

# Sistema de control para el secador de madera a escala del laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética de la Escuela Politécnica Nacional

Esteban Francisco Estrada Cruz, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador  
 Ana Lucía Vega Pilco, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador  
 Ana Verónica Rodas Benalcázar, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito - Ecuador

**Resumen-** En el laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética (LEAEE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica existe un secador solar de madera cuya operación es manual por lo que se ha diseñado el sistema de control para automatizar el proceso.

El proyecto consiste en medir las principales variables que intervienen en el proceso (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y contenido de humedad de la madera) a través de sensores, acondicionar las señales y enviarlas a un controlador que se encargará de regular el voltaje de alimentación de un sistema de ventilación forzada, dependiendo de la radiación solar que incide en el colector y de las temperaturas al interior de la cámara de secado, permitiendo un secado en menor tiempo.

Adicionalmente se implementa un sistema de monitoreo del proceso mediante un HMI que permite 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 edificio de Formación Básica (ICB).

**Índices-** Automatización, HMI, secador solar de madera, sistema de control, transmisión inalámbrica.

## I. INTRODUCCIÓN

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.

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.

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 que se puede apreciar en la Fig. 1, es del tipo Colector Solar de Placa Plana con Cubierta, el cual consta de: placa transparente, placa colectora, aislamiento y carcasa o soporte.

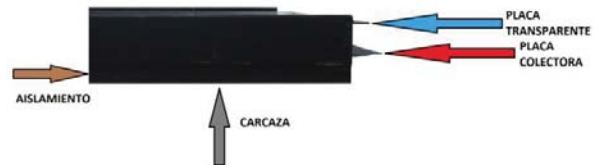


Fig. 1. Colector Solar del LEAEE con sus componentes

La cámara de secado, se puede observar en la Fig. 2, consta de un espacio para el secado 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.

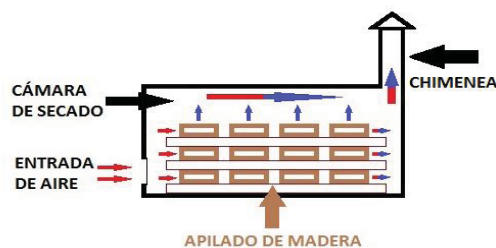


Fig. 2. Cámara de secado

En la Fig. 3 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.

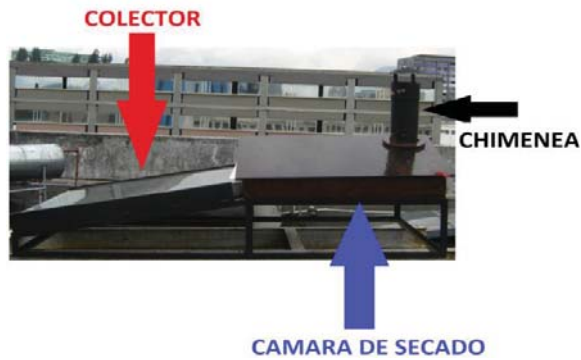


Fig. 3 Secador de Madera prototipo del LEAEE

Este trabajo fue apoyado por el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica, a cargo del Físico Marco Yáñez. ([marco.yanez@epn.edu.ec](mailto:marco.yanez@epn.edu.ec))

## II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE

Para el diseño e implementación del hardware del sistema, se debe primeramente conocer cómo se distribuirá y apilará la madera dentro del secador. Posteriormente, determinar, seleccionar y distribuir los sensores a utilizar, seleccionar e instalar los actuadores, el sistema de adquisición de datos, el sistema de control y presentación de los datos mediante un HMI.

### A. Distribución y Apilado de la Madera

Un factor considerado 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 y 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.

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 utilizan tablas de las siguientes dimensiones:

- a) Largo: 0,50 m
- b) Ancho: 0,06 m
- c) Espesor: 0,02 m

Considerando que el espesor de las tablas utilizadas es de 2 cm, el espesor de los separadores será de 3 cm, y 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 si una distancia de 2,5 cm para permitir que el aire que pasa a través de éstas arrastre la mayor cantidad de humedad, situación que no ocurre si estas se encuentran juntas.

En la Fig. 4 y Fig. 5 se puede observar el apilado de la madera dentro de la cámara de secado con sus respectivas

distancias. Estas se encuentran a una escala 1:10.

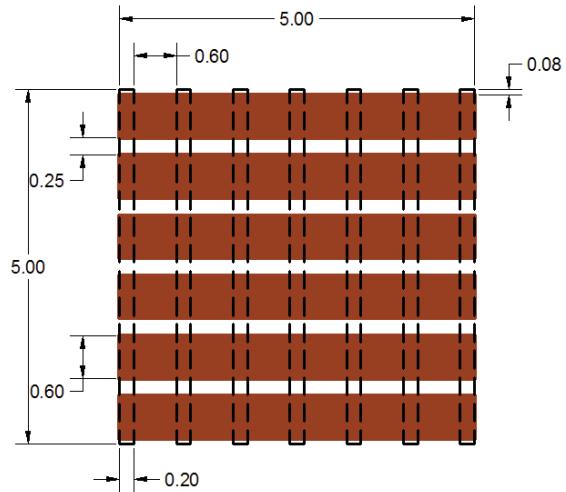


Fig. 4. Vista superior del apilado de madera para el prototipo del

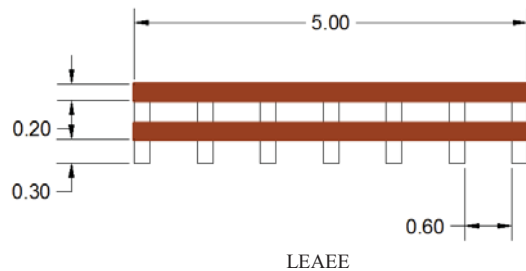


Fig. 5. Vista frontal del apilado de madera para el prototipo del LEAEE

### B. 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 explica a continuación:

#### 1) 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 los voltajes necesarios para el funcionamiento total sin inconvenientes.

El subsistema tiene una regleta conectada a la red eléctrica, para la conexión del transformador de 4A que se utiliza para alimentar el circuito de fuentes reguladas y de otros elementos que necesiten estar conectados a la red de 120 VAC.

#### 2) Subsistema de Acondicionamiento de Sensores

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 utilizado para el conversor ADC del microcontrolador ATmega164p es de 5 voltios.

Se utilizan 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.

De acuerdo a los valores máximos y mínimos obtenidos se estableció que:

- a) 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.
- b) Para el sensor de velocidad de viento, se selecciona el 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.
- c) De acuerdo a estos valores se decidió utilizar el sensor 6450 de Davis Instruments, que mide radiación solar global.
- d) Para un rango de medición entre 4 a 40% y tomando en cuenta la facilidad de implementación se tomó en cuenta el xilohigrómetro Moisture Meter MD 812. En la Fig. 6 se puede observar la ubicación del electrodo para medir el contenido de humedad dentro del apilado.

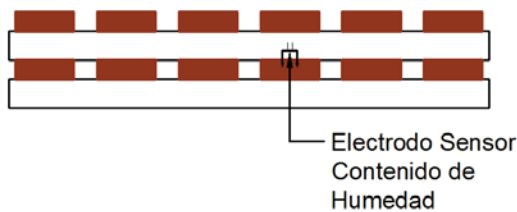


Fig. 6. Ubicación del electrodo para medir contenido de humedad

En el caso de los sensores de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar se implementa un seguidor de voltaje diseñando un circuito para amplificar las señales que éstos entregan, mientras que para el sensor de contenido de humedad se diseña 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.

A continuación se presentan en las Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 y Fig. 11 los respectivos circuitos de acondicionamiento.

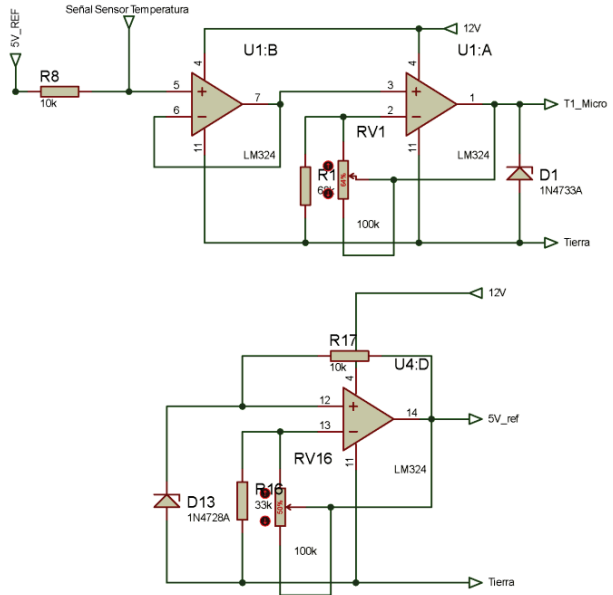


Fig. 7. Circuito de acondicionamiento del Sensor de temperatura

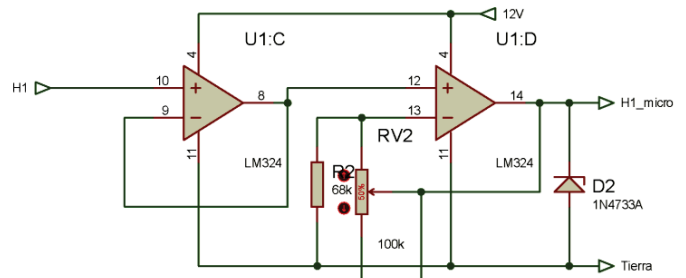


Fig. 8. Circuito de acondicionamiento Sensor de Humedad Relativa

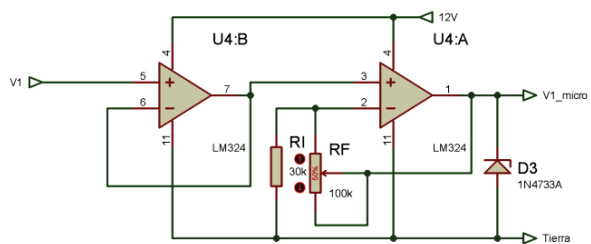


Fig. 9. Circuito de acondicionamiento del Sensor MD0550

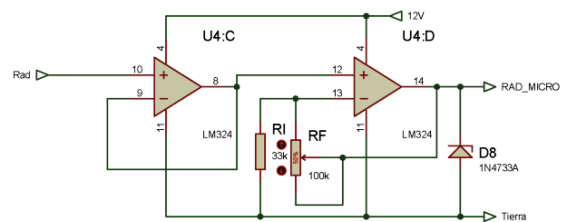


Fig. 10. Circuito de acondicionamiento del sensor de radiación solar

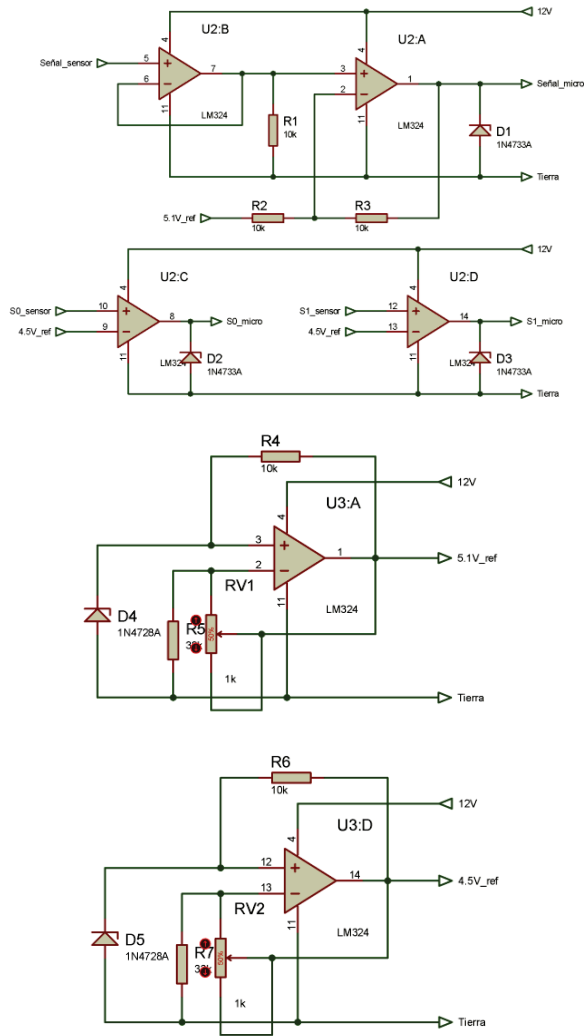


Fig. 11. Circuito de acondicionamiento para medir contenido de humedad

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

### 3) 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.

Se utilizan para la adquisición tres multiplexores, un multiplexor está dedicado a las señales de temperatura, otro a la adquisición de las señales de humedad relativa, y otro para las señales de velocidad de viento, dejando para las señales de radiación y de contenido de humedad entradas directas a los pines del conversor analógico – digital del microcontrolador. En la Fig. 12 se indica el diagrama de conexión del sistema de adquisición, en donde los conectores representan las entradas de las señales de voltaje previamente acondicionadas.

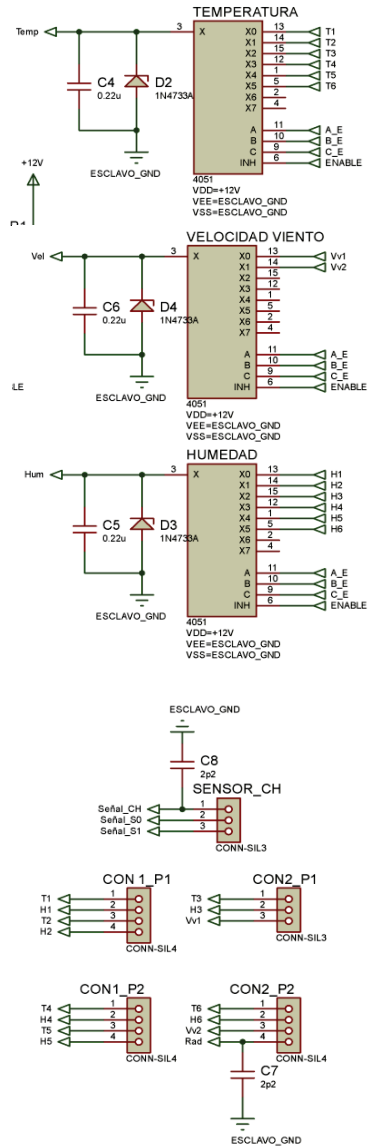
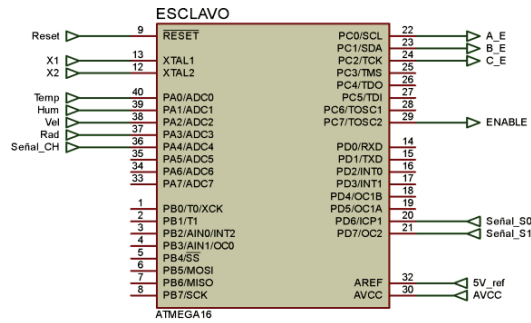


Fig. 12. Diagrama de conexión del Sistema de Adquisición

### 4) Subsistema de Control

Es el que permite decidir el tipo de control y las acciones implementadas para permitir que el secado se haga de una forma más eficiente. Se utilizó microcontroladores ATMEGA 164P.

A. 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.

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.

Para que se mantengan las condiciones dentro de la cámara de secado, sin sufrir ningún cambio brusco, se dotó al prototipo de un mecanismo que detecte el estado de la puerta de ingreso del producto; esto se realiza mediante un sensor que detecta la apertura y lo muestra en el LCD, con 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.

Para establecer en que momento debe finalizar el proceso una vez que la madera haya alcanzado el contenido de humedad deseado, 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.

B. 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.

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.

Para mejorar el secado es necesario contar con un control del flujo del aire dentro de la cámara, para esto se colocan 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.

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.

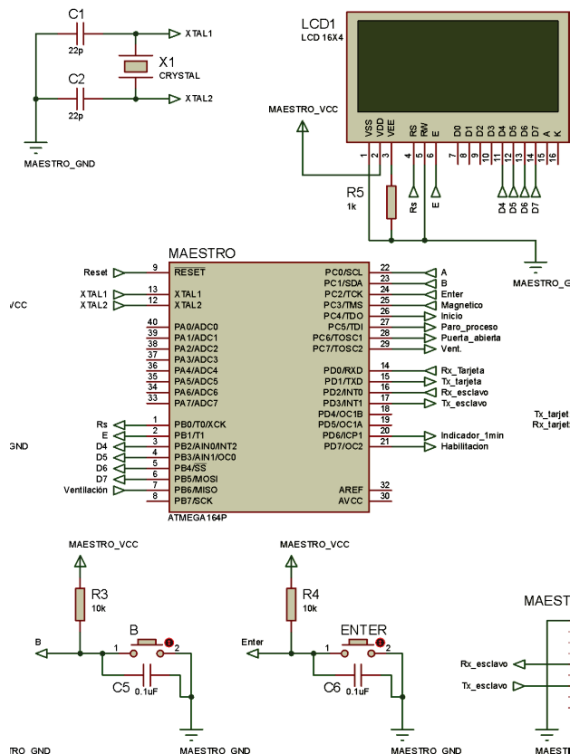
5) Subsistema de Visualización

Este consta de dos partes, la primera es una visualización a través de un LCD, el cual sirve de interfaz con el usuario para que pueda conocer los valores instantáneos del proceso.

En el circuito de visualización se encuentran tres pulsadores, los cuales manejan el menú del LCD. El circuito implementado se puede observar en la Fig. 13.

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.



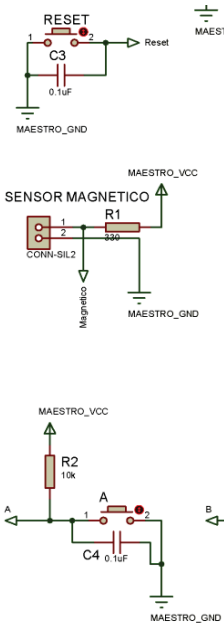


Fig. 13. Diagrama de conexión del Subsistema de visualización

6) *Subsistema de Transmisión*

Para visualizar los datos 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 utiliza los módulos XBEE PRO 868 que utilizan radio-frecuencia para la distancia indicada, que es de aproximadamente 200 metros. En la Fig. 14 se puede observar el diagrama de conexión.

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.

III. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

C. *Desarrollo del Programad del Microcontrolador Maestro*

El programa desarrollado para el microcontrolador maestro se lo ha realizado en la plataforma BASCOM AVR 2.0.7.5.

El microcontrolador maestro tiene como función principal la de visualizar los datos que adquiere el microcontrolador esclavo en el LCD, los cuales se van desplegando de acuerdo a las instrucciones, 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, a través de los

elementos que conforman el sistema, el usuario puede supervisar el proceso de secado, e incluso interactuar en el mismo.

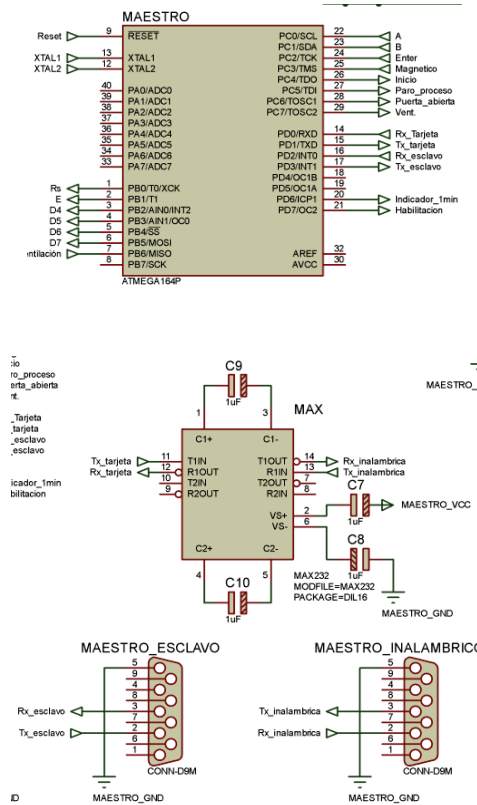


Fig. 14. Diagrama de conexión del Subsistema de transmisión

D. *Desarrollo del Programa del Microcontrolador Esclavo*

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.

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.

E. *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 \*.xls.

En el 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, como se muestra en la Fig. 15 y Fig. 16.

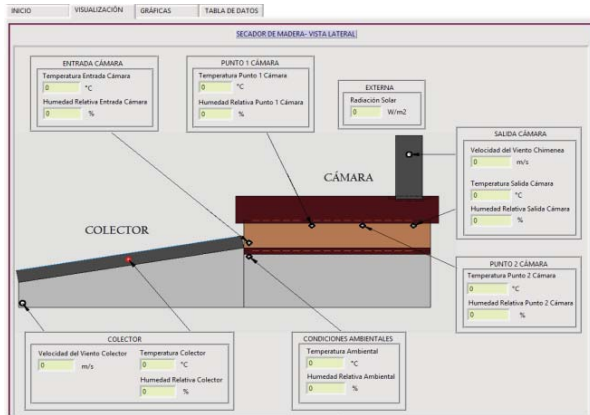


Fig.15. Pestaña de Visualización del HMI Vista Superior del Secador

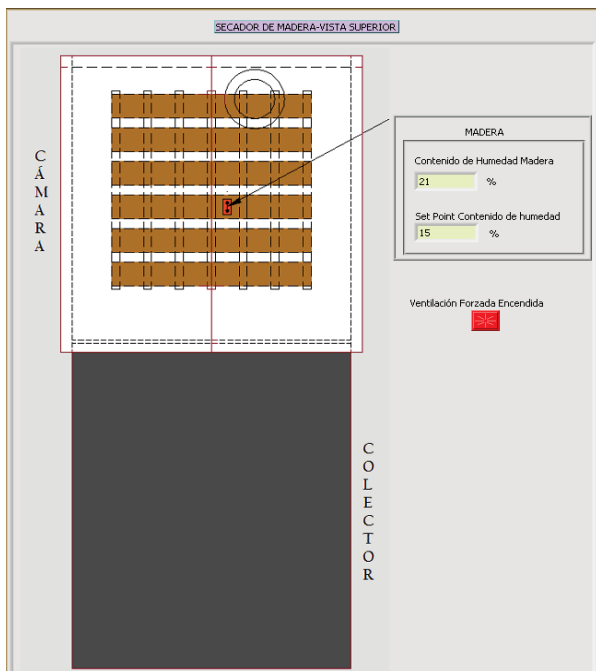


Fig. 16. Pestaña de Visualización del HMI Vista lateral del secador

#### IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se realizaron pruebas, las cuales se indican a continuación.

#### A. Pruebas para determinar el tipo de ventilación

Para que el proceso de secado funcione en las condiciones adecuadas, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) La temperatura a la entrada de la Cámara debe ser mayor a la temperatura en los puntos intermedios.
- 2) 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 Fig. 17.

Debido a que los criterios de secado no se cumplen con la ventilación natural, se decidió implementar una ventilación forzada, la misma que se logra ubicando ventiladores en el prototipo.

De acuerdo a lo mencionado se decidió colocar un ventilador en la chimenea y otro en la parte central superior de la cámara.

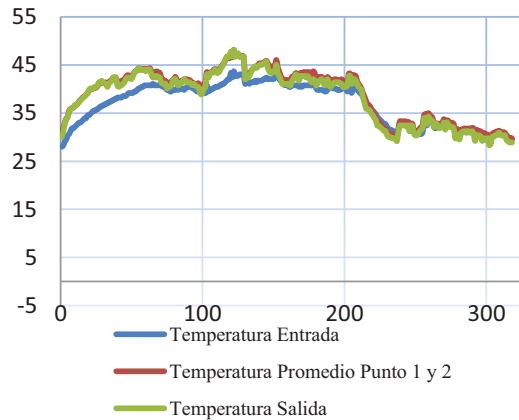


Fig.17. Resultados de las pruebas realizadas con ventilación natural

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, como se observa en la Fig. 18.

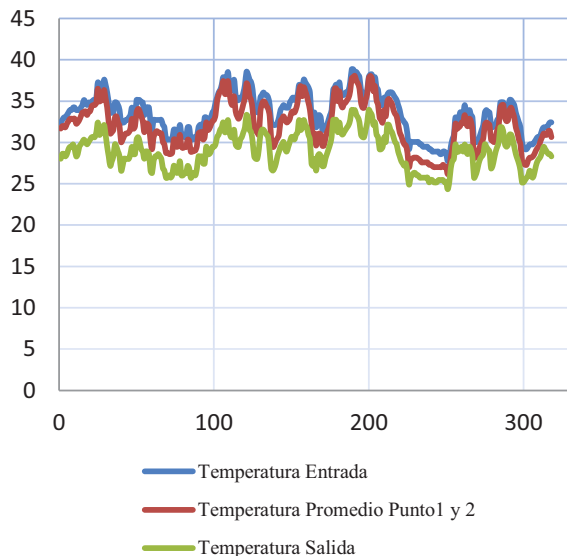


Fig. 18. Resultados de las pruebas realizadas con ventilación forzada

*B. 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, con el fin de determinar cuál es el valor de voltaje de alimentación necesario para que los ventiladores cumplan con las condiciones establecidas de acuerdo a las condiciones climáticas.

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.

En la Tabla I se detalla el resultado del análisis, y se indica los rangos de radiación con sus respectivos porcentajes de alimentación de los dos ventiladores.

*C. 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 el 39% al 18% de contenido de humedad.

A continuación se explica de forma detallada cada una de las pruebas antes mencionadas.

*1) Comparación del proceso de secado con ventilación natural y con 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 obtenido 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 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.

TABLA I  
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



Para calcular la cantidad de agua evaporada durante el proceso se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (1)$$

Donde,

$\Delta m$ : Es la cantidad de agua evaporada

$m_i$ : Es la masa inicial de la madera

$m_f$ : Es la masa final de la madera

En la Tabla II 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.

TABLA II  
DATOS DEL PROCESO DE SECADO CON VENTILACIÓN NATURAL

Radiación Solar Promedio	Masa Inicial Total	Masa Final Total	Agua Evaporada Total
$[W/m^2]$	[g]	[g]	[g]
798,96	4.753,69	4.253,09	500,6

El proceso antes descrito se repite, pero con el sistema de ventilación encendido (ventilación forzada).

Para establecer qué tipo de ventilación favorece el secado se compara la masa de agua evaporada en cada una de las pruebas. En la Tabla III se indica los valores obtenidos.

TABLA III  
DATOS DEL PROCESO DE SECADO CON VENTILACIÓN FORZADA

Radiación Solar Promedio	Masa Inicial Total	Masa Final Total	Agua Evaporada Total
$[W/m^2]$	[g]	[g]	[g]
692,43	4.898,94	4.243,58	655,36

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 más 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.

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.

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%.

De acuerdo a los valores obtenidos durante la prueba de secado se determinó que las 12 piezas de madera apiladas dentro de la cámara llegaron al contenido de humedad establecido después de 6 días.

En la Fig. 19 se puede observar la curva de secado de la prueba realizada.

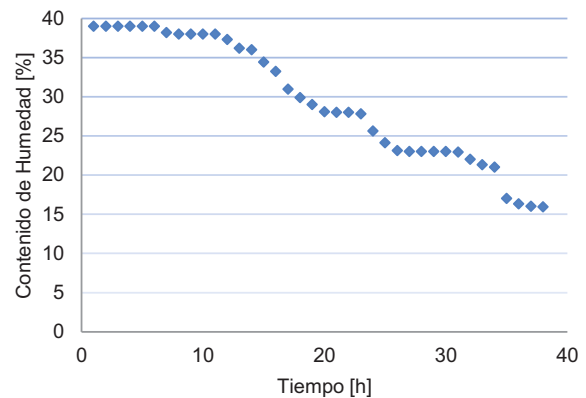


Fig. 19. Curva de Secado para dos filas de madera apilada

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 IV se detalla los valores obtenidos de la prueba realizada.

TABLA IV  
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

En la Tabla V se muestra los valores promedio de agua extraída de cada día.

Como se puede observar en la Tabla V 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 de secado se encuentra en la fase de secado

TABLA V  
MASA DE AGUA EXTRAÍDA POR DÍA

D í a	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

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 V, 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.

### 3) Prueba Para Determinar La Eficiencia Del Sistema De Control

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 el proceso de secado es más eficiente si se controla 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 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, 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, 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.

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 VI se muestra los valores obtenidos para diferentes pruebas con ventilación forzada y en la Tabla VII se muestra los datos de las pruebas con ventilación natural.

TABLA VI  
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 VII  
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 de secado con ventilación natural, como se indica en la fórmula a continuación:

$$\eta_r = \frac{m_{f_{vf}}}{m_{f_{vn}}} \quad (2)$$

Dónde,

$\eta_r$ : Es la relación de eficiencia del sistema de control.

$m_{f_{vf}}$ : Es la masa total de agua extraída del proceso con ventilación forzada.

$m_{f_{vn}}$ : 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 VIII se indica los valores de las masas finales, de la radiación solar y de la relación de eficiencia.

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 VIII.

TABLA VIII  
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

## V. CONCLUSIONES

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.

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 que sirve para extraer la humedad de las piezas de madera 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 con un contenido de humedad

de la madera inicial de 39 % hasta un contenido de humedad de la madera del 15 %, se reduce con respecto a un secado al aire libre o con ventilación natural.

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.

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.

## VI. 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 uno 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 donde van los separadores, también evitan que las piezas de madera se deformen.

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 cuál resultaría más beneficioso tanto para el proceso de secado como para el medio ambiente si se quisiera 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.

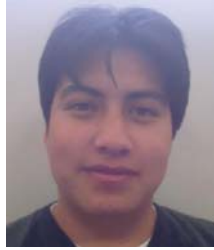
## VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración prestada al físico Marco Yáñez y a la ingeniera Ana Rodas por la revisión de este documento y por el apoyo brindado en el desarrollo de este tema.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] Iteso. "Notas sobre el curso de Energía Solar", Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, Jalisco 1995.
- [2] Sánchez Miño, Santiago. "ENERGÍAS RENOVABLES: Conceptos y Aplicaciones", Fundación Natura, Quito 2003.
- [3] Ananías, Rubén. *Bases Físicas del Secado de la Madera, apuntes de asignatura*. Concepción: Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, 2009.
- [4] Corporación Chilena De La Madera. "Compendio de Directrices para la Enseñanza en Ingeniería - Pino Radiata", s.n., Chile 2003.
- [5] Junta Del Acuerdo De Cartagena. "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino", Carvajal S.A., Lima 1984.
- [6] Centro De Innovación Tecnológico De La Madera. "Técnicas de Secado de la Madera", s.n., Lima 2009.
- [7] Vignote Peña, Santiago Y Martínez Rojas, Isaac. "Tecnología de la Madera", Grupo Mundi-Prensa, Madrid 2006
- [8] Ananías, Rubén. "Física de la Madera, apuntes de asignatura", Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío-Bío, Chile 2009.

## IX. BIOGRAFÍAS



**Esteban Estrada Cruz**, nació el 22 de junio de 1986. Obtuvo su título de bachiller en Ciencias, especialidad Físico Matemático, en el Colegio Técnico Experimental de Aviación Civil.

Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en el 2013.

Áreas de interés: Instrumentación y control de procesos industriales, mejoramiento del medio ambiente mediante sistemas de control automático, energías renovables, robótica, inteligencia artificial, estrategias para automatización del sector eléctrico.

([este\\_estr@hotmail.com](mailto:este_estr@hotmail.com))



**Ana Vega Pilco**, nació en Quito el 3 de julio de 1986. Obtuvo el título de bachiller en Ciencias, especialidad Físico Matemático, en el Colegio Experimental 24 de Mayo.

Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniera en Electrónica y Control en el 2013.

Áreas de interés: Instrumentación y control de procesos industriales, automatización de equipos para facilitar actividades cotidianas, energías renovables, , inteligencia artificial.

([anitaluvp@yahoo.com](mailto:anitaluvp@yahoo.com))

**Ana Rodas Benalcázar**. Ingeniera en Electrónica y Control y Master en Gerencia Empresarial con Mención en Operaciones. Profesor principal del Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés incluyen: instrumentación, control de procesos y electrónica de potencia.