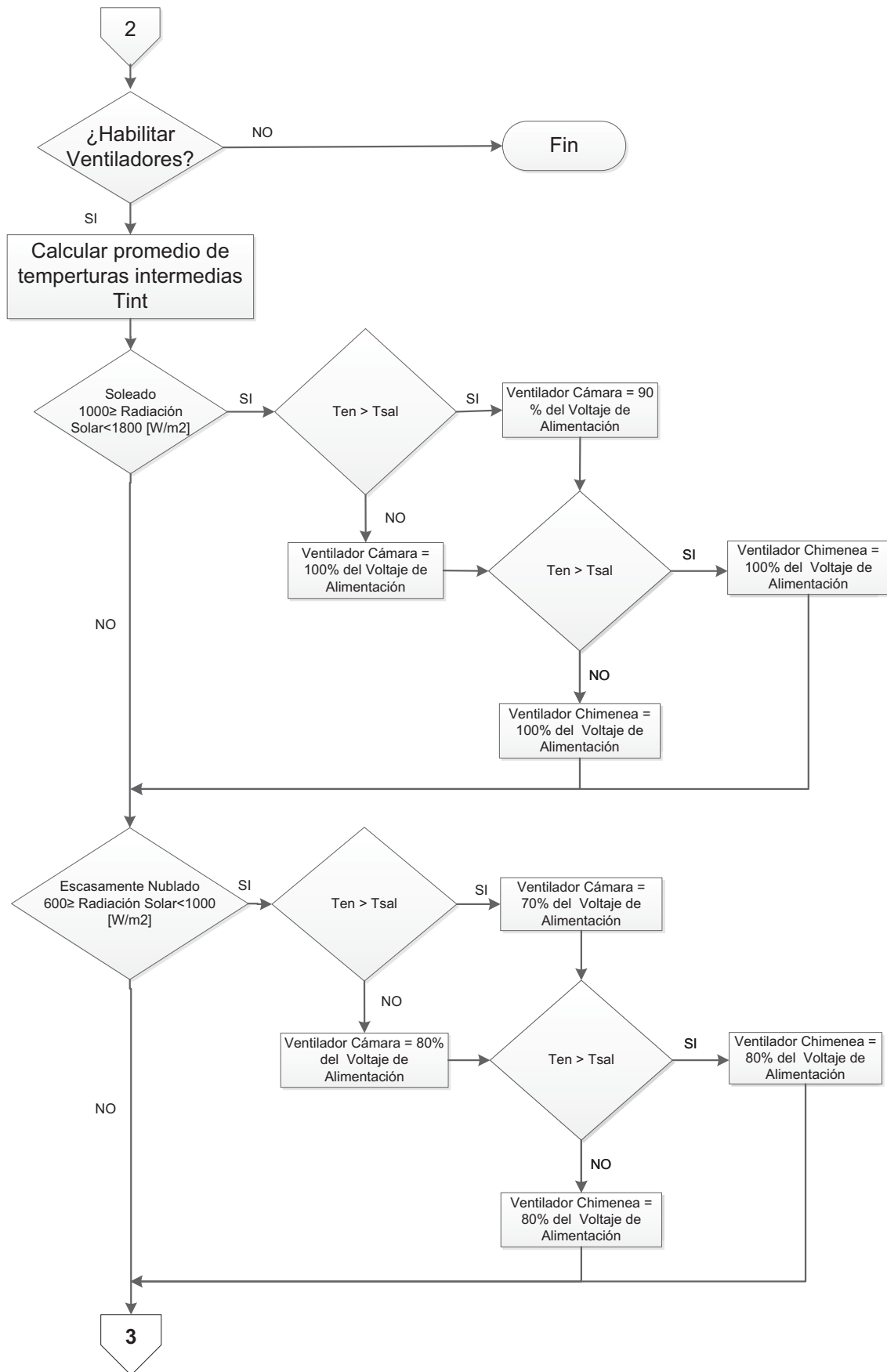
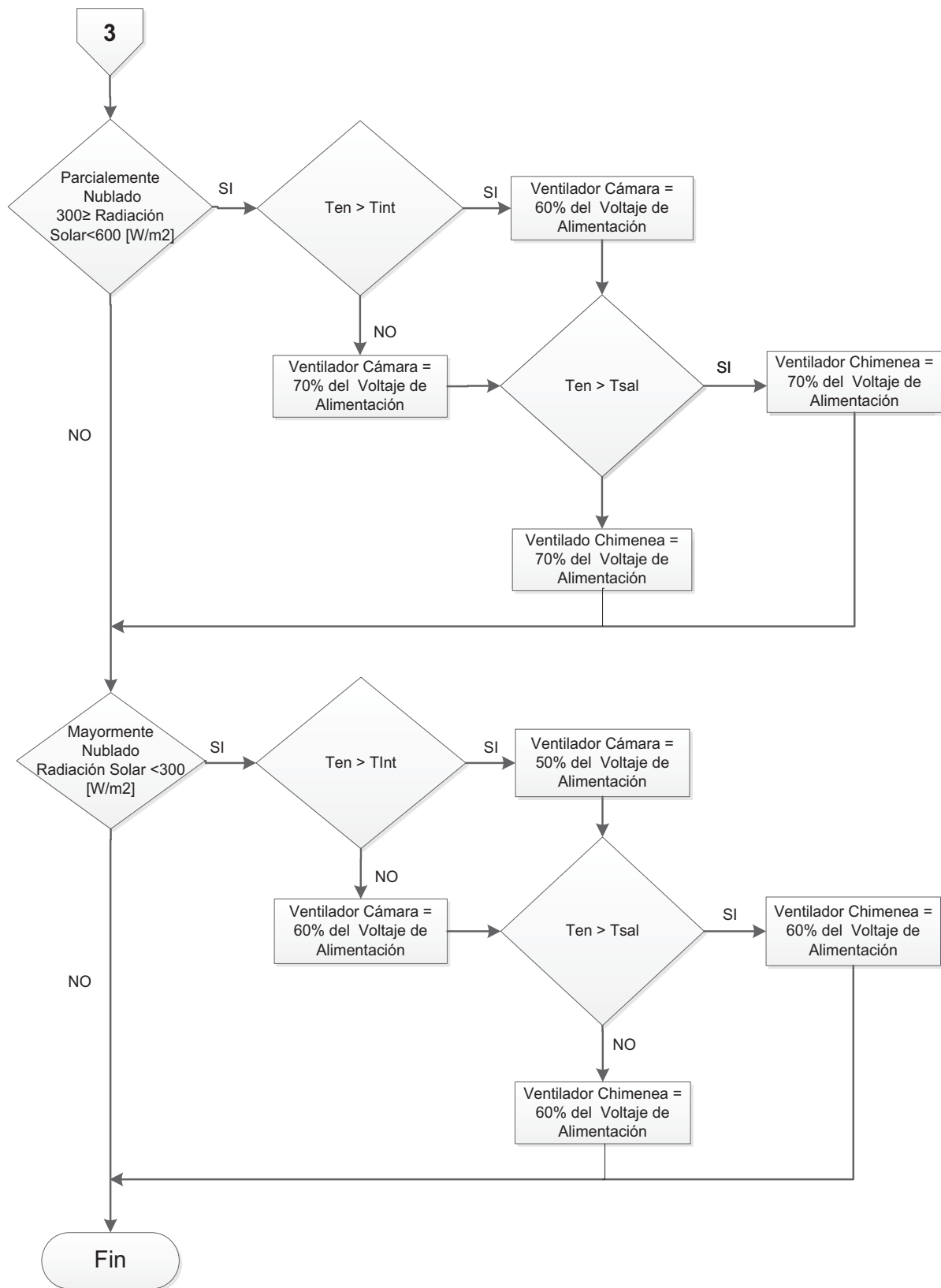


Figura 3.32 Diagrama de flujo del Control de los ventiladores (2)



A continuación se detalla el diagrama de flujo:

Calcular Promedio de las Temperaturas Intermedias de la Cámara: Se promedia el valor de las temperaturas intermedias de la cámara, es decir, las temperaturas del Punto1 y del Punto2.

Control de los ventiladores de la Cámara y de la Chimenea: Dependiendo de las condiciones climáticas se determinó cuatro estados: Mayormente Nublado, Parcialmente Nublado, Escasamente Nublado y Soleado, a los cuales les corresponde un rango de radiación solar. Basados en las pruebas realizadas y tomando en cuenta las condiciones mencionadas se estableció un porcentaje de alimentación para cada ventilador, en el Capítulo 4: Pruebas y Resultados se detalla esta información.

A continuación se explica el diagrama de flujo tomando en cuenta los estados de la radiación solar:

Si es Soleado (Radiación solar entre $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $1800 \left[\frac{W}{m^2} \right]$) se tiene,

- a. Si la Temperatura de Entrada es mayor a la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios, el voltaje de alimentación del ventilador de la cámara será del 90%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 100%.
- b. Si la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios es mayor a la Temperatura de Salida el voltaje de alimentación del ventilador de la chimenea será del 100%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 100%.

Si es Escasamente Soleado (Radiación solar entre $600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$) se tiene,

- a. Si la Temperatura de Entrada es mayor a la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios, el voltaje de alimentación del ventilador de la cámara será del 70%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 80%.
- b. Si la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios es mayor a la Temperatura de Salida el voltaje de alimentación del ventilador de la chimenea será 80%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 80%.

Si es Parcialmente Nublado (Radiación solar entre $300 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $600 \left[\frac{W}{m^2} \right]$) se tiene,

- a. Si la Temperatura de Entrada es mayor a la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios, el voltaje de alimentación del ventilador de la cámara será del 60%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 70%.
- b. Si la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios es mayor a la Temperatura de Salida el voltaje de alimentación del ventilador de la chimenea será 70%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 70%.

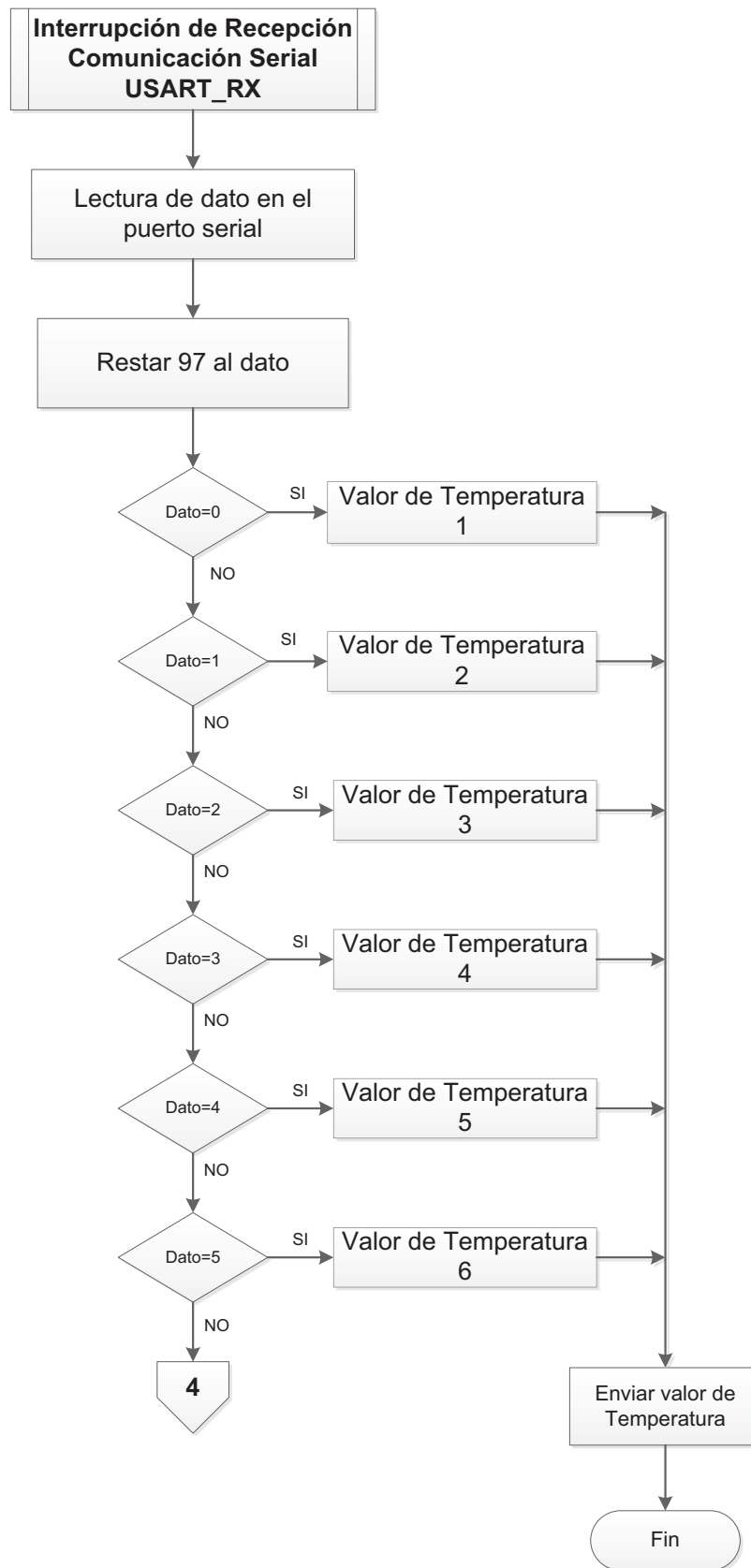
Si es Mayormente Nublado (Radiación solar menor a $300 \left[\frac{W}{m^2} \right]$) se tiene,

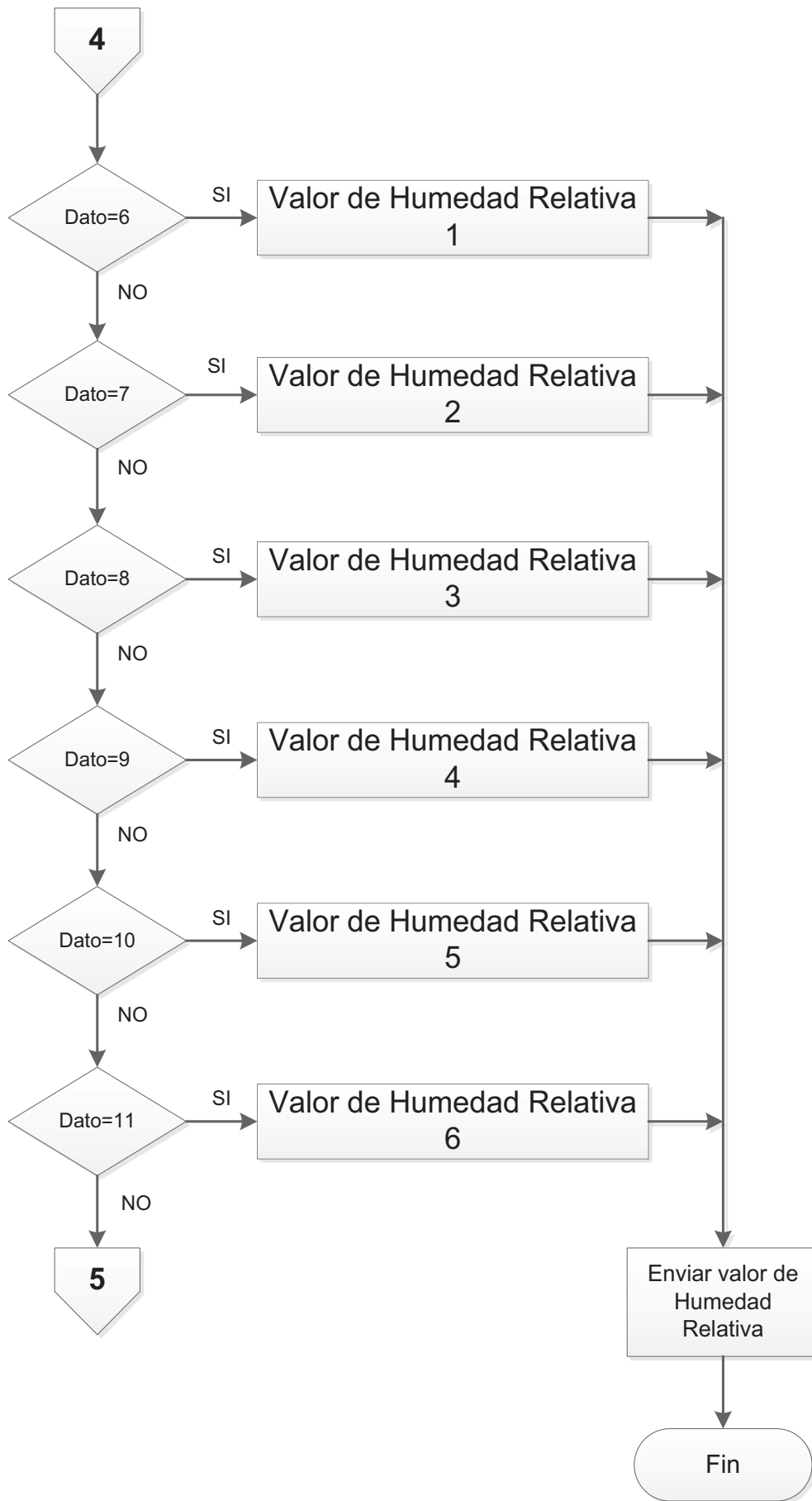
- a. Si la Temperatura de Entrada es mayor a la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios, el voltaje de alimentación del ventilador de la cámara será del 50%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 60%.
- b. Si la Temperatura Promedio de los puntos Intermedios es mayor a la Temperatura de Salida el voltaje de alimentación del ventilador de la chimenea será 60%, caso contrario el voltaje de alimentación será del 60%.

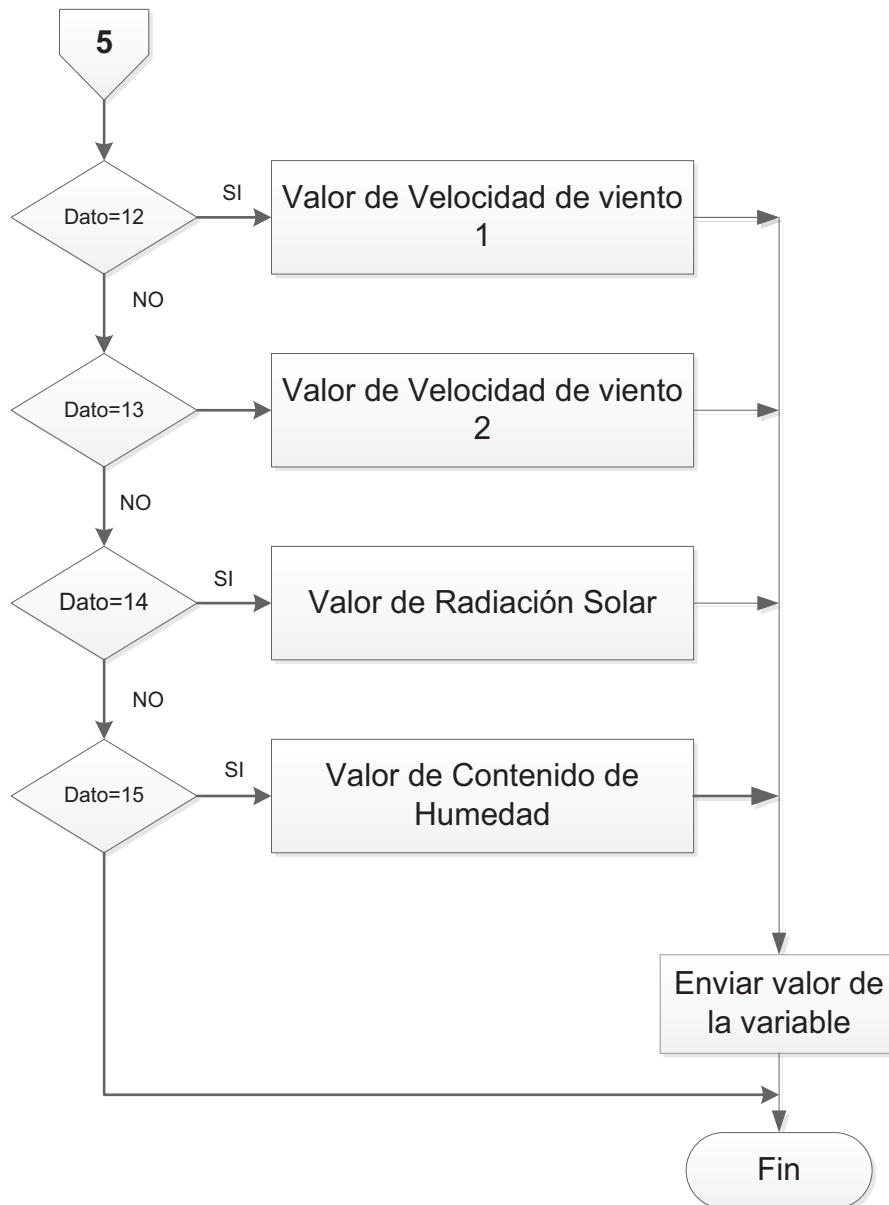
El control implementado para el manejo de los ventiladores se basa en la variación del voltaje de alimentación de cada uno de éstos, es decir, dependiendo de las condiciones climáticas el voltaje de alimentación variará para permitir que las condiciones antes indicadas se cumplan. De acuerdo a las pruebas realizadas los ventiladores funcionan desde el 50% del voltaje de alimentación con lo que la velocidad de los ventiladores con este porcentaje de alimentación es bajo y con el 100% la velocidad será la máxima, el control de los ventiladores se lo realiza variando el PWM generado por el TIMER1 del microcontrolador esclavo, es decir, para cada porcentaje de alimentación existe un valor en el registro OCR que genera el PWM.

La única interrupción habilitada en este microcontrolador es la de la comunicación serial, que al igual que el microcontrolador maestro se ejecuta cuando se solicita un dato para ser enviado; en la Figura 3.33 se observa el diagrama de flujo de la interrupción.

Figura 3.33 Diagrama de flujo de la Interrupción de la Comunicación Serial del Puerto USART0







El microcontrolador esclavo espera la petición de datos por parte del microcontrolador maestro, esta petición se la realiza a través de letras, es decir, el microcontrolador esclavo espera a que llegue un dato por el puerto serial lo compara con sus indicadores y dependiendo del dato que haya llegado envía el valor correspondiente por el puerto serial al microcontrolador maestro. Los datos que compara son las letras desde la A hasta la P, entonces se tiene que desde la A hasta la F son los datos correspondientes a las Temperaturas, desde la G hasta la L son los datos correspondientes a las Humedades Relativas, desde la M hasta la N son los datos correspondientes a las Velocidades de Viento, la O es el dato

para la Radiación Solar y la P para el valor del Contenido de Humedad de la madera.

Una vez concluida esta interrupción se regresa al programa principal, en el cual se ejecuta la adquisición y el control del sistema de secado.

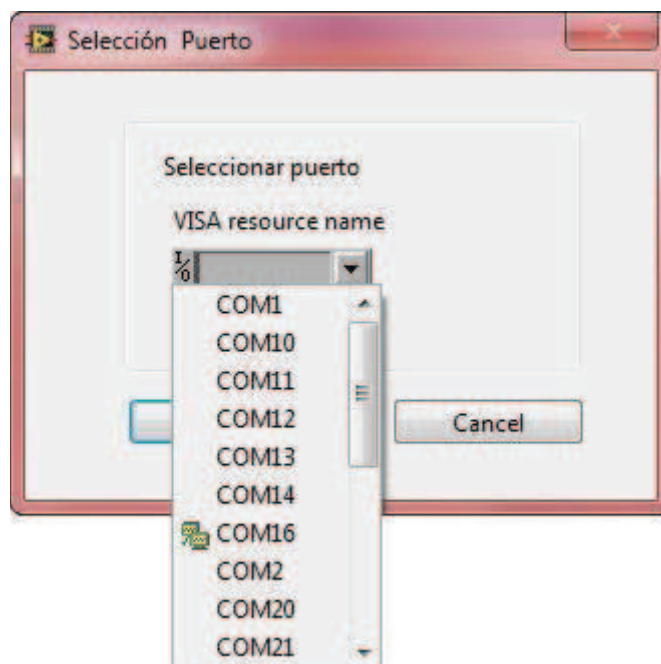
3.3. DESARROLLO DEL HMI PARA LA VISUALIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO.

El HMI implementado para este proyecto se lo realiza en la plataforma LabView 2009, sirve para la visualización de los datos del proceso de secado, y para un análisis posterior utilizando estos datos los cuales son guardados en un archivo.

En este HMI se puede observar con detalle el valor de los diferentes sensores que se encuentran en el sistema así como también de varios extras que complementan la visualización de los datos.

En la Figura 3.34 se observa el cuadro de dialogo en el cual el HMI solicita al usuario que coloque el puerto de comunicación en el cual se conectó el módulo de comunicación.

Figura 3.34 Cuadro de diálogo para selección del puerto de comunicación



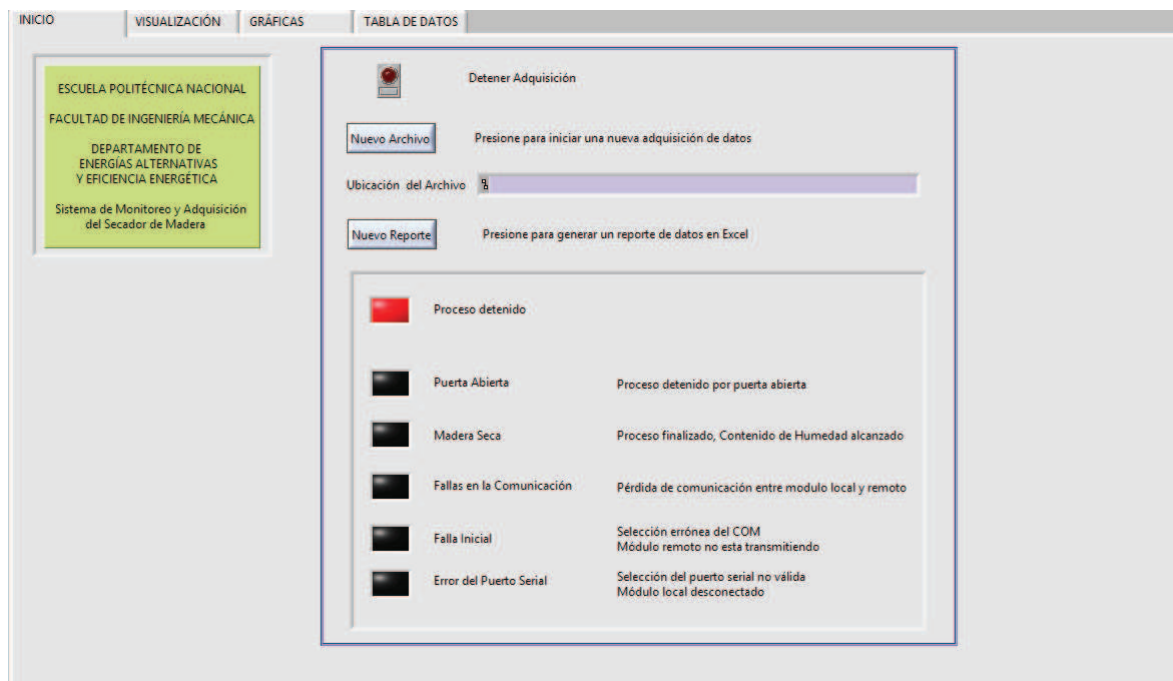
Una vez seleccionado el puerto al que está conectado la tarjeta, se ejecuta el HMI principal que es un conjunto de pestañas en las cuales el usuario puede desplazarse para observar las distintas utilidades que posee el HMI, en la pestaña principal llamada “Inicio” se selecciona la ubicación en donde se creará el archivo .xls en el cual se guardarán todos los datos obtenidos de la adquisición.

En esta pestaña también se puede observar varias alertas que determinan el estado del proceso, estos indicadores permiten saber si se ha producido algún error o si se ha detenido el proceso.

También en esta pestaña se puede encontrar un botón con el cual se crea un reporte de los datos obtenidos en un archivo de Excel para facilitar el análisis posterior de los datos.

En la Figura 3.35 se observa la ventana de inicio en la cual se encuentra lo antes mencionado.

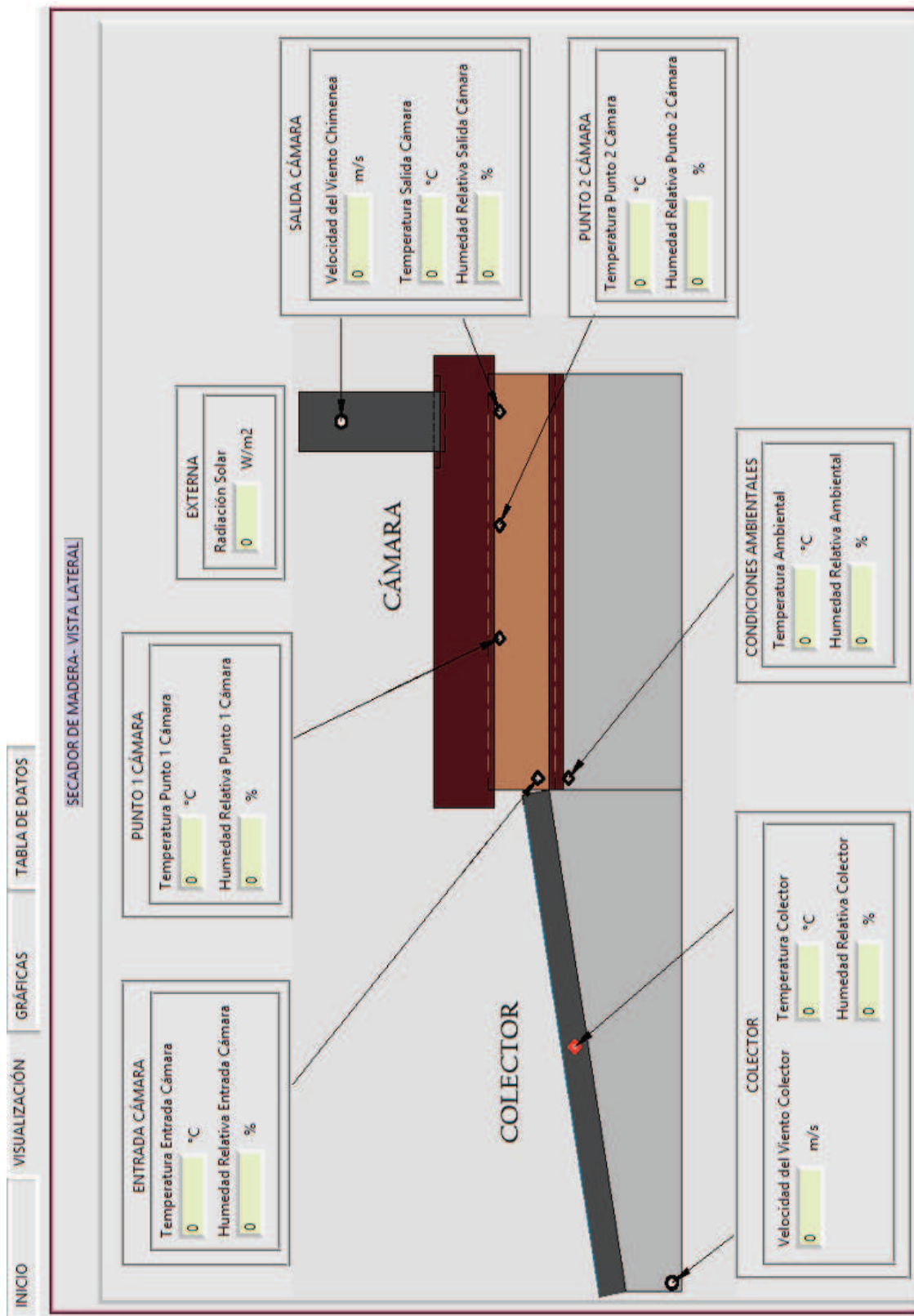
Figura 3.35 Pestaña Principal del HMI



Otra pestaña de este HMI es la pestaña llamada “Visualización”, en esta pestaña se observa dos figuras, la primera corresponde a la vista lateral y la segunda corresponde a la vista superior del secador solar de madera, en los cuales se

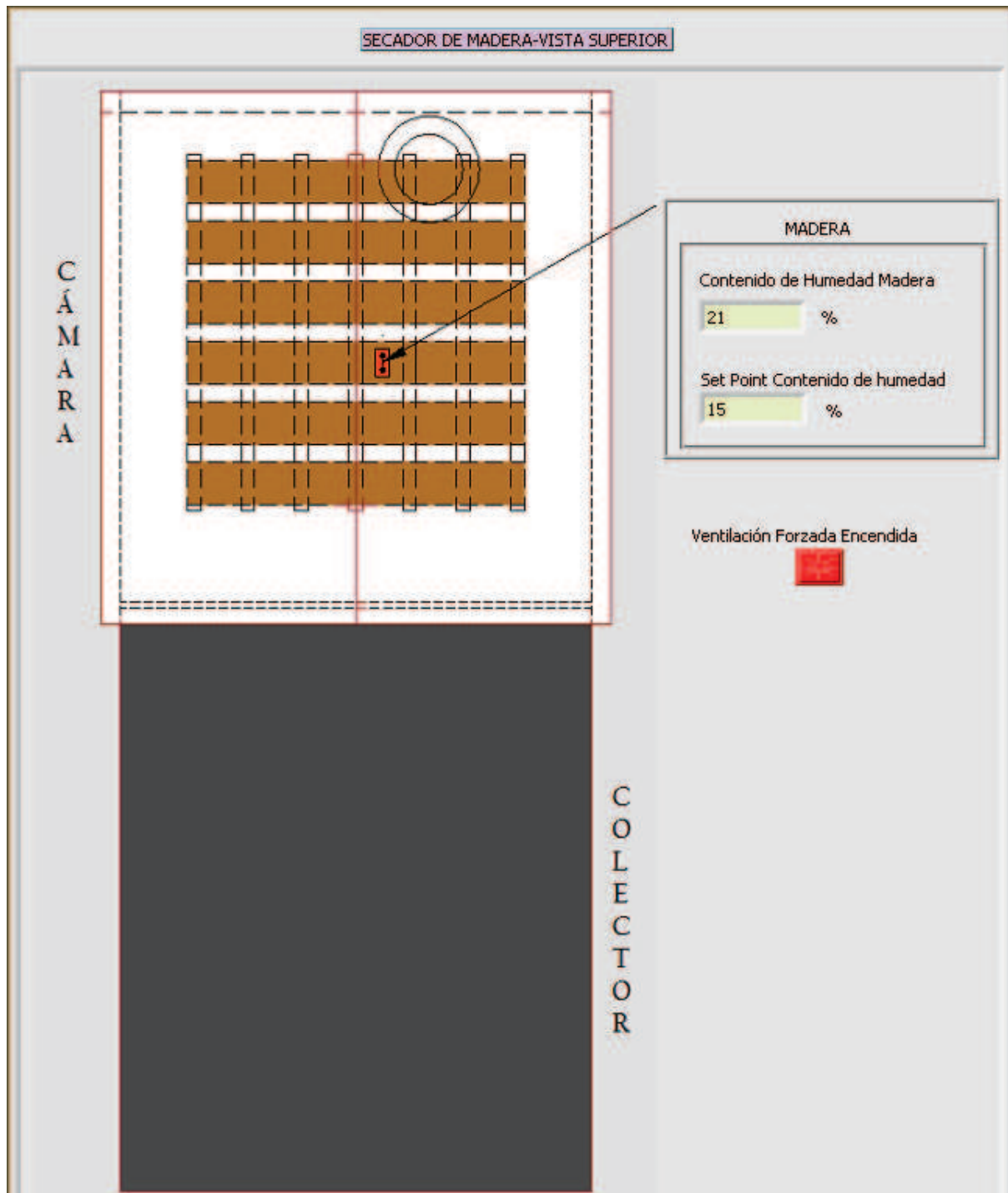
puede identificar la ubicación de los sensores además se muestra el valor de cada uno de ellos. En la Figura 3.36 se observa la pestaña mencionada.

Figura 3.36 Pestaña de Visualización del HMI Vista lateral del secador



En la Figura 3.37 se observa la vista superior de la cámara.

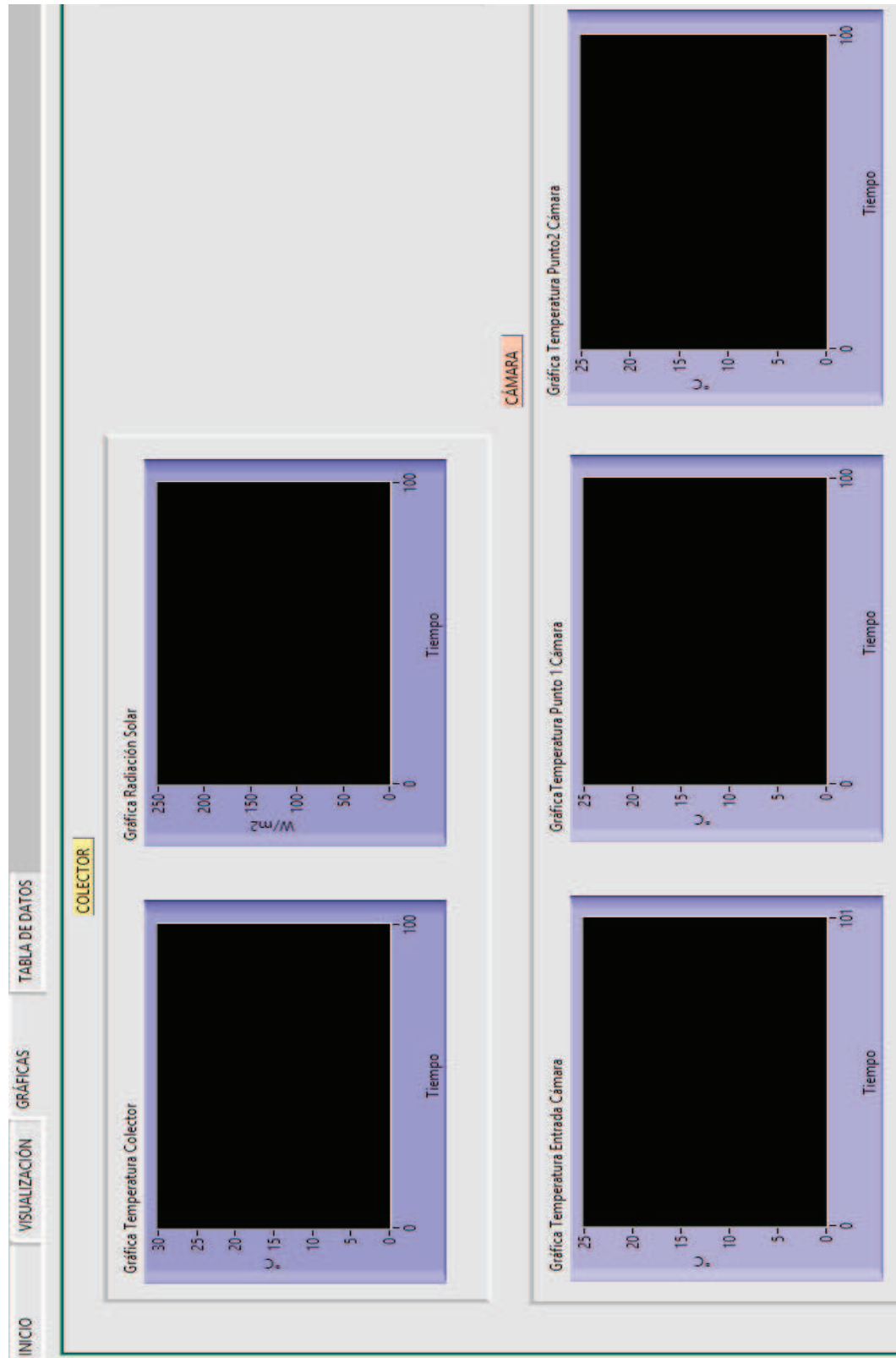
Figura 3.37 Pestaña de Visualización del HMI Vista Superior del Secador



Como parte del HMI se cuenta con una pestaña en la cual se puede observar los distintos generadores de formas de onda, está pestaña se llama "Gráficas", estos generadores de formas de onda permiten observar el comportamiento de cada

una de las variables del secador de madera con respecto al tiempo. En la Figura 3.38 se observa la pestaña que indica las gráficas a visualizar.

Figura 3.38 Pestaña de Gráficas del HMI



En la última pestaña llamada “Tabla de Datos” se encuentran distintas tablas en las cuales los datos se van registrando cada vez que el HMI los solicite al microcontrolador maestro, permitiendo al usuario observar los datos mientras el proceso de secado vaya evolucionando, en la Figura 3.39 se observa la pestaña mencionada.

Figura 3.39 Pestaña de Tabla de Datos del HMI

The screenshot shows the 'Tabla de Datos' (Data Table) interface of an HMI. At the top, there is a navigation menu with the following items: INICIO, VISUALIZACIÓN, GRÁFICAS, and TABLA DE DATOS. The main content area is divided into several sections, each containing a data table:

- Colector:** A table with columns for 'Temperatura [°C]', 'Humedad Relativa [%]', and 'Velocidad Viento [m/s]'. It contains 10 rows of data.
- Condiciones Ambientales:** A table with columns for 'Temperatura [°C]' and 'Humedad Relativa [%]'. It contains 10 rows of data.
- Externa:** A table with columns for 'Radiación Solar [W/m2]' and 'Contenido de Humedad [%]'. It contains 10 rows of data.
- Madera:** A table with columns for 'Radiación Solar [W/m2]' and 'Contenido de Humedad [%]'. It contains 10 rows of data.
- Cámara:** A large table with columns for 'Temperatura Entrada [°C]', 'Humedad Relativa Entrada [%]', 'Temperatura Punto 1 [°C]', 'Humedad Relativa Punto 1 [%]', 'Temperatura Punto 2 [°C]', 'Humedad Relativa Punto 2 [%]', 'Temperatura Salida [°C]', 'Humedad Relativa Salida [%]', and 'Velocidad Viento Salida [m/s]'. It contains 10 rows of data.

Para un correcto estudio del proceso de secado, además de la visualización de los datos en el LCD y en el HMI, se cuenta con una opción en el HMI (pestaña "Inicio") en la cual el usuario puede generar un reporte de los datos en una hoja de Excel, en la cual se presentan todos los datos de una forma ordenada, además de ciertas gráficas de las variables involucradas en el proceso que permiten un análisis más completo del secado de madera.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se realizaron pruebas en los diferentes subsistemas que conforman el secador de madera solar.

A continuación se explica el tipo de pruebas realizadas en cada uno de los subsistemas.

4.1. PRUEBAS PARA EL SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN

De acuerdo a las especificaciones mencionadas en el Capítulo 2: Diseño e Implementación del Hardware, en el *Subsistema de Alimentación*, los voltajes de salida de las fuentes deben estar dentro de un rango de voltaje aceptable, esto para evitar cualquier inconveniente al momento de alimentar los circuitos electrónicos. En la Tabla 4.1 se observa los valores de voltaje obtenidos de la fuente de alimentación y error relativo.

Tabla 4.1 Errores de voltaje en las fuentes de alimentación.

Ubicación	Voltaje nominal [V]	Voltaje medido [V]	Error Relativo [%]
Acondicionamiento	12	12,155	1,3
	5	4,99	0,2
	3.3	3,295	0,15
	-12	-12,237	1,98
Relés	12	12,001	0,0083
	5	5,038	0,76
Microprocesadores	12	11,972	0,23
	5	5,042	0,84
Tarjeta Xbee	12	11,971	0,24
Ventiladores	12	11,976	0,2

De acuerdo a los datos obtenidos del error para las distintas fuentes de alimentación, se observa que están dentro del rango aceptable especificado para cada uno de los reguladores utilizados, con esto se garantiza que cuando el sistema esté funcionando los voltajes de alimentación a los distintos circuitos electrónicos se mantenga en el valor aceptable de funcionamiento.

4.2. PRUEBAS PARA EL SUBSISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO

Las pruebas realizadas para el *Subsistema de Acondicionamiento* permiten realizar una correcta calibración de los sensores de temperatura, humedad relativa y radiación solar.

Para calibrar los sensores antes mencionados se toma como referencia que el error máximo promedio debe ser aproximadamente 5% para cada sensor. Para lograr este propósito se obtuvieron aproximadamente 100 valores los cuales fueron comparados con sus respectivos patrones, a continuación se detalla los resultados obtenidos.

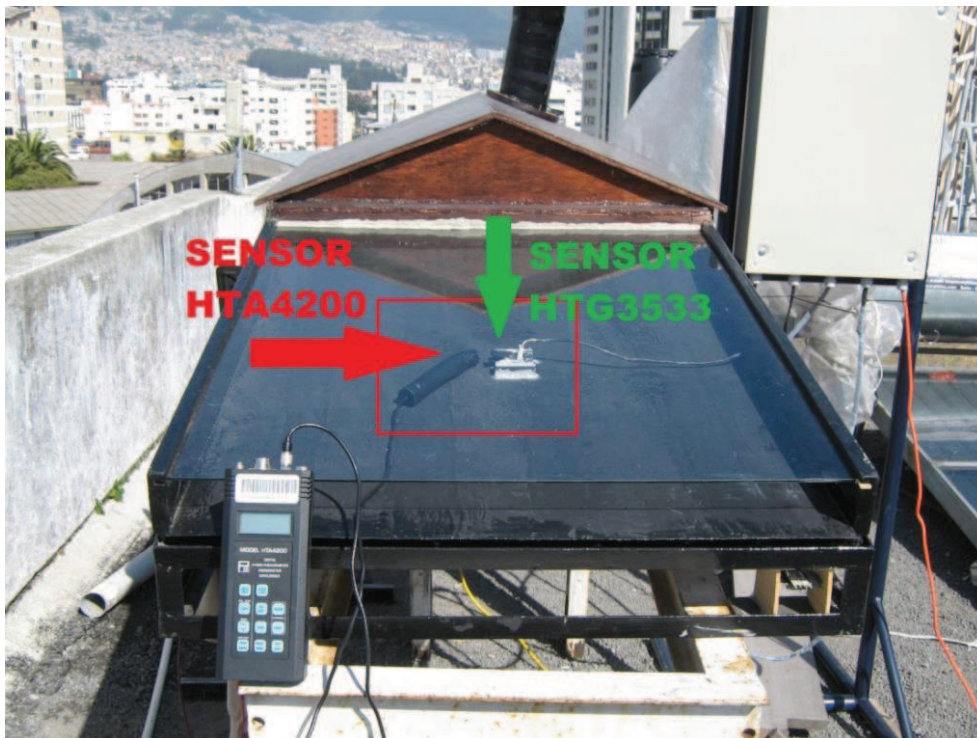
4.2.1. CALIBRACIÓN DE LOS MÓDULOS HTG3533 (SENSORES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA)

En el subcapítulo correspondiente a los sensores de temperatura y humedad relativa se explicó, como se obtuvo la curva de reacción para el sensor de temperatura, y cuál es la ecuación de comportamiento del sensor de humedad relativa, todos estos datos proporcionados por la hoja de datos dada por el fabricante. Teniendo en cuenta estos datos es necesaria la calibración de cada uno de estos sensores, a continuación se indica los resultados obtenidos de la calibración.

Para los módulos **MOD1, MOD2, MOD3, MOD4, MOD5 y MOD6** se obtuvieron valores, con los cuales se comprueba y verifica el comportamiento de los mismos tomando como referencia el higrómetro-termómetro PACER HTA4200 que será el sensor patrón.

Para realizar la calibración de los sensores es necesario colocar el sensor patrón cerca del sensor HTG3533 para que los dos midan en similares condiciones, esto se lo realizó para cada módulo, en la Figura 4.1 se puede observar la prueba de calibración para el **MOD6**.

Figura 4.1 Ubicación del Sensor Patrón HTA4200 para la calibración del sensor MOD6



Después de colocar el sensor patrón se procede a tomar las mediciones de temperatura y humedad relativa, los valores del sensor HTG3533 son recogidas por el sistema de adquisición de datos y almacenados en un archivo de Excel generado por el HMI, mientras que los valores del sensor HTA4200 son recogidos manualmente y almacenados en la memoria interna del mismo dispositivo.

El tiempo de recolección de datos es de una hora y media, lo que corresponde a 100 datos aproximadamente, los datos obtenidos son analizados para cada sensor en Excel y las tablas que contienen los datos se muestran en el Anexo 7.

En las tablas de datos para cada módulo se puede observar los valores de temperatura y humedad relativa obtenidos del sensor patrón PACER HTA4200,

del módulo HTG3533 y el error relativo, también se realizaron las gráficas del comportamiento correspondientes a los valores obtenidos.

A continuación se muestra para cada módulo los datos y las gráficas obtenidas de la calibración, en las gráficas se muestran los valores del sensor patrón, del sensor HTG3533 antes de la calibración y también de los valores después de la calibración.

El análisis se lo hará primero para las temperaturas y luego para las humedades relativas, esto debido a que el sensor HTG3533 mide las dos variables, al igual que el sensor patrón.

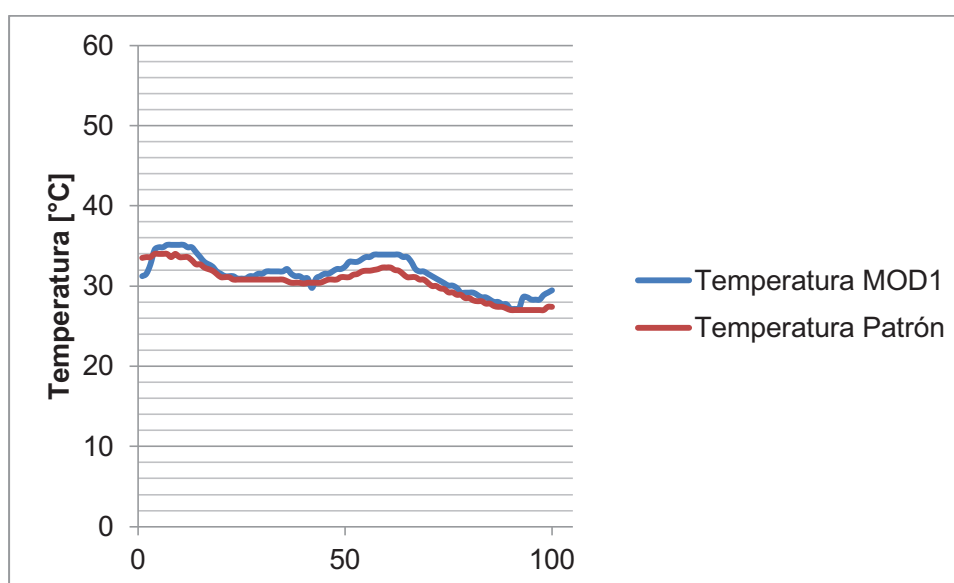
MÓDULO MOD1

Este módulo se encuentra ubicado en la parte central superior (punto intermedio 1) de la cámara (Figura 2.12).

Los datos tomados de temperatura en el punto 1 se encuentran detallados en el Anexo 7.1.

Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y el sensor HTG3533 **MOD1** calibrado (Figura 4.2).

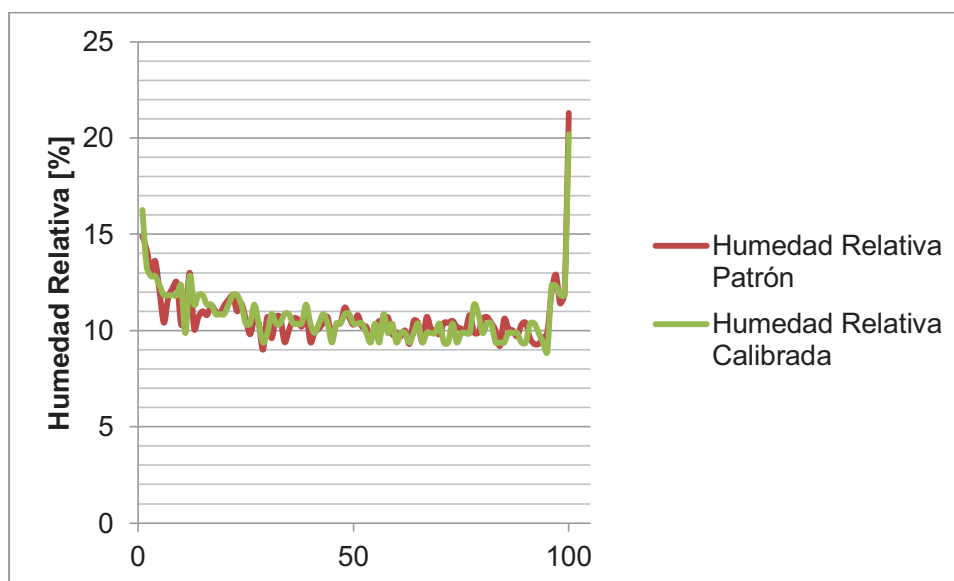
Figura 4.2 Curvas de comportamiento de la temperatura del MOD1 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la temperatura del MOD1 es del 1,69% que se encuentra dentro del rango para considerarlo como un valor aceptable en la medición.

Los datos tomados de humedad relativa en el punto 1 se encuentran detallados en el Anexo 7.2, con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y el sensor HTG3533 **MOD1** calibrado (Figura 4.3).

Figura 4.3 Curvas de comportamiento de la humedad relativa del MOD1 calibrado y del Sensor HTA4200



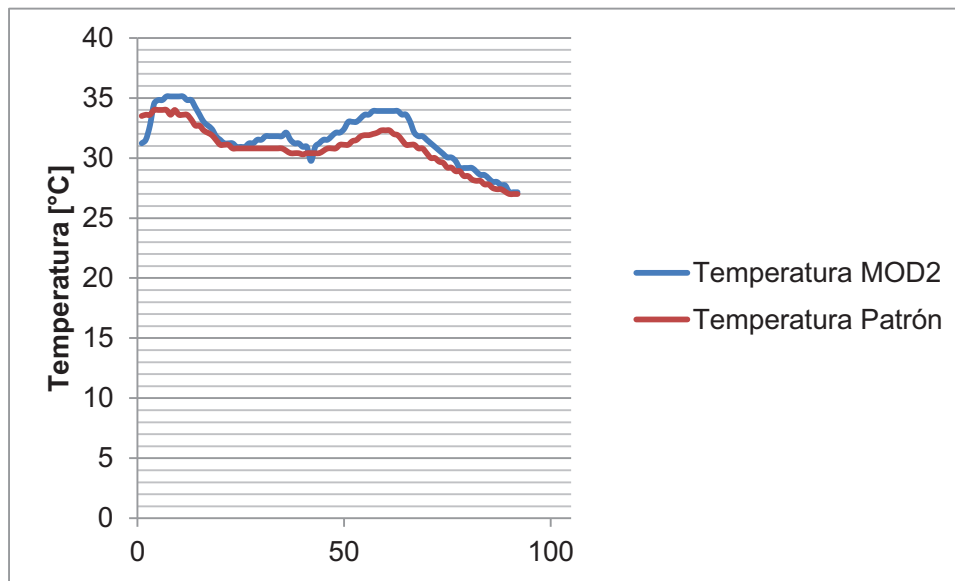
De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la humedad relativa del **MOD1** es del 4,94% que se encuentra dentro del rango para considerarlo como un valor aceptable en la medición.

MÓDULO MOD2

Este módulo se encuentra ubicado en la parte central superior (punto intermedio 2) de la cámara (Figura 2.12).

Los datos tomados de temperatura en el punto 2 se encuentran detallados en el Anexo 7.3, con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y el sensor HTG3533 **MOD2** calibrado (Figura 4.4).

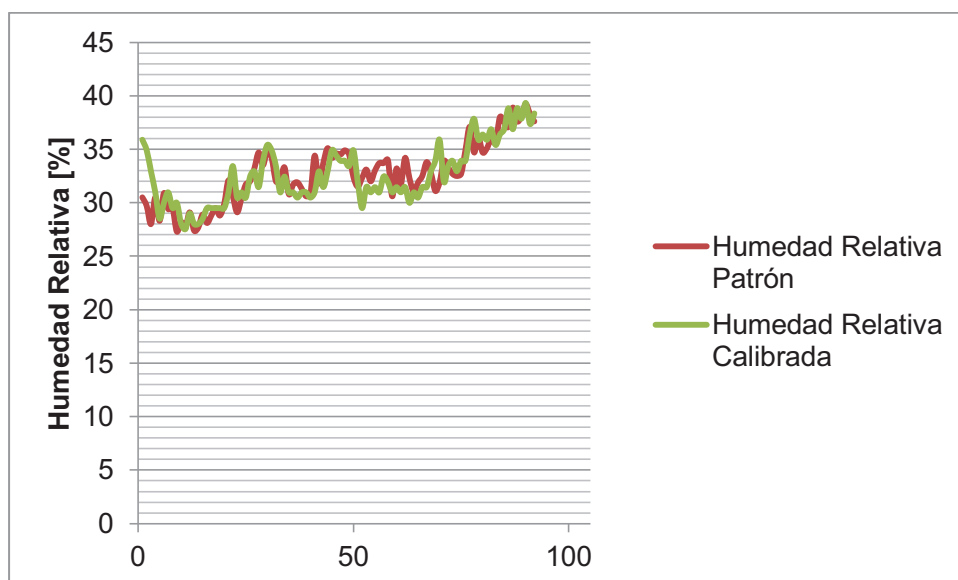
Figura 4.4 Curvas de comportamiento de la temperatura del MOD2 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la temperatura del **MOD2** es del 3,17% valor que se encuentra dentro del rango aceptable.

Los datos tomados de humedad relativa en el punto 2 se encuentran detallados en el Anexo 7.4, con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y el sensor HTG3533 **MOD2** calibrado (Figura 4.5).

Figura 4.5 Curvas de comportamiento de la humedad relativa del MOD2 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la humedad relativa del **MOD2** es del 3,92% que se encuentra dentro del rango para considerarlo como un valor aceptable en la medición.

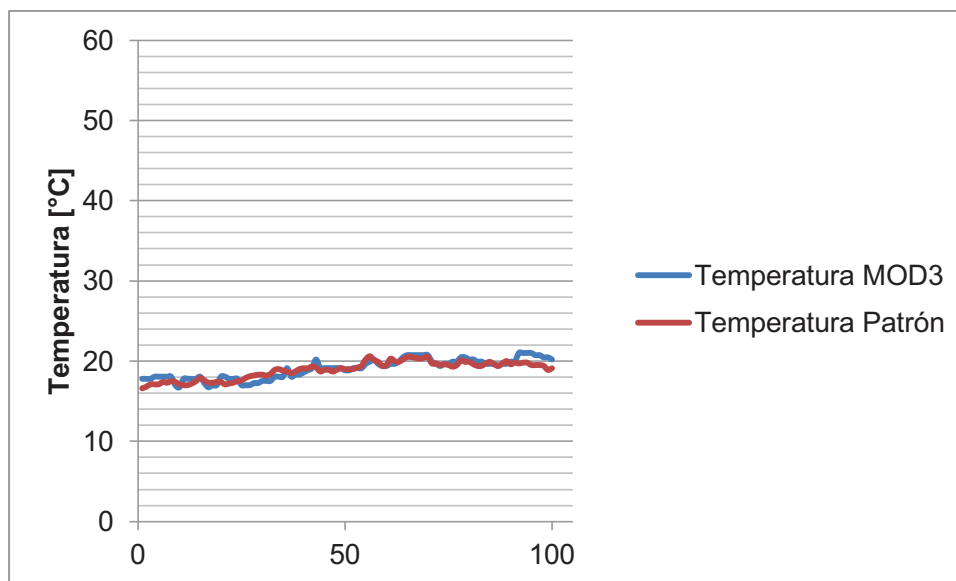
MÓDULO MOD3

Este módulo se encuentra ubicado a la salida de la cámara (Figura 2.12).

Los datos tomados de temperatura a la salida de la cámara se encuentran detallados en el Anexo 7.5.

Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y del sensor HTG3533 **MOD3** calibrado (Figura 4.6).

Figura 4.6 Curvas de comportamiento de la temperatura del MOD3 calibrado y del Sensor HTA4200

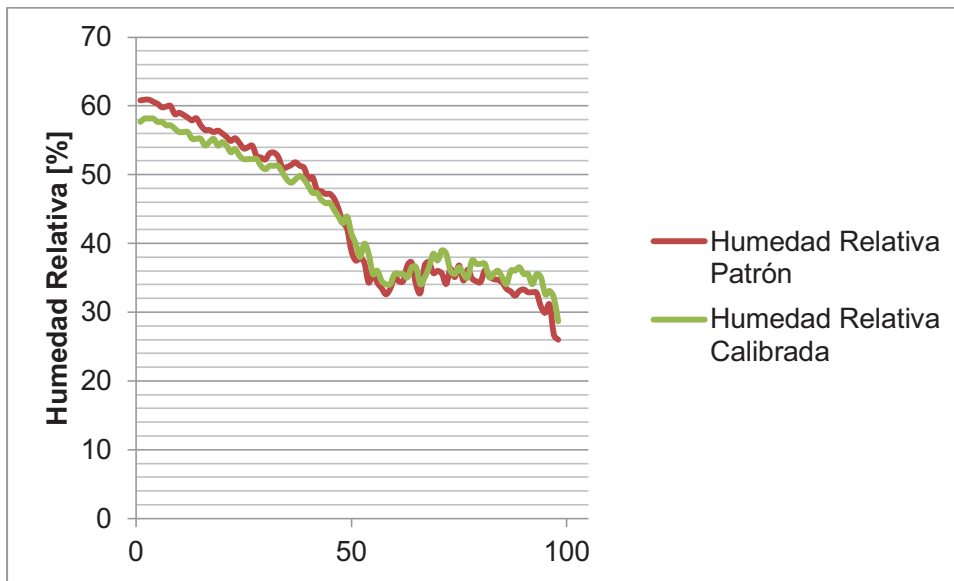


De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la temperatura del **MOD3** es del 3,35% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

Los datos tomados para la humedad relativa en la salida de la cámara se encuentran detallados en el Anexo 7.6.

Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y del sensor HTG3533 **MOD3** calibrado (Figura 4.7).

Figura 4.7 Curvas de comportamiento de la humedad relativa del MOD3 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la humedad relativa del **MOD3** es del 4,62% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

MÓDULO MOD4

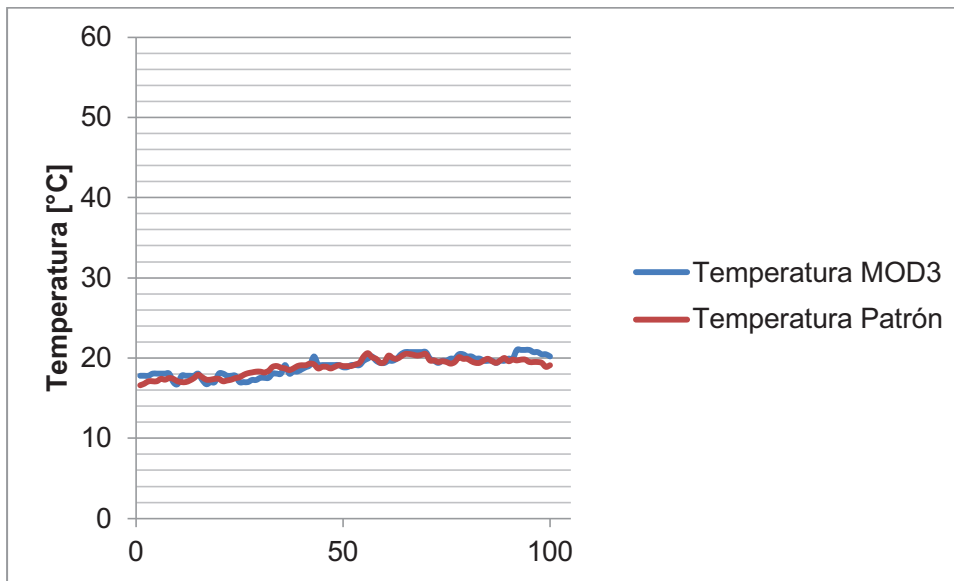
Este módulo mide la temperatura y humedad relativa del ambiente por eso se encuentra en la parte exterior situada en la base (parte inferior) de la cámara (Figura 2.12).

Se utilizó como patrones los sensores de temperatura y humedad relativa de la estación meteorológica del Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética, cuyo sensor es el DMA 672 que es un termo higrómetro, con el cual se calibra el sensor **MOD4**.

Los datos tomados de la temperatura ambiental se encuentran detallados en el Anexo 7.7.

Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y del sensor HTG3533 **MOD3** (Figura 4.8).

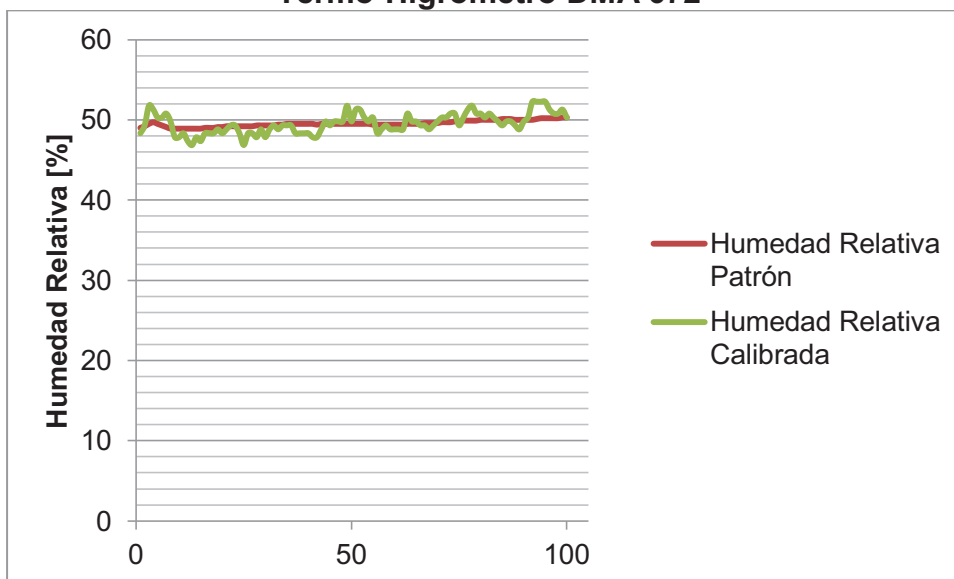
Figura 4.8 Curvas de comportamiento de la temperatura MOD4 y del Termo-Higrómetro DMA 672



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la temperatura del **MOD4** es del 2.81% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

Los datos tomados para la humedad relativa en la salida de la cámara se encuentran detallados en el Anexo 7.8. Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y el sensor HTG3533 **MOD4** (Figura 4.9).

Figura 4.9 Curvas de comportamiento de la humedad relativa del MOD4 y del Termo-Higrómetro DMA 672



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la humedad relativa del **MOD4** es del 2.87% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

Para este módulo no fue necesario ningún tipo de calibración ya que el momento de tomar los valores y compararlos con los de los sensores patrones, los errores que se obtuvieron para la temperatura y humedad relativa son menores al del error promedio máximo permitido.

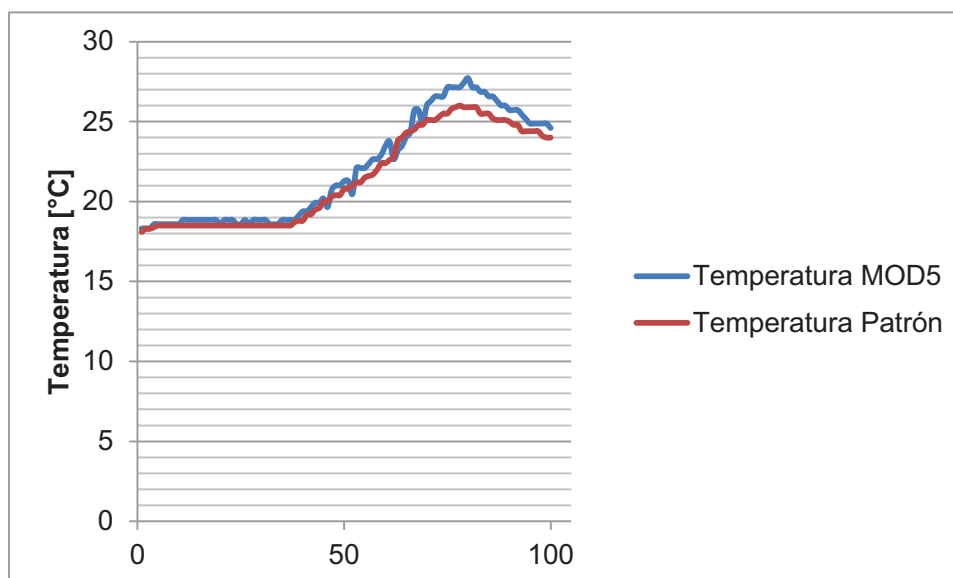
MÓDULO MOD5

Este módulo se encuentra ubicado en la entrada de la cámara (Figura 2.12).

Los datos tomados de temperatura a la entrada de la cámara se encuentran detallados en el Anexo 7.9.

Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y del sensor HTG3533 **MOD5** calibrado (Figura 4.10).

Figura 4.10 Curvas de comportamiento de la temperatura del MOD5 calibrado y del Sensor HTA4200

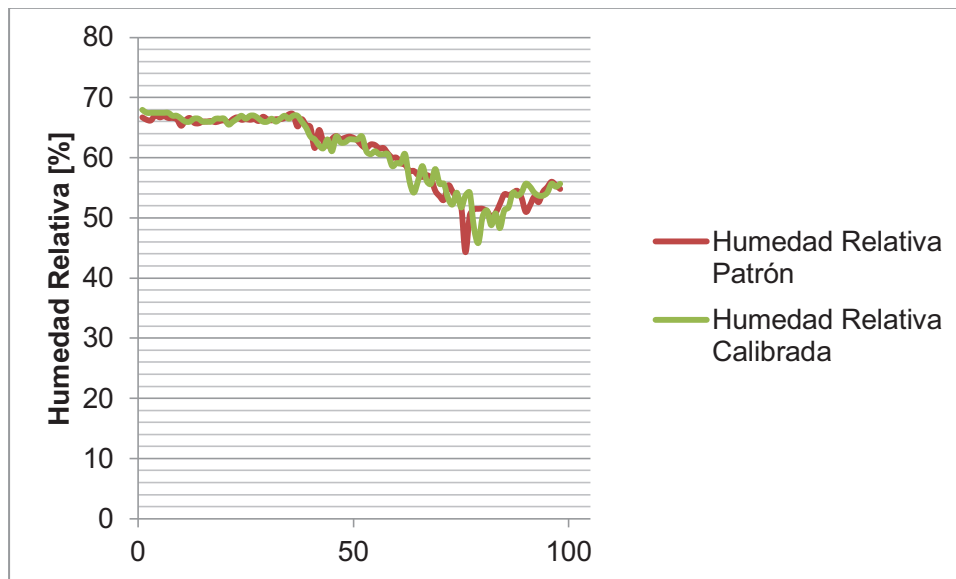


De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la temperatura del **MOD5** es del 2.6% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

Los datos tomados para la humedad relativa a la entrada de la cámara se encuentran detallados en el Anexo 7.10.

Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y del sensor HTG3533 **MOD5** calibrado (Figura 4.11).

Figura 4.11 Curvas de comportamiento de la humedad relativa del MOD5 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la humedad relativa del **MOD5** es del 2,15% valor que se encuentra dentro del rango.

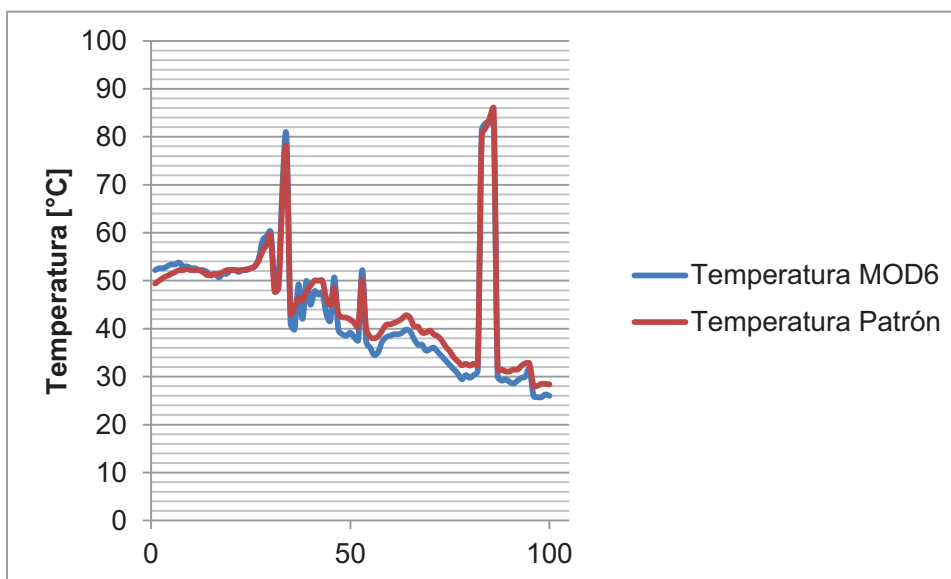
MÓDULO MOD6

Este módulo se encuentra ubicado en un punto intermedio en el interior del colector (Figura 2.11).

Los datos tomados de temperatura en el colector se encuentran detallados en el Anexo 7.11.

Con los valores obtenidos de temperatura se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón HTA4200 y del sensor HTG3533 **MOD6** calibrado (Figura 4.12).

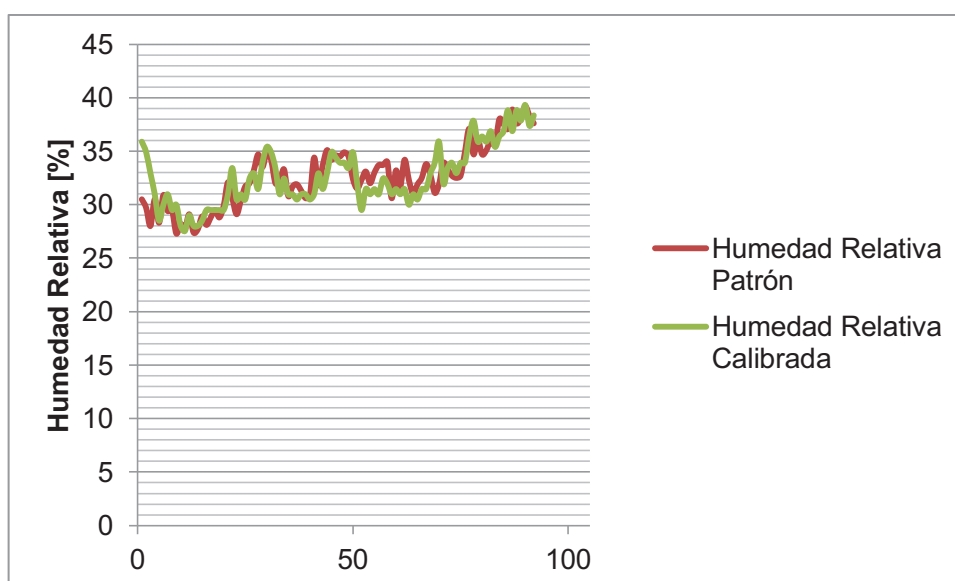
Figura 4.12 Curvas de comportamiento de la temperatura del MOD5 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la temperatura del **MOD6** es del 5,15% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

Los datos tomados de humedad relativa en el colector se encuentran en el Anexo 7.12. Con los valores obtenidos se procede a graficar el comportamiento del sensor patrón y del sensor HTG3533 **MOD5** calibrado (Figura 4.11).

Figura 4.13 Curvas de comportamiento de la humedad relativa del MOD5 calibrado y del Sensor HTA4200



De acuerdo a los cálculos realizados el error promedio para la humedad relativa del **MOD6** es del 5,2% valor que se encuentra dentro del rango para considerar la medición como un valor aceptable en el proceso.

Dentro del *Subsistema de Acondicionamiento* también se realizó la calibración para el sensor de radiación solar, de la misma forma en la que se realizó la calibración para los módulos de HTG3533.

4.2.2. CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR VANTAGE PRO 6450

Para comprobar el comportamiento del sensor de radiación solar 6450, utilizando la curva de reacción, se procede a comparar los valores obtenidos con el sensor patrón, en este caso, el radiómetro global DPA 453 de la estación meteorológica del LEAEE.

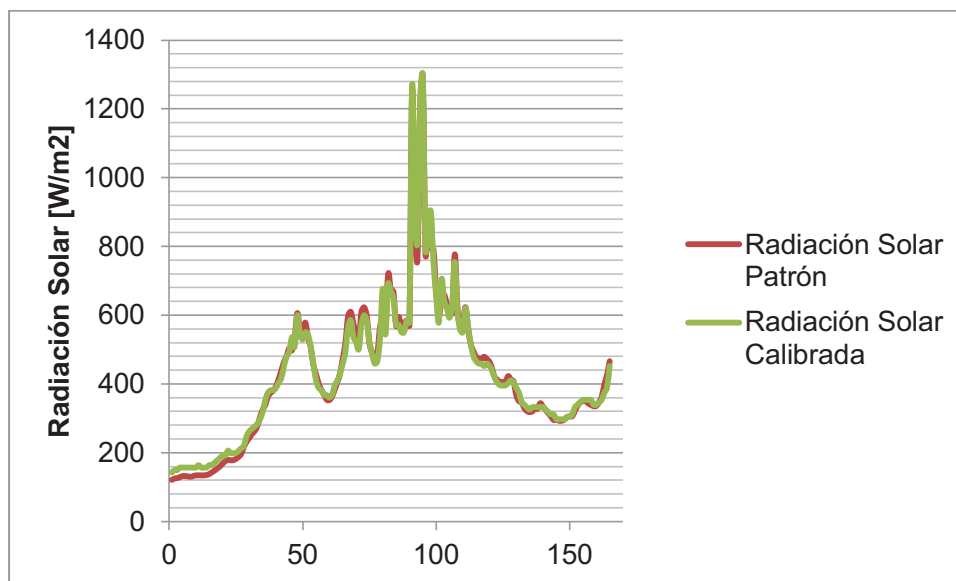
La prueba se realizó ubicando el sensor de radiación solar 6450 que se encuentra en un módulo ubicado en la terraza de la Facultad de Ingeniería Mecánica, junto al radiómetro DPA 453, el cual se encuentra montado en una torre meteorológica del LEAEE, es decir al ser colocados en la misma posición se garantiza que los dos sensores midan la radiación solar en similares condiciones.

Los valores obtenidos durante la prueba se pueden observar en una tabla en la que se encuentran los valores del sensor de radiación solar 6450 y del radiómetro global DPA 453, así como también del error relativo para cada medición y al final el error promedio de esta prueba (ver Anexo 8).

El error promedio calculado entre el valor del sensor patrón y el sensor utilizado para medir la radiación solar debe ser aproximadamente del 5%, esto para que el valor obtenido sea aceptable.

En la Figura 4.14 se observa las gráficas del comportamiento del radiómetro DPA 453 y del sensor de radiación solar VANTAGE PRO 6450 calibrado.

Figura 4.14 Curvas de comportamiento del sensor de radiación solar 6450 y del radiómetro DPA 453



De acuerdo a los valores calculados se tiene que el error máximo promedio para este sensor es del 4,99%, valor que se encuentra dentro del rango aceptable para medición de los parámetros.

4.2.3. PRUEBAS PARA OBTENER LA ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE VELOCIDAD MD0550

El sensor de velocidad MD0550 no cuenta con una curva característica, es decir, no se tiene la ecuación de comportamiento para realizar los cálculos en el microcontrolador, motivo por el cual se realizó las pruebas para encontrar esta curva y posteriormente la ecuación de comportamiento.

De acuerdo a la información dada por el fabricante se obtiene $0\ m/s$ cuando el voltaje de salida es de 0,5 voltios, es decir, para obtener este valor de salida es necesario ajustar el potenciómetro que se encuentra en el sensor para obtener ese valor, esto fue posible cuando se aisló al sensor en un espacio cerrado, ya que un leve movimiento del aire en los alrededores del sensor cambiaban el valor de salida de voltaje. Luego de obtener los valores antes mencionados se procedió a realizar la prueba para encontrar la curva característica del sensor, para esto se utiliza un túnel de viento en el cual mediante un variador de velocidad se controla

el flujo generado por el ventilador centrífugo que se encuentra acoplado al motor trifásico.

Al poder controlar el flujo de aire dentro del túnel de viento se puede mantener un flujo constante, con lo cual se garantiza que al momento de medir la salida de voltaje del sensor MD0550 se tendrá un valor fijo para ese flujo de aire, se utilizó como sensor patrón al sensor HTA4200 que también mide velocidad de viento.

La prueba realizada consistió en colocar los sensores en el túnel de viento de tal forma que el flujo de aire que pase por los dos sea el mismo, como se observa en la Figura 4.15.

Una vez colocados los sensores en su posición se procede a encender el sistema con un determinado flujo de aire. Después de esto se toma los valores de velocidad de viento con el sensor patrón y el voltaje de salida con el sensor MD0550, es decir, para un voltaje de salida del sensor MD0550 se tendrá el valor de velocidad de viento respectivo, este procedimiento se lo realiza con diferentes flujos de aire dentro del túnel de viento. Con los valores que se obtienen de esta prueba se procede en Excel a graficar la curva correspondiente y así obtener la ecuación que se implementó en el microcontrolador para comprobar las mediciones de este sensor (Ver Anexo 2).

Figura 4.15 Ubicación del sensor de velocidad de viento MD0550 y el anemómetro HTA4200



Una vez obtenida la curva característica del sensor, se obtuvo la ecuación de comportamiento, la misma que se indica a continuación.

$$Vel = 0,0679 * V^5 - 0,7821 * V^4 + 3,5722 * V^3 - 7,6288 * V^2 + 7,9164 * V - 3,0853$$

Después de realizar las pruebas respectivas y la calibración de los sensores involucrados en el sistema de adquisición de datos se procede a realizar las pruebas del sistema de control y del proceso de secado, esto debido a que las variables involucradas en los distintos procesos deben ser correctas para que el control se haga de forma correcta, y se garantice un buen secado de la madera.

4.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SUBSISTEMA DE CONTROL

Para este subsistema se realizaron varias pruebas en las cuales se determinó, el tipo de ventilación y el tipo de control empleado para garantizar un proceso de secado óptimo, también se realizaron las pruebas respectivas para comprobar que el control implementado se realiza de forma correcta.

A continuación se explica las pruebas realizadas y los resultados que se obtuvieron de las mismas.

4.3.1. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA DETERMINAR EL TIPO DE VENTILACIÓN

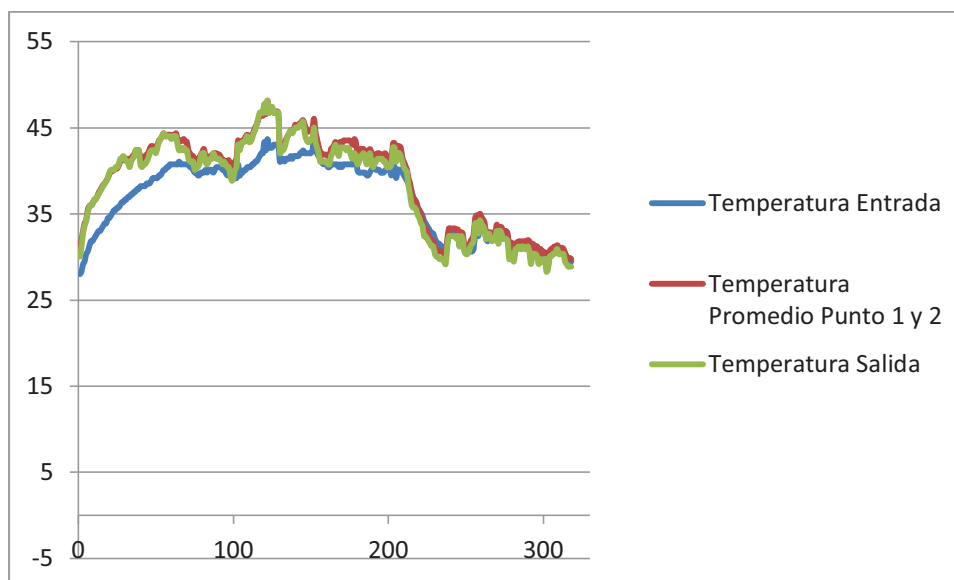
Para que el proceso de secado se esté efectuando en las condiciones adecuadas, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- a) La temperatura a la entrada de la cámara debe ser mayor a la temperatura en los puntos intermedios.
- b) La temperatura a la salida de la cámara debe ser menor a la temperatura en los puntos intermedios.

Tomando en cuenta estos criterios se asegura que el flujo dentro de la cámara es el adecuado para secar la madera, ya que al no cumplir con estas condiciones provocaría que el flujo de aire en el interior sea excesivo o insuficiente para secar.

El secado que realiza el prototipo es por convección natural, en el que la chimenea existente en este prototipo permite trasladar el vapor de agua extraído de la madera hacia el exterior. Se realizaron varias pruebas del sistema en las cuales se comprobó que los criterios de secado antes mencionados no se cumplían, es decir, la ventilación en el interior de la cámara no permite un secado eficiente como se observa en la Figura 4.16.

Figura 4.16 Resultados de las pruebas realizadas con ventilación natural



Debido a que los criterios de secado no se cumplen con la ventilación natural, se decidió implementar una ventilación forzada, misma que se logra ubicando ventiladores en el prototipo.

De acuerdo a lo mencionado antes se decidió colocar un ventilador en la chimenea, éste sirve para forzar la salida del vapor de agua al exterior.

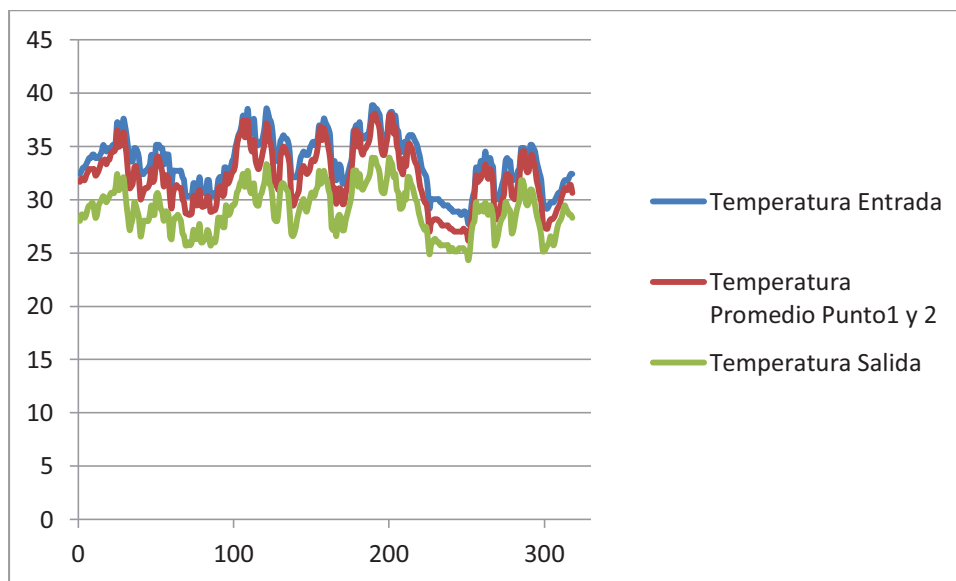
Realizando las pruebas correspondientes y con el ventilador en su máximo valor, no se consiguió cumplir con los criterios de secado, es decir, que el flujo de aire no era el suficiente, motivo por el cual se optó por incorporar otro ventilador, el cual se lo ubicó en la parte central superior de la cámara (ver Figura 2.26).

Con los ventiladores ubicados en las posiciones indicadas, se realizaron nuevas pruebas, en las cuales los ventiladores se alimentaron con el valor máximo de

voltaje y se comprobó que los criterios establecidos se cumplieron, obteniendo un flujo de aire adecuado.

En la Figura 4.17 se muestra las gráficas de las temperaturas de los puntos de la cámara de secado luego de haber implementado un sistema con ventilación forzada.

Figura 4.17 Resultados de las pruebas realizadas con ventilación forzada



Los datos de las pruebas realizadas para comprobar el cumplimiento de las condiciones que permiten un secado eficiente se detallan en el Anexo 9, los datos tabulados de las pruebas con ventilación natural se encuentran en el Anexo 9.1, mientras que los datos de las pruebas realizadas con ventilación forzada se muestran en el Anexo 9.2.

4.3.2. PRUEBAS PARA DETERMINAR EL TIPO DE CONTROL

Para determinar el tipo de control se realizaron varias pruebas en las cuales se consideró el estado del clima, es decir, se tomó en cuenta si el día estaba soleado o nublado (cantidad de radiación solar global), esto para determinar cuál es el valor de voltaje de alimentación necesario para los ventiladores y que estos cumplan con las condiciones establecidas de acuerdo a las condiciones climáticas.

Para conocer el valor con el que van a ser alimentados los ventiladores se decidió tomar como referencia que el voltaje máximo con el que están alimentados es el 100% y a partir de esto se dividió el voltaje de alimentación desde 0% hasta el 100% en pasos de 10%, con lo cual se tiene 10 diferentes voltajes de alimentación.

Se probó con cada uno de los porcentajes de alimentación y se llegó a determinar que los dos ventiladores empiezan a girar con un voltaje de alimentación del 50%, motivo por el cual se consideran los porcentajes desde el 50% al 100% para alimentar a los ventiladores. Dependiendo de las condiciones climáticas se estableció 4 rangos los cuales son: Mayormente Nublado, Parcialmente Nublado, Escasamente Nublado y Soleado, y para cada uno de estos se determinó la radiación solar correspondiente, tomando en cuenta estos rangos se varió los porcentajes de alimentación de los ventiladores con la finalidad de que los criterios de secado antes mencionados se cumplan. Los datos obtenidos de las diferentes pruebas realizadas se pueden ver en el Anexo 10, después de realizar el análisis respectivo de los datos se llegó a determinar cuatro rangos de radiación solar, y la variación del voltaje de alimentación de los ventiladores para que se cumpla con los criterios de secado. En la Tabla 4.2 se detalla el resultado del análisis, y se indica los rangos de radiación con sus respectivos porcentajes de alimentación de los dos ventiladores.

Tabla 4.2 Resultados de las pruebas para determinar el porcentaje de alimentación de los ventiladores del sistema

Estado del Tiempo	Condición 1	Radiación Solar	Ventilador Cámara	Condición 2	Ventilador Chimenea
Mayormente Nublado	Ten > Tint	0-300	50%	Ten > Ts	60%
	Ten < Tint		60%	Ten < Ts	60%
Parcialmente Nublado	Ten > Tint	301-600	60%	Ten > Ts	70%
	Ten < Tint		70%	Ten < Ts	70%
Escasamente Nublado	Ten > Tint	601-1000	70%	Ten > Ts	80%
	Ten < Tint		80%	Ten < Ts	80%
Soleado	Ten > Tint	1001-1800	90%	Ten > Ts	100%
	Ten < Tint		100%	Ten < Ts	100%

Ten: Temperatura entrada, Tint: Temperatura Intermedia, Ts: Temperatura salida

Teniendo en cuenta los rangos de radiación y los porcentajes de alimentación de los ventiladores se procede a realizar la acción de control en el microcontrolador esclavo, y para comprobar que se cumpla con lo indicado en la tabla 4.2 se realizan las pruebas pertinentes.

4.3.2.1. COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LOS VENTILADORES

Para comprobar el funcionamiento del sistema de control de los ventiladores se midió el voltaje de alimentación a éstos y se comparó con los voltajes que se esperarían cuando están alimentados del 50% al 100%, también se toma los valores de radiación solar correspondientes a los valores de voltaje de alimentación, esto se lo hace para comprobar que el accionamiento de los ventiladores se lo haga en el rango establecido con los valores de alimentación de voltaje correspondiente.

En la Tabla 4.3 se indica el valor de voltaje de alimentación para cada porcentaje tomando como referencia que el voltaje máximo de alimentación es 11,164 V.

Tabla 4.3 Porcentajes de alimentación de los ventiladores

Porcentaje [%]	Voltaje [V]
50	5,582
60	6,6984
70	7,8148
80	8,9312
90	10,0476
100	11,164

En la prueba realizada se tomaron los datos de los voltajes de alimentación de los 2 ventiladores para cada rango de radiación solar y se comparó estos voltajes con los mostrados en la tabla 4.3.

Los datos obtenidos de esta prueba se muestran en diferentes tablas, los valores obtenidos en el rango de 0 a 300 $[W/m^2]$ se muestran en la Tabla 4.4, los valores para el rango de 301 a 600 $[W/m^2]$ se muestran en la Tabla 4.5, los valores para el

rango de 601 a 1000 $[W/m^2]$ se muestran en la Tabla 4.6 mientras que para los valores de 1001 a 1800 $[W/m^2]$ se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.4 Voltaje de Alimentación para los ventiladores en el rango de 0 a 300 $[W/m^2]$

Radiación Solar	Ventilador Cámara	Voltaje Ventilador Cámara	Error Relativo Ventilador Cámara	Ventilador Chimenea	Voltaje Ventilador Chimenea	Error Relativo Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[%]	[V]	[%]	[%]	[V]	[%]
82,3	50	5,585	0,0537	60	6,566	1,9766
74,35	50	5,581	0,0179	60	6,568	1,9467
117,35	50	5,574	0,1433	60	6,573	1,8721
237,3	50	5,569	0,2329	60	6,573	1,8721
230,39	50	5,578	0,0717	60	6,574	1,8572
230,25	50	5,57	0,2150	60	6,576	1,8273
230,3	50	5,572	0,1791	60	6,579	1,7825
82,3	50	5,571	0,1971	60	6,581	1,7527
237,3	50	5,582	0,0000	60	6,581	1,7527
166,84	50	5,576	0,1075	60	6,583	1,7228
		Promedio	0,1218		Promedio	1,8363

Tabla 4.5 Voltaje de Alimentación para los ventiladores en el rango de 301 a 600 $[W/m^2]$

Radiación Solar	Ventilador Cámara	Voltaje Ventilador Cámara	Error Relativo Ventilador Cámara	Ventilador Chimenea	Voltaje Ventilador Chimenea	Error Relativo Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[%]	[V]	[%]	[%]	[V]	[%]
540,29	70	7,842	0,3481	70	7,763	0,6628
463,3	70	7,834	0,2457	70	7,759	0,7140
314,2	60	6,727	0,4270	70	7,76	0,7012
413,29	60	6,721	0,3374	70	7,77	0,5733
532,86	60	6,613	1,2749	70	7,759	0,7140
543,34	60	6,723	0,3673	70	7,769	0,5861
554,3	60	6,736	0,5613	70	7,77	0,5733
392,29	60	6,727	0,4270	70	7,77	0,5733
589,58	60	6,729	0,4568	70	7,771	0,5605
471,76	60	6,731	0,4867	70	7,773	0,5349
		Promedio	0,4939		Promedio	0,6193

Tabla 4.6 Voltaje de Alimentación para los ventiladores en el rango de 601 a 1000 $[W/m^2]$

Radiación Solar	Ventilador Cámara	Voltaje Ventilador Cámara	Error Relativo Ventilador Cámara	Ventilador Chimenea	Voltaje Ventilador Chimenea	Error Relativo Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[%]	[V]	[%]	[%]	[V]	[%]
631,69	80	8,987	0,6248	80	8,814	1,3123
645,29	70	7,848	0,4248	80	8,9	0,3493
645,12	70	7,847	0,4120	80	8,903	0,3157
601,15	70	7,852	0,4760	80	8,902	0,3269
709,33	70	7,847	0,4120	80	8,912	0,2150
701,86	70	7,851	0,4632	80	8,904	0,3046
779,8	70	7,855	0,5144	80	8,903	0,3157
807,97	70	7,854	0,5016	80	8,901	0,3381
829,4	70	7,85	0,4504	80	8,907	0,2710
793,88	70	7,848	0,4248	80	8,907	0,2710
		Promedio	0,4704		Promedio	0,4020

Tabla 4.7 Voltaje de Alimentación para los ventiladores en el rango de 1001 a 1800 $[W/m^2]$

Radiación Solar	Ventilador Cámara	Voltaje Ventilador Cámara	Error Relativo Ventilador Cámara	Ventilador Chimenea	Voltaje Ventilador Chimenea	Error Relativo Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[%]	[V]	[%]	[%]	[V]	[%]
1068	90	10,043	0,0458	100	11,229	0,5822
1131,2	90	10,056	0,0836	100	11,247	0,7435
1034	90	10,042	0,0557	100	11,231	0,6001
1269	90	10,035	0,1254	100	11,229	0,5822
1069,4	90	10,048	0,0040	100	11,228	0,5733
		Promedio	0,0629		Promedio	0,6163

Como se puede observar en las distintas tablas los errores que se tienen de los voltajes medidos con respecto a los voltajes esperados es de menos del 1%, teniendo un voltaje de alimentación aceptable para cada uno de los ventiladores, también se puede observar que dependiendo de los rangos de radiación solar se

tiene los porcentajes de voltaje de alimentación especificados para poder realizar el control.

4.4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROCESO DE SECADO

Para verificar que el proceso de secado se está realizando de una forma óptima se efectúan dos pruebas: la primera prueba se la realiza para verificar que el secado con ventilación forzada es más eficiente que con ventilación natural y la segunda prueba se la realiza para saber el tiempo que se demora el proceso en secar 12 piezas de madera, desde 39% a 18% de contenido de humedad.

A continuación se explica de forma detallada cada una de las pruebas antes mencionadas.

4.4.1. COMPARACIÓN DEL PROCESO DE SECADO UTILIZANDO VENTILACIÓN NATURAL Y VENTILACIÓN FORZADA

Para poder establecer una comparación entre estos tipos de ventilación fue necesario realizar las pruebas de secado con un tipo de ventilación y luego con el otro, y con los datos obtenidos comprobar que el sistema de ventilación permite un secado más eficiente.

Para estas pruebas se tomó en cuenta un tiempo determinado, éste fue de aproximadamente 5 horas. Para conocer como se está realizando el proceso de secado durante este tiempo, se debe conocer la cantidad de agua que es evaporada y para esto se necesita saber la masa inicial y la masa final de las piezas de madera, ya que al conocer este valor se determinará qué tipo de ventilación permite una mayor extracción de agua de las piezas de madera.

Para iniciar el proceso de secado se midió el peso de cada una de las 12 piezas y luego se procedió al apilamiento dentro de la cámara de secado, se inició el sistema de adquisición de datos y control. El sistema de ventilación se encuentra apagado (ventilación natural) y después de 5 horas de secado se retira las piezas y se mide nuevamente el peso. Para calcular la cantidad de agua evaporada durante el proceso se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (4.1)$$

Dónde:

Δm : Cantidad de agua evaporada

m_i : Masa inicial de la madera

m_f : Masa final de la madera

En la Tabla 4.8 se muestran los valores: promedio de radiación solar, masa inicial total de madera, masa final total de madera y cantidad total de agua evaporada, tomando en cuenta la masa inicial y final de cada una de las piezas de madera se puede calcular un promedio de agua evaporada, así como también el promedio de agua que se evapora de la fila superior e inferior del apilado, los datos de los pesos individuales se observa en el Anexo 11.

Tabla 4.8 Datos del proceso de Secado con Ventilación Natural

Radiación Solar Promedio	Masa Inicial Total	Masa Final Total	Agua Evaporada Total	Promedio del Agua Evaporada Total	Promedio del Agua Evaporada Fila Superior	Promedio del Agua Evaporada Fila Inferior
$[W/m^2]$	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
798,96	4.753,69	4.253,09	500,6	41,72	54,88	26,70

El proceso antes descrito se repite, pero con el sistema de ventilación encendido (ventilación forzada).

En la Tabla 4.9 se indica los valores obtenidos y en el Anexo 11 se presenta los valores de masas para cada una de las piezas individualmente.

Tabla 4.9 Datos del proceso de Secado con Ventilación Forzada

Radiación Solar Promedio	Masa Inicial Total	Masa Final Total	Agua Evaporada Total	Promedio del Agua Evaporada Total	Promedio del Agua Evaporada Fila Superior	Promedio del Agua Evaporada Fila Inferior
$[W/m^2]$	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
692,43	4.898,94	4.243,58	655,36	54,61	60,27	48,95

Para establecer qué tipo de ventilación favorece el secado se compara la masa de agua evaporada en cada una de las pruebas. Para la ventilación natural se tiene 500,6 g de agua evaporada mientras que para la ventilación forzada se logra extraer 655,36 g, por lo tanto implementar un secado con ventilación forzada garantiza que el proceso de secado sea óptimo.

Otro factor importante dentro de este análisis es la cantidad de radiación solar incidente. Como se puede observar en la prueba 1 el promedio de radiación solar es de 798,96 $[W/m^2]$, mientras que para la prueba 2 es de 692,43 $[W/m^2]$, la radiación en la segunda prueba es menor pero al tener una mejor circulación de aire en el interior de la cámara, se extrae más cantidad de agua de las piezas de madera.

En el apilado de madera se tiene dos filas, cada una consta de 6 piezas de madera, en las tablas 4.8 y 4.9 se muestra el promedio de agua evaporada para cada fila, analizando los resultados se tiene que en las dos pruebas se extrae más agua en la fila superior, esto se debe a que en la fila inferior la circulación de aire es menor y el aire húmedo no circula de forma eficiente.

4.4.2. PRUEBA PARA ESTABLECER EL TIEMPO DE SECADO DE LA MADERA

Para determinar el tiempo de secado se procede a humedecer las piezas de madera hasta que todas tengan la misma masa, esto garantiza que el contenido de humedad sea igual para todas.

Antes de introducir las maderas a la cámara de secado, se pesa cada una de las piezas, para tener la masa inicial, luego se apilan las piezas y se comienza con el proceso de secado.

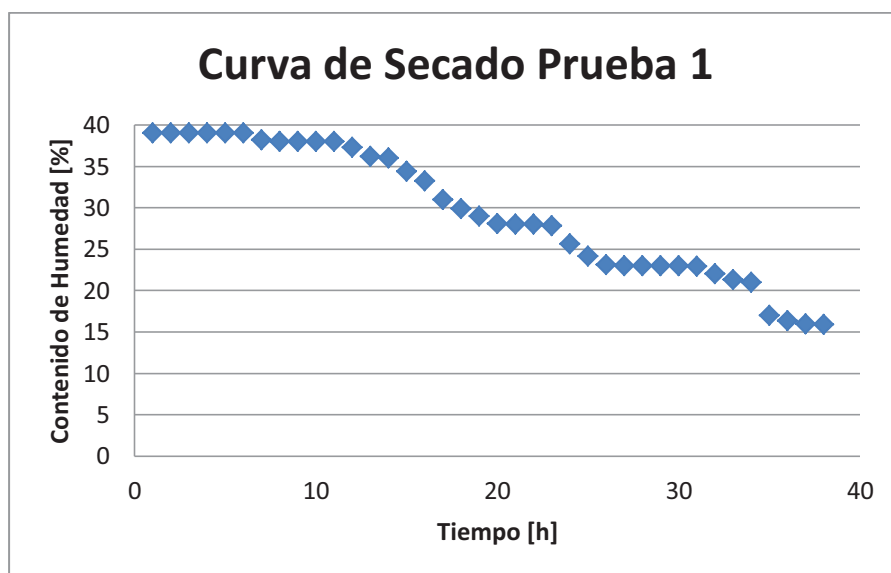
Este proceso se llevará a cabo desde las 09:40 de la mañana hasta las 5:30 de la tarde, transcurrido este tiempo se retira las piezas de madera para pesarlas, luego de esto se apila nuevamente las piezas en la cámara. El proceso de pesaje de las piezas de madera da a conocer el comportamiento del secado durante todo un día, ya que tomar en cuenta las masas iniciales y finales de cada día permite

saber la cantidad de agua que se ha extraído de las piezas durante la mañana y también saber que sucede durante la noche, debido a que en este tiempo no existe ningún tipo de control. Para conocer el tiempo necesario para secar las piezas de madera se tomará en cuenta el contenido de humedad. Las piezas comienzan con un contenido de humedad del 39% y se desea llegar al 15%.

Después de concluida la prueba se determinó que las 12 piezas de madera apiladas dentro de la cámara llegaron al contenido de humedad establecido en un lapso de 6 días.

En la Figura 4.18 se puede observar la curva de secado de la prueba realizada.

Figura 4.18 Curva de Secado para dos filas de madera apilada



Tomando en cuenta los valores de masa se puede determinar cuanta cantidad de agua total se extrae de las piezas de madera, en la Tabla 4.10 se detalla los valores obtenidos de la prueba realizada.

Tabla 4.10 Masa total de Agua Extraída en el proceso de secado (Prueba 1)

Masa Inicial Total	Masa Final Total	Cantidad total de agua evaporada
[g]	[g]	[g]
4.317,73	2.930,66	1.387,07

Las 12 piezas de madera tienen una masa total inicial de 4.317,73 gramos con un contenido de humedad del 39%, después de 6 días de secado se extrajo 2.930,66 gramos de agua y las piezas de madera terminaron con un contenido de humedad de 15% en promedio. Cada pieza perdió en promedio 115,59 gramos de agua en total. En la Tabla 4.11 se muestra los valores promedio de agua extraída de cada día.

Tabla 4.11 Masa de agua extraída por día (Prueba 1)

Día	Masa total de agua extraída en el día	Masa total de agua extraída en la noche	Promedio de Radiación Solar
	[g]	[g]	[W/m ²]
1	46,63	9,07	473,76
2	29,05	3,04	478,85
3	15,21	-1,51	487,33
4	8,92	-2,77	425,92
5	7,76	-2,55	449,06
6	1,56	-	512,4

Como se puede observar en la tabla 4.11 durante los dos primeros días la cantidad de agua que se extrae es mayor que en los demás días, esto se debe a que el proceso se encuentra en la fase de secado constante donde el contenido de humedad decrece de forma rápida hasta alcanzar el punto de saturación de fibras, a partir del día 3 la cantidad de agua que se extrae es menor porque el proceso se encuentra en la fase de secado intermedio donde el secado es más lento, hasta llegar al contenido de humedad deseado.

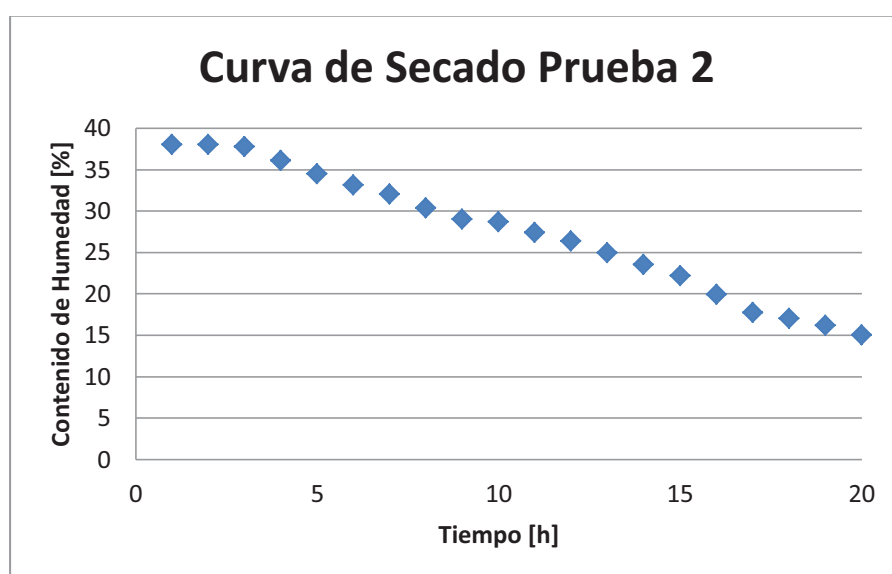
La radiación solar es un factor importante al momento de analizar la cantidad de agua extraída, porque a mayor radiación solar la temperatura del aire, que sirve para la extracción del agua de las piezas, se incrementa.

Esto se puede apreciar observando los datos de radiación solar de la tabla 4.11, donde los días que existe mayor radiación solar la cantidad de agua extraída de las piezas es mayor dependiendo de la fase de secado en la que se encuentre.

Durante la noche, tiempo en el que no existe ningún tipo de control, en los primeros 4 días existe una pérdida de agua en las piezas de madera y esto se debe a la propiedad higroscópica de la madera, es decir, las condiciones en las que se encuentra la cámara permiten que haya una pérdida de agua de las piezas de madera ya que éstas se encuentran más húmedas que el ambiente en el que se encuentran, caso contrario sucede después del cuarto día en el que las piezas de madera no pierden peso, sino que ganan peso y esto se debe a que las maderas ya no se encuentran tan húmedas como el ambiente en el que se encuentran, por este motivo la diferencia es negativa.

La prueba antes mencionada se realizó tomando en cuenta las 12 piezas de madera, las cuales fueron apiladas de la forma que se indicó en el subcapítulo del apilado de la madera. Como parte del análisis correspondiente al proceso de secado se decidió implementar una prueba para conocer el tiempo de secado cuando se apila una fila de 6 piezas dentro de la cámara, los datos obtenidos de esta prueba así como la curva de secado se presentan a continuación. Para realizar la prueba se humedecieron las piezas hasta conseguir uniformidad en sus masas iniciales, garantizando así un contenido de humedad de la madera similar para todas las piezas, luego se procedió a realizar el secado de la misma forma en la que se realizó la prueba para las 12 piezas de madera. En la Figura 4.19 se indica la curva de secado para esta prueba

Figura 4.19 Curva de Secado para una fila de madera apilada



En la Tabla 4.12 se muestra la masa total inicial, la masa total final y la cantidad de agua extraída durante el proceso de secado.

Tabla 4.12 Masa total de Agua Extraída en el proceso de secado (Prueba 2)

Masa Inicial Total	Masa Final Total	Cantidad total de agua evaporada
[g]	[g]	[g]
2.113,94	1.495,47	618,47

Las piezas de madera ingresaron a la cámara de secado con una masa inicial total de 2.113,94 gramos con un contenido de humedad inicial de 38%, después de 2 días y medio las 6 piezas de madera perdieron en total 618,47 gramos de agua para llegar a un contenido de humedad final de 15%. Cada pieza de madera perdió en promedio 103,08 gramos.

En la Tabla 4.13 se muestra los valores promedio de agua extraída de cada día.

Tabla 4.13 Masa de agua extraída por día (Prueba 2)

Día	Masa total de agua extraída en el día	Masa total de agua extraída en la noche	Promedio de Radiación Solar
	[g]	[g]	[W/m ²]
1	52,75	10,59	441,12
2	25,12	0,38	453,07
3	14,24	-	838,02

Como se puede observar en la tabla 4.13 el primer día pierde en promedio 52,75 gramos, esto se debe a que se encuentra en la fase de secado constante, al término del primer día el contenido de humedad es del 32 %, el segundo día comienza con un contenido de humedad del 29% y pierde 25,12 gramos, pierde menos que el primer día porque se encuentra en la fase de secado constante, donde la evaporación del agua de las maderas es más lenta, al finalizar la prueba este día el contenido de humedad de las piezas de madera es del 21%, el último día el secado alcanza el 15% del contenido de humedad a medio día ya que la radiación para ese tiempo en promedio fue alta.

Durante la noche del primer día se pierde 10,58 gramos motivo por el cual el contenido de humedad baja de 32% a 29%, lo que no sucede el segundo día ya que durante la noche no se extrae agua de las piezas y por esto el contenido de humedad se mantiene en el valor al final del día que es del 21%, el último día pierde en promedio 14,24 gramos de agua hasta alcanzar el 15% de contenido de humedad.

De las pruebas realizadas se puede concluir que el tiempo de secado depende de la cantidad de madera ingresada a la cámara, porque con una menor cantidad de piezas de madera el aire que sirve para extraer el agua junto con el control implementado es más óptimo que cuando se colocan las 12 piezas en la cámara, es decir, a menor número de piezas de madera el tiempo de secado es menor.

4.4.3. PRUEBA PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL

Como se indicó anteriormente el proceso de secado mejora cuando se implementa un sistema de ventilación forzada, es decir, cuando el sistema de control está funcionando, tomando en cuenta esto se puede decir que el proceso de secado es más eficiente si se controla en este caso el flujo de aire que circula a través de las piezas de madera permitiendo que las condiciones de temperatura y humedad relativa en el interior sean las adecuadas para permitir que el secado se mejore, motivo por el cual se realizó una prueba para determinar la eficiencia del sistema de control comparando el proceso de secado cuando se utiliza ventilación forzada y cuando se utiliza ventilación natural.

En esta prueba se realizó el proceso de secado durante 2 horas utilizando ventilación natural y 2 horas utilizando ventilación forzada, esto para poder comparar la masa total de agua extraída de las piezas de madera al final de cada proceso. Para esta comparación se considera como parámetro principal que la radiación solar sea similar en ambas pruebas de secado, con esto se garantiza que el proceso de secado para cada tipo de ventilación se realizó en las mismas condiciones. Otro parámetro que se debe considerar es la masa inicial de las piezas de madera, la cual debe ser similar para cada una de las pruebas

realizadas. Al igual que en las pruebas anteriores, se humedece las piezas de madera para que tengan una masa inicial aproximadamente de 4.150 gramos lo que significa que cada uno de las piezas debe tener una masa aproximada de 350 gramos, luego de ser humedecidas se las pesa y luego apila en el interior de la cámara de secado, transcurridas las 2 horas que dura este proceso se retira las piezas de madera de la cámara y se las vuelve a pesar, este procedimiento se repite para todas las pruebas que se realicen. De los datos obtenidos durante las pruebas mencionadas se toma en cuenta la radiación solar, masa inicial y masa final de las piezas de madera, en la Tabla 4.14 se muestra los valores obtenidos para diferentes pruebas con ventilación forzada y en la Tabla 4.15 se muestra los datos de las pruebas con ventilación natural.

Tabla 4.14 Valores obtenidos en las pruebas con ventilación forzada

Radiación Solar	Masa total Inicial	Masa total Final	Masa total de agua extraída
$[W/m^2]$	[g]	[g]	[g]
163,03	4.137,56	4.016,03	121,53
542,46	4.106,86	3.953,62	153,24
797,52	4.144,12	3.938,32	205,80
846.23	4.279,08	4.022,99	256,09
1.019,54	4.144,33	3.817,84	326,49

Tabla 4.15 Valores obtenidos en las pruebas con ventilación natural

Radiación Solar	Masa total Inicial	Masa total Final	Masa total de agua extraída
$[W/m^2]$	[g]	[g]	[g]
211,98	4.156,38	4.053,08	103,30
534,70	4.070,97	3.940,85	130,12
823,67	4.150,39	4.004,74	145,65
897,16	4.042,15	3.892,66	149,49
1.011,87	4.155,01	3.979,95	175,06

Para calcular la relación de eficiencia del proceso de secado se relaciona las masas totales de agua extraídas de cada uno de los procesos de secado tomando en cuenta la radiación solar, para obtener este valor se divide la masa total de

agua extraída del proceso de secado con ventilación forzada para la masa total de agua extraída del proceso se secado con ventilación natural, como se indica en la fórmula a continuación.

$$\eta_r = \frac{mf_{vf}}{mf_{vn}} \quad (4.2)$$

Dónde:

η_r : Es la relación de eficiencia del sistema de control.

mf_{vf} : Es la masa total de agua extraída del proceso con ventilación forzada.

mf_{vn} : Es la masa total de agua extraída del proceso con ventilación natural.

Los resultados que se pueden obtener de esta relación son valores menores, iguales o mayores a uno, lo que significa que si el valor calculado es menor que uno el proceso de secado utilizando ventilación forzada no mejora al contrario utilizar este tipo de ventilación no favorece al proceso de secado, si el valor de la relación es igual a uno significa que utilizar ventilación forzada y ventilación natural extraen la misma cantidad de agua de las piezas de madera y cuando la relación es mayor que uno significa que utilizar ventilación forzada mejora el proceso.

En la **Tabla 4.16** se indica los valores de las masas finales, de la radiación solar y de la relación de eficiencia.

Tabla 4.16 Valores de la relación de eficiencia

Radiación Solar Ventilación Forzada	Radiación solar Ventilación Natural	Masa total de agua extraída Ventilación Forzada	Masa total de agua extraída Ventilación Natural	Relación de Eficiencia
$[W/m^2]$	$[W/m^2]$	[g]	[g]	
163,03	211,98	121,53	103,30	1,18
542,46	534,70	153,24	130,12	1,18
797,52	823,67	205,80	145,65	1,41
846,23	897,16	256,09	149,49	1,71
1.019,54	1.011,87	326,49	175,06	1,87

De los valores obtenidos en el cálculo de la relación de eficiencia para cada una de las pruebas realizadas se puede observar que el valor obtenido es mayor que uno, motivo por el cual el proceso de secado mejora si se utiliza ventilación forzada.

El proceso de secado utilizando ventilación forzada (sistema de control activado) mejora desde un 18% hasta un 87% tomando en cuenta los datos de la tabla 4.16.

4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA DE SECADO BASADO EN ENERGÍA SOLAR

Al tener un sistema basado en energía solar se tiene que tomar en cuenta los beneficios que éste tiene con respecto a sistemas que están basados en energías fósiles, motivo por el cual se ha decidido realizar un análisis económico y ambiental de un secador solar de madera con respecto a secadores que se encuentran implementados actualmente.

Para el análisis se utiliza como referencia el prototipo de este proyecto en el cual se seca 12 piezas de madera y para tener un secador a escala real se especifica la cantidad de madera que va a ser secada. Para este caso se diseñará un secador que permita secar 120 tablas con las siguientes dimensiones:

Largo: 2,5 m

Ancho: 0,25 m

Espesor: 0,05 m

Estas dimensiones se basan en lo que se utiliza en las dos empresas consultadas sobre el secado de madera, descritas en el primer capítulo.

En el prototipo del laboratorio se secan 12 piezas de madera que corresponde a $0,0072 \text{ m}^3$ de madera, y para secar esa cantidad de madera el colector solar genera cierta cantidad de energía a continuación se realiza el cálculo de la energía entregada por el colector solar.

La energía total que ingresa al colector en un día se puede evaluar con la siguiente fórmula:

$$Q_{colector} = A_C * \bar{G} * \cos \theta * \Delta t \quad (4.3)$$

Dónde:

$Q_{colector}$ = Energía total incidente en el colector [J]

A_C = Área de exposición del colector [m^2]

\bar{G} = Radiación Solar Promedio durante el intervalo de medición [W/m^2]

θ = Ángulo de inclinación del colector [$^\circ$], $\theta = 10$ [$^\circ$]

Δt = Tiempo de exposición a la radiación solar [s], $\Delta t = 8$ [h] = 28.800 [s]

$$Q_{colector} = 0,52456 [m^3] * 830,2967 [W/m^2] * \cos (10^\circ) * 28.800[s]$$

$$Q_{colector} = 12.352.999,65 [J]$$

Calculada la energía entregada por el colector y mediante relación directa entre la cantidad a secar en el prototipo y la que se secará en el secador real se puede obtener la cantidad de energía que se tendría en el secador real.

La cantidad de madera del secador real con las dimensiones antes mencionadas corresponde a $3,75 m^3$, por lo tanto la cantidad de energía será:

$$Q_{real} = \frac{Q_{colector} * V_{real}}{V_{prototipo}} \quad (4.4)$$

Dónde:

Q_{real} : Energía total para el secador real

$Q_{colector}$: Energía total para el secador prototipo

V_{real} : Volumen de madera para el secador real

$V_{prototipo}$: Volumen de madera para el secador prototipo

$$Q_{real} = \frac{12.352.999,65 [J] * 3,75[m^3]}{0,0072[m^3]}$$

$$Q_{real} = 6.433.853.983,29 [J]$$

Calculada la cantidad de energía generada en el secador solar, se puede realizar un análisis con respecto a otras fuentes de energía, es decir, si se utilizaría otro tipo de fuente para obtener la misma cantidad de energía cuanto sería el costo que se obtendría, ya que con el sol esa energía es gratuita.

Las fuentes de energía que más se utilizan para los secadores de madera son el diésel, el gas licuado de petróleo, la energía eléctrica y los residuos de madera.

Para conocer el costo de utilizar estas fuentes es necesario conocer en el caso del diésel y el gas licuado la cantidad de estos productos que permiten obtener esa energía y con esta cantidad calcular el costo, en el caso de la energía eléctrica con el dato que se tiene de la energía generada se puede calcular el costo al conocer el valor del kilovatio hora.

Para el cálculo del volumen se utilizará la fórmula de la energía aportada por un combustible (ecuación 1.10):

$$Energía = Volumen\ de\ combustible * Densidad * Poder\ calorífico$$

Dónde:

*Volumen de combustible * Densidad*: Se refiere a la cantidad de combustible que se va a utilizar.

Con la fórmula antes descrita se puede calcular el volumen, con lo que la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$Volumen\ de\ combustible = \frac{Energía}{(Densidad * Poder\ calorífico)} \quad (4.5)$$

En la **Tabla 4.17** se presenta los valores correspondientes al poder calorífico y a la densidad de los combustibles que se van a utilizar en el análisis.

Tabla 4.17 Valores de Densidad y Poder Calorífico

Combustible	Densidad	Unidad	Poder Calorífico	Unidad
Diésel	0,843	$\left[\frac{kg}{l}\right]$	10.877	$\left[\frac{kcal}{kg}\right]$
Gas Licuado de Petróleo	0,537	$\left[\frac{kg}{l}\right]$	11.951	$\left[\frac{kcal}{kg}\right]$
Residuos de Madera	952	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	18.445,03	$\left[\frac{MJ}{kg}\right]$

Con los datos proporcionados de densidad y poder calorífico y utilizando la ecuación 4.4 se calcula el volumen para diésel y gas licuado de petróleo, en la Tabla 4.18 se presenta los resultados obtenidos.

En la Tabla 4.19 se detalla los valores de la masa que se obtiene con el volumen calculado para el gas licuado de petróleo y para los residuos de madera.

Tabla 4.18 Volumen calculado para Diésel, Gas Licuado de Petróleo y Residuos de madera

Combustible	Energía	Unidad	Volumen	Unidades
Diésel	6.433.853.983,29	[J]	167,70	[l]
Gas Licuado de Petróleo	6.433.853.983,29	[J]	239,6078	[l]
Residuos de Madera	6.433,85	[MJ]	0,3663	[m ³]

Tabla 4.19 Masa calculada para Gas Licuado de Petróleo y Residuos de madera

Combustible	Energía	Unidad	Volumen	Unidades	Masa	Unidad
Gas Licuado de Petróleo	6.433.853.983,29	[J]	239,6078	[l]	128,6694	[kg]
Residuos de Madera	6.433,85	[MJ]	0,3663	[m ³]	348,8123	[kg]

Obtenidos los valores de volumen se puede llegar a determinar el costo que implica generar esa cantidad de energía. En la Tabla 4.20 se indican los valores por galón en el mercado ecuatoriano para el diésel y para el gas licuado de petróleo.

Tabla 4.20 Costos del Diésel y Gas Licuado de Petróleo

Combustible	Precio	Unidad
Diésel	0.900704	$\left[\frac{USD}{gal}\right]$
Gas Licuado de Petróleo	0.900704	$\left[\frac{USD}{kg}\right]$

Con los precios indicados en la tabla anterior se procede a calcular el costo de generar la energía propuesta en un día de secado. En la Tabla 4.21 se muestran los valores calculados, para el caso del diésel se analiza el costo por litros en donde 3.785 litros es un galón obteniendo que para cada litro de diésel el precio es de 0.2379 dólares.

Tabla 4.21 Costos por día si se utiliza Diésel y Gas Licuado de Petróleo

Combustible	Consumo por día estimado	Unidad	Costo por unidad	Costo total [USD]
Diésel	168	l	0,2379	39,9740
Gas licuado de petróleo	129	kg	0.9007	116,1908

En la Tabla 4.22 se tiene el precio que resulta de utilizar como fuente la energía eléctrica.

Tabla 4.22 Costos por día si se utiliza Energía Eléctrica

Fuente	Energía [kWh]	Costo por unidad	Costo total [USD]
Energía Eléctrica	3,4313	0,068	233,33

De los datos presentados en las tablas se tiene que para generar aproximadamente 6.433,85 MJ en 8 horas se tiene que si el combustible a utilizarse fuera los residuos de madera no implicarían un costo adicional si es que estos residuos no van a ser vendidos para otro uso, si el combustible fuera diésel se debe pagar aproximadamente 40 USD, con el gas licuado de petróleo se debe pagar una cantidad mayor que es aproximadamente 116 USD, para el caso de la energía eléctrica el costo aumenta y se debería pagar aproximadamente 233 USD, los costos de generación para esa cantidad de energía por día es alta si consideramos gas licuado y energía eléctrica ya que con el diésel el costo es

menor, pero comparados con la energía solar el costo para cualquier otra fuente resulta elevado. El coste de generación de energía es alto, y sumado a esto se debe considerar que al momento de la combustión se emiten agentes contaminantes como óxidos de Azufre (SO_x), llamados óxidos de impurezas, óxidos de Nitrógeno (NO_x) llamados óxidos de alta temperatura y residuos sólidos conformados por partículas totales en suspensión (PTS) representados por las cenizas u hollín los cuales son perjudiciales para el medio ambiente como se explicó en el Capítulo 1. El uso de sistemas solares implica procesos silenciosos, autónomos, no contaminantes y en armonía con el medio ambiente local. Hay que destacar que en este análisis no se toma en cuenta los costos ambientales que resultan por la utilización de otro tipo de combustible.

4.6. ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO

En la Tabla 4.23 se detalla el costo de los diferentes elementos y materiales utilizados en el proyecto.

Tabla 4.23 Detalle de costos del proyecto

Ítem	Costo	Ítem	Costo
Microcontroladores Atmega 164p	\$ 13,00	Sensor de Contenido de Humedad	\$ 18,41
LCD 16x2	\$ 10,00	Sensores de Temperatura y Humedad Relativa	\$140,10
Módulo XBEE-PRO 868	\$ 157,27	Sensor de Velocidad de Viento	\$ 38,00
Transformadores	\$ 100,00	Ventiladores	\$ 8,00
Gabinete Metálico	\$ 57,29	Elementos Varios	\$ 395,00
		Total	\$ 951,97

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las pruebas realizadas se puede llegar a las siguientes conclusiones:

5.1. CONCLUSIONES

- Investigar acerca del proceso de secado de la madera permite reconocer cuales son las variables que necesitan ser evaluadas, también proporciona información para identificar el tipo de sensor que va a ser utilizado además de conocer la correcta ubicación de los mismos para asegurar que los sistemas diseñados sean funcionales.
- Diseñar e implementar el sistema de control en el secador de madera permite que el proceso de secado se haga de una forma más eficiente y óptima, considerando que un sistema sin automatización permite el secado pero no cumple con los requerimientos y las condiciones planteadas por el usuario.
- Conocer la forma correcta en la que la madera debe ser apilada dentro de la cámara es de gran importancia ya que una correcta ubicación garantiza que el flujo de aire pase a través de todas las piezas de madera extrayendo la mayor cantidad de agua de las mismas.
- Contar con un sistema de adquisición funcional es importante pues permite obtener de una forma correcta los valores de las variables que intervienen en el proceso de secado, porque de éstas depende que el sistema de control funcione de una forma correcta.
- El sistema de visualización que consta del LCD en el tablero de control y el HMI instalado en la computadora del laboratorio facilitan el acceso y manejo de la información correspondiente al proceso de secado de una manera rápida y clara.

- Para una medición correcta de las variables involucradas en el proceso de secado se calibró los sensores instalados para que el error máximo que se tenga en una medición sea aproximadamente del 5 %, garantizando así que el control basado en estas mediciones sea eficiente.
- El prototipo del laboratorio al inicio no contaba con ningún tipo de control y el secado se basaba en la ventilación natural, motivo por el cual no se cumplen las condiciones necesarias para un secado eficiente, para satisfacer las condiciones se optó por implementar una ventilación forzada, la cual consiste en el uso de ventiladores ubicados de forma estratégica.
- La implementación de ventiladores en la cámara de secado, permite que exista una mejor circulación de aire en el interior de la cámara asegurando que se extraiga una mayor cantidad de agua de las piezas de madera, ya que si no se tiene ventilación forzada el aire no serviría para secar.
- En base a las pruebas realizadas y considerando que la ventilación forzada permite una mayor extracción de agua de las piezas de madera, se garantiza que el tiempo de secado de las mismas se reduzca con respecto a un secado al aire libre o con ventilación natural.
- Se pudo comprobar que reduciendo la cantidad de piezas de madera apiladas para el proceso se redujo el tiempo de secado debido a que la cantidad de energía absorbida por el colector es la misma y si se tiene menos cantidad para secar, esta energía será mejor utilizada, también hay que considerar que al existir más espacio existe una mejor distribución del flujo de aire.
- El sistema de control implementado permite regular la ventilación al interior de la cámara, basándose en los valores de radiación solar incidente en el colector solar y las temperaturas dentro de la cámara de secado para asegurar un secado eficiente y en menor tiempo.
- Incluir como parte del HMI un generador de reportes de los datos obtenidos en cada proceso facilita a los usuarios tener esta información de manera ordenada para realizar un análisis posterior más detallado.

- Contar con un sistema que controle el secado solar de madera es beneficioso ya que éste permite que el secado sea más rápido, es decir, de acuerdo a las pruebas realizadas y a los resultados obtenidos se tiene que al implementar ventilación forzada se extrae una mayor cantidad de agua de las piezas de madera. Hay que tomar en cuenta que la radiación solar también es un factor importante, analizando los resultados se tiene que para una radiación solar similar la extracción de agua es mayor cuando se utiliza la ventilación forzada.
- Implementar el secado solar para la madera, así como también del sistema de control para el mismo, le permite al usuario que utiliza el secado al aire libre tener la madera seca en menos tiempo. El secador solar cuenta con un colector el cual concentra la energía solar y la utiliza para el secado, también posee una cámara de secado la cual protege la madera de condiciones climáticas adversas, permitiendo un proceso de secado más eficiente.
- Tener un sistema basado en energía solar evita el uso de combustibles fósiles, obteniendo un beneficio para el medio ambiente ya que utilizar energía solar evita la generación de gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles, hay que tomar en cuenta que la energía solar es renovable y se encuentra al alcance de todos sin ningún costo.
- La cantidad de energía utilizada para un proceso de secado utilizando combustibles fósiles no sólo representa un perjuicio al medio ambiente sino que también representa un costo la generación de esa cantidad de energía, por este motivo poseer un sistema con energía solar no sólo representa un beneficio ambiental sino también económico.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para que se obtenga una mejor captación de la energía solar el colector debe estar orientado de acuerdo al hemisferio en el que se encuentre este sistema, es decir, si se está en el hemisferio norte el colector debe estar orientado hacia el sur, y si se está en el hemisferio sur el colector debe estar orientado hacia el norte.
- Para que el proceso de secado se realice de forma correcta las piezas de madera en el apilado deben estar separadas una de otra, ya que si se encuentran una a continuación de la otra no se extraerá la mayor cantidad de agua de las mismas, tener un espacio de separación entre las piezas mejora la circulación de aire a través de las mismas.
- En el apilado de las piezas de madera los separadores que son utilizados deben estar secos, esto para evitar posibles daños en las piezas de madera como la decoloración por dónde van los separadores, también evitan que las piezas de madera se deformen.
- Para que el sistema de control implementado en el secador solar de madera opere correctamente se debe activar adecuadamente todos los dispositivos de encendido, así como se debe encender el sensor de contenido de humedad antes de iniciar con el proceso de secado, una vez iniciado el proceso de secado no se debe abrir la puerta de entrada a la cámara de secado, ya que el proceso se paraliza y las condiciones al interior de la cámara se afectan.
- Para el correcto uso del sistema del secador solar de madera, es necesario leer detenidamente el manual de usuario, en el cual se da los parámetros para un manejo adecuado tanto del módulo como del HMI implementado.
- Para ampliar y complementar el estudio sobre los secadores solares se debe implementar en el laboratorio prototipos que cuenten con sistemas de secado solar tipo directo y mixto con los cuales se podrá tener una idea clara de cual resultaría más beneficioso tanto para el proceso de secado

como para el medio ambiente si se querría implementarlo a escala real. Además se debe realizar un estudio en el cual se determine los materiales adecuados para la construcción tanto del colector solar como de la cámara de secado.

- Para que exista una mayor extracción de cantidad de agua de las piezas de madera se recomienda que el flujo de aire circule por todo el apilado, es decir, que se distribuya de forma uniforme en todas las piezas de madera, para esto es necesario colocar ventiladores en posiciones adecuadas para cumplir con este propósito.
- Es necesario empezar a buscar energías limpias para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y además disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, para aprovechar al máximo las energías renovables como la energía solar es necesario que los sistemas posean un cierto nivel tecnológico, esto incluye la instrumentación y la automatización de los procesos.
- Para un análisis más detallado del secador solar de madera se deben realizar los estudios necesarios en los cuales se involucre todos los parámetros que intervienen para establecer los balances de masa y energía y a través de esto determinar la viabilidad de construir secadores basados en energía solar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ITESO, Notas sobre el curso de Energía Solar, Jalisco: Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, 1995.
- [2] S. SANCHEZ MIÑO , ENERGÍAS RENOVABLES: Conceptos y Aplicaciones, Quito: Fundación Natura, 2003.
- [3] Y. A. CENGEL, Transferencia de Calor, México: Mc Graw Hill, 2004.
- [4] A. J. CHAPMAN, Transmisión del Calor, Madrid: Bellisco, 1984.
- [5] J. P. HOLMAN, Transferencia de Calor, México: Continental, 1999.
- [6] ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN TÉCNICA DE LAS INDUSTRIAS DE LA MADERA, «Madera Generalidades,» 6 Junio 2011. [En línea]. Available: http://www.infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_2_Madera%20Generalidades_06.06.2011.pdf.
- [7] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, *Maderas. Terminología.*, Quito, Ecuador: Norma Ecuatoriana, 1984.
- [8] CENTRO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICO DE LA MADERA, Técnicas de Secado de la Madera, Lima, 2009.
- [9] S. VIGNOTE PEÑA y I. MARTÍNEZ ROJAS, Tecnología de la Madera, Madrid: Grupo Mundi-Prensa, 2006.
- [10] JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA, Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, Lima: Carvajal S.A., 1984.
- [11] R. ANANÍAS, Bases Físicas del Secado de la Madera, apuntes de asignatura, Concepción: Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, 2009.
- [12] CORPORACIÓN CHILENA DE LA MADERA, Compendio de Directrices para la Enseñanza en Ingeniería - Pino Radiata, Chile, 2003.
- [13] F. SANZ, Aplicaciones Industriales de la Madera de Pino Pinaster, Galicia, 2006.
- [14] R. ANANÍAS, Física de la Madera, apuntes de asignatura, Concepción: Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, 2009.
- [15] DIRECCIÓN GENERAL DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINAS, Guía de la Energía Solar, Madrid,

2006.

- [16] SEMARNAT, *Estufa solar de secado de madera*, Guadalajara.
- [17] I. MONTERO PUERTAS, *Modelado y Cosntrucción de un secador solar híbrido para residuos biomásicos*, Badajoz: Universidad de Extremadura, 2005.
- [18] CENTRO URUGUAYO DE TECNOLOGÍAS APROPIADAS, *Colectores Solares*, Montevideo.
- [19] G. MORENO, «Manual de Intrumentación para una Secadora Solar,» Iztapalapa, 1995.
- [20] CENTRO DE RECURSOS PARA LA TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA, «Instituto de Trasferencia de Tecnologías apropiadas para Sectores Marginales,» ITACAB, 2012. [En línea]. Available: http://www.itacab.org/adminpub/web/index.php?mod=ficha&ficha_id=171.
- [21] MUNICIPALIDAD DEL VENADO TUERTO, «ENERGÍAS RENOVABLES,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.energiasrenovables.gov.ar/secador-solar.htm>.
- [22] INGENIERÍA SIN FRONTERAS, «CONSTRUMÁTICA,» [En línea]. Available: http://www.construmatica.com/construpedia/Nivel_Tecnol%C3%B3gico_Disponible._Aplicaci%C3%B3n_de_la_Energ%C3%ADa_Solar_T%C3%A9rmica_en_Plantas_Secadoras_de_Alimentos.
- [23] METROGAS, «METROGAS,» 2012. [En línea]. Available: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_ambiental_1.
- [24] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, *Manual de Inventario de Fuentes Puntuales*, Bogotá.
- [25] S. VIZCARRA, «Guía para el Secado de la Madera en Hornos,» BOLFOR, Santa Cruz, Bolivia, 1998.
- [26] F. MUÑOZ ACOSTA, «Secado de la Madera Aserrada,» 2008.
- [27] MEASUREMENT SPECIALTIES, «HTG3500 Series - Relative Humidity and Temperature Module,» 2010. [En línea]. Available: www.meas-spec.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=9179.
- [28] J. MOMPÍN POBLET, *Transductores y Medidores electrónicos*, Barcelona: Marcombo Boixereu, 1977.
- [29] H. MUNGUÍA, «Universidad de Sonora, Departamento de Física,» 2005. [En línea]. Available: http://paginas.fisica.uson.mx/horacio.munguia/aula_virtual/Cursos/Instrumentacion%20II/Documentos/Regulacion%20voltaje.pdf.

- [30] J. L. ARCINIEGA MARTÍNEZ, Desarrollo de una Metodología para calibrar instrumentos de medición de flujo de gases en un banco de toberas de flujo crítico, México: Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [31] MODERN DEVICE, «Wind Sensor MD05500,» 2012. [En línea]. Available: <http://shop.moderndevice.com/products/wind-sensor>.
- [32] EcuRED, «Piranómetro,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.ecured.cu/index.php/Piran%C3%B3metro>.
- [33] DAVIS INSTRUMENTS, «Solar Radiation Sensor,» 2012. [En línea]. Available: http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf.
- [34] J. APPEL, Secado de Madera I, Quito: SECAP, 1994.
- [35] C. NOVILLO MONTERO, Dispositivos Electrónicos, Quito, 2006.
- [36] Digi International, XBee-PRO®868 RF Modules, http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001020_B.pdf.
- [37] ENTE VASCO DE LA ENERGÍA, «EVE ENTE VASCO DE LA ENERGÍA,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.eve.es/web/Eve/files/e9/e990bfda-1c53-4363-aff7-dfc2942501c1.PDF>.
- [38] ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROPECUARIA CONCORDIA, «Informe forestal. J. Industrialización,» Sergio Seymandi , Entre Ríos, 1987.
- [39] A. ARATA ANDREANI, Ingeniería del Secado Solar, Santiago: 5 Centenario, 1992.
- [40] FORM FACTORS, «formfactors.org,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.formfactors.org/developer/specs/ATX12V%20PSDG2.01.pdf>.
- [41] R. COUGHLIN, Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales, México: Prentice-Hall Hispanoamérica S.A., 1993.
- [42] RED INTERINSTITUCIONAL DE TECNOLOGÍAS LIMPIAS, «red interinstitucional de tecnologías limpias RITL,» 2012. [En línea]. Available: http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/331101/331101_fucon.htm.
- [43] A. CREUS, *Instrumentación Industrial*, vol. 6ta., Barcelona: Marcombo S.A., 1997.
- [44] HONGFA RELAY, «Subminiature Dip Relay JRC 27 F/012-S (555),» 2012. [En línea]. Available: http://www.simpex.ch/fileadmin/bereiche/elektromechanisch/PDF/Elektromechanische_Relais/kap12_06.pdf.
- [45] STMicroelectronics, Datasheet multiplexor analógico HCF4051B,

<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXwwwq.pdf>.

[46] ATmel, Datasheet del microcontrolador ATmega164p,
<http://www.atmel.com/Images/doc7674.pdf>.

[47] S. J. H. ELECTRONICS, Datasheet LCD 16x4 JHD 593-M8,
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/276143/JHD/JHD539-164B.html>.

[48] STMicroelectronics, Datasheet regulador de voltaje negativo L7900 Series,
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2149.pdf>.

[49] STMicroelectronics, Datasheet regulador de voltaje positivo L7800 Series,
www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2143.pdf.

[50] MAXIM, Datasheet del Circuito Integrado MAX232,
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/maxim/MAX220-MAX249.pdf>.

[51] TEXAS INSTRUMENTS, Datasheet regulador de voltaje de la serie LM1086,
www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1086.pdf.

ANEXOS

ANEXO 1 TABLA DE VALORES PARA OBTENER LA CURVA DE REACCIÓN Y ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE TEMPERATURA HTG3533

ANEXO 2 TABLA DE VALORES PARA EL SENSOR DE VELOCIDAD DE VIENTO Y CURVAS DE REACCIÓN

ANEXO 3 TABLAS DE VALORES Y CURVAS DE REACCIÓN PARA EL SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR VANTAGE PRO2 6450

ANEXO 4 TABLA DE VALORES Y CURVAS DE REACCIÓN PARA EL SENSOR DE CONTENIDO DE HUMEDAD MD812

ANEXO 5 DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

ANEXO 6 ESQUEMA DEL TABLERO

ANEXO 7 DATOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MÓDULOS HTG3533

ANEXO 8 DATOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR VANTAGE PRO 6450

ANEXO 9 DATOS OBTENIDOS PARA DETERMINAR EL TIPO DE VENTILACIÓN

ANEXO 10 DATOS OBTENIDOS PARA DETERMINAR EL TIPO DE CONTROL

ANEXO 11 DATOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE SECADO CON VENTILACIÓN NATURAL Y FORZADA

ANEXO 1 TABLA DE VALORES PARA OBTENER LA CURVA DE REACCIÓN Y ECUACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE TEMPERATURA HTG3533

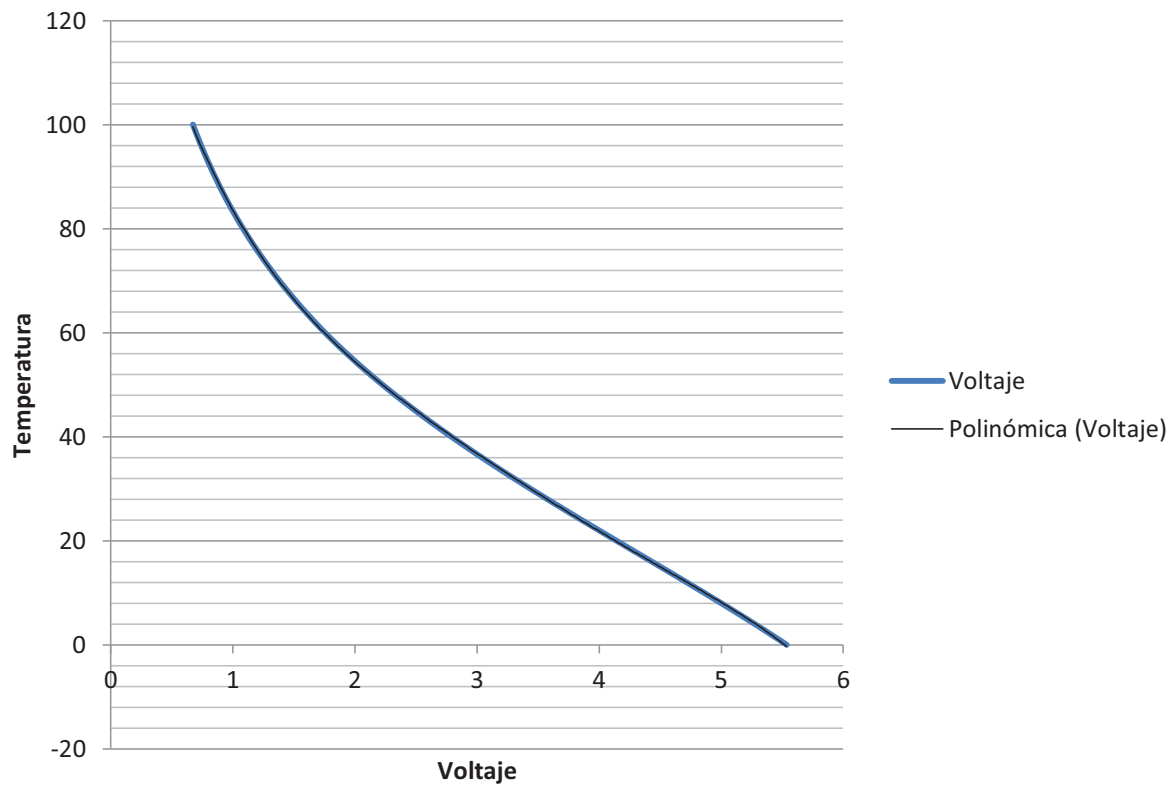
Temp,	Res.	Volt.	Temp.	Res.	Volt.	Temp.	Res.	Volt.
[°C]	[Ω]	[V]	[°C]	[Ω]	[V]	[°C]	[Ω]	[V]
0	27.219	3,656	34	7.199	2,092	67	2.435	0,979
1	26.076	3,614	35	6.948	2,049	68	2.364	0,956
2	24.988	3,571	36	6.707	2,007	69	2.294	0,932
3	23.951	3,527	37	6.475	1,965	70	2.228	0,911
4	22.963	3,483	38	6.253	1,923	71	2.163	0,889
5	22.021	3,438	39	6.039	1,882	72	2.100	0,867
6	21.123	3,393	40	5.834	1,842	73	2.040	0,847
7	20.267	3,348	41	5.636	1,802	74	1.981	0,826
8	19.450	3,30	42	5.445	1,762	75	1.925	0,807
9	18.670	3,256	43	5.262	1,723	76	1.870	0,787
10	17.926	3,209	44	5.086	1,685	77	1.817	0,768
11	17.214	3,162	45	4.917	1,648	78	1.766	0,750
12	16.534	3,115	46	4.754	1,611	79	1.716	0,732
13	15.886	3,068	47	4.597	1,574	80	1.669	0,715
14	15.266	3,021	48	4.446	1,538	81	1.622	0,697
15	14.674	2,973	49	4.301	1,503	82	1.578	0,681
16	14.108	2,925	50	4.161	1,469	83	1.535	0,665
17	13.566	2,878	51	4.026	1,435	84	1.493	0,649
18	13.049	2,830	52	3.896	1,401	85	1.452	0,634
19	12.554	2,783	53	3.771	1,369	86	1.413	0,619
20	12.081	2,735	54	3.651	1,337	87	1.375	0,604
21	11.628	2,688	55	3.535	1,305	88	1.338	0,590
22	11.195	2,641	56	3.423	1,275	89	1.303	0,576
23	10.780	2,594	57	3.315	1,244	90	1.268	0,562
24	10.382	2,547	58	3.211	1,215	91	1.234	0,549
25	10.000	2,50	59	3.111	1,186	92	1.202	0,536
26	9.364	2,453	60	3.014	1,157	93	1.170	0,523
27	9.284	2,407	61	2.922	1,130	94	1.139	0,511
28	8.947	2,361	62	2.834	1,104	95	1.110	0,499
29	8.624	2,315	63	2.748	1,077	96	1.081	0,487
30	8.315	2,269	64	2.666	1,052	97	1.053	0,476
31	8.018	2,225	65	2.568	1,027	98	1.026	0,465
32	7.734	2,181	66	2.509	1,002	99	999	0,454
33	7.461	2,136				100	974	0,443

Los datos de voltaje son obtenidos con la ecuación 2.7.

Para los circuitos de acondicionamiento se amplificó la señal de voltaje a 5 voltios, la curva mostrada en la parte inferior representa la temperatura versus el voltaje amplificado.

Curva de Reacción del Sensor de Temperatura HTG 3533 Señal Amplificada

$$y = -0,1x^5 + 1,8041x^4 - 12,996x^3 + 47,606x^2 - 104,91x + 152,12$$
$$R^2 = 1$$



ANEXO 2 TABLA DE VALORES PARA EL SENSOR DE VELOCIDAD DE VIENTO Y CURVAS DE REACCIÓN

Anexo 2.1 Tabla de Velocidad de Viento en el LEAEE (Edificio FIM) para establecer valor máximo y mínimo.

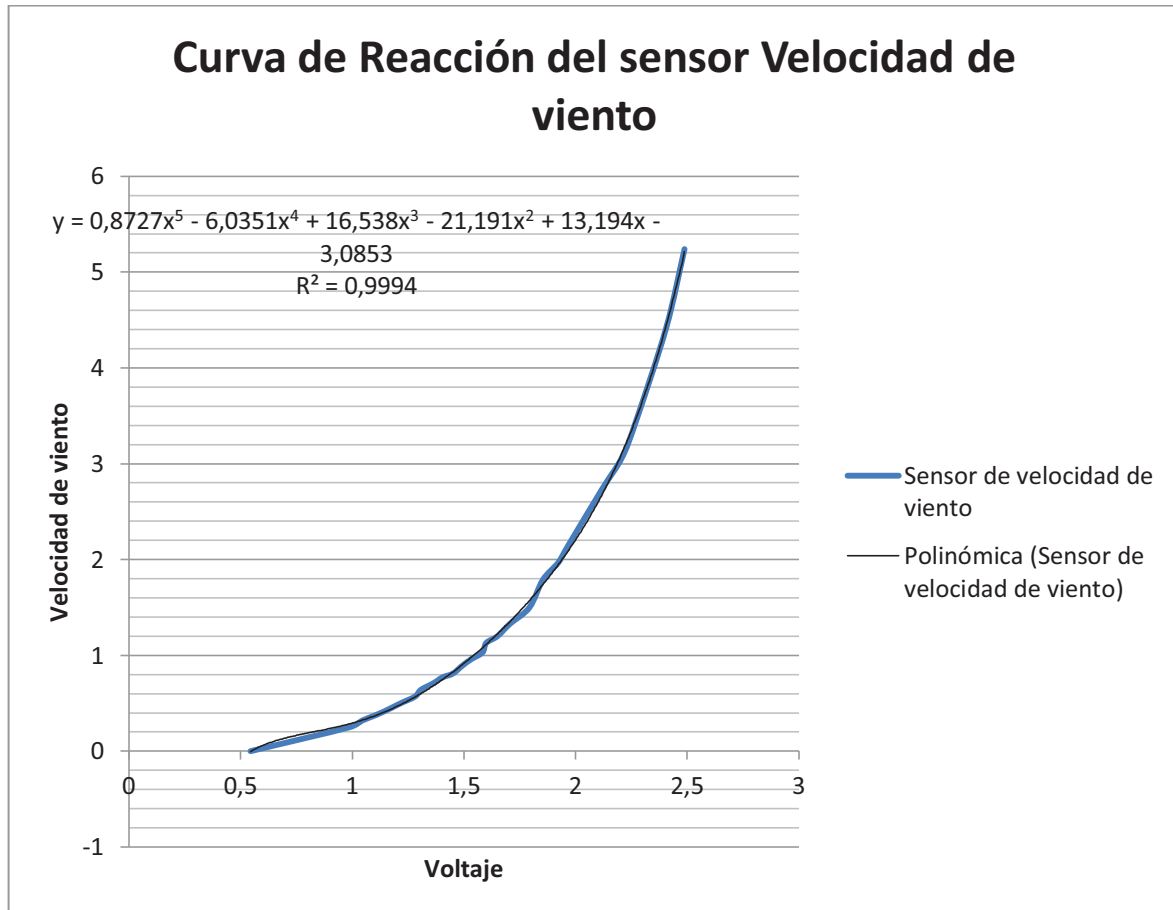
Año	Mes	Velocidad de Viento
		[m/s]
2011	Abril	8,63
	Mayo	8,88
	Junio	9,24
	Julio	9,29
	Agosto	10,61
	Septiembre	9,58
	Octubre	9,03
	Noviembre	8,17
	Diciembre	7,78
2012	Enero	7,55
	Febrero	8,66
	Marzo	8,76
	Abril	7,06

Los datos son tomados de la página de Internet del laboratorio, y permite conocer el valor máximo de Velocidad de Viento.

Anexo 2.2 Tabla de valores para obtener la curva de reacción y la ecuación de comportamiento del sensor de Velocidad de Viento MD550 utilizando túnel de viento de Laboratorio de Instrumentación Industrial.

Velocidad de Viento (Sensor Patrón)	Voltaje de Salida (Sensor MD0550)
[m/s]	[V]
0	0,544
0,25	0,988
0,32	1,0445
0,38	1,109
0,44	1,165
0,5	1,2165
0,57	1,281
0,64	1,307
0,71	1,364
0,77	1,4035
0,81	1,4505
0,89	1,4915
0,96	1,5325
1,03	1,583
1,13	1,6
1,2	1,65
1,33	1,7065
1,5	1,7935
1,79	1,854
1,97	1,923
2,15	1,986
2,73	2,1175
3,07	2,209
3,45	2,2715
4,42	2,406
5,24	2,488

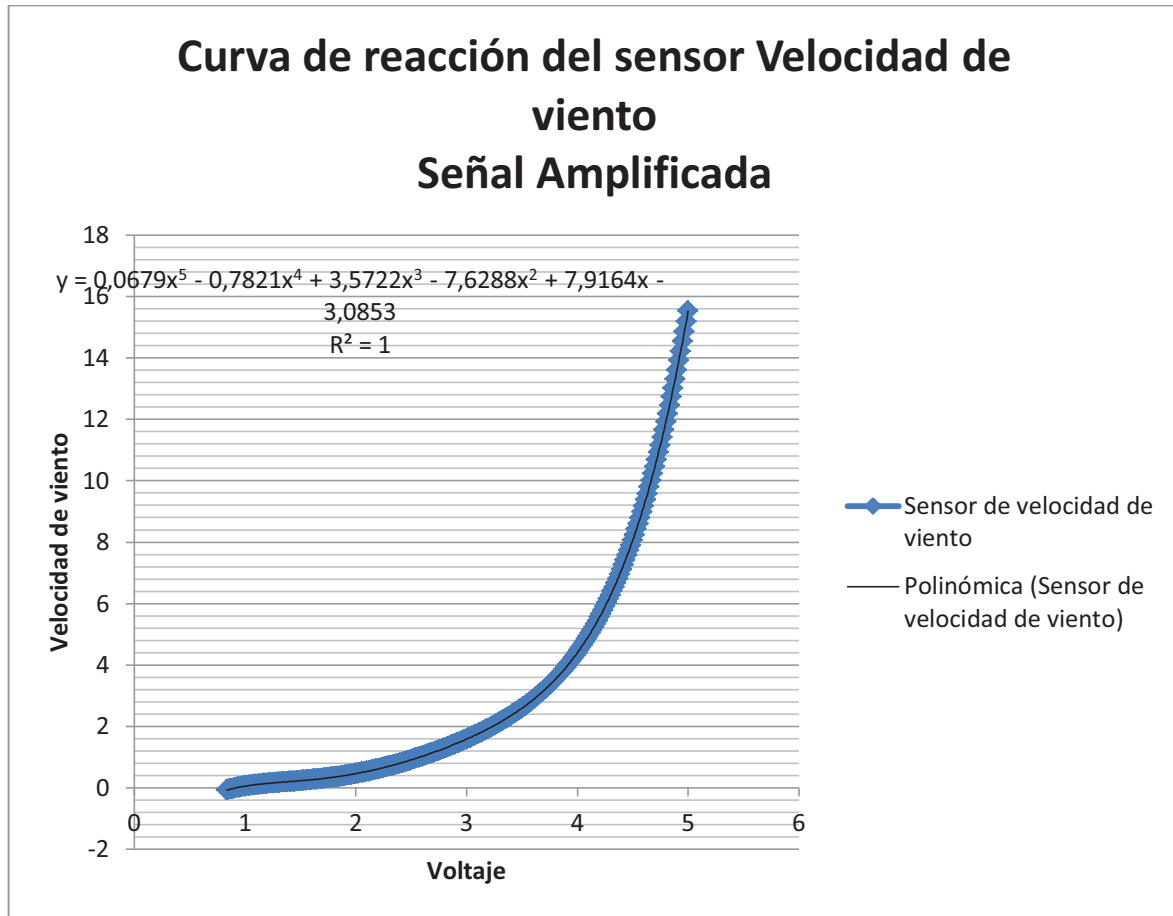
Con estos datos obtenidos de velocidad de viento en el túnel de viento se establece la curva de reacción y el valor de la ecuación de comportamiento, como se puede observar en la siguiente gráfica.



Con la fórmula expuesta en la gráfica se realiza en Excel una nueva hoja de cálculos en la cual tomando en cuenta la variación de voltaje se obtiene la velocidad de viento para esa variación. En este caso se optó por variar desde 0.5 voltios hasta 3 voltios. Esto se debe a que a 0.5 voltios se tiene 0 m/s (especificaciones del fabricante) y a 3 voltios se tiene aproximadamente 15,52 m/s velocidad máxima que medirá el sensor tomando en cuenta los registros de velocidad de viento en el edificio de Ingeniería Mecánica por parte del LEAEE, datos indicados en el Anexo 2.1.

Para realizar los cálculos en el microcontrolador los valores de voltaje antes mencionados se amplifican para tener el valor máximo en 5 voltios, tomando en cuenta los valores amplificados de voltaje, en Excel se realiza una nueva curva de

reacción con la cual se obtiene la nueva ecuación de comportamiento del sensor, como se puede observar en la siguiente figura.



ANEXO 3 TABLAS DE VALORES Y CURVAS DE REACCIÓN PARA EL SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR VANTAGE PRO2 6450

Anexo 3.1 Tabla de Radiación Solar en el LEAEE (Edificio FIM) para establecer valor máximo y mínimo.

Año	Mes	Radiación Solar
		$[W/m^2]$
2011	Abril	1.526,54
	Mayo	1.555,50
	Junio	1.537,44
	Julio	1.599,08
	Agosto	1.570,26
	Septiembre	1.615,64
	Octubre	1.689,54
	Noviembre	1.689,54
	Diciembre	1.529,86
2012	Enero	1.556,59
	Febrero	1.687,64
	Marzo	1.709,69
	Abril	1.639,77

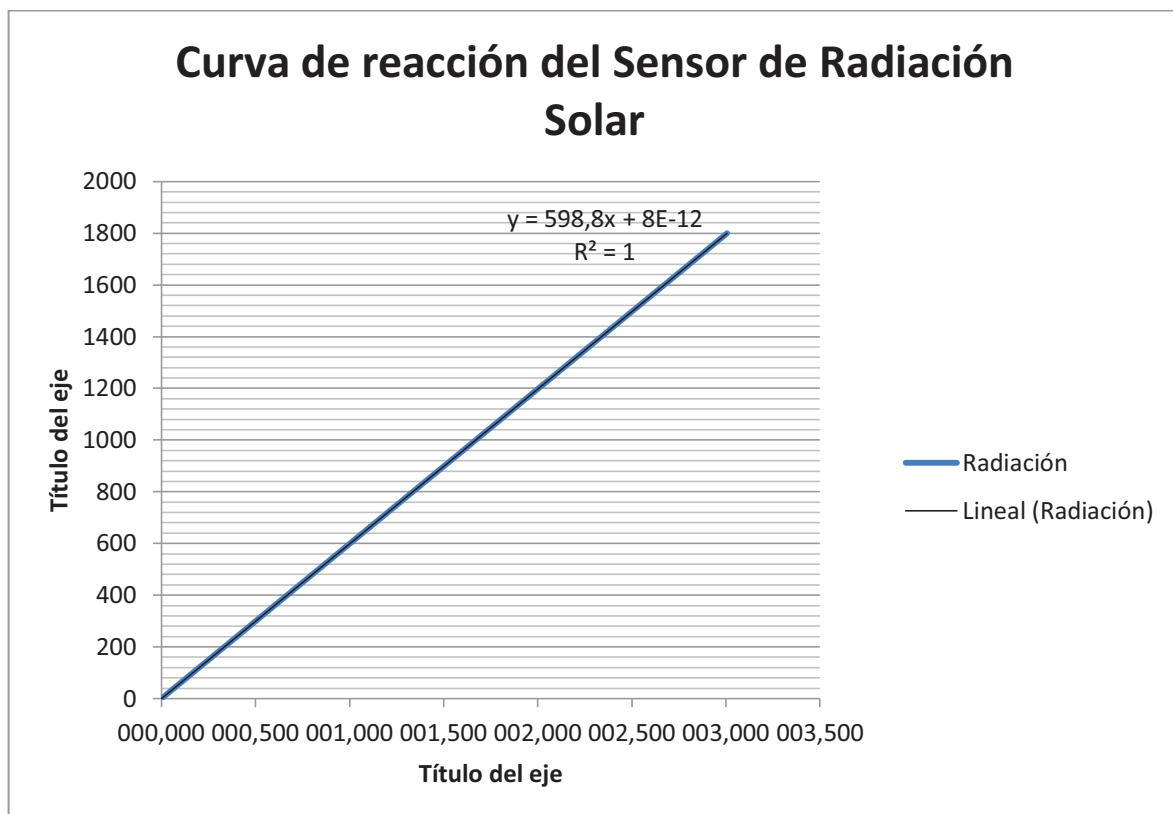
Con los datos antes mencionados se determina que el sensor de radiación solar Vantage Pro2 del LEAEE sirve para este proyecto.

Anexo 3.2 Curvas de reacción para el sensor de radiación solar Vantage PRO2 6450

Tomando en cuenta las especificaciones del sensor de Radiación Solar se traza la curva de reacción, es decir, se toma en cuenta el voltaje de alimentación, así como también la variación de voltaje que tiene el sensor dependiendo de la radiación existente.

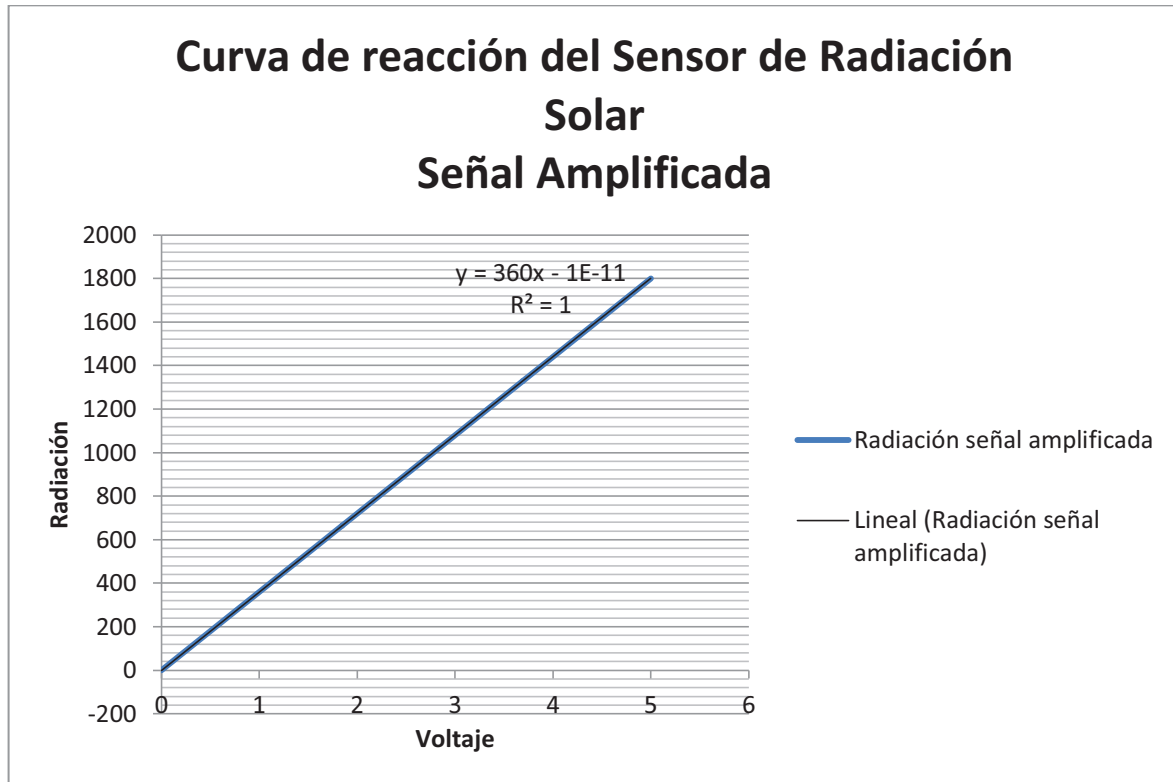
El sensor es alimentado con 3V y la salida de este es 1.67 mV por W/m^2 , por lo tanto se tiene que en el sensor de radiación el valor mínimo es $0 W/m^2$ y el valor máximo $1800 W/m^2$.

Conociendo estos datos se tiene que la salida del sensor es lineal y utilizando Excel se puede calcular la ecuación de comportamiento y graficar la curva de reacción como se indica a continuación.



Para utilizar en el microcontrolador la señal del sensor se amplifica y tomando en cuenta estos nuevos valores se gráfica la curva de comportamiento, y en Excel se

obtiene la ecuación de comportamiento en la siguiente gráfica se puede observar tanto la curva como la ecuación de comportamiento.



ANEXO 4 TABLA DE VALORES Y CURVAS DE REACCIÓN PARA EL SENSOR DE CONTENIDO DE HUMEDAD MD812

Para el sensor de contenido de humedad de la madera se tiene 4 curvas de reacción, como se explicó antes, dependiendo del estado de los pines selectores se tendrá un rango de contenido de humedad, a continuación se indica las tablas de valores de voltaje para cada valor de contenido de humedad, así como también de los valores de voltaje utilizado en el microcontrolador para los rangos establecidos por los selectores S0 y S1.

Anexo 4.1 Tabla de valores y curva de reacción para los valores mayores de 40% (S0 = 1 y S1 = 1)

Ch	Vsensor	Vmicrocontrolador
[%]	[V]	[V]
41	8,76	3,66
40	8,537	3,437

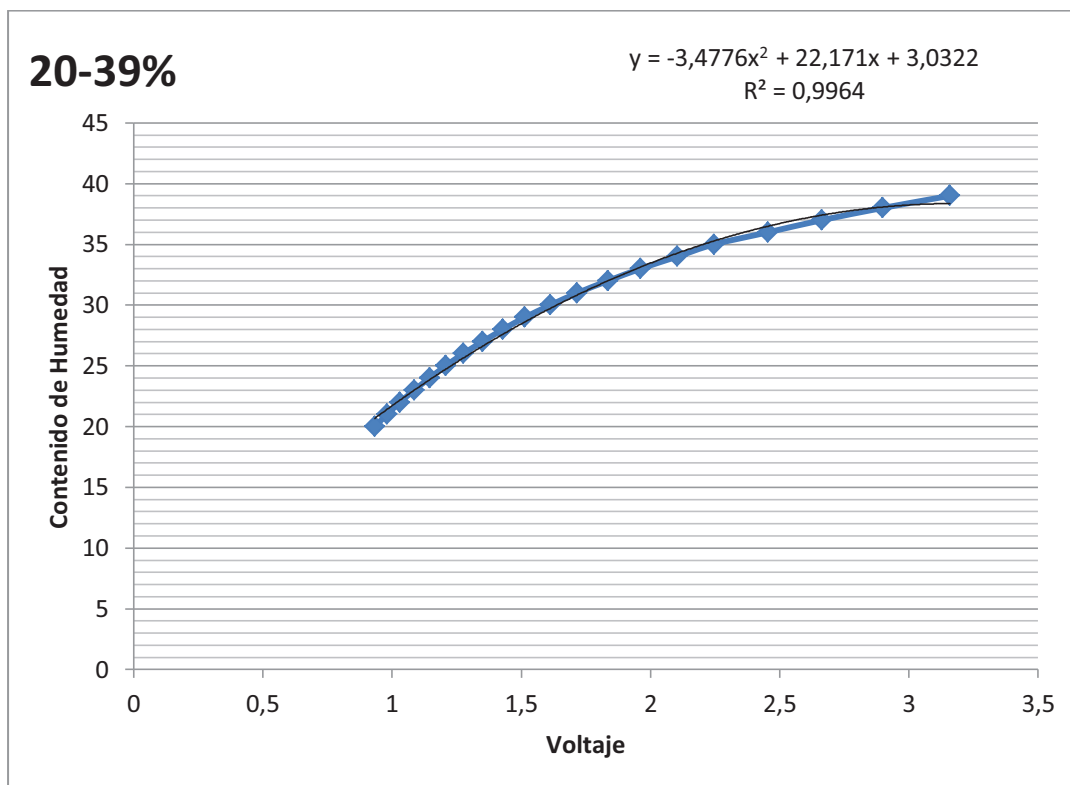
Este sensor según las especificaciones del fabricante sólo mide hasta 40% de contenido de humedad de la madera, por lo que en este rango se considera que para cualquier variación de voltaje se tendrá 40% de contenido de humedad.

Anexo 4.2 Tabla de valores y curva de reacción para los valores entre 20% y 39% (S0 = 0 y S1 = 1)

Ch	Vsensor	Vmicrocontrolador
[%]	[V]	[V]
39	8,258	3,158
38	7,998	2,898
37	7,736	2,663
36	7,555	2,455
35	7,345	2,245
34	7,204	2,104
33	7,061	1,961
32	6,935	1,835

31	6,816	1,716
30	6,712	1,612
29	6,614	1,514
28	6,529	1,429
27	6,45	1,35
26	6,375	1,275
25	6,307	1,207
24	6,245	1,145
23	6,185	1,085
22	6,13	1,03
21	6,08	0,98
20	6,032	0,932

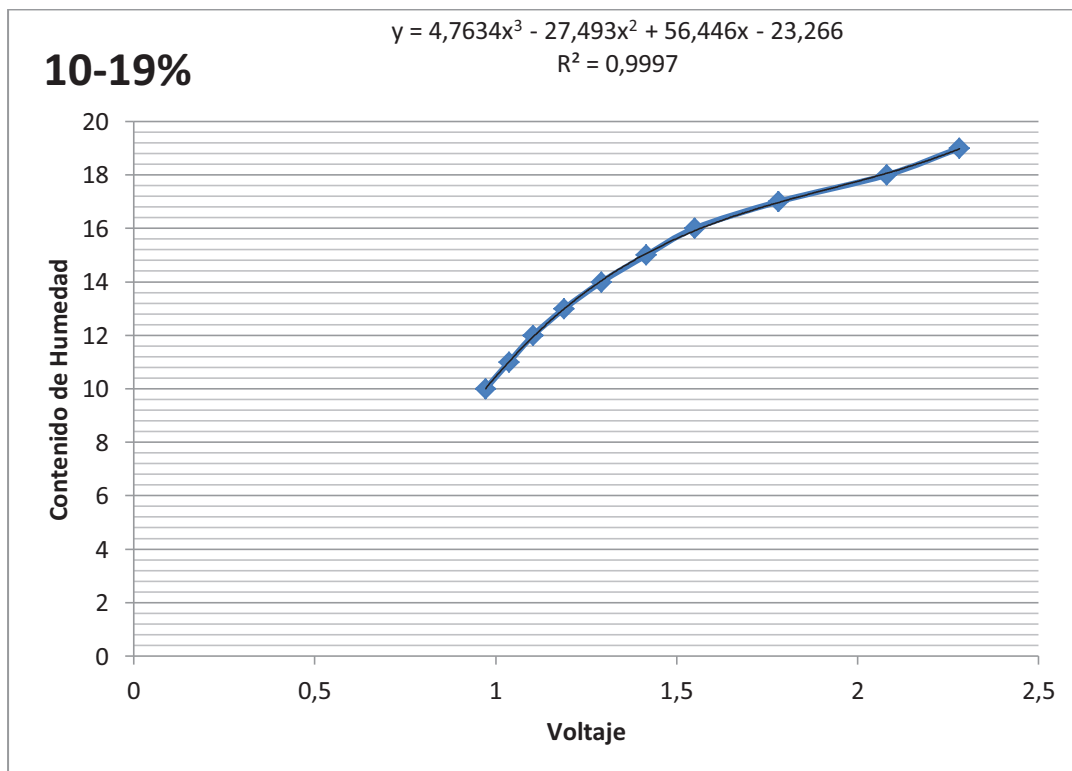
Con los datos antes mencionados se realiza la curva de reacción utilizando los valores que van a ser reconocidos por el microcontrolador, los cuales fueron previamente acondicionados para tal motivo, a continuación se indica la curva de reacción y la respectiva ecuación de comportamiento.



Anexo 4.3 Tabla de valores y curva de reacción para los valores entre 10% y 19% (S0 = 0 y S1 = 0)

Ch	Vsensor	Vmicrocontrolador
[%]	[V]	[V]
19	7,381	2,281
18	7,181	2,081
17	6,882	1,782
16	6,65	1,55
15	6,517	1,417
14	6,393	1,293
13	6,29	1,19
12	6,204	1,104
11	6,137	1,037
10	6,072	0,972

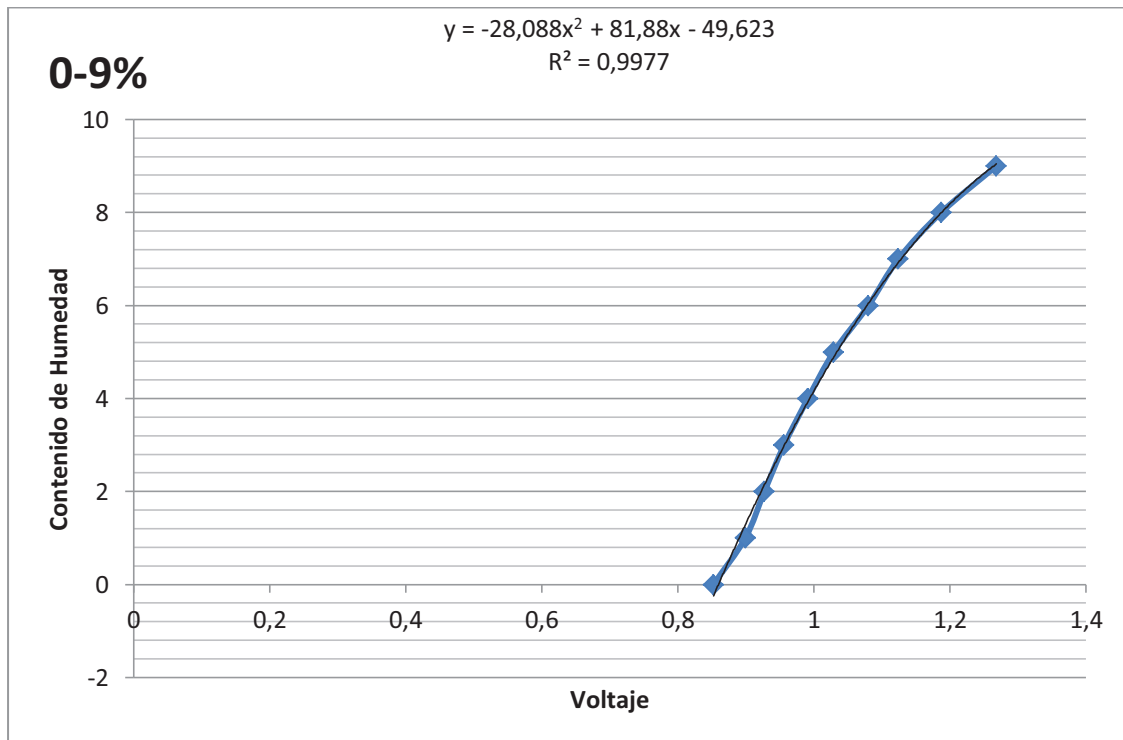
Con los datos antes mencionados se realiza la curva de reacción utilizando los valores acondicionados para el microcontrolador, a continuación se indica la curva de reacción y la respectiva ecuación de comportamiento.



Anexo 4.4 Tabla de valores y curva de reacción para los valores entre 0% y 9% (S0 = 1 y S1 = 0)

Ch	Vsensor	Vmicrocontrolador
[%]	[V]	[V]
9	6,368	1,268
8	6,287	1,187
7	6,224	1,124
6	6,18	1,08
5	6,129	1,029
4	6,091	0,991
3	6,056	0,956
2	6,027	0,927
1	5,999	0,899
0	5,952	0,852

Con los datos antes mencionados se realiza la curva de reacción utilizando los valores acondicionados para el microcontrolador, a continuación se indica la curva de reacción y la respectiva ecuación de comportamiento.



ANEXO 5 DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

Anexo 5. 1 Diagrama Esquemático Microcontrolador Maestro

Anexo 5. 2 Diagrama Esquemático Microcontrolador Esclavo

Anexo 5. 3 Diagrama Esquemático Fuentes de Alimentación

Anexo 5. 4 Diagrama Esquemático Circuito de Acondicionamiento 1

Anexo 5. 5 Diagrama Esquemático Circuito de Acondicionamiento 2

**Anexo 5. 6 Diagrama Esquemático de los Circuitos de Acondicionamiento:
Contenido de Humedad y Radiación Solar**

Anexo 5. 7 Diagrama Esquemático del Circuito de Accionamiento de los Ventiladores

ANEXO 6 ESQUEMA DEL TABLERO

Anexo 6. 1 Diagramas de Distribución de los Circuitos Electrónicos en el Tablero

Anexo 6. 2 Diagrama de Distribución de los Transformadores

Anexo 6. 3 Diagrama de Conexiones del Tablero

ANEXO 7 DATOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS MÓDULOS HTG3533

Anexo 7. 1 DATOS DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA DEL MOD1

Tabla de Valores de temperatura obtenidos para la calibración del módulo MOD1

Temperatura Módulo	Temperatura Patrón	Error Relativo Temperatura
[°C]	[°C]	[%]
48,8634	46,5000	5,0825
50,3246	48,5000	3,7620
51,0710	49,3000	3,5924
51,4485	49,7000	3,5182
51,4485	50,0000	2,8970
51,8290	50,2000	3,2450
51,8290	50,5000	2,6317
52,2125	50,9000	2,5786
52,5992	51,3000	2,5325
52,9891	51,4000	3,0917
52,9891	51,4000	3,0917
52,9891	51,6000	2,6921
52,5992	51,4000	2,3331
52,5992	51,4000	2,3331
52,5992	51,8000	1,5429
52,5992	51,8000	1,5429
52,5992	51,4000	2,3331
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,6000	1,1870
52,5992	51,8000	1,5429
52,5992	51,8000	1,5429
52,5992	51,8000	1,5429
52,9891	51,9000	2,0985
52,9891	51,8000	2,2957
52,5992	51,8000	1,5429
52,9891	51,8000	2,2957
52,5992	52,0000	1,1523
52,9891	51,8000	2,2957
52,5992	51,8000	1,5429
52,5992	51,8000	1,5429

52,2125	51,4000	1,5808
51,8290	51,4000	0,8346
51,8290	51,1000	1,4266
51,4485	51,0000	0,8795
51,4485	51,0000	0,8795
51,8290	51,0000	1,6255
51,8290	51,1000	1,4266
51,8290	51,3000	1,0312
51,8290	51,4000	0,8346
51,8290	51,4000	0,8346
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,8000	0,7964
52,9891	52,0000	1,9022
52,9891	51,9000	2,0985
52,5992	51,8000	1,5429
52,2125	51,7000	0,9913
52,2125	51,8000	0,7964
52,5992	51,8000	1,5429
52,5992	51,4000	2,3331
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,4000	1,5808
52,5992	51,4000	2,3331
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,4000	1,5808
52,2125	51,7000	0,9913
52,5992	51,5000	2,1344
52,5992	51,4000	2,3331
52,5992	51,4000	2,3331
52,2125	51,0000	2,3775
52,2125	51,0000	2,3775
51,4485	50,6000	1,6769
51,4485	50,6000	1,6769
51,0710	50,2000	1,7351
50,6964	50,2000	0,9889
50,3246	50,2000	0,2482
50,6964	50,6000	0,1905
50,6964	50,6000	0,1905
51,4485	51,0000	0,8795
51,8290	51,0000	1,6255
51,4485	50,6000	1,6769
51,0710	50,2000	1,7351
50,6964	50,2000	0,9889
50,6964	50,0000	1,3928
50,3246	50,0000	0,6492

50,3246	50,2000	0,2482
50,3246	50,2000	0,2482
50,6964	50,2000	0,9889
51,0710	50,6000	0,9309
51,0710	50,5000	1,1308
51,0710	50,3000	1,5329
51,0710	50,6000	0,9309
51,0710	50,6000	0,9309
51,0710	50,7000	0,7318
51,4485	51,0000	0,8795
51,8290	51,0000	1,6255
51,8290	50,6000	2,4288
51,4485	50,6000	1,6769
50,6964	50,2000	0,9889
50,3246	49,3000	2,0783
49,5889	49,3000	0,5860
49,2249	49,6000	0,7562
48,1473	46,9000	2,6595
44,6894	45,4000	1,5653
44,3533	45,4000	2,3055
44,3533	45,8000	3,1587
45,7074	45,8000	0,2023
34,5184	35,6000	3,0381
	Error relativo promedio [%]	1,6927

Anexo 7. 2 DATOS DE CALIBRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA DEL MOD1

Tabla de Valores de humedad relativa obtenidos para la calibración del módulo MOD1

Humedad Relativa Patrón	Humedad Relativa Calibrada	Error Relativo Humedad Relativa
[%]	[%]	[%]
14,9000	16,2628	9,1462
14,2000	13,3124	6,2509
13,1000	12,8206	2,1326
13,6000	12,8206	5,7306
12,0000	12,3289	2,7408
10,4000	11,8372	13,8188
11,7000	11,8372	1,1723
12,2000	11,8372	2,9741
12,5000	11,8372	5,3027
10,3000	12,3289	19,6980

10,6000	9,8702	6,8848
13,0000	12,8206	1,3798
10,1000	11,3454	12,3309
10,7000	11,8372	10,6277
11,0000	11,8372	7,6105
10,8000	11,3454	5,0502
11,3000	11,3454	0,4020
11,0000	10,8537	1,3301
10,9000	10,8537	0,4249
11,3000	10,8537	3,9497
11,6000	11,3454	2,1946
11,8000	11,8372	0,3149
11,0000	11,8372	7,6105
11,4000	11,3454	0,4787
10,6000	10,3619	2,2458
9,8000	10,3619	5,7342
10,6000	11,3454	7,0323
10,4000	10,3619	0,3659
9,0000	9,3785	4,2053
10,7000	9,8702	7,7550
9,6000	10,8537	13,0592
10,7000	10,3619	3,1593
10,7000	10,3619	3,1593
9,4000	10,8537	15,4647
10,0000	10,8537	8,5369
10,6000	10,3619	2,2458
10,6000	10,3619	2,2458
10,2000	10,3619	1,5877
10,9000	11,3454	4,0864
9,4000	10,3619	10,2335
9,9000	9,8702	0,3009
10,1000	10,3619	2,5936
10,4000	10,8537	4,3624
10,7000	10,3619	3,1593
9,6000	9,3785	2,3075
10,3000	10,3619	0,6015
10,4000	10,3619	0,3659
11,2000	10,8537	3,0921
10,7000	10,8537	1,4363
10,3000	10,3619	0,6015
10,8000	10,3619	4,0560
10,2000	10,3619	1,5877
10,2000	9,8702	3,2332
9,6000	9,3785	2,3075

10,1000	10,3619	2,5936
10,5000	9,3785	10,6812
10,3000	10,8537	5,3756
10,7000	9,8702	7,7550
9,8000	10,3619	5,7342
9,9000	9,3785	5,2679
9,7000	9,8702	1,7548
10,0000	9,8702	1,2979
9,3000	9,3785	0,8438
10,5000	9,8702	5,9980
10,4000	10,3619	0,3659
9,4000	9,3785	0,2290
10,7000	9,8702	7,7550
10,1000	9,8702	2,2751
10,0000	9,8702	1,2979
9,8000	10,3619	5,7342
10,4000	9,3785	9,8223
10,4000	9,3785	9,8223
10,5000	10,3619	1,3148
10,2000	9,3785	8,0541
10,1000	9,8702	2,2751
10,0000	9,8702	1,2979
10,8000	9,8702	8,6091
9,9000	11,3454	14,6002
9,9000	10,8537	9,6332
10,6000	9,8702	6,8848
10,7000	10,3619	3,1593
10,4000	10,3619	0,3659
10,0000	9,3785	6,2152
9,2000	9,3785	1,9400
10,6000	9,3785	11,5238
10,1000	9,8702	2,2751
10,0000	9,8702	1,2979
9,7000	9,8702	1,7548
10,3000	9,3785	8,9468
10,4000	9,3785	9,8223
9,6000	10,3619	7,9370
9,3000	10,3619	11,4188
9,3000	9,8702	6,1313
9,6000	9,3785	2,3075
9,9000	8,8867	10,2349
12,0000	12,3289	2,7408
12,9000	12,3289	4,4272
11,4000	11,8372	3,8347

11,9000	11,8372	0,5281
21,3000	20,1967	5,1799
	Error relativo promedio [%]	4,9417

Anexo 7. 3 DATOS DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA MOD2

Tabla de valores de temperatura obtenidos para la calibración del módulo MOD2

Temperatura Módulo	Temperatura Patrón	Error Relativo Temperatura
[°C]	[°C]	[%]
31,2234	33,5000	6,7960
31,5195	33,6000	6,1920
32,7108	33,6000	2,6464
34,5184	34,0000	1,5248
34,8222	34,0000	2,4183
34,8222	34,0000	2,4183
35,1267	34,0000	3,3138
35,1267	33,6000	4,5438
35,1267	34,0000	3,3138
35,1267	33,6000	4,5438
35,1267	33,6000	4,5438
34,8222	33,6000	3,6375
34,8222	33,2000	4,8862
34,2154	32,7000	4,6343
33,6115	32,7000	2,7874
33,0103	32,3000	2,1992
32,7108	32,1000	1,9028
32,4120	31,9000	1,6049
31,8163	31,5000	1,0041
31,5195	31,1000	1,3488
31,2234	31,1000	0,3966
31,2234	31,1000	0,3966
31,2234	30,8000	1,3745
30,9279	30,8000	0,4152
30,9279	30,8000	0,4152
30,9279	30,8000	0,4152
31,2234	30,8000	1,3745
31,2234	30,8000	1,3745
31,5195	30,8000	2,3360
31,5195	30,8000	2,3360
31,8163	30,8000	3,2997

31,8163	30,8000	3,2997
31,8163	30,8000	3,2997
31,8163	30,8000	3,2997
31,8163	30,8000	3,2997
32,1138	30,6000	4,9470
31,5195	30,4000	3,6825
31,2234	30,4000	2,7084
31,2234	30,4000	2,7084
30,9279	30,3000	2,0722
30,9279	30,4000	1,7365
29,7527	30,4000	2,1293
30,9279	30,4000	1,7365
31,2234	30,4000	2,7084
31,5195	30,6000	3,0049
31,5195	30,8000	2,3360
31,8163	30,8000	3,2997
32,1138	30,8000	4,2655
32,1138	31,1000	3,2598
32,4120	31,1000	4,2185
33,0103	31,1000	6,1425
33,0103	31,4000	5,1284
33,0103	31,5000	4,7947
33,3105	31,8000	4,7502
33,6115	31,9000	5,3651
33,6115	31,9000	5,3651
33,9131	32,0000	5,9784
33,9131	32,1000	5,6482
33,9131	32,3000	4,9941
33,9131	32,3000	4,9941
33,9131	32,3000	4,9941
33,9131	32,0000	5,9784
33,9131	31,9000	6,3106
33,6115	31,5000	6,7031
33,6115	31,1000	8,0755
33,0103	31,1000	6,1425
32,1138	31,1000	3,2598
31,8163	30,8000	3,2997
31,8163	30,8000	3,2997
31,5195	30,4000	3,6825
31,2234	30,0000	4,0778
30,9279	30,0000	3,0929
30,6331	29,7000	3,1417
30,3390	29,6000	2,4965
30,0455	29,2000	2,8955

30,0455	29,2000	2,8955
29,7527	28,9000	2,9505
29,1691	28,9000	0,9311
29,1691	28,5000	2,3477
29,1691	28,5000	2,3477
29,1691	28,2000	3,4365
28,8783	28,1000	2,7697
28,5882	28,1000	1,7372
28,5882	27,8000	2,8351
28,2987	27,8000	1,7939
28,0099	27,5000	1,8542
28,0099	27,4000	2,2260
27,7218	27,4000	1,1744
27,7218	27,2000	1,9183
27,1476	27,0000	0,5465
27,1476	27,0000	0,5465
27,1476	27,0000	0,5465
Error relativo promedio [%]		3,1726

Anexo 7. 4 DATOS DE CALIBRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA DEL MOD2

Tabla de valores de humedad relativa obtenidos para la calibración del módulo MOD2

Humedad Relativa Patrón	Humedad Relativa Calibrada	Error Relativo Humedad Relativa
[%]	[%]	[%]
30,5000	35,8864	17,6604
29,7000	34,9030	17,5184
28,0000	32,9360	17,6286
30,5000	30,9691	1,5379
28,3000	28,5104	0,7434
30,9000	29,9856	2,9593
29,4000	30,9691	5,3369
29,5000	29,4939	0,0208
27,3000	29,9856	9,8373
28,2000	28,0186	0,6431
27,7000	27,5269	0,6249
29,1000	29,0021	0,3364
27,4000	28,0186	2,2578
27,7000	28,0186	1,1503
28,9000	28,5104	1,3482
28,1000	29,4939	4,9603

28,8000	29,4939	2,4092
29,5000	29,4939	0,0208
28,8000	29,4939	2,4092
29,9000	29,4939	1,3584
32,1000	30,9691	3,5232
30,6000	33,4277	9,2410
29,1000	30,4773	4,7331
30,4000	30,9691	1,8719
31,7000	30,4773	3,8570
32,0000	32,4443	1,3883
33,2000	32,9360	0,7952
34,7000	31,4608	9,3349
33,5000	33,9195	1,2522
34,9000	35,3947	1,4174
34,2000	34,9030	2,0554
32,0000	33,4277	4,4617
32,1000	30,9691	3,5232
33,3000	32,4443	2,5698
30,8000	30,9691	0,5489
31,7000	30,9691	2,3058
31,9000	30,4773	4,4598
31,3000	30,9691	1,0573
30,6000	30,9691	1,2061
30,8000	30,4773	1,0477
34,4000	30,9691	9,9737
31,8000	32,9360	3,5723
33,7000	31,4608	6,6445
35,1000	32,9360	6,1652
34,2000	34,9030	2,0554
34,6000	34,4112	0,5456
34,5000	33,9195	1,6827
34,9000	33,9195	2,8095
34,5000	33,4277	3,1080
32,4000	34,9030	7,7252
31,5000	31,9525	1,4366
32,3000	29,4939	8,6878
33,1000	31,4608	4,9523
32,0000	30,9691	3,2217
33,0000	31,4608	4,6643
33,7000	30,9691	8,1037
33,7000	32,4443	3,7262
34,0000	31,9525	6,0220
30,6000	30,9691	1,2061
33,2000	31,4608	5,2386

31,7000	30,9691	2,3058
34,2000	31,4608	8,0094
32,3000	29,9856	7,1654
31,0000	30,9691	0,0998
31,9000	30,4773	4,4598
32,5000	31,4608	3,1976
33,8000	31,4608	6,9207
32,8000	32,9360	0,4147
31,1000	33,9195	9,0658
31,9000	35,8864	12,4966
33,9000	31,9525	5,7447
33,3000	33,4277	0,3836
32,7000	33,9195	3,7293
32,5000	32,9360	1,3416
32,7000	33,9195	3,7293
34,9000	33,9195	2,8095
37,1000	36,3782	1,9457
34,7000	37,8534	9,0875
36,1000	35,8864	0,5916
34,7000	36,3782	4,8362
35,1000	35,8864	2,2405
36,0000	36,8699	2,4164
35,6000	35,3947	0,5767
38,0000	36,3782	4,2680
37,5000	36,8699	1,6803
37,1000	38,8368	4,6815
38,9000	36,8699	5,2188
37,6000	38,8368	3,2895
38,1000	37,8534	0,6473
39,2000	39,3286	0,3280
38,3000	37,3616	2,4500
37,6000	38,3451	1,9817
	Error relativo promedio [%]	3,9246

Anexo 7. 5 DATOS DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA DEL MOD3

Tabla de valores de temperatura obtenidos para la calibración del módulo MOD3

Temperatura Módulo	Temperatura Patrón	Error Relativo Temperatura
[°C]	[°C]	[%]
31,2234	33,5	6,7960

31,5195	33,6	6,1920
32,7108	33,6	2,6464
34,5184	34	1,5248
34,8222	34	2,4183
34,8222	34	2,4183
35,1267	34	3,3138
35,1267	33,6	4,5438
35,1267	34	3,3138
35,1267	33,6	4,5438
35,1267	33,6	4,5438
34,8222	33,6	3,6375
34,8222	33,2	4,8862
34,2154	32,7	4,6343
33,6115	32,7	2,7874
33,0103	32,3	2,1992
32,7108	32,1	1,9028
32,4120	31,9	1,6049
31,8163	31,5	1,0041
31,5195	31,1	1,3488
31,2234	31,1	0,3966
31,2234	31,1	0,3966
31,2234	30,8	1,3745
30,9279	30,8	0,4152
30,9279	30,8	0,4152
30,9279	30,8	0,4152
31,2234	30,8	1,3745
31,2234	30,8	1,3745
31,5195	30,8	2,3360
31,5195	30,8	2,3360
31,8163	30,8	3,2997
31,8163	30,8	3,2997
31,8163	30,8	3,2997
31,8163	30,8	3,2997
31,8163	30,8	3,2997
32,1138	30,6	4,9470
31,5195	30,4	3,6825
31,2234	30,4	2,7084
31,2234	30,4	2,7084
30,9279	30,3	2,0722
30,9279	30,4	1,7365
29,7527	30,4	2,1293
30,9279	30,4	1,7365
31,2234	30,4	2,7084
31,5195	30,6	3,0049

31,5195	30,8	2,3360
31,8163	30,8	3,2997
32,1138	30,8	4,2655
32,1138	31,1	3,2598
32,4120	31,1	4,2185
33,0103	31,1	6,1425
33,0103	31,4	5,1284
33,0103	31,5	4,7947
33,3105	31,8	4,7502
33,6115	31,9	5,3651
33,6115	31,9	5,3651
33,9131	32	5,9784
33,9131	32,1	5,6482
33,9131	32,3	4,9941
33,9131	32,3	4,9941
33,9131	32,3	4,9941
33,9131	32	5,9784
33,9131	31,9	6,3106
33,6115	31,5	6,7031
33,6115	31,1	8,0755
33,0103	31,1	6,1425
32,1138	31,1	3,2598
31,8163	30,8	3,2997
31,8163	30,8	3,2997
31,5195	30,4	3,6825
31,2234	30	4,0778
30,9279	30	3,0929
30,6331	29,7	3,1417
30,3390	29,6	2,4965
30,0455	29,2	2,8955
30,0455	29,2	2,8955
29,7527	28,9	2,9505
29,1691	28,9	0,9311
29,1691	28,5	2,3477
29,1691	28,5	2,3477
29,1691	28,2	3,4365
28,8783	28,1	2,7697
28,5882	28,1	1,7372
28,5882	27,8	2,8351
28,2987	27,8	1,7939
28,0099	27,5	1,8542
28,0099	27,4	2,2260
27,7218	27,4	1,1744
27,7218	27,2	1,9183

27,1476	27	0,5465
27,1476	27	0,5465
27,1476	27	0,5465
28,5882	27	5,8821
28,5882	27	5,8821
28,2987	27	4,8100
28,2987	27	4,8100
28,2987	27	4,8100
28,8783	27	6,9567
29,1691	27,4	6,4565
29,4606	27,4	7,5203
	Error relativo promedio [%]	3,3483

Anexo 7. 6 DATOS DE CALIBRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA MOD3

Tabla de valores de humedad relativa obtenidos para la calibración del módulo MOD3

Humedad Relativa Patrón	Humedad Relativa Calibrada	Error Relativo Humedad Relativa
[%]	[%]	[%]
60,8000	57,6721	5,1445
60,9000	58,1639	4,4928
60,9000	58,1639	4,4928
60,6000	58,1639	4,0200
60,3000	57,6721	4,3580
59,8000	57,6721	3,5583
59,9000	57,1804	4,5402
60,0000	57,1804	4,6993
58,8000	56,6887	3,5907
59,0000	56,1969	4,7510
58,7000	56,1969	4,2642
58,3000	56,1969	3,6073
57,9000	55,2134	4,6400
58,2000	55,2134	5,1315
57,2000	55,2134	3,4730
56,5000	54,2300	4,0177
56,5000	54,7217	3,1474
56,2000	55,2134	1,7554
56,4000	54,2300	3,8476
56,0000	54,7217	2,2827
55,5000	54,2300	2,2883
54,9000	53,2465	3,0118

55,3000	53,7382	2,8242
54,6000	52,7548	3,3795
53,8000	52,2630	2,8568
54,0000	52,2630	3,2166
54,2000	52,2630	3,5737
52,7000	52,2630	0,8292
52,5000	51,2796	2,3246
52,2000	50,7878	2,7053
53,1000	51,2796	3,4283
53,2000	51,2796	3,6099
52,6000	51,2796	2,5103
51,0000	50,2961	1,3802
51,1000	49,3126	3,4978
51,4000	48,8209	5,0177
51,8000	49,3126	4,8019
51,3000	49,8043	2,9155
51,0000	49,3126	3,3086
49,4000	48,3291	2,1677
49,6000	47,3457	4,5450
47,8000	47,3457	0,9505
47,6000	46,3622	2,6004
47,2000	45,8705	2,8168
47,2000	45,8705	2,8168
46,5000	44,8870	3,4688
45,0000	43,9035	2,4366
43,1000	42,9200	0,4175
42,1000	43,9035	4,2839
38,9000	41,4448	6,5420
37,5000	39,9696	6,5857
37,9000	38,0027	0,2709
37,2000	39,9696	7,4452
34,3000	38,4944	12,2286
35,8000	35,5440	0,7151
34,3000	36,0357	5,0604
33,5000	34,5605	3,1657
32,6000	34,0688	4,5055
33,4000	34,0688	2,0024
35,1000	35,5440	1,2649
34,5000	35,5440	3,0261
34,5000	35,5440	3,0261
36,8000	35,0523	4,7493
37,2000	36,5275	1,8079
34,0000	36,5275	7,4337
32,8000	34,0688	3,8683

36,8000	35,0523	4,7493
37,3000	36,5275	2,0711
35,7000	38,4944	7,8275
36,0000	37,5109	4,1971
35,6000	38,9862	9,5117
34,1000	38,4944	12,8868
36,3000	36,0357	0,7280
35,1000	35,5440	1,2649
36,8000	36,5275	0,7406
34,6000	35,5440	2,7283
36,2000	35,0523	3,1705
34,9000	37,5109	7,4812
34,5000	37,0192	7,3020
34,4000	37,0192	7,6140
36,1000	37,0192	2,5463
35,2000	35,0523	0,4197
34,8000	35,5440	2,1379
34,7000	36,0357	3,8494
34,3000	35,0523	2,1932
33,4000	34,0688	2,0024
33,0000	36,0357	9,1992
32,4000	36,0357	11,2214
33,1000	36,5275	10,3549
33,3000	35,5440	6,7387
32,9000	35,5440	8,0365
32,9000	34,0688	3,5525
32,8000	35,5440	8,3658
30,8000	35,0523	13,8060
29,9000	32,5936	9,0086
31,1000	33,0853	6,3836
26,7000	32,1018	20,2316
26,0000	28,6597	10,2296
25,3000	29,6432	17,1666
26,0000	30,6266	17,7947
	Error relativo promedio [%]	4,6183

Anexo 7. 7 DATOS DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA MOD4

Tabla de valores de temperatura obtenidos para la calibración del módulo MOD4

Temperatura Módulo	Temperatura Patrón	Error Relativo Temperatura
[°C]	[°C]	[%]
17,7888	16,6000	7,1616
17,7888	16,8000	5,8859
17,7888	17,1000	4,0283
18,0542	17,1000	5,5802
18,0542	17,1000	5,5802
18,0542	17,4000	3,7599
18,0542	17,3000	4,3597
18,0542	17,5000	3,1670
16,9953	17,4000	2,3257
16,7317	17,1000	2,1541
17,7888	17,0000	4,6402
17,7888	17,0000	4,6402
17,7888	17,2000	3,4234
17,7888	17,5000	1,6505
18,0542	17,9000	0,8616
17,2594	17,6000	1,9352
16,7317	17,3000	3,2852
16,9953	17,3000	1,7611
16,9953	17,4000	2,3257
18,0542	17,4000	3,7599
18,0542	17,1000	5,5802
17,7888	17,2000	3,4234
17,7888	17,3000	2,8256
17,7888	17,5000	1,6505
16,9953	17,6000	3,4356
16,9953	17,9000	5,0540
16,9953	18,1000	6,1031
17,2594	18,2000	5,1681
17,2594	18,3000	5,6863
17,5239	18,3000	4,2410
17,5239	18,2000	3,7148
17,5239	18,4000	4,7614
18,0542	18,9000	4,4750
18,0542	19,0000	4,9778
18,0542	18,8000	3,9669
19,1207	18,7000	2,2500

18,0542	18,5000	2,4096
18,3201	18,7000	2,0316
18,3201	19,0000	3,5785
18,5865	19,1000	2,6887
18,8533	19,1000	1,2915
19,1207	19,3000	0,9288
20,1960	19,2000	5,1873
19,1207	18,7000	2,2500
19,1207	18,9000	1,1679
19,1207	18,9000	1,1679
19,1207	18,7000	2,2500
19,1207	18,9000	1,1679
19,1207	19,1000	0,1086
18,8533	19,0000	0,7719
18,8533	19,0000	0,7719
19,1207	19,0000	0,6355
19,1207	19,2000	0,4128
19,1207	19,4000	1,4395
19,6572	20,2000	2,6871
19,9263	20,6000	3,2704
20,1960	20,1000	0,4775
19,6572	19,9000	1,2200
19,3887	19,4000	0,0583
19,3887	19,5000	0,5708
19,6572	20,3000	3,1664
19,6572	20,0000	1,7139
19,9263	19,9000	0,1322
20,4662	20,2000	1,3180
20,7371	20,5000	1,1566
20,7371	20,5000	1,1566
20,7371	20,4000	1,6525
20,7371	20,3000	2,1533
20,7371	20,4000	1,6525
20,7371	20,5000	1,1566
19,9263	19,7000	1,1487
19,6572	19,7000	0,2172
19,3887	19,5000	0,5708
19,6572	19,6000	0,2919
19,6572	19,5000	0,8062
19,9263	19,3000	3,2451
19,9263	19,5000	2,1861
20,4662	20,1000	1,8221
20,4662	19,9000	2,8454
20,1960	19,9000	1,4873

20,1960	19,6000	3,0407
19,9263	19,4000	2,7129
19,9263	19,4000	2,7129
19,6572	19,7000	0,2172
19,6572	19,9000	1,2200
19,6572	19,6000	0,2919
19,3887	19,4000	0,0583
19,6572	19,7000	0,2172
19,6572	20,0000	1,7139
19,9263	19,6000	1,6648
19,9263	19,8000	0,6379
21,0086	19,7000	6,6426
21,0086	19,8000	6,1040
21,0086	19,8000	6,1040
21,0086	19,5000	7,7364
20,7371	19,5000	6,3442
20,7371	19,5000	6,3442
20,4662	19,4000	5,4961
20,4662	18,9000	8,2870
20,1960	19,1000	5,7381
	Error relativo promedio [%]	2,8131

Anexo 7. 8 DATOS DE CALIBRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA MOD4

Tabla de valores de humedad relativa obtenidos para la calibración del módulo MOD4

Humedad Relativa Patrón	Humedad Relativa Calibrada	Error Relativo Humedad Relativa
[%]	[%]	[%]
49,0000	48,3239	1,3798
49,2000	49,3074	0,2183
49,5000	51,7661	4,5779
49,7000	51,2743	3,1677
49,5000	50,2909	1,5977
49,3000	50,2909	2,0099
49,1000	50,7826	3,4269
48,9000	49,7991	1,8387
48,9000	47,8322	2,1837
48,9000	47,8322	2,1837
48,9000	48,3239	1,1781
48,9000	47,3404	3,1893
48,9000	46,8487	4,1949

48,9000	47,8322	2,1837
48,9000	47,3404	3,1893
49,0000	48,3239	1,3798
49,0000	48,3239	1,3798
49,0000	48,3239	1,3798
49,1000	48,8157	0,5791
49,1000	48,3239	1,5806
49,2000	48,8157	0,7812
49,2000	49,3074	0,2183
49,2000	49,3074	0,2183
49,2000	48,3239	1,7806
49,2000	46,8487	4,7790
49,2000	48,3239	1,7806
49,2000	48,3239	1,7806
49,3000	47,8322	2,9773
49,3000	48,8157	0,9824
49,3000	47,8322	2,9773
49,3000	48,8157	0,9824
49,3000	49,3074	0,0150
49,4000	48,8157	1,1829
49,4000	49,3074	0,1875
49,5000	49,3074	0,3891
49,5000	49,3074	0,3891
49,5000	48,3239	2,3759
49,5000	48,3239	2,3759
49,5000	48,3239	2,3759
49,5000	48,3239	2,3759
49,5000	47,8322	3,3693
49,4000	47,8322	3,1737
49,5000	48,8157	1,3825
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	49,3074	0,3891
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	51,7661	4,5779
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	51,2743	3,5845
49,5000	51,2743	3,5845
49,5000	50,2909	1,5977
49,5000	49,7991	0,6043
49,4000	50,2909	1,8034
49,4000	48,3239	2,1783
49,4000	48,8157	1,1829

49,4000	49,3074	0,1875
49,4000	48,8157	1,1829
49,4000	48,8157	1,1829
49,4000	48,8157	1,1829
49,4000	48,8157	1,1829
49,5000	50,7826	2,5911
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	49,7991	0,6043
49,5000	49,3074	0,3891
49,6000	49,3074	0,5899
49,6000	48,8157	1,5813
49,6000	49,3074	0,5899
49,6000	49,7991	0,4015
49,7000	50,2909	1,1889
49,7000	50,2909	1,1889
49,7000	50,7826	2,1783
49,8000	50,7826	1,9731
49,8000	49,3074	0,9892
49,9000	50,2909	0,7833
49,9000	51,2743	2,7542
49,9000	51,7661	3,7396
49,9000	50,7826	1,7687
50,0000	50,7826	1,5652
50,0000	50,2909	0,5817
50,0000	50,7826	1,5652
50,0000	50,2909	0,5817
50,0000	49,7991	0,4017
50,1000	49,3074	1,5820
50,1000	49,7991	0,6005
50,1000	49,7991	0,6005
50,0000	49,3074	1,3852
50,0000	48,8157	2,3687
50,0000	49,7991	0,4017
50,0000	50,2909	0,5817
50,0000	52,2578	4,5156
50,1000	52,2578	4,3070
50,2000	52,2578	4,0992
50,2000	52,2578	4,0992
50,2000	51,2743	2,1401
50,2000	50,7826	1,1606
50,2000	50,7826	1,1606
50,3000	51,2743	1,9371
50,3000	50,2909	0,0182

18,5865	18,5000	0,4673
18,8533	18,5000	1,9099
18,8533	18,5000	1,9099
18,8533	18,5000	1,9099
18,8533	18,7000	0,8200
19,1207	18,8000	1,7061
19,3887	18,8000	3,1314
19,3887	19,2000	0,9828
19,6572	19,2000	2,3813
19,9263	19,5000	2,1861
19,9263	19,6000	1,6648
20,1960	20,0000	0,9798
19,6572	20,0000	1,7139
20,7371	20,3000	2,1533
21,0086	20,4000	2,9833
21,0086	20,4000	2,9833
21,2807	20,8000	2,3111
21,2807	20,8000	2,3111
20,4662	21,0000	2,5417
22,1009	21,2000	4,2494
22,1009	21,2000	4,2494
22,1009	21,5000	2,7948
22,3756	21,6000	3,5905
22,6509	21,7000	4,3820
22,6509	22,0000	2,9586
22,9269	22,4000	2,3522
23,4809	22,4000	4,8254
23,7589	22,6000	5,1278
22,6509	22,8000	0,6540
23,2036	23,8000	2,5061
23,4809	24,0000	2,1630
24,0376	24,3000	1,0800
24,3169	24,4000	0,3406
25,7238	24,5000	4,9950
25,7238	24,8000	3,7249
24,8776	24,8000	0,3130
26,0072	25,1000	3,6143
26,2913	25,1000	4,7461
26,5760	25,1000	5,8805
26,5760	25,3000	5,0435
26,5760	25,5000	4,2197
27,1476	25,5000	6,4610
27,1476	25,8000	5,2231
27,1476	25,9000	4,8168

27,1476	26,0000	4,4137
27,4343	25,9000	5,9241
27,7218	25,9000	7,0339
27,1476	25,9000	4,8168
27,1476	25,9000	4,8168
26,8615	25,5000	5,3390
26,8615	25,5000	5,3390
26,5760	25,5000	4,2197
26,5760	25,2000	5,4604
26,2913	25,1000	4,7461
26,0072	25,1000	3,6143
26,0072	25,1000	3,6143
25,7238	25,0000	2,8951
25,7238	24,8000	3,7249
25,7238	24,8000	3,7249
25,4410	24,4000	4,2666
25,1590	24,4000	3,1106
24,8776	24,4000	1,9575
24,8776	24,4000	1,9575
24,8776	24,4000	1,9575
24,8776	24,1000	3,2266
24,8776	24,0000	3,6568
24,5969	24,0000	2,4872
	Error relativo promedio [%]	2,6019

Anexo 7. 10 DATOS DE CALIBRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA MOD5

Tabla de valores de humedad relativa obtenidos para la calibración del módulo MOD5

Humedad Relativa Patrón	Humedad Relativa Calibrada	Error Relativo Humedad Relativa
[%]	[%]	[%]
66,7000	67,9544	1,8807
66,3000	67,4627	1,7537
66,2000	67,4627	1,9074
67,1000	67,4627	0,5405
66,7000	67,4627	1,1435
66,9000	67,4627	0,8411
66,6000	67,4627	1,2953
66,6000	66,9710	0,5570
66,4000	66,9710	0,8599
65,3000	66,4792	1,8059

66,2000	65,9875	0,3210
66,6000	65,9875	0,9197
65,8000	66,4792	1,0323
65,7000	66,4792	1,1860
66,0000	65,9875	0,0190
66,0000	65,9875	0,0190
66,1000	65,9875	0,1702
65,9000	66,4792	0,8789
66,1000	66,4792	0,5737
66,2000	66,4792	0,4218
65,8000	65,4958	0,4624
66,4000	65,9875	0,6212
66,7000	66,4792	0,3310
66,3000	66,9710	1,0120
66,4000	66,4792	0,1193
66,3000	66,9710	1,0120
66,4000	66,9710	0,8599
66,1000	66,4792	0,5737
66,8000	65,9875	1,2163
66,4000	65,9875	0,6212
66,2000	66,4792	0,4218
66,4000	65,9875	0,6212
66,4000	66,4792	0,1193
66,6000	66,9710	0,5570
67,2000	66,4792	1,0726
67,2000	66,9710	0,3408
65,2000	66,9710	2,7162
66,4000	65,9875	0,6212
65,4000	65,0040	0,6055
65,1000	63,5288	2,4135
61,6000	63,0371	2,3329
64,6000	62,0536	3,9418
62,7000	61,5619	1,8152
62,0000	63,0371	1,6727
63,1000	61,0701	3,2169
63,6000	63,5288	0,1119
63,1000	62,5453	0,8790
63,3000	62,5453	1,1922
63,5000	63,0371	0,7290
63,3000	63,0371	0,4154
62,8000	63,0371	0,3775
62,0000	63,5288	2,4658
61,6000	61,0701	0,8602
62,2000	60,5784	2,6071

62,1000	61,0701	1,6584
61,5000	60,5784	1,4986
61,6000	60,5784	1,6585
60,7000	60,5784	0,2003
60,0000	58,6114	2,3143
60,0000	59,1032	1,4947
59,1000	59,1032	0,0054
58,8000	60,5784	3,0245
57,8000	56,1528	2,8499
57,8000	54,1858	6,2529
57,1000	56,1528	1,6589
56,8000	58,6114	3,1892
57,1000	56,1528	1,6589
56,6000	55,6610	1,6590
54,5000	58,1197	6,6417
53,6000	55,6610	3,8452
53,0000	55,6610	5,0208
55,4000	53,2023	3,9669
54,4000	52,2189	4,0094
53,2000	54,1858	1,8530
52,1000	51,7271	0,7157
44,3000	53,6941	21,2056
50,4000	54,1858	7,5115
51,4000	48,2850	6,0603
51,5000	45,8263	11,0169
51,5000	50,2519	2,4234
51,1000	51,2354	0,2650
50,2000	48,7767	2,8352
50,8000	50,7437	0,1109
52,3000	48,2850	7,6769
53,9000	51,2354	4,9436
53,8000	51,7271	3,8529
54,1000	54,1858	0,1586
54,5000	53,6941	1,4787
53,4000	54,1858	1,4716
51,0000	55,6610	9,1393
52,1000	55,1693	5,8912
53,5000	54,1858	1,2819
52,6000	53,6941	2,0800
54,3000	53,6941	1,1159
55,1000	54,1858	1,6591
56,0000	55,6610	0,6053
55,4000	55,1693	0,4164
54,8000	55,6610	1,5712

54,6000	57,1362	4,6451
53,8000	55,6610	3,4592
	Error relativo promedio [%]	2,1511

Anexo 7. 11 DATOS DE CALIBRACIÓN DE TEMPERATURA MOD6

Tabla de valores de temperatura obtenidos para la calibración del módulo MOD6

Temperatura Módulo	Temperatura Patrón	Error Relativo Temperatura
[°C]	[°C]	[%]
52,2125	49,4000	5,6933
52,5992	50,0000	5,1984
52,5992	50,6000	3,9510
52,9891	51,0000	3,9003
53,3825	51,4000	3,8569
53,3825	51,8000	3,0549
53,7792	52,2000	3,0254
52,9891	52,2000	1,5118
52,9891	52,4000	1,1243
52,5992	52,2000	0,7647
52,5992	52,2000	0,7647
52,2125	52,2000	0,0240
52,2125	51,8000	0,7964
51,8290	51,2000	1,2285
51,0710	51,2000	0,2519
51,4485	51,4000	0,0944
50,6964	51,4000	1,3688
51,4485	51,8000	0,6785
51,4485	52,2000	1,4396
52,2125	52,2000	0,0240
52,2125	52,2000	0,0240
51,8290	52,2000	0,7108
52,2125	52,2000	0,0240
52,2125	52,4000	0,3578
52,5992	52,6000	0,0015
52,9891	53,0000	0,0205
54,5837	54,2000	0,7079
58,4062	56,2000	3,9255
59,3068	57,5000	3,1422
60,2284	59,5000	1,2242
41,0703	43,1000	4,7093

39,7910	44,5000	10,5820
49,2249	46,4000	6,0882
42,0416	45,9000	8,4061
49,9554	47,7000	4,7284
45,0270	48,9000	7,9202
47,7926	50,0000	4,4147
47,0897	50,0000	5,8207
47,4401	50,0000	5,1198
43,0241	46,2000	6,8743
41,7166	45,0000	7,2963
50,6964	48,5000	4,5287
39,7910	43,1000	7,6774
38,8423	42,4000	8,3908
38,5280	42,3000	8,9173
39,1576	41,9000	6,5452
38,2146	41,2000	7,2462
37,5904	40,4000	6,9544
52,2125	50,2000	4,0090
37,2796	40,0000	6,8009
36,0447	38,3000	5,8885
34,5184	38,0000	9,1620
35,1267	38,4000	8,5242
37,2796	39,6000	5,8595
38,2146	40,8000	6,3368
38,5280	40,9000	5,7996
38,8423	41,2000	5,7225
38,8423	41,6000	6,6291
39,1576	42,1000	6,9891
39,7910	42,8000	7,0303
39,4738	42,3000	6,6813
37,9021	40,5000	6,4147
36,6605	40,4000	9,2561
36,6605	39,2000	6,4782
35,4319	39,2000	9,6124
35,7379	39,6000	9,7527
36,0447	38,8000	7,1013
35,1267	38,4000	8,5242
34,2154	37,5000	8,7589
33,3105	36,2000	7,9819
32,4120	35,3000	8,1814
31,5195	34,0000	7,2956
30,6331	33,2000	7,7317
29,4606	32,4000	9,0723
30,3390	32,7000	7,2203

29,7527	32,3000	7,8864
30,3390	32,7000	7,2203
31,2234	32,5000	3,9281
30,0455	31,5000	4,6175
29,1691	31,5000	7,3997
29,4606	31,1000	5,2715
28,8783	31,1000	7,1437
28,5882	31,5000	9,2439
29,1691	31,5000	7,3997
29,7527	32,3000	7,8864
30,0455	32,8000	8,3979
31,5195	32,7000	3,6101
26,0072	28,1000	7,4478
25,7238	28,1000	8,4563
25,7238	28,5000	9,7411
26,2913	28,5000	7,7500
26,0072	28,4000	8,4254
49,9554	47,7000	4,7284
50,6964	48,5000	4,5287
70,2873	67,4000	4,2839
79,7461	77,2000	3,2980
81,2829	80,0000	1,6037
82,8728	81,9000	1,1878
82,8728	83,9000	1,2243
83,6883	85,9000	2,5747
	Error relativo promedio [%]	5,1518

Anexo 7. 12 DATOS DE CALIBRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA MOD6

Tabla de valores de humedad relativa obtenidos para la calibración del módulo MOD6

Humedad Relativa Patrón	Humedad Relativa Calibrada	Error Relativo Humedad Relativa
[%]	[%]	[%]
11,8000	9,2985	21,1993
11,3000	9,7902	13,3609
11,0000	9,2985	15,4684
10,5000	9,2985	11,4431
10,3000	8,8067	14,4976
10,3000	9,2985	9,7235
9,9000	8,8067	11,0430
9,8000	9,2985	5,1176

9,6000	8,8067	8,2631
9,8000	8,8067	10,1353
9,7000	9,2985	4,1394
9,7000	9,2985	4,1394
9,7000	9,2985	4,1394
10,0000	9,2985	7,0152
10,0000	9,7902	2,0979
10,0000	10,2820	2,8195
10,1000	9,7902	3,0672
9,9000	9,7902	1,1089
9,8000	9,2985	5,1176
9,8000	9,2985	5,1176
9,7000	9,2985	4,1394
10,0000	9,2985	7,0152
9,6000	9,2985	3,1408
9,6000	9,2985	3,1408
9,4000	9,2985	1,0800
9,3000	8,8067	5,3038
8,5000	8,3150	2,1764
8,1000	6,8398	15,5581
7,5000	6,3481	15,3592
6,6000	5,8563	11,2678
3,5000	3,8894	11,1251
3,5000	3,8894	11,1251
3,5000	3,8894	11,1251
3,5000	3,8894	11,1251
11,9000	11,7572	1,2003
11,4000	13,7241	20,3869
11,3000	12,7406	12,7490
11,2000	12,2489	9,3652
10,2000	11,7572	15,2663
9,9000	9,7902	1,1089
9,2000	8,3150	9,6195
9,1000	8,8067	3,2226
9,0000	8,3150	7,6110
11,1000	10,7737	2,9397
11,5000	11,7572	2,2362
12,2000	13,2324	8,4620
13,2000	13,2324	0,2452
13,8000	14,2158	3,0133
13,8000	14,7076	6,5767
14,0000	14,2158	1,5417
14,8000	15,1993	2,6981
15,7000	15,1993	3,1891

15,6000	16,6745	6,8880
16,2000	16,1828	0,1062
17,8000	17,1663	3,5603
17,6000	19,1332	8,7114
17,3000	17,1663	0,7731
16,3000	16,1828	0,7191
15,5000	15,6911	1,2326
15,2000	14,7076	3,2396
15,2000	14,7076	3,2396
14,8000	15,1993	2,6981
14,3000	14,7076	2,8502
14,0000	13,7241	1,9707
14,5000	13,7241	5,3510
15,6000	15,6911	0,5837
15,9000	17,1663	7,9639
16,9000	16,6745	1,3342
16,7000	18,1497	8,6810
16,5000	17,6580	7,0182
17,0000	16,6745	1,9146
17,5000	18,1497	3,7128
18,4000	18,6415	1,3123
19,6000	20,1167	2,6361
20,4000	21,1002	3,4321
22,1000	22,0836	0,0741
23,1000	23,5588	1,9863
23,3000	25,0340	7,4422
23,8000	23,5588	1,0133
24,2000	25,5258	5,4784
23,7000	24,5423	3,5540
23,8000	23,0671	3,0794
6,8000	6,8398	0,5852
7,8000	7,8233	0,2983
9,0000	9,2985	3,3164
10,3000	10,2820	0,1752
25,3000	25,5258	0,8924
25,5000	25,5258	0,1011
26,2000	25,5258	2,5734
25,9000	26,0175	0,4537
25,5000	27,0010	5,8862
24,8000	26,0175	4,9093
23,9000	25,0340	4,7449
23,5000	23,5588	0,2503
23,9000	23,0671	3,4850
31,2000	30,9349	0,8498

31,0000	31,4266	1,3762
30,5000	31,4266	3,0381
30,7000	30,4431	0,8367
31,0000	30,9349	0,2101
	Error relativo promedio [%]	5,1967

ANEXO 8 DATOS OBTENIDOS DE LA CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE RADIACIÓN SOLAR VANTAGE PRO 6450

Tabla de valores de la calibración del sensor de radiación solar

Radiación Solar Patrón	Radiación Solar Calibrada	Error Relativo Radiación Solar
$[W/m^2]$	$[W/m^2]$	[%]
121,0000	142,6093	17,8589
125,0000	149,6405	19,7124
126,0000	149,6405	18,7623
129,0000	156,6718	21,4510
132,0000	156,6718	18,6907
132,0000	156,6718	18,6907
131,0000	156,6718	19,5968
130,0000	156,6718	20,5168
132,0000	156,6718	18,6907
134,0000	156,6718	16,9192
134,0000	163,7030	22,1664
134,0000	156,6718	16,9192
134,0000	156,6718	16,9192
135,0000	156,6718	16,0532
138,0000	163,7030	18,6254
143,0000	163,7030	14,4776
148,0000	170,7343	15,3610
154,0000	177,7655	15,4322
160,0000	184,7968	15,4980
168,0000	191,8280	14,1834
175,0000	191,8280	9,6160
179,0000	205,8905	15,0226
178,0000	198,8593	11,7187
178,0000	198,8593	11,7187
182,0000	198,8593	9,2633
188,0000	205,8905	9,5162
197,0000	212,9218	8,0821
217,0000	219,9530	1,3608
232,0000	248,0780	6,9302
243,0000	262,1405	7,8768
254,0000	269,1718	5,9731
263,0000	276,2030	5,0202
277,0000	283,2343	2,2506
303,0000	297,2968	1,8823
325,0000	318,3905	2,0337

339,0000	353,5468	4,2911
363,0000	374,6405	3,2068
374,0000	381,6718	2,0513
381,0000	381,6718	0,1763
393,0000	388,7030	1,0934
414,0000	402,7655	2,7136
439,0000	416,8280	5,0506
464,0000	451,9843	2,5896
482,0000	480,1093	0,3923
504,0000	494,1718	1,9500
498,0000	536,3593	7,7027
533,0000	508,2343	4,6465
606,0000	599,6405	1,0494
550,0000	543,3905	1,2017
555,0000	529,3280	4,6256
578,0000	550,4218	4,7713
534,0000	543,3905	1,7585
507,0000	508,2343	0,2434
455,0000	459,0155	0,8825
428,0000	409,7968	4,2531
401,0000	388,7030	3,0666
383,0000	381,6718	0,3468
369,0000	367,6093	0,3769
354,0000	367,6093	3,8444
353,0000	360,5780	2,1468
363,0000	367,6093	1,2698
384,0000	395,7343	3,0558
406,0000	409,7968	0,9352
430,0000	430,8905	0,2071
474,0000	459,0155	3,1613
519,0000	494,1718	4,7839
597,0000	564,4843	5,4465
610,0000	585,5780	4,0036
576,0000	536,3593	6,8821
545,0000	522,2968	4,1657
522,0000	501,2030	3,9841
609,0000	571,5155	6,1551
623,0000	599,6405	3,7495
598,0000	585,5780	2,0773
519,0000	522,2968	0,6352
491,0000	487,1405	0,7860
470,0000	459,0155	2,3371
490,0000	466,0468	4,8884
567,0000	536,3593	5,4040
589,0000	676,9843	14,9379
563,0000	543,3905	3,4830

719,0000	691,0468	3,8878
675,0000	669,9530	0,7477
668,0000	648,8593	2,8654
569,0000	571,5155	0,4421
595,0000	571,5155	3,9470
561,0000	550,4218	1,8856
574,0000	550,4218	4,1077
585,0000	585,5780	0,0988
570,0000	578,5468	1,4994
1252,0000	1267,6093	1,2467
887,0000	901,9843	1,6893
762,0000	810,5780	6,3751
1202,0000	1218,3905	1,3636
1294,0000	1295,7343	0,1340
778,0000	789,4843	1,4761
855,0000	852,7655	0,2613
795,0000	901,9843	13,4571
790,0000	754,3280	4,5154
671,0000	655,8905	2,2518
599,0000	578,5468	3,4146
640,0000	705,1093	10,1733
659,0000	641,8280	2,6058
632,0000	620,7343	1,7826
604,0000	592,6093	1,8859
605,0000	634,7968	4,9251
777,0000	754,3280	2,9179
619,0000	606,6718	1,9916
567,0000	557,4530	1,6838
576,0000	550,4218	4,4407
623,0000	620,7343	0,3637
560,0000	564,4843	0,8008
514,0000	515,2655	0,2462
495,0000	480,1093	3,0082
478,0000	466,0468	2,5007
475,0000	459,0155	3,3652
473,0000	459,0155	2,9565
479,0000	451,9843	5,6400
472,0000	459,0155	2,7509
464,0000	451,9843	2,5896
443,0000	437,9218	1,1463
418,0000	416,8280	0,2804
412,0000	402,7655	2,2414
403,0000	395,7343	1,8029
406,0000	395,7343	2,5285
406,0000	395,7343	2,5285
423,0000	402,7655	4,7836

412,0000	409,7968	0,5348
407,0000	402,7655	1,0404
368,0000	388,7030	5,6258
350,0000	374,6405	7,0402
347,0000	346,5155	0,1396
330,0000	339,4843	2,8740
321,0000	332,4530	3,5679
318,0000	325,4218	2,3339
320,0000	332,4530	3,8916
328,0000	332,4530	1,3576
328,0000	332,4530	1,3576
344,0000	332,4530	3,3567
334,0000	332,4530	0,4632
324,0000	325,4218	0,4388
315,0000	318,3905	1,0764
306,0000	311,3593	1,7514
295,0000	311,3593	5,5455
296,0000	297,2968	0,4381
293,0000	297,2968	1,4665
293,0000	297,2968	1,4665
296,0000	297,2968	0,4381
303,0000	304,3280	0,4383
306,0000	304,3280	0,5464
306,0000	311,3593	1,7514
322,0000	332,4530	3,2463
337,0000	339,4843	0,7372
346,0000	346,5155	0,1490
350,0000	353,5468	1,0134
351,0000	353,5468	0,7256
343,0000	353,5468	3,0749
339,0000	353,5468	4,2911
335,0000	339,4843	1,3386
336,0000	339,4843	1,0370
347,0000	346,5155	0,1396
362,0000	353,5468	2,3351
398,0000	374,6405	5,8692
425,0000	388,7030	8,5405
466,0000	451,9843	3,0077
	Error relativo promedio [%]	4,9917

ANEXO 9 DATOS OBTENIDOS PARA DETERMINAR EL TIPO DE VENTILACIÓN

Anexo 9. 1 DATOS DEL SISTEMA CON VENTILACIÓN NATURAL

Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Salida Cámara	Temperatura Promedio Puntos 1 y 2
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
28,0099	31,5195	30,0455	30,0455	30,7825
28,2987	32,7108	31,2234	31,2234	31,9671
29,1691	33,6115	32,4120	32,7108	33,0117
29,4606	34,5184	33,3105	33,6115	33,9145
30,3390	34,8222	33,6115	34,2154	34,2168
30,6331	36,0447	34,8222	35,1267	35,4334
31,2234	36,3522	35,4319	35,7379	35,8921
31,8163	36,3522	35,7379	36,0447	36,0451
31,8163	36,6605	35,7379	36,0447	36,1992
32,1138	36,9697	36,0447	36,6605	36,5072
32,4120	37,2796	36,0447	36,6605	36,6222
32,7108	37,5904	36,3522	36,9697	36,9713
33,0103	38,2146	36,6605	37,2796	37,4376
33,0103	38,5280	36,9697	37,5904	37,7488
33,3105	38,5280	37,5904	37,9021	38,0592
33,6115	39,1576	37,5904	38,2146	38,3740
33,9131	39,1576	37,9021	38,5280	38,5298
33,9131	39,4738	38,2146	38,8423	38,8442
34,5184	39,7910	38,5280	39,1576	39,1595
34,5184	40,1093	39,1576	39,7910	39,6334
34,8222	40,4285	39,4738	40,1093	39,9512
35,1267	40,4285	39,4738	40,1093	39,9512
35,4319	40,4285	39,7910	40,1093	40,1098
35,4319	40,7489	39,7910	40,4285	40,2699
35,7379	40,7489	39,7910	40,4285	40,2699
35,7379	41,0703	40,1093	40,7489	40,5898
36,0447	41,3929	40,7489	41,3929	41,0709
36,3522	41,7166	40,7489	41,3929	41,2328
36,3522	41,7166	40,7489	41,7166	41,2328
36,6605	41,7166	40,7489	41,3929	41,2328
36,6605	42,0416	40,4285	41,0703	41,2351
36,9697	42,0416	40,7489	41,0703	41,3952
36,9697	42,0416	40,1093	40,4285	41,0754
37,2796	42,3678	40,4285	41,0703	41,3982
37,2796	42,6953	40,7489	41,3929	41,7221

37,5904	42,6953	41,0703	41,7166	41,8828
37,5904	43,0241	41,7166	42,3678	42,3704
37,9021	43,0241	41,7166	42,3678	42,3704
37,9021	43,0241	41,7166	42,3678	42,3704
38,2146	42,3678	40,7489	40,7489	41,5583
38,2146	42,3678	40,4285	40,4285	41,3982
38,2146	42,3678	40,7489	40,7489	41,5583
38,2146	42,6953	40,7489	40,7489	41,7221
38,5280	43,0241	40,7489	41,0703	41,8865
38,5280	43,0241	41,0703	41,3929	42,0472
38,5280	43,3542	41,7166	42,0416	42,5354
38,8423	43,6858	42,0416	42,3678	42,8637
39,1576	43,6858	42,0416	42,3678	42,8637
39,1576	43,6858	41,7166	42,3678	42,7012
39,1576	43,6858	41,7166	42,0416	42,7012
39,1576	44,0188	42,0416	42,6953	43,0302
39,4738	44,3533	42,6953	43,3542	43,5243
39,4738	44,3533	43,0241	43,6858	43,6887
39,7910	44,6894	43,3542	44,0188	44,0218
40,1093	45,0270	43,6858	44,3533	44,3564
40,1093	44,6894	43,3542	44,0188	44,0218
40,4285	44,6894	43,3542	44,0188	44,0218
40,4285	44,6894	43,6858	44,0188	44,1876
40,7489	44,6894	43,6858	44,0188	44,1876
40,7489	44,3533	43,6858	43,6858	44,0195
40,7489	44,6894	43,6858	44,0188	44,1876
40,7489	44,6894	43,3542	44,0188	44,0218
40,7489	45,0270	43,6858	44,0188	44,3564
40,7489	44,3533	43,0241	43,0241	43,6887
41,0703	44,0188	42,6953	42,3678	43,3570
40,7489	44,3533	42,6953	42,6953	43,5243
40,7489	44,3533	42,6953	42,3678	43,5243
40,7489	44,3533	43,0241	42,6953	43,6887
40,7489	44,0188	42,6953	42,3678	43,3570
40,7489	44,0188	42,6953	42,3678	43,3570
40,7489	42,6953	42,0416	41,3929	42,3684
40,4285	42,3678	41,7166	41,0703	42,0422
40,4285	42,0416	41,3929	41,0703	41,7172
40,1093	42,0416	41,3929	41,0703	41,7172
39,7910	41,7166	40,7489	40,1093	41,2328
39,7910	41,7166	40,7489	40,4285	41,2328
39,4738	42,0416	40,7489	40,4285	41,3952
39,4738	42,0416	41,0703	40,7489	41,5560
39,7910	42,3678	41,3929	41,7166	41,8803

39,7910	42,6953	41,7166	42,0416	42,2060
39,7910	43,0241	42,0416	42,0416	42,5328
40,1093	42,0416	41,3929	41,0703	41,7172
39,7910	41,7166	41,0703	40,7489	41,3935
40,1093	41,7166	41,0703	41,0703	41,3935
40,1093	42,0416	41,3929	41,3929	41,7172
40,1093	42,0416	41,3929	41,3929	41,7172
39,7910	42,3678	41,7166	42,0416	42,0422
40,1093	42,3678	41,7166	41,7166	42,0422
40,4285	42,3678	41,7166	41,3929	42,0422
40,4285	42,0416	41,7166	41,3929	41,8791
40,4285	42,0416	41,7166	41,3929	41,8791
40,4285	41,7166	41,3929	41,0703	41,5548
40,1093	41,3929	41,0703	40,7489	41,2316
40,1093	41,3929	41,0703	41,0703	41,2316
39,7910	41,0703	40,7489	40,7489	40,9096
39,4738	41,3929	40,7489	40,4285	41,0709
39,4738	41,7166	40,7489	40,4285	41,2328
39,4738	41,3929	40,1093	39,4738	40,7511
39,1576	41,0703	39,7910	38,8423	40,4307
39,1576	41,0703	39,7910	39,1576	40,4307
39,1576	41,7166	40,4285	40,1093	41,0726
39,1576	42,0416	40,7489	40,4285	41,3952
40,7489	44,0188	43,0241	43,0241	43,5214
39,4738	43,0241	42,0416	42,3678	42,5328
39,7910	43,6858	42,6953	43,0241	43,1905
39,7910	44,0188	43,0241	43,3542	43,5214
40,1093	44,3533	43,0241	43,3542	43,6887
40,1093	44,6894	43,3542	43,6858	44,0218
40,4285	44,6894	43,6858	44,0188	44,1876
40,4285	44,6894	43,3542	43,3542	44,0218
40,4285	44,6894	43,3542	43,3542	44,0218
40,7489	45,0270	43,3542	43,6858	44,1906
40,7489	45,3663	43,6858	44,3533	44,5261
41,0703	45,7074	44,3533	44,6894	45,0303
41,0703	46,0501	44,6894	45,3663	45,3698
41,3929	46,3947	45,3663	46,0501	45,8805
41,7166	46,7412	46,0501	46,7412	46,3957
42,0416	47,0897	46,0501	46,7412	46,5699
42,0416	46,7412	46,0501	46,7412	46,3957
43,3542	48,1473	47,0897	47,7926	47,6185
42,3678	47,0897	46,0501	46,7412	46,5699
43,6858	48,8634	47,4401	48,1473	48,1517
42,6953	47,4401	46,3947	46,7412	46,9174

42,6953	47,4401	46,3947	47,0897	46,9174
42,6953	47,4401	46,7412	47,4401	47,0907
43,0241	47,0897	46,3947	46,7412	46,7422
43,0241	47,0897	46,3947	46,7412	46,7422
43,0241	47,4401	46,3947	46,7412	46,9174
43,0241	47,0897	46,3947	46,7412	46,7422
41,0703	43,0241	42,0416	42,0416	42,5328
41,3929	43,0241	42,3678	42,3678	42,6959
41,3929	43,0241	42,3678	42,3678	42,6959
41,0703	43,3542	42,6953	42,6953	43,0247
41,3929	44,0188	43,3542	43,3542	43,6865
41,3929	44,3533	43,6858	44,0188	44,0195
41,3929	44,6894	44,0188	44,3533	44,3541
41,7166	45,0270	44,3533	44,6894	44,6902
41,3929	45,0270	44,3533	44,3533	44,6902
41,7166	45,3663	44,3533	44,6894	44,8598
41,7166	45,7074	45,0270	45,0270	45,3672
41,7166	45,3663	44,6894	45,0270	45,0279
41,7166	45,7074	45,0270	45,0270	45,3672
42,0416	46,0501	45,0270	45,3663	45,5386
42,0416	46,0501	45,3663	45,3663	45,7082
42,3678	46,3947	45,3663	45,7074	45,8805
42,0416	46,0501	44,6894	44,3533	45,3698
42,0416	45,3663	44,3533	43,6858	44,8598
42,0416	45,3663	43,6858	43,3542	44,5261
42,0416	45,3663	44,0188	43,3542	44,6926
42,0416	45,3663	44,0188	43,6858	44,6926
42,3678	45,3663	44,3533	43,6858	44,8598
43,6858	46,3947	45,7074	45,0270	46,0511
43,3542	45,0270	44,0188	43,3542	44,5229
42,0416	44,0188	43,3542	42,6953	43,6865
41,7166	43,0241	42,6953	42,0416	42,8597
41,3929	42,3678	42,0416	41,0703	42,2047
41,0703	42,3678	41,7166	41,0703	42,0422
40,7489	42,3678	41,3929	41,0703	41,8803
41,0703	42,3678	41,3929	41,0703	41,8803
40,7489	42,3678	41,3929	41,0703	41,8803
40,4285	42,3678	41,0703	40,7489	41,7191
40,4285	42,3678	41,0703	40,7489	41,7191
40,7489	43,0241	42,0416	41,7166	42,5328
40,7489	43,0241	42,3678	42,0416	42,6959
40,7489	43,3542	42,6953	42,6953	43,0247
40,7489	43,6858	43,0241	43,0241	43,3549
40,7489	43,3542	42,3678	42,3678	42,8610

40,4285	43,3542	42,0416	41,7166	42,6979
40,7489	43,6858	43,0241	42,6953	43,3549
40,4285	43,6858	42,6953	42,6953	43,1905
40,7489	44,0188	43,0241	42,6953	43,5214
40,7489	44,0188	43,0241	42,6953	43,5214
40,7489	44,0188	43,0241	42,3678	43,5214
40,7489	44,0188	43,0241	42,6953	43,5214
40,7489	44,0188	43,0241	42,3678	43,5214
40,7489	44,0188	42,6953	41,7166	43,3570
40,7489	43,6858	42,3678	41,3929	43,0268
42,0416	44,3533	43,0241	42,0416	43,6887
41,7166	44,0188	42,6953	41,7166	43,3570
40,1093	42,6953	41,3929	40,7489	42,0441
39,7910	43,0241	41,7166	41,0703	42,3704
39,7910	43,0241	42,0416	41,7166	42,5328
39,7910	43,0241	42,0416	41,7166	42,5328
39,7910	43,0241	42,0416	42,0416	42,5328
39,7910	42,6953	41,7166	41,3929	42,2060
39,4738	42,3678	41,3929	40,7489	41,8803
39,4738	42,6953	41,3929	41,0703	42,0441
39,7910	43,0241	42,0416	42,0416	42,5328
40,1093	42,6953	41,7166	41,0703	42,2060
40,4285	42,3678	41,3929	40,4285	41,8803
40,4285	42,0416	41,3929	40,7489	41,7172
40,1093	42,0416	41,7166	41,0703	41,8791
40,1093	42,3678	41,7166	41,3929	42,0422
40,1093	42,3678	41,7166	41,3929	42,0422
39,7910	42,0416	41,7166	41,3929	41,8791
39,7910	42,3678	41,3929	41,3929	41,8803
39,7910	42,3678	41,3929	41,0703	41,8803
40,1093	42,3678	41,7166	41,0703	42,0422
40,1093	42,0416	41,3929	40,4285	41,7172
40,4285	41,7166	41,3929	40,4285	41,5548
40,1093	41,3929	41,0703	40,4285	41,2316
39,4738	41,7166	41,0703	40,7489	41,3935
40,7489	43,3542	43,0241	42,6953	43,1891
40,4285	43,3542	43,0241	42,6953	43,1891
39,1576	42,0416	41,3929	41,0703	41,7172
40,1093	43,3542	42,3678	42,0416	42,8610
40,1093	43,3542	42,3678	42,0416	42,8610
40,1093	43,0241	42,3678	41,7166	42,6959
39,7910	41,7166	41,3929	41,0703	41,5548
39,4738	41,3929	40,7489	40,4285	41,0709
39,1576	40,7489	40,4285	40,1093	40,5887

38,8423	40,4285	39,7910	39,7910	40,1098
38,5280	39,4738	38,8423	38,2146	39,1581
37,9021	38,8423	38,2146	37,2796	38,5284
37,5904	37,9021	37,2796	36,0447	37,5908
36,9697	37,2796	36,3522	35,7379	36,8159
36,6605	36,9697	36,3522	35,7379	36,6609
36,3522	36,6605	36,0447	35,4319	36,3526
35,7379	36,0447	35,4319	34,8222	35,7383
35,4319	35,7379	35,1267	34,5184	35,4323
35,1267	35,1267	34,5184	33,9131	34,8226
34,8222	34,5184	34,2154	33,6115	34,3669
34,2154	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
33,9131	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
33,6115	33,3105	32,7108	32,1138	33,0107
33,3105	32,7108	32,1138	31,8163	32,4123
33,0103	32,4120	31,8163	31,5195	32,1141
32,7108	32,1138	31,8163	31,2234	31,9650
32,7108	32,1138	31,5195	31,2234	31,8166
32,1138	31,5195	30,9279	30,3390	31,2237
31,8163	31,2234	30,6331	30,0455	30,9282
31,5195	30,9279	30,6331	30,0455	30,7805
31,5195	30,9279	30,3390	29,7527	30,6334
31,2234	30,9279	30,3390	29,7527	30,6334
31,2234	30,9279	30,3390	29,7527	30,6334
30,9279	30,6331	30,0455	29,4606	30,3393
30,9279	30,3390	29,7527	29,1691	30,0458
31,5195	32,1138	31,8163	31,2234	31,9650
32,7108	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
32,7108	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
32,7108	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
32,7108	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
32,7108	33,6115	33,0103	32,4120	33,3109
32,4120	33,3105	33,0103	32,1138	33,1604
32,4120	33,3105	33,0103	32,4120	33,1604
31,2234	32,1138	31,8163	31,2234	31,9650
32,4120	33,0103	32,7108	32,4120	32,8606
32,1138	33,0103	32,4120	32,1138	32,7111
30,9279	31,5195	31,2234	30,6331	31,3714
30,9279	31,5195	30,9279	30,3390	31,2237
30,6331	31,2234	30,9279	30,3390	31,0756
30,6331	31,5195	30,9279	30,6331	31,2237
30,6331	32,1138	31,5195	31,2234	31,8166
30,6331	32,4120	31,8163	31,5195	32,1141
30,9279	33,0103	32,1138	31,8163	32,5621

32,7108	34,8222	34,2154	33,9131	34,5188
33,3105	35,1267	34,5184	33,9131	34,8226
32,4120	33,9131	33,3105	32,7108	33,6118
33,6115	35,1267	34,8222	34,2154	34,9745
33,3105	34,8222	34,5184	33,9131	34,6703
33,3105	34,5184	34,2154	33,6115	34,3669
33,3105	34,2154	33,9131	33,3105	34,0642
32,1138	33,0103	32,7108	32,1138	32,8606
31,8163	33,0103	32,7108	32,4120	32,8606
32,1138	33,0103	32,7108	32,7108	32,8606
32,1138	33,0103	32,7108	32,1138	32,8606
32,1138	33,0103	32,4120	31,8163	32,7111
32,1138	33,0103	32,7108	32,1138	32,8606
32,1138	33,0103	32,4120	32,1138	32,7111
33,3105	33,9131	33,6115	33,0103	33,7623
32,4120	32,4120	32,1138	31,5195	32,2629
33,3105	33,6115	33,3105	33,0103	33,4610
33,0103	33,6115	33,3105	32,7108	33,4610
32,7108	33,3105	32,7108	32,1138	33,0107
32,4120	33,3105	32,7108	32,1138	33,0107
32,4120	33,3105	32,7108	32,1138	33,0107
32,1138	33,0103	32,4120	31,8163	32,7111
30,6331	31,2234	30,6331	29,7527	30,9282
31,5195	32,1138	31,2234	30,3390	31,6686
31,5195	31,8163	31,2234	30,3390	31,5198
30,0455	30,6331	30,0455	29,4606	30,3393
30,9279	31,8163	31,2234	30,9279	31,5198
30,9279	32,1138	31,2234	30,9279	31,6686
31,2234	32,1138	31,5195	31,2234	31,8166
31,2234	32,1138	31,5195	30,9279	31,8166
30,9279	32,1138	31,5195	31,2234	31,8166
31,2234	32,1138	31,5195	31,2234	31,8166
31,2234	32,1138	31,5195	30,9279	31,8166
31,2234	32,1138	31,5195	30,9279	31,8166
31,2234	32,1138	31,8163	31,2234	31,9650
31,2234	32,1138	31,5195	30,6331	31,8166
29,7527	30,6331	30,0455	29,1691	30,3393
30,9279	31,8163	31,2234	30,3390	31,5198
30,9279	31,8163	30,9279	30,3390	31,3721
30,6331	31,5195	30,9279	30,3390	31,2237
30,6331	31,5195	30,9279	30,0455	31,2237
29,4606	30,3390	29,7527	29,1691	30,0458
30,6331	31,2234	30,6331	29,7527	30,9282
30,3390	30,9279	30,3390	29,4606	30,6334

30,3390	30,9279	30,3390	29,4606	30,6334
30,3390	30,6331	30,3390	29,7527	30,4860
28,8783	29,4606	28,8783	28,2987	29,1694
28,8783	29,4606	28,8783	28,5882	29,1694
30,3390	30,9279	30,3390	30,0455	30,6334
30,6331	31,2234	30,6331	30,0455	30,9282
30,3390	31,2234	30,6331	30,3390	30,9282
30,6331	31,5195	30,9279	30,3390	31,2237
30,6331	31,2234	30,9279	30,6331	31,0756
30,6331	31,5195	31,2234	30,9279	31,3714
30,6331	31,2234	30,9279	30,3390	31,0756
30,6331	31,2234	30,6331	30,3390	30,9282
30,3390	31,2234	30,9279	30,3390	31,0756
30,3390	31,2234	30,6331	30,3390	30,9282
30,3390	30,6331	30,3390	29,4606	30,4860
30,0455	30,3390	29,7527	29,1691	30,0458
29,7527	30,0455	29,4606	28,8783	29,7530
29,7527	30,0455	29,7527	28,8783	29,8991
29,4606	30,0455	29,4606	28,8783	29,7530

Anexo 9. 2 DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA CON VENTILACIÓN FORZADA

Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Salida Cámara	Temperatura Promedio Puntos 1 y 2
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
32,4120	32,7108	30,6331	28,0099	31,6719
32,7108	33,0103	30,9279	28,5882	31,9691
33,0103	33,0103	30,9279	28,5882	31,9691
33,0103	32,7108	30,9279	28,2987	31,8193
33,3105	33,3105	31,2234	28,5882	32,2670
33,6115	33,6115	31,5195	29,1691	32,5655
33,9131	33,9131	31,8163	29,4606	32,8647
33,9131	33,9131	31,8163	29,4606	32,8647
34,2154	33,9131	31,8163	29,7527	32,8647
34,2154	33,9131	31,8163	29,1691	32,8647
33,9131	33,3105	31,2234	28,2987	32,2670
33,9131	33,3105	31,5195	28,5882	32,4150
33,9131	33,6115	31,8163	29,4606	32,7139
34,2154	34,2154	32,1138	29,7527	33,1646
34,5184	34,5184	32,7108	30,0455	33,6146
35,1267	34,5184	32,7108	30,3390	33,6146
34,8222	34,8222	32,7108	30,0455	33,7665

34,5184	34,2154	32,4120	29,7527	33,3137
34,8222	34,8222	32,7108	30,0455	33,7665
34,8222	34,8222	32,7108	30,3390	33,7665
34,8222	35,4319	33,3105	30,6331	34,3712
35,1267	35,7379	33,3105	30,6331	34,5242
35,1267	35,7379	33,3105	30,6331	34,5242
35,4319	36,0447	33,6115	31,2234	34,8281
37,2796	37,5904	35,4319	32,4120	36,5112
36,0447	36,0447	33,9131	30,9279	34,9789
36,3522	36,0447	34,2154	31,2234	35,1300
36,3522	36,0447	34,2154	31,2234	35,1300
37,5904	37,2796	35,4319	32,1138	36,3558
36,9697	36,0447	34,5184	30,9279	35,2816
36,0447	34,8222	33,6115	29,4606	34,2168
34,8222	33,0103	31,8163	28,2987	32,4133
33,6115	31,8163	30,3390	27,1476	31,0776
33,6115	32,1138	30,3390	27,7218	31,2264
33,6115	32,4120	30,6331	28,2987	31,5225
34,8222	33,9131	32,1138	29,7527	33,0134
34,8222	33,9131	32,4120	29,4606	33,1625
34,5184	33,0103	31,8163	28,8783	32,4133
33,9131	32,7108	31,2234	28,2987	31,9671
32,4120	30,6331	29,4606	26,5760	30,0468
32,4120	30,9279	29,7527	27,1476	30,3403
32,4120	31,5195	30,0455	28,0099	30,7825
32,7108	31,8163	30,3390	28,0099	31,0776
32,7108	31,8163	30,3390	28,0099	31,0776
33,0103	31,8163	30,6331	28,0099	31,2247
33,3105	32,4120	30,9279	28,5882	31,6699
34,2154	33,6115	32,1138	29,4606	32,8626
33,3105	32,4120	30,9279	28,5882	31,6699
33,3105	32,7108	31,2234	28,5882	31,9671
35,1267	34,5184	32,7108	30,3390	33,6146
35,1267	34,8222	33,3105	30,6331	34,0664
35,1267	34,5184	33,0103	30,0455	33,7644
34,8222	33,9131	32,4120	29,1691	33,1625
34,8222	33,3105	31,8163	28,8783	32,5634
33,3105	32,1138	30,3390	28,0099	31,2264
34,2154	33,0103	31,5195	28,8783	32,2649
34,2154	33,0103	31,5195	28,8783	32,2649
34,2154	32,7108	31,2234	28,5882	31,9671
32,4120	30,9279	29,4606	26,5760	30,1942
31,5195	29,7527	28,5882	26,2913	29,1704
32,7108	31,2234	30,0455	27,7218	30,6344

32,7108	31,8163	30,3390	28,2987	31,0776
32,7108	32,1138	30,6331	28,2987	31,3734
32,7108	32,1138	30,3390	28,5882	31,2264
32,7108	31,8163	30,3390	28,2987	31,0776
32,7108	31,8163	30,3390	28,0099	31,0776
32,1138	30,6331	29,4606	26,8615	30,0468
31,8163	30,3390	29,1691	26,5760	29,7540
30,3390	29,4606	28,0099	25,7238	28,7352
30,3390	29,4606	28,0099	25,7238	28,7352
30,3390	29,1691	28,0099	26,0072	28,5895
30,3390	29,1691	28,0099	25,7238	28,5895
30,3390	29,4606	28,0099	26,0072	28,7352
31,5195	30,9279	29,7527	27,1476	30,3403
31,5195	30,9279	29,7527	26,8615	30,3403
30,6331	30,0455	28,8783	26,2913	29,4619
30,9279	30,3390	29,1691	26,5760	29,7540
32,1138	31,5195	30,3390	27,7218	30,9292
30,9279	30,0455	28,8783	26,0072	29,4619
30,9279	29,7527	28,8783	26,0072	29,3155
30,6331	30,0455	28,8783	26,2913	29,4619
30,6331	30,0455	28,8783	26,2913	29,4619
31,8163	30,9279	29,7527	27,1476	30,3403
31,8163	30,6331	29,7527	26,8615	30,1929
30,3390	29,4606	28,2987	25,7238	28,8796
30,3390	29,4606	28,2987	26,0072	28,8796
30,6331	29,7527	28,2987	26,2913	29,0257
30,3390	29,7527	28,2987	26,0072	29,0257
30,6331	30,3390	28,8783	26,8615	29,6086
31,8163	31,8163	30,3390	28,2987	31,0776
32,1138	31,8163	30,6331	28,0099	31,2247
32,1138	31,8163	30,6331	28,2987	31,2247
31,2234	30,9279	29,7527	27,4343	30,3403
33,0103	31,2234	30,0455	27,4343	30,6344
33,0103	33,0103	31,8163	29,4606	32,4133
32,4120	32,1138	30,9279	28,5882	31,5208
32,7108	32,4120	30,9279	28,5882	31,6699
33,0103	33,0103	31,2234	28,8783	32,1168
33,6115	33,3105	31,8163	29,4606	32,5634
33,9131	33,6115	31,8163	29,4606	32,7139
34,8222	34,2154	32,4120	29,7527	33,3137
35,4319	36,0447	33,9131	30,6331	34,9789
36,0447	36,9697	34,5184	30,9279	35,7441
36,3522	37,5904	34,8222	31,5195	36,2063
36,9697	37,5904	35,1267	31,8163	36,3586

37,9021	38,5280	36,3522	32,4120	37,4401
36,9697	36,9697	34,8222	31,2234	35,8959
37,2796	36,9697	34,8222	31,5195	35,8959
38,5280	38,5280	36,3522	32,7108	37,4401
36,9697	36,9697	35,1267	31,2234	36,0482
36,6605	35,7379	33,9131	30,6331	34,8255
36,3522	35,4319	33,6115	30,6331	34,5217
37,5904	36,3522	34,8222	31,5195	35,5872
35,7379	34,5184	33,0103	29,7527	33,7644
35,1267	33,9131	32,4120	29,4606	33,1625
35,1267	33,6115	32,1138	29,4606	32,8626
35,4319	34,2154	32,4120	30,3390	33,3137
35,4319	34,8222	33,0103	30,6331	33,9163
36,0447	35,7379	33,6115	31,2234	34,6747
36,9697	36,3522	34,5184	31,8163	35,4353
38,5280	38,2146	36,0447	33,3105	37,1296
38,2146	37,5904	36,0447	33,0103	36,8176
37,5904	36,3522	34,8222	31,5195	35,5872
37,2796	35,7379	34,5184	31,2234	35,1282
36,3522	34,5184	33,3105	30,0455	33,9145
34,5184	32,4120	31,2234	28,2987	31,8177
34,2154	32,1138	30,6331	28,0099	31,3734
33,6115	31,8163	30,6331	28,0099	31,2247
33,9131	31,5195	30,3390	29,1691	30,9292
35,4319	34,5184	33,0103	30,9279	33,7644
35,7379	35,4319	33,9131	31,5195	34,6725
36,0447	35,7379	34,2154	31,5195	34,9767
35,7379	35,4319	34,2154	31,2234	34,8237
35,7379	35,1267	33,6115	30,9279	34,3691
35,4319	34,8222	33,3105	30,6331	34,0664
34,5184	33,9131	32,4120	28,8783	33,1625
32,4120	30,9279	29,7527	26,8615	30,3403
32,1138	30,0455	28,8783	26,5760	29,4619
32,1138	30,3390	28,8783	26,8615	29,6086
32,1138	30,9279	29,4606	27,4343	30,1942
32,4120	31,2234	29,7527	28,2987	30,4880
33,0103	31,2234	30,6331	28,8783	30,9282
33,9131	33,3105	31,8163	29,4606	32,5634
34,2154	33,6115	32,1138	29,7527	32,8626
34,5184	33,9131	32,4120	30,0455	33,1625
34,2154	33,3105	32,1138	29,1691	32,7122
34,2154	33,0103	31,8163	28,8783	32,4133
34,2154	33,3105	31,8163	29,4606	32,5634
34,8222	33,6115	32,1138	30,0455	32,8626

35,1267	34,2154	33,0103	30,6331	33,6129
35,4319	34,5184	33,0103	30,6331	33,7644
35,1267	34,2154	33,0103	30,3390	33,6129
35,4319	34,8222	33,3105	30,9279	34,0664
35,7379	35,7379	33,9131	31,2234	34,8255
36,9697	36,9697	35,4319	32,7108	36,2008
36,3522	37,5904	36,0447	31,5195	36,8176
36,3522	36,3522	34,8222	31,8163	35,5872
37,5904	37,5904	35,7379	32,7108	36,6642
37,2796	36,9697	35,4319	32,1138	36,2008
36,9697	36,3522	34,8222	31,8163	35,5872
36,6605	35,4319	34,2154	30,9279	34,8237
36,0447	34,5184	33,3105	30,3390	33,9145
33,3105	33,9131	30,6331	27,4343	32,2731
32,7108	30,9279	30,0455	27,1476	30,4867
33,6115	31,5195	30,6331	28,0099	31,0763
31,8163	30,0455	29,1691	26,5760	29,6073
33,0103	31,5195	30,3390	28,2987	30,9292
33,3105	31,5195	30,6331	28,5882	31,0763
33,0103	31,5195	30,3390	28,2987	30,9292
31,5195	30,3390	28,8783	27,1476	29,6086
31,5195	30,0455	29,1691	27,1476	29,6073
31,8163	31,2234	29,7527	28,0099	30,4880
32,1138	31,8163	30,6331	28,5882	31,2247
32,7108	32,4120	30,9279	29,1691	31,6699
33,3105	33,0103	31,8163	29,7527	32,4133
33,9131	33,6115	32,4120	30,6331	33,0117
36,3522	34,8222	35,1267	32,7108	34,9745
36,6605	37,2796	35,7379	32,7108	36,5088
36,9697	37,2796	35,7379	32,7108	36,5088
36,0447	35,7379	34,2154	31,2234	34,9767
37,2796	36,9697	35,4319	32,4120	36,2008
35,7379	35,4319	33,9131	31,2234	34,6725
35,7379	35,1267	33,3105	30,9279	34,2186
35,7379	35,7379	33,6115	31,2234	34,6747
36,0447	35,7379	33,9131	31,5195	34,8255
36,0447	36,0447	34,2154	31,8163	35,1300
36,3522	36,3522	34,5184	32,1138	35,4353
37,2796	37,2796	35,1267	32,7108	36,2032
38,8423	38,8423	36,6605	33,9131	37,7514
38,8423	38,8423	36,9697	33,6115	37,9060
38,5280	38,8423	37,2796	33,9131	38,0610
38,5280	38,2146	36,6605	33,3105	37,4376
38,2146	37,9021	36,3522	33,0103	37,1271

37,9021	37,2796	35,7379	32,4120	36,5088
36,3522	35,4319	34,2154	30,9279	34,8237
36,0447	34,8222	33,6115	30,6331	34,2168
35,7379	35,1267	33,3105	30,6331	34,2186
35,7379	36,0447	34,2154	31,5195	35,1300
36,3522	36,9697	34,8222	32,4120	35,8959
37,9021	38,5280	36,9697	33,9131	37,7488
38,2146	38,8423	37,2796	33,6115	38,0610
38,2146	38,5280	36,9697	33,3105	37,7488
36,9697	36,9697	35,4319	32,1138	36,2008
37,9021	37,5904	36,0447	32,4120	36,8176
36,6605	35,7379	34,5184	30,9279	35,1282
36,3522	35,1267	33,9131	30,6331	34,5199
34,8222	33,6115	32,4120	29,1691	33,0117
34,5184	33,3105	32,1138	29,1691	32,7122
34,5184	33,0103	31,8163	29,4606	32,4133
35,4319	34,5184	33,3105	30,6331	33,9145
34,2154	33,9131	32,4120	30,0455	33,1625
35,7379	35,7379	34,2154	32,1138	34,9767
36,0447	36,0447	34,5184	32,1138	35,2816
36,0447	35,7379	34,2154	31,5195	34,9767
36,0447	35,4319	33,9131	31,2234	34,6725
35,7379	34,5184	33,3105	30,6331	33,9145
35,4319	34,2154	32,7108	30,0455	33,4631
35,1267	33,9131	32,4120	29,7527	33,1625
34,5184	33,0103	31,5195	28,8783	32,2649
33,9131	31,8163	30,6331	28,2987	31,2247
33,0103	31,2234	30,3390	27,7218	30,7812
32,7108	30,6331	29,7527	27,4343	30,1929
32,4120	30,3390	29,1691	27,1476	29,7540
32,1138	30,0455	29,1691	27,4343	29,6073
30,9279	29,1691	28,2987	26,2913	28,7339
29,1691	27,4343	26,5760	24,8776	27,0052
30,0455	28,2987	27,4343	25,7238	27,8665
30,0455	28,2987	27,7218	26,0072	28,0102
30,0455	28,5882	27,7218	26,2913	28,1550
30,0455	28,5882	27,7218	26,2913	28,1550
30,0455	28,5882	27,7218	26,0072	28,1550
30,0455	28,5882	27,4343	26,0072	28,0113
29,7527	28,2987	27,4343	25,7238	27,8665
29,7527	28,0099	27,1476	25,7238	27,5787
29,4606	28,0099	27,1476	25,7238	27,5787
29,4606	28,0099	27,1476	25,7238	27,5787
29,4606	28,0099	27,1476	25,7238	27,5787

29,4606	28,0099	27,1476	25,7238	27,5787
29,1691	27,7218	26,8615	25,1590	27,2916
29,1691	27,7218	26,8615	25,4410	27,2916
28,8783	27,7218	26,5760	25,4410	27,1489
28,8783	27,4343	26,5760	25,1590	27,0052
28,8783	27,4343	26,5760	25,1590	27,0052
28,8783	27,4343	26,5760	25,1590	27,0052
28,8783	27,4343	26,5760	25,4410	27,0052
28,5882	27,4343	26,5760	25,4410	27,0052
28,5882	27,4343	26,5760	25,4410	27,0052
28,8783	27,7218	26,8615	25,4410	27,2916
28,8783	27,4343	26,5760	25,1590	27,0052
28,5882	27,4343	26,5760	25,1590	27,0052
27,7218	26,5760	25,7238	24,3169	26,1499
28,0099	27,1476	26,2913	25,1590	26,7194
29,4606	28,5882	27,7218	26,8615	28,1550
30,3390	29,7527	28,5882	27,7218	29,1704
30,9279	30,9279	29,7527	28,0099	30,3403
33,0103	33,0103	31,5195	29,7527	32,2649
32,1138	32,4120	30,9279	28,8783	31,6699
32,7108	32,4120	31,2234	28,8783	31,8177
33,6115	32,7108	31,2234	29,1691	31,9671
33,6115	33,0103	31,8163	29,4606	32,4133
33,3105	33,0103	31,8163	28,8783	32,4133
34,5184	33,9131	32,7108	29,7527	33,3119
33,3105	32,7108	31,8163	28,8783	32,2636
33,0103	32,4120	31,5195	28,5882	31,9657
33,9131	33,3105	32,4120	29,4606	32,8613
33,3105	33,0103	32,1138	29,1691	32,5621
33,0103	31,8163	30,9279	28,2987	31,3721
30,0455	28,5882	27,7218	25,7238	28,1550
30,0455	28,5882	27,7218	26,0072	28,1550
30,0455	28,8783	28,0099	26,5760	28,4441
30,3390	29,4606	28,5882	27,4343	29,0244
30,9279	30,0455	29,1691	28,0099	29,6073
31,5195	30,6331	29,4606	28,2987	30,0468
32,1138	30,9279	30,0455	28,5882	30,4867
33,6115	32,7108	31,5195	29,7527	32,1151
33,9131	33,0103	31,8163	29,4606	32,4133
33,6115	32,7108	31,8163	29,1691	32,2636
33,6115	32,7108	31,5195	28,8783	32,1151
32,1138	30,9279	29,7527	26,8615	30,3403
31,8163	30,6331	29,7527	27,1476	30,1929
32,1138	30,6331	29,4606	28,0099	30,0468

32,1138	31,2234	30,0455	28,8783	30,6344
32,7108	32,1138	30,9279	29,4606	31,5208
33,0103	32,7108	31,5195	30,0455	32,1151
34,8222	34,8222	33,6115	31,8163	34,2168
34,8222	35,1267	33,9131	31,8163	34,5199
34,8222	35,1267	33,9131	31,2234	34,5199
33,6115	33,6115	32,4120	29,7527	33,0117
33,6115	33,0103	32,1138	29,4606	32,5621
33,9131	33,3105	32,1138	29,7527	32,7122
35,1267	34,5184	33,3105	30,9279	33,9145
35,1267	34,8222	33,6115	30,9279	34,2168
34,8222	34,2154	33,0103	30,3390	33,6129
34,5184	33,6115	32,4120	29,4606	33,0117
33,6115	32,4120	31,2234	28,5882	31,8177
33,0103	31,8163	30,6331	28,0099	31,2247
32,4120	30,9279	29,7527	27,4343	30,3403
31,8163	30,3390	29,1691	26,5760	29,7540
30,0455	28,2987	27,4343	25,1590	27,8665
29,4606	28,0099	26,8615	25,1590	27,4357
29,1691	27,7218	26,8615	25,4410	27,2916
29,1691	27,7218	26,8615	25,7238	27,2916
29,4606	28,2987	27,4343	26,0072	27,8665
29,7527	28,5882	27,7218	26,5760	28,1550
29,7527	28,5882	27,7218	26,0072	28,1550
29,7527	28,5882	28,0099	25,7238	28,2990
30,0455	28,8783	28,2987	26,2913	28,5885
30,3390	29,4606	28,5882	27,1476	29,0244
30,6331	29,7527	28,8783	27,7218	29,3155
30,6331	30,0455	29,1691	28,0099	29,6073
30,9279	30,6331	29,7527	28,2987	30,1929
31,5195	31,2234	30,0455	28,8783	30,6344
31,8163	31,5195	30,6331	29,4606	31,0763
31,8163	31,5195	30,3390	29,1691	30,9292
31,8163	31,5195	30,3390	28,8783	30,9292
32,1138	31,8163	30,9279	28,5882	31,3721
32,4120	31,8163	30,9279	28,5882	31,3721
32,4120	31,2234	30,0455	28,2987	30,6344

ANEXO 10 DATOS OBTENIDOS PARA DETERMINAR EL TIPO DE CONTROL

Los datos que se muestran se los realiza para cada rango de radiación solar.

Tabla de los datos obtenidos para una radiación solar entre 0 a 300 $[W/m^2]$

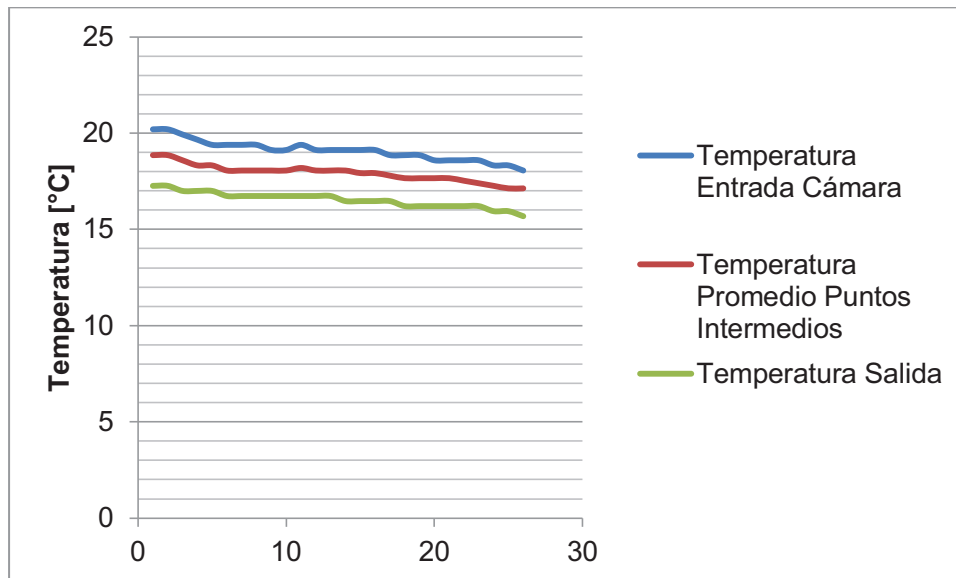
Se muestran datos de tres días con el voltaje de alimentación al valor indicado.

DÍA 1

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Ventilador Cámara	Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$
84,3750	20,1960	18,8533	18,8533	18,8533	17,2594	50	60
77,3438	20,1960	18,8533	18,8533	18,8533	17,2594		
84,3750	19,9263	18,5865	18,5865	18,5865	16,9953		
91,4063	19,6572	18,3201	18,3201	18,3201	16,9953		
105,4688	19,3887	18,3201	18,3201	18,3201	16,9953		
112,5000	19,3887	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
112,5000	19,3887	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
105,4688	19,3887	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
105,4688	19,1207	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
98,4375	19,1207	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
91,4063	19,3887	18,0542	18,3201	18,1872	16,7317		
84,3750	19,1207	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
77,3438	19,1207	18,0542	18,0542	18,0542	16,7317		
70,3125	19,1207	18,0542	18,0542	18,0542	16,4683		
63,2813	19,1207	17,7888	18,0542	17,9215	16,4683		
63,2813	19,1207	17,7888	18,0542	17,9215	16,4683		
63,2813	18,8533	17,7888	17,7888	17,7888	16,4683		
63,2813	18,8533	17,5239	17,7888	17,6564	16,2054		
56,2500	18,8533	17,5239	17,7888	17,6564	16,2054		
56,2500	18,5865	17,5239	17,7888	17,6564	16,2054		
49,2188	18,5865	17,5239	17,7888	17,6564	16,2054		
42,1875	18,5865	17,5239	17,5239	17,5239	16,2054		
35,1563	18,5865	17,2594	17,5239	17,3917	16,2054		
35,1563	18,3201	17,2594	17,2594	17,2594	15,9427		
28,1250	18,3201	16,9953	17,2594	17,1274	15,9427		
28,1250	18,0542	16,9953	17,2594	17,1274	15,6803		

Los datos que se muestran en la tabla son los de las temperaturas en el interior de la cámara, los mismos que son graficados para comprobar que el control

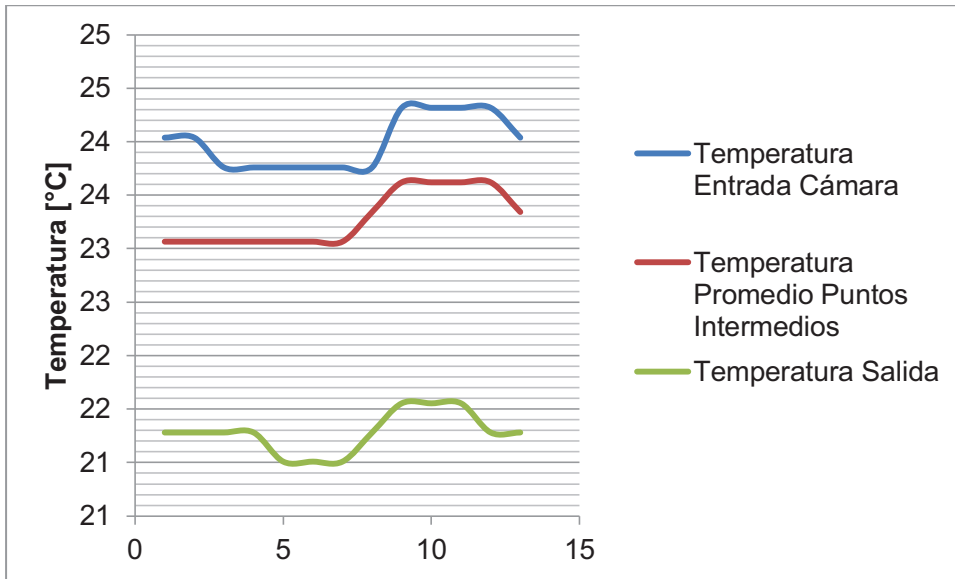
establecido para este rango de radiación es el adecuado, como se muestra en la gráfica a continuación:



DÍA 2

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
[W/m ²]	[°C]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
210,9375	24,0376	22,9269	23,2036	23,0652	21,2807	50	60
217,9688	24,0376	22,9269	23,2036	23,0652	21,2807		
260,1563	23,7589	22,9269	23,2036	23,0652	21,2807		
260,1563	23,7589	22,9269	23,2036	23,0652	21,2807		
246,0938	23,7589	22,9269	23,2036	23,0652	21,0086		
337,5000	23,7589	22,9269	23,2036	23,0652	21,0086		
358,5938	23,7589	22,9269	23,2036	23,0652	21,0086		
344,5313	23,7589	23,2036	23,4809	23,3422	21,2807		
253,1250	24,3169	23,4809	23,7589	23,6199	21,5535		
246,0938	24,3169	23,4809	23,7589	23,6199	21,5535		
239,0625	24,3169	23,4809	23,7589	23,6199	21,5535		
232,0313	24,3169	23,4809	23,7589	23,6199	21,2807		
239,0625	24,0376	23,2036	23,4809	23,3422	21,2807		

Los datos que se muestran en la tabla son los de las temperaturas en el interior de la cámara, los mismos que son graficados para comprobar que el control establecido para este rango de radiación es el adecuado, como se muestra en la gráfica a continuación:



DÍA 3

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
[W/m ²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
210,9375	25,1590	23,4809	24,0376	23,7592	22,6509	50	60
210,9375	24,8776	23,4809	24,0376	23,7592	22,6509		
217,9688	25,1590	23,7589	24,3169	24,0379	22,6509		
203,9063	25,1590	24,0376	24,3169	24,1772	22,9269		
210,9375	25,4410	24,3169	24,5969	24,4569	22,9269		
225,0000	25,7238	24,3169	24,8776	24,5973	22,9269		
260,1563	26,0072	24,5969	24,8776	24,7373	22,9269		
288,2813	26,0072	24,8776	25,1590	25,0183	23,2036		
323,4375	26,2913	25,4410	25,4410	25,4410	23,4809		
365,6250	26,5760	25,7238	25,7238	25,7238	23,7589		
597,6563	27,1476	26,0072	26,0072	26,0072	24,0376		
435,9375	27,7218	27,1476	27,1476	27,1476	24,8776		
309,3750	28,2987	27,7218	28,0099	27,8658	25,4410		
309,3750	28,8783	28,5882	28,5882	28,5882	26,0072		
442,9688	29,1691	28,8783	28,8783	28,8783	26,2913		
295,3125	29,1691	28,5882	28,5882	28,5882	26,2913		
281,2500	29,4606	28,8783	28,8783	28,8783	26,2913		
281,2500	29,7527	28,8783	28,5882	28,7332	26,2913		
464,0625	29,4606	28,2987	28,2987	28,2987	26,0072		
253,1250	29,1691	28,2987	28,2987	28,2987	26,0072		
203,9063	29,1691	28,2987	28,0099	28,1543	26,0072		
161,7188	28,5882	27,7218	27,7218	27,7218	25,7238		
133,5938	28,2987	27,1476	27,1476	27,1476	25,1590		
105,4688	27,7218	26,2913	26,2913	26,2913	24,3169		
84,3750	26,8615	25,1590	25,4410	25,3000	23,7589		
84,3750	26,0072	24,5969	24,8776	24,7373	23,2036		
84,3750	25,4410	23,7589	24,0376	23,8982	22,3756		
84,3750	24,5969	22,9269	23,4809	23,2039	21,8268		
84,3750	24,3169	22,6509	22,9269	22,7889	21,5535		

84,3750	23,7589	22,1009	22,6509	22,3759	21,2807
84,3750	23,4809	22,1009	22,6509	22,3759	21,2807
98,4375	23,2036	21,8268	22,3756	22,1012	21,0086
98,4375	22,9269	21,5535	22,1009	21,8272	20,7371
98,4375	22,9269	21,5535	21,8268	21,6902	20,7371
98,4375	22,3756	21,0086	21,5535	21,2810	20,1960
91,4063	22,1009	20,7371	21,2807	21,0089	19,9263
77,3438	21,8268	20,4662	21,0086	20,7374	19,6572
77,3438	21,5535	20,1960	21,0086	20,6023	19,6572
63,2813	21,5535	20,4662	21,0086	20,7374	19,6572
56,2500	21,2807	20,1960	20,7371	20,4665	19,3887
56,2500	21,0086	19,9263	20,4662	20,1963	19,1207
56,2500	21,0086	19,6572	20,4662	20,0617	19,1207
63,2813	20,7371	19,6572	20,1960	19,9266	19,1207
77,3438	20,7371	19,6572	20,1960	19,9266	18,8533
91,4063	20,7371	19,3887	20,1960	19,7923	18,8533
98,4375	20,4662	19,3887	19,9263	19,6575	18,5865
112,5000	20,4662	19,3887	19,9263	19,6575	18,5865

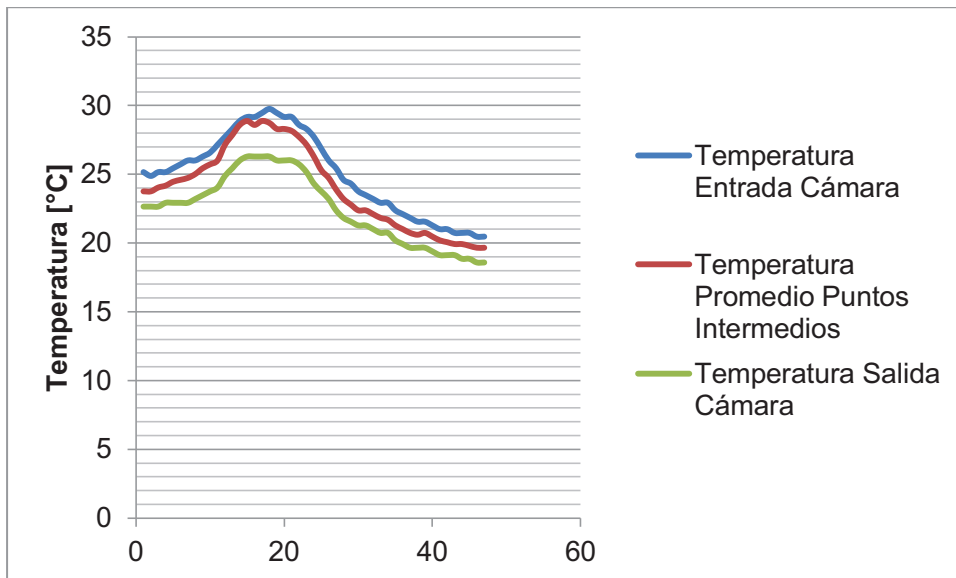


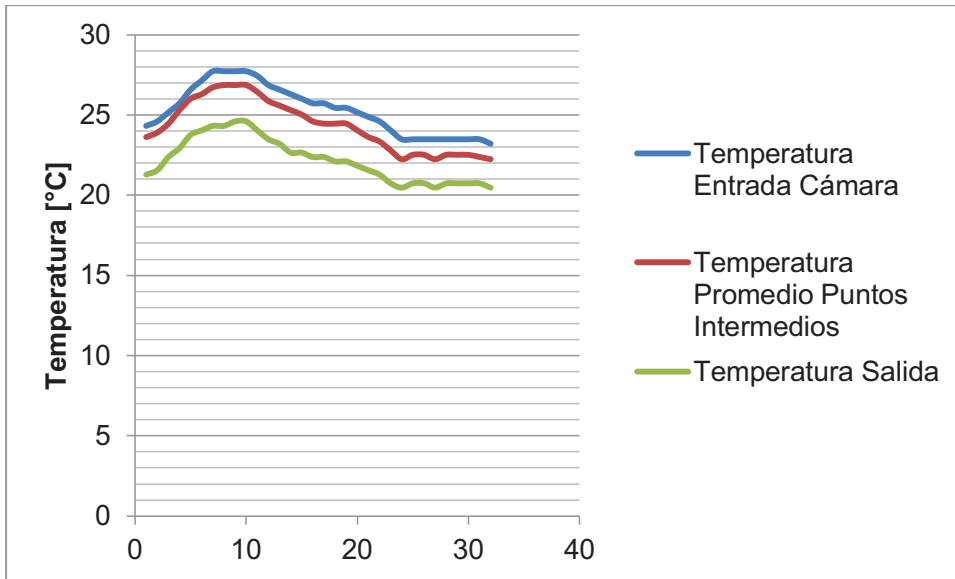
Tabla de los datos obtenidos para una radiación solar entre 300 a 600 [W/m²]

Los datos que se tienen son de dos días con el valor voltaje de alimentación indicado.

Día 1

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
[W/m ²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
492,1875	24,3169	23,4809	23,7589	23,6199	21,2807	60	70
562,5000	24,5969	23,7589	24,0376	23,8982	21,5535		
541,4063	25,1590	24,3169	24,5969	24,4569	22,3756		
576,5625	25,7238	25,1590	25,4410	25,3000	22,9269		
520,3125	26,5760	25,7238	26,2913	26,0075	23,7589		
513,2813	27,1476	26,0072	26,5760	26,2916	24,0376		
506,2500	27,7218	26,5760	26,8615	26,7187	24,3169		
527,3438	27,7218	26,5760	27,1476	26,8618	24,3169		
513,2813	27,7218	26,5760	27,1476	26,8618	24,5969		
267,1875	27,7218	26,5760	27,1476	26,8618	24,5969		
232,0313	27,4343	26,2913	26,5760	26,4336	24,0376		
225,0000	26,8615	25,7238	26,0072	25,8655	23,4809		
225,0000	26,5760	25,4410	25,7238	25,5824	23,2036		
225,0000	26,2913	25,1590	25,4410	25,3000	22,6509		
217,9688	26,0072	24,8776	25,1590	25,0183	22,6509		
351,5625	25,7238	24,5969	24,5969	24,5969	22,3756		
253,1250	25,7238	24,3169	24,5969	24,4569	22,3756		
274,2188	25,4410	24,3169	24,5969	24,4569	22,1009		
154,6875	25,4410	24,3169	24,5969	24,4569	22,1009		
133,5938	25,1590	24,0376	24,0376	24,0376	21,8268		
140,6250	24,8776	23,4809	23,7589	23,6199	21,5535		
154,6875	24,5969	23,2036	23,4809	23,3422	21,2807		
189,8438	24,0376	22,6509	22,9269	22,7889	20,7371		
330,4688	23,4809	22,1009	22,3756	22,2382	20,4662		
210,9375	23,4809	22,3756	22,6509	22,5132	20,7371		
210,9375	23,4809	22,3756	22,6509	22,5132	20,7371		
246,0938	23,4809	22,1009	22,3756	22,2382	20,4662		
288,2813	23,4809	22,3756	22,6509	22,5132	20,7371		
246,0938	23,4809	22,3756	22,6509	22,5132	20,7371		
281,2500	23,4809	22,3756	22,6509	22,5132	20,7371		
225,0000	23,4809	22,1009	22,6509	22,3759	20,7371		
274,2188	23,2036	22,1009	22,3756	22,2382	20,4662		

Los datos que se muestran en la tabla son los de las temperaturas en el interior de la cámara, los mismos que son graficados para comprobar que el control establecido para este rango de radiación es el adecuado, como se muestra en la gráfica a continuación:



Día 2

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[\%]$	$[\%]$
464,0625	38,2146	35,4319	35,1267	35,2793	32,7108	60	70
464,0625	37,9021	35,7379	35,1267	35,4323	33,0103		
421,8750	37,5904	35,4319	35,1267	35,2793	32,7108		
597,6563	37,2796	35,1267	34,8222	34,9745	32,4120		
288,2813	36,6605	34,8222	34,2154	34,5188	31,8163		
309,3750	36,3522	34,8222	34,5184	34,6703	31,5195		
365,6250	35,4319	33,3105	33,0103	33,1604	30,3390		
541,4063	34,8222	33,0103	32,7108	32,8606	30,3390		
506,2500	34,8222	33,0103	32,7108	32,8606	30,3390		
344,5313	34,8222	33,3105	33,0103	33,1604	30,6331		
365,6250	33,9131	32,4120	32,4120	32,4120	29,7527		
506,2500	33,6115	31,8163	31,8163	31,8163	29,4606		
421,8750	33,6115	32,4120	32,1138	32,2629	29,7527		
421,8750	33,6115	32,7108	32,4120	32,5614	30,0455		
442,9688	33,6115	32,4120	32,1138	32,2629	29,7527		
541,4063	33,9131	32,7108	32,4120	32,5614	30,0455		
499,2188	33,9131	32,7108	32,4120	32,5614	30,0455		
590,6250	33,6115	32,1138	32,1138	32,1138	29,4606		
541,4063	33,6115	32,7108	32,7108	32,7108	30,3390		
464,0625	33,6115	32,7108	32,4120	32,5614	30,0455		
499,2188	33,9131	33,0103	33,0103	33,0103	30,6331		
562,5000	33,3105	32,4120	32,4120	32,4120	29,7527		
478,1250	33,3105	32,4120	32,4120	32,4120	29,7527		
513,2813	33,3105	32,1138	32,1138	32,1138	29,7527		
344,5313	32,4120	31,2234	31,2234	31,2234	28,5882		
323,4375	32,1138	30,6331	30,6331	30,6331	28,2987		
316,4063	31,2234	29,4606	29,4606	29,4606	27,1476		
618,7500	30,6331	28,5882	28,8783	28,7332	26,5760		
738,2813	30,0455	28,2987	28,5882	28,4434	26,5760		
414,8438	30,3390	28,8783	29,1691	29,0237	27,4343		
309,3750	30,9279	30,0455	30,0455	30,0455	28,2987		
717,1875	31,2234	30,3390	30,3390	30,3390	28,5882		
225,0000	31,5195	30,6331	30,9279	30,7805	28,8783		

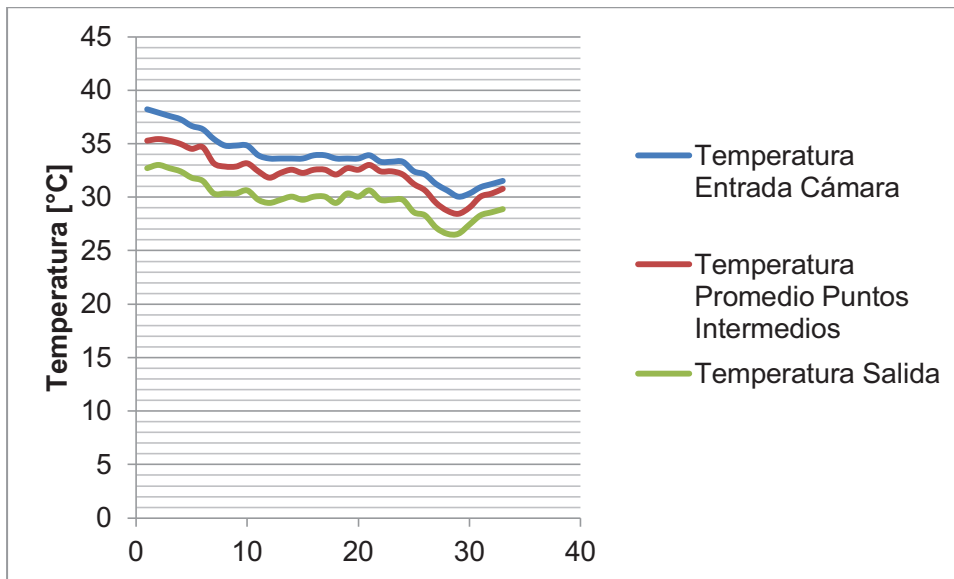


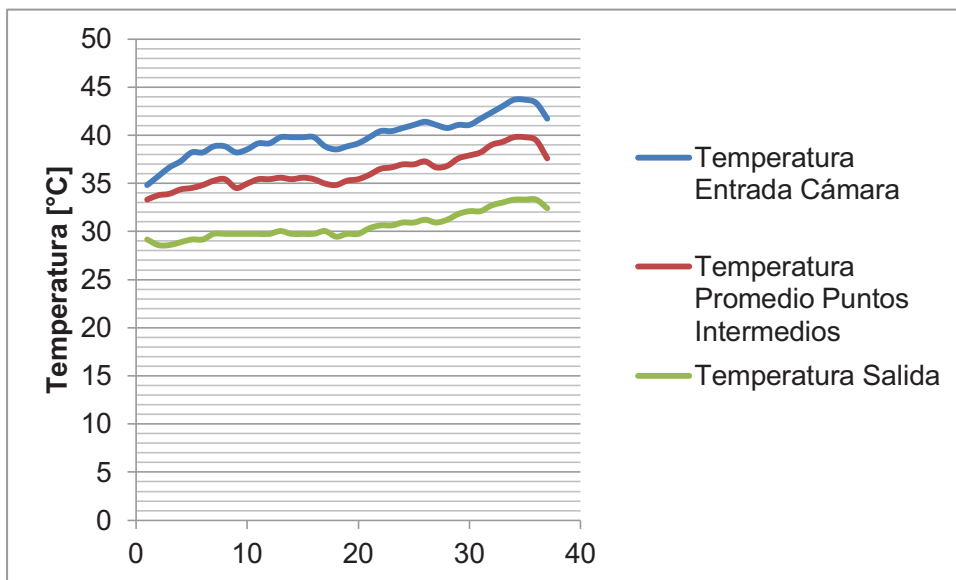
Tabla de los datos obtenidos para una radiación solar entre 600 a 1000 [W/m²]

Los datos que se tienen son de dos días con el valor voltaje de alimentación indicado.

Día 1

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
[W/m ²]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
682,0313	34,8222	33,3105	33,3105	33,3105	29,1691	80	80
689,0625	35,7379	33,9131	33,6115	33,7623	28,5882		
696,0938	36,6605	33,9131	33,9131	33,9131	28,5882		
717,1875	37,2796	34,5184	34,2154	34,3669	28,8783		
724,2188	38,2146	34,5184	34,5184	34,5184	29,1691		
731,2500	38,2146	35,1267	34,5184	34,8226	29,1691		
731,2500	38,8423	35,1267	35,4319	35,2793	29,7527		
738,2813	38,8423	35,7379	35,1267	35,4323	29,7527		
724,2188	38,2146	34,8222	34,2154	34,5188	29,7527		
717,1875	38,5280	35,1267	34,8222	34,9745	29,7527		
745,3125	39,1576	35,4319	35,4319	35,4319	29,7527		
738,2813	39,1576	35,4319	35,4319	35,4319	29,7527		
731,2500	39,7910	35,4319	35,7379	35,5849	30,0455		
745,3125	39,7910	35,4319	35,4319	35,4319	29,7527		
745,3125	39,7910	35,7379	35,4319	35,5849	29,7527		
773,4375	39,7910	35,4319	35,4319	35,4319	29,7527		
780,4688	38,8423	35,1267	34,8222	34,9745	30,0455		
780,4688	38,5280	35,1267	34,5184	34,8226	29,4606		
787,5000	38,8423	35,4319	35,1267	35,2793	29,7527		
794,5313	39,1576	35,4319	35,4319	35,4319	29,7527		
815,6250	39,7910	36,0447	35,7379	35,8913	30,3390		
829,6875	40,4285	36,6605	36,3522	36,5064	30,6331		

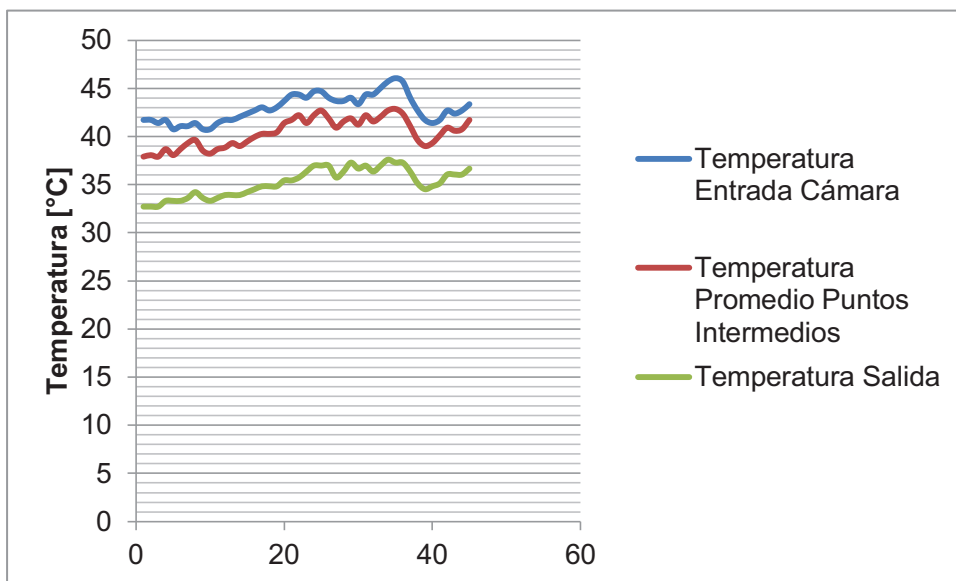
829,6875	40,4285	36,6605	36,6605	36,6605	30,6331
829,6875	40,7489	36,9697	36,9697	36,9697	30,9279
829,6875	41,0703	36,9697	36,9697	36,9697	30,9279
850,7813	41,3929	37,2796	37,2796	37,2796	31,2234
850,7813	41,0703	36,9697	36,3522	36,6609	30,9279
857,8125	40,7489	37,2796	36,3522	36,8159	31,2234
850,7813	41,0703	37,9021	37,2796	37,5908	31,8163
857,8125	41,0703	38,2146	37,5904	37,9025	32,1138
871,8750	41,7166	38,5280	37,9021	38,2150	32,1138
864,8438	42,3678	39,1576	38,8423	38,9999	32,7108
885,9375	43,0241	39,4738	39,1576	39,3157	33,0103
885,9375	43,6858	39,7910	39,7910	39,7910	33,3105
885,9375	43,6858	39,7910	39,7910	39,7910	33,3105
892,9688	43,3542	39,4738	39,4738	39,4738	33,3105
871,8750	41,7166	37,9021	37,2796	37,5908	32,4120



Día 2

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	$[\%]$	$[\%]$
878,9063	41,7166	38,2146	37,5904	37,9025	32,7108	60	80
885,9375	41,7166	38,2146	37,9021	38,0583	32,7108		
900,0000	41,3929	37,9021	37,9021	37,9021	32,7108		
900,0000	41,7166	38,5280	38,8423	38,6851	33,3105		
892,9688	40,7489	38,2146	37,9021	38,0583	33,3105		
900,0000	41,0703	38,8423	38,5280	38,6851	33,3105		
900,0000	41,0703	39,4738	39,1576	39,3157	33,6115		
914,0625	41,3929	39,7910	39,4738	39,6324	34,2154		
914,0625	40,7489	38,8423	38,2146	38,5284	33,6115		
907,0313	40,7489	38,5280	37,9021	38,2150	33,3105		
892,9688	41,3929	38,8423	38,5280	38,6851	33,6115		
914,0625	41,7166	38,8423	38,8423	38,8423	33,9131		

907,0313	41,7166	39,4738	39,1576	39,3157	33,9131
892,9688	42,0416	39,1576	38,8423	38,9999	33,9131
907,0313	42,3678	39,4738	39,4738	39,4738	34,2154
914,0625	42,6953	40,1093	39,7910	39,9501	34,5184
942,1875	43,0241	40,4285	40,1093	40,2689	34,8222
963,2813	42,6953	40,4285	40,1093	40,2689	34,8222
984,3750	43,0241	40,7489	40,1093	40,4291	34,8222
991,4063	43,6858	41,3929	41,3929	41,3929	35,4319
1005,4688	44,3533	41,7166	41,7166	41,7166	35,4319
998,4375	44,3533	42,3678	42,0416	42,2047	35,7379
998,4375	44,0188	41,7166	41,0703	41,3935	36,3522
998,4375	44,6894	42,3678	42,0416	42,2047	36,9697
1033,5938	44,6894	42,6953	42,6953	42,6953	36,9697
1040,6250	44,0188	42,0416	41,7166	41,8791	36,9697
1096,8750	43,6858	41,3929	40,4285	40,9107	35,7379
1089,8438	43,6858	41,7166	41,3929	41,5548	36,3522
1117,9688	44,0188	42,0416	41,7166	41,8791	37,2796
956,2500	43,3542	41,3929	41,0703	41,2316	36,6605
1117,9688	44,3533	42,0416	42,3678	42,2047	36,9697
1132,0313	44,3533	41,7166	41,3929	41,5548	36,3522
1181,2500	45,0270	42,0416	42,0416	42,0416	36,9697
1216,4063	45,7074	42,3678	43,0241	42,6959	37,5904
1103,9063	46,0501	42,6953	43,0241	42,8597	37,2796
984,3750	45,7074	42,3678	42,3678	42,3678	37,2796
471,0938	44,0188	41,3929	40,7489	41,0709	36,3522
506,2500	42,6953	39,7910	39,4738	39,6324	35,1267
1188,2813	41,7166	39,4738	38,5280	39,0009	34,5184
914,0625	41,3929	39,4738	39,1576	39,3157	34,8222
928,1250	41,7166	40,1093	40,1093	40,1093	35,1267
1160,1563	42,6953	41,0703	40,7489	40,9096	36,0447
562,5000	42,3678	40,7489	40,4285	40,5887	36,0447
1321,8750	42,6953	41,0703	40,4285	40,7494	36,0447
485,1563	43,3542	41,7166	41,7166	41,7166	36,6605



Día 3

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
878,9063	37,2796	36,3522	35,7379	36,0451	31,8163	60	80
871,8750	37,5904	36,3522	35,4319	35,8921	31,5195		
822,6563	38,2146	36,9697	36,0447	36,5072	32,1138		
703,1250	38,5280	37,2796	36,3522	36,8159	32,1138		
794,5313	38,8423	37,9021	36,6605	37,2813	32,4120		
843,7500	39,4738	38,2146	36,9697	37,5921	32,4120		
843,7500	39,7910	38,2146	36,9697	37,5921	32,7108		
864,8438	39,4738	38,2146	36,9697	37,5921	32,4120		
857,8125	38,5280	36,9697	35,7379	36,3538	32,1138		
900,0000	38,8423	37,9021	36,6605	37,2813	32,7108		
907,0313	39,4738	38,5280	37,2796	37,9038	33,3105		
907,0313	40,1093	39,1576	37,9021	38,5298	33,9131		
907,0313	40,4285	39,4738	38,2146	38,8442	33,9131		
900,0000	41,0703	39,4738	38,2146	38,8442	33,9131		
963,2813	41,0703	40,4285	39,1576	39,7930	34,8222		
998,4375	41,0703	40,1093	38,8423	39,4758	34,5184		
1026,5625	42,0416	40,7489	39,4738	40,1113	35,1267		
1033,5938	42,3678	41,3929	40,1093	40,7511	35,7379		
914,0625	42,6953	41,7166	40,4285	41,0726	36,0447		
1026,5625	43,0241	41,7166	40,4285	41,0726	36,0447		
1040,6250	41,7166	40,7489	39,4738	40,1113	35,4319		
991,4063	42,0416	41,0703	39,7910	40,4307	35,7379		
970,3125	43,0241	41,7166	40,4285	41,0726	36,3522		
1019,5313	43,3542	41,7166	40,7489	41,2328	36,3522		
1054,6875	43,3542	41,7166	40,4285	41,0726	36,3522		
1026,5625	42,6953	41,3929	40,1093	40,7511	35,7379		
1019,5313	42,6953	41,0703	39,7910	40,4307	36,0447		
1026,5625	42,3678	40,4285	39,1576	39,7930	35,7379		
1047,6563	41,7166	40,1093	39,1576	39,6334	35,4319		
1040,6250	42,0416	40,1093	39,1576	39,6334	35,4319		
1019,5313	43,0241	42,6953	41,3929	42,0441	37,2796		
1019,5313	43,3542	42,3678	41,0703	41,7191	36,6605		
998,4375	43,3542	41,7166	40,7489	41,2328	36,9697		
984,3750	44,0188	43,0241	42,0416	42,5328	37,9021		
457,0313	44,6894	43,6858	42,3678	43,0268	38,2146		

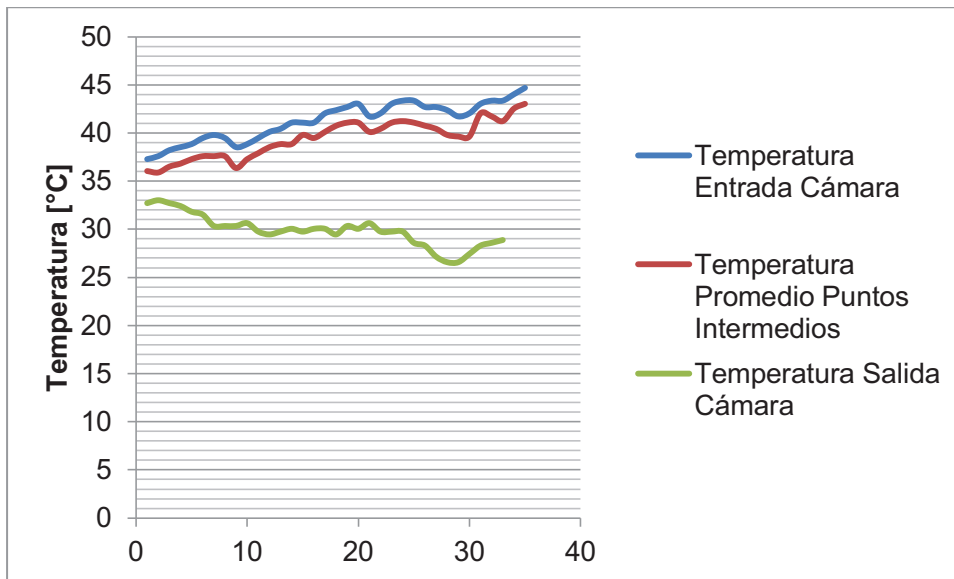
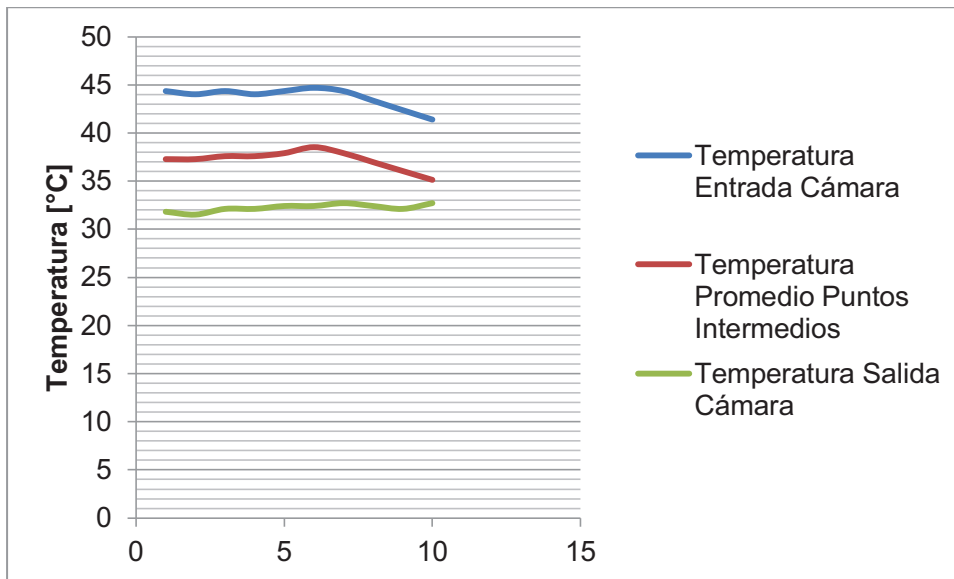


Tabla de los datos obtenidos para una radiación solar entre 1000 a 1800
 $[W/m^2]$

Los datos que se tienen son de tres días con el valor voltaje de alimentación indicado.

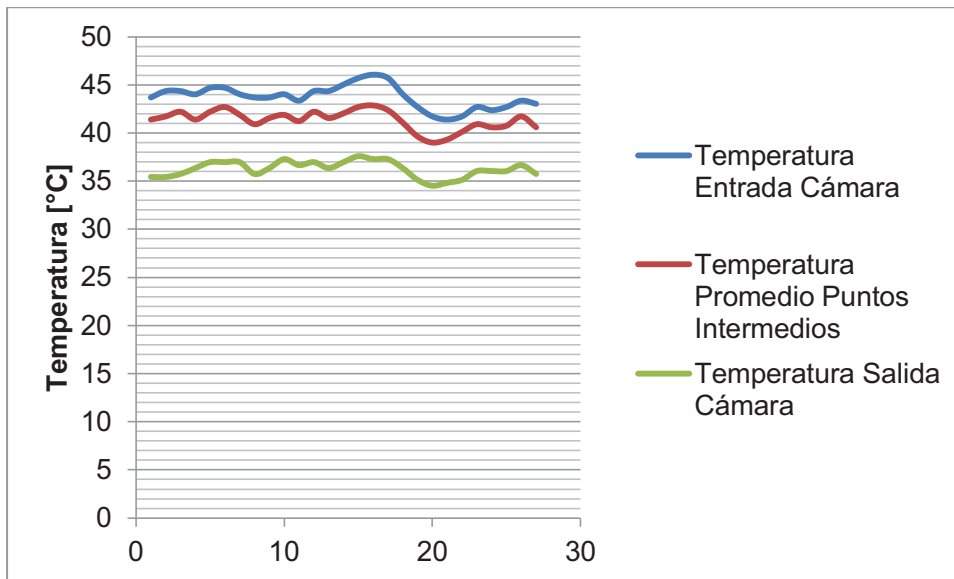
Día 1

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
1005,4688	44,3533	42,6953	41,3929	37,2796	31,8163	100	100
1019,5313	44,0188	42,0416	41,0703	37,2796	31,5195		
1012,5000	44,3533	42,6953	41,7166	37,5904	32,1138		
991,4063	44,0188	42,3678	41,3929	37,5904	32,1138		
1026,5625	44,3533	43,0241	42,0416	37,9021	32,4120		
1019,5313	44,6894	43,6858	42,3678	38,5280	32,4120		
1012,5000	44,3533	42,6953	41,7166	37,9021	32,7108		
1054,6875	43,3542	41,3929	40,4285	36,9697	32,4120		
379,6875	42,3678	39,7910	39,1576	36,0447	32,1138		
738,2813	41,3929	38,8423	38,2146	35,1267	32,7108		



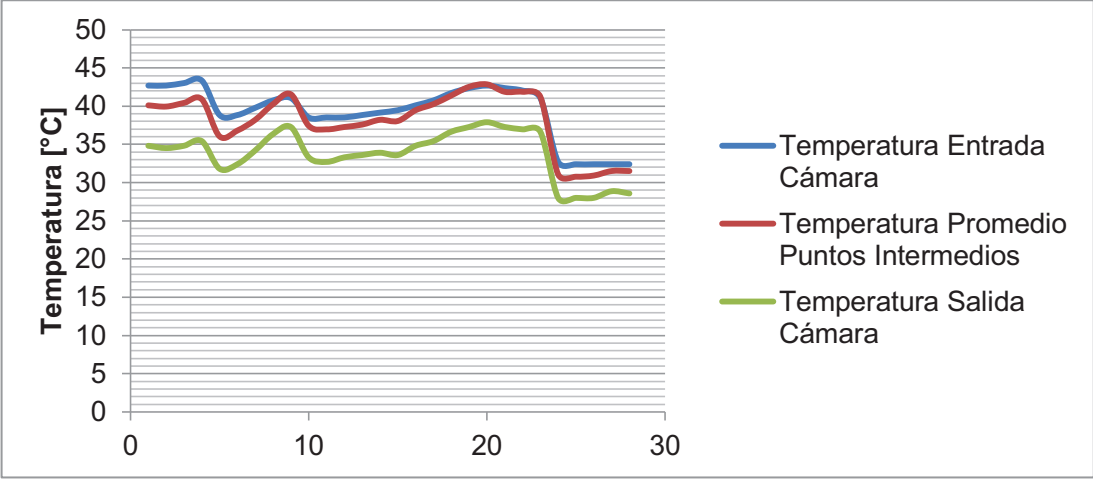
Día 2

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[%]
991,4063	43,6858	41,3929	41,3929	41,3929	35,4319	100	100
1005,4688	44,3533	41,7166	41,7166	41,7166	35,4319		
998,4375	44,3533	42,3678	42,0416	42,2047	35,7379		
998,4375	44,0188	41,7166	41,0703	41,3935	36,3522		
998,4375	44,6894	42,3678	42,0416	42,2047	36,9697		
1033,5938	44,6894	42,6953	42,6953	42,6953	36,9697		
1040,6250	44,0188	42,0416	41,7166	41,8791	36,9697		
1096,8750	43,6858	41,3929	40,4285	40,9107	35,7379		
1089,8438	43,6858	41,7166	41,3929	41,5548	36,3522		
1117,9688	44,0188	42,0416	41,7166	41,8791	37,2796		
956,2500	43,3542	41,3929	41,0703	41,2316	36,6605		
1117,9688	44,3533	42,0416	42,3678	42,2047	36,9697		
1132,0313	44,3533	41,7166	41,3929	41,5548	36,3522		
1181,2500	45,0270	42,0416	42,0416	42,0416	36,9697		
1216,4063	45,7074	42,3678	43,0241	42,6959	37,5904		
1103,9063	46,0501	42,6953	43,0241	42,8597	37,2796		
984,3750	45,7074	42,3678	42,3678	42,3678	37,2796		
471,0938	44,0188	41,3929	40,7489	41,0709	36,3522		
506,2500	42,6953	39,7910	39,4738	39,6324	35,1267		
1188,2813	41,7166	39,4738	38,5280	39,0009	34,5184		
914,0625	41,3929	39,4738	39,1576	39,3157	34,8222		
928,1250	41,7166	40,1093	40,1093	40,1093	35,1267		
1160,1563	42,6953	41,0703	40,7489	40,9096	36,0447		
562,5000	42,3678	40,7489	40,4285	40,5887	36,0447		
1321,8750	42,6953	41,0703	40,4285	40,7494	36,0447		
485,1563	43,3542	41,7166	41,7166	41,7166	36,6605		
597,6563	43,0241	40,7489	40,4285	40,5887	35,7379		



Día 3

Radiación Solar	Temperatura Entrada Cámara	Temperatura Punto 1 Cámara	Temperatura Punto 2 Cámara	Temperatura Promedio Puntos Intermedios	Temperatura Salida Cámara	Flujo de Aire Ventilador Cámara	Flujo de Aire Ventilador Chimenea
$[W/m^2]$	$[°C]$	$[°C]$	$[°C]$	$[°C]$	$[°C]$	$[\%]$	$[\%]$
878,9063	42,6953	40,1093	40,1093	40,1093	34,8222	100	100
1033,5938	42,6953	40,1093	39,7910	39,9501	34,5184		
1321,8750	43,0241	40,4285	40,4285	40,4285	34,8222		
660,9375	43,3542	41,0703	40,7489	40,9096	35,4319		
541,4063	38,8423	36,3522	35,7379	36,0451	31,8163		
1279,6875	38,8423	36,9697	36,6605	36,8151	32,4120		
1258,5938	39,7910	38,2146	38,2146	38,2146	34,2154		
1307,8125	40,7489	40,1093	40,4285	40,2689	36,3522		
478,1250	41,0703	41,3929	41,7166	41,5548	37,2796		
506,2500	38,5280	37,5904	37,2796	37,4350	33,3105		
1293,7500	38,5280	36,9697	36,9697	36,9697	32,7108		
513,2813	38,5280	37,2796	37,2796	37,2796	33,3105		
991,4063	38,8423	37,5904	37,5904	37,5904	33,6115		
794,5313	39,1576	38,2146	38,2146	38,2146	33,9131		
1265,6250	39,4738	37,9021	38,2146	38,0583	33,6115		
963,2813	40,1093	39,4738	39,4738	39,4738	34,8222		
1335,9375	40,7489	40,1093	40,4285	40,2689	35,4319		
653,9063	41,7166	41,3929	41,3929	41,3929	36,6605		
1364,0625	42,3678	42,3678	42,6953	42,5315	37,2796		
583,5938	42,6953	43,0241	42,6953	42,8597	37,9021		
724,2188	42,3678	42,0416	41,7166	41,8791	37,2796		
457,0313	42,0416	42,0416	41,7166	41,8791	36,9697		
464,0625	41,0703	41,3929	41,0703	41,2316	36,6605		
358,5938	32,7108	31,2234	30,9279	31,0756	28,0099		
1061,7188	32,4120	30,9279	30,6331	30,7805	28,0099		
435,9375	32,4120	30,9279	30,9279	30,9279	28,0099		
407,8125	32,4120	31,5195	31,5195	31,5195	28,8783		
1019,5313	32,4120	31,5195	31,5195	31,5195	28,5882		



ANEXO 11 DATOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE SECADO CON VENTILACIÓN NATURAL Y FORZADA

Anexo 11. 1 DATOS DEL PROCESO CON VENTILACION NATURAL

Maderas	Peso Inicial	Peso Final	Peso Secado
	[g]	[g]	[g]
2	407,1	372,86	34,24
3	361,96	336,51	25,45
4	394,47	370,81	23,66
5	461,01	436,63	24,38
7	404,11	378,33	25,78
8	356,77	318,95	37,82
10	411,65	347,12	64,53
12	398,03	339,6	58,43
15	374,03	323,14	50,89
16	374,71	324,51	50,2
18	396,19	347,53	48,66
19	413,66	357,1	56,56
Peso Total	4753,69	4253,09	500,6
			Promedio Total
			41,72
			Promedio Fila Superior
			54,88
			Promedio Fila Inferior
			26,70

Anexo 11. 2 DATOS DEL PROCESO CON VENTILACIÓN FORZADA

Maderas	Peso Inicial	Peso Final	Peso Secado
	[g]	[g]	[g]
2	405,02	353,79	51,23
3	382,92	338,29	44,63
4	416,21	373,55	42,81
5	480,44	436,24	44,20
7	425,72	376,55	49,17
8	373,86	312,18	61,68
10	420,42	346,20	74,22
12	414,74	350,41	64,33
15	391,15	331,48	59,67
16	385,27	326,04	59,23
18	389,86	339,58	50,28
19	413,33	359,42	53,91
Peso Total	4.898,94	4.243,58	655,36
			Promedio Total 54,61
			Promedio Fila Superior 60,27
			Promedio Fila Inferior 48,95