



COMPORTAMIENTO CINEMÁTICO DEL SECADO DE MADERA EN HORNO SOLAR DEL PROGRAMA INSTITUCIONAL DE LA MADERA (PIMA)

KINEMATIC BEHAVIOR OF WOOD DRYING IN A SOLAR FURNACE OF THE INSTITUTIONAL WOOD PROGRAMME (PIMA)

Mary Triny Gutiérrez Mendoza¹
Brayan Alexander Álvarez Torres²
Brian Ernesto Espinoza Vicente³
Rodrigo José Mendoza Zeledón⁴

(Recibido/received:24-mayo-2023; aceptado/accepted:19-junio-2023)

RESUMEN: El estudio consistió en el diseño de un sistema automático para mejorar el proceso de secado de madera en las instalaciones del programa institucional de la madera (PIMA) de la UNI RUPAP. El sistema fue diseñado en varios modos de operación con el objetivo de censar y guardar las variables temperatura en las paredes, colector y madera; humedad relativa (HR) en la cámara interna de secado y el apilamiento de madera, también controlar el cierre de las ventilas superior e inferior mediante servo motores y el accionamiento de los ventiladores. El comportamiento de la cinética del secado de madera en condiciones de convección natural y convección forzada fue censado durante 37 y 26 días, respectivamente. La HR de 14% en convección natural se alcanzó en el día 9. Los rangos HR oscilaron entre 17.6% - 13.5% debido a la dependencia de las condiciones climáticas y la ausencia de extracción de vapor de agua contenido en el aire interior del horno. El comportamiento de la cinética del secado en convección forzada, la HR se mantuvo constante a partir del día 18. Oscilo entre los rangos 14.0% - 14.6% a causa del uso de ventiladores y los extractores que extraen el vapor saturado del interior del horno.

PALABRAS CLAVE: convección natural; convección forzada; humedad relativa; temperatura

¹ Docente de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de la Industria, mary.gutierrez@fti.uni.edu.ni

² Graduado de la carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de la Industria

³ Graduado de la carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de la Industria

⁴ Graduado de la carrera de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Tecnología de la Industria

ABSTRACT: The study consisted in the design of an automaton system to improve the wood drying process in the facilities of the institutional wood program (PIMA) of UNI RUPAP. The system was designed in various modes of operation in order to register and store the temperature variables in the walls, collector and wood; relative humidity (RH) in the internal drying chamber and the wood stack, also control the closing of the upper and lower vents by means of servo motors and the activation of the fans. The behavior of the kinetics of wood drying under natural convection and forced convection conditions was recorded for 37 and 26 days, respectively. The 14% RH in natural convection was reached on day 9. The RH ranges oscillated between 17.6% - 13.5% due to the dependence on weather conditions and the absence of extraction of water vapor contained in the air inside the oven. The behavior of the kinetics of the drying in forced convection, the RH remained constant from day 18. It oscillated between the ranges 14.0% - 14.6% due to the use of fans and the extractors that extract the saturated steam from the interior of the oven.

KEYWORDS: natural convection; forced convection; relative humidity; temperature.

INTRODUCCIÓN

En todo proceso de producción de mueble con madera en su etapa de transformación es necesario el tiempo de secado. En la actualidad, el método comúnmente utilizado en Nicaragua es el secado al aire libre, que da como resultado un secado heterogéneo con alta probabilidad a deformaciones, fisuras causadas por el sol, contaminación y exposición a hongos (Golfín Seco y Conde, 2007). Ante esta situación, surge la implementación del secado de madera usando hornos solares, un método amigable con el ambiente y eficaz. Sin embargo, pese a ofrecer una zona hermética, durante el momento de realizar las mediciones del nivel de humedad en la madera es necesario acceder a la cámara interna, ocasionando pérdida de calor desde el interior del horno hacia el exterior a causa de la diferencia de temperatura.

El método de obtención de datos interrumpe la hermeticidad del proceso modificando las variables temperatura y HR en la madera, incidiendo en el comportamiento de la cinética del secado. Por tal razón, se diseña un sistema autómatas usando el microcontrolador Arduino con la finalidad de registrar y monitorear constantemente Temperatura (T) en las paredes, colector y madera; HR en la cámara interna de secado y la madera. Este sistema se instala en el horno solar de secado de madera del Programa Institucional de la Madera (PIMA) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

La construcción del horno de secado de madera fue basada del prototipo presentado por Guevara y Villegas (2017), pero fue rediseñado al agregar ventilas. Estos se activan de forma automática mediante un panel donde se instaló el sistema autómatas encargado del censado de las variables, para ello el sistema de secado cuenta con los siguientes componentes (figura 1):

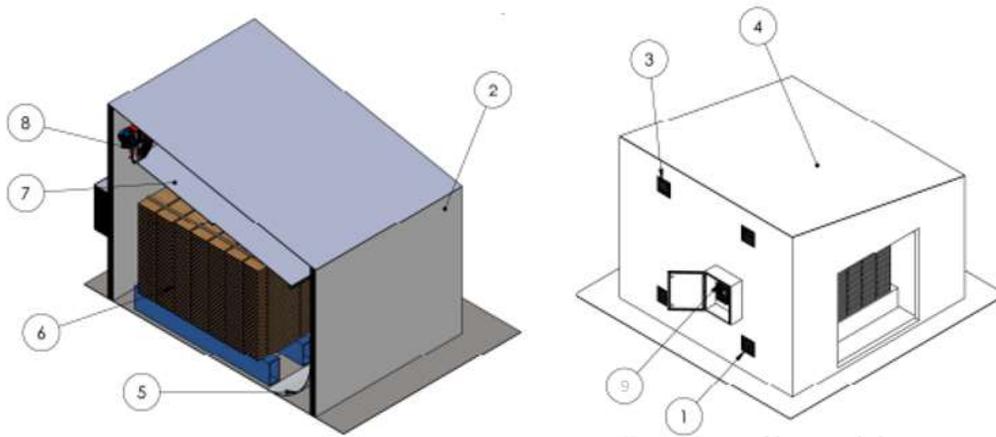


Figura 1. Componentes del horno de secado de madera

El Techo (4) de vidrio dúplex, se encarga de captar la energía solar que calienta el aire interno de la cámara, mientras el colector combinado con su color negro mate (7) ubicado entre el techo y la pila de madera (6) captura la energía solar térmica, aumentando su temperatura y transfiriendo calor al aire (Garita y col., 2008). La presencia del colector impide que los rayos del sol incidan directamente sobre la madera que se pretende secar, evitándole daños a superficie como las grietas y la decoloración.

La energía solar capturada en el colector, hecho de una lámina de hierro con aproximadamente 3 mm de espesor, pintada con pintura anticorrosiva color negro mate, debe ponerse en movimiento a lo interno, a fin de que ese aire caliente circule entre la pila de la madera, para ello se colocaron dos ventiladores (8) con una velocidad promedio del aire a través de la pila de madera entre 1 m/s y 2 m/s. Este aire caliente circulado en la cámara interior del horno de secado es direccionado por una lámina deflectora (5) hacia el apilamiento para cambiar las propiedades termodinámicas de la madera, induciendo a la disminución de la HR producto a la transferencia de calor entre el aire y la pila de madera, luego, durante un tiempo determinado se activan las ventilas inferior (1) y superior (3) con la finalidad de extraer la humedad absorbida por el aire y suministrar aire del ambiente, respectivamente.

Referente a las paredes, puertas y ventanas (2) deben de cumplir el requerimiento de mantener el calor a lo interno de la cámara de secado, para ello el material debe cumplir con alta resistividad térmica por tal razón, el material seleccionado fue la lámina de acero aluminizado y aislamiento de espuma de poliestireno para actuar como material aislante. En cambio, las ventilas, deflector y el panel (9) son componentes agregados para incorporar el sistema automático.

Por ende, la presente investigación desarrollo el sistema automático para comparar el comportamiento de la cinética del secado de la madera en un horno solar, evaluando condiciones de convección natural y convección forzada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño experimental del sistema autómatas mostrado en la Figura 2, actúa en función del micro controlador, Arduino, para la selección de los modos de operación y la función del sistema con el uso de un teclado numérico. En todo sistema es necesario una pantalla donde se muestren datos de interés para el usuario, para ello seleccionamos una LCD I2C 16x4 con una amplitud en pantalla para mostrar la mayor cantidad de datos posibles.

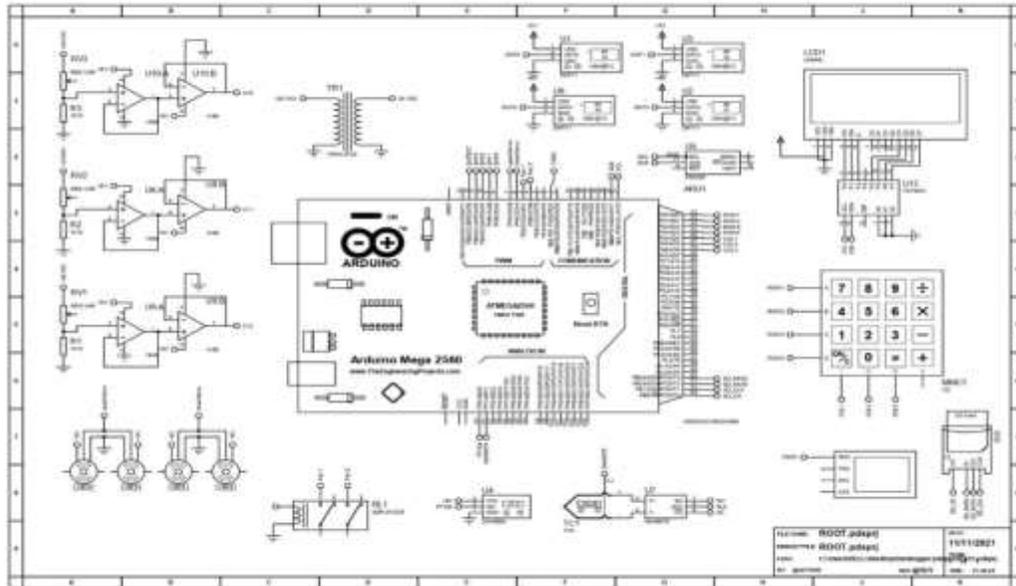


Figura 2. Circuito de Diseño del Sistema Automata

Conocidas las temperaturas máximas y mínimas de los valores a medidos mediante mediciones directas, se seleccionó para la medición de la HR y temperatura interna del horno el sensor DHT22. Un sensor de tipo digital comúnmente usado con el micro controlador Arduino. En el caso de la temperatura superficial en el colector de radiación solar Roa y Ortega (2011) recomendaron utilizar los sensores de tipo resistivos LM35, porque son sensores de un amplio espectro de medición y soportan temperaturas altas superiores al máximo registrado durante el censo inicial del horno, eso garantizó un óptimo funcionamiento.

Tabla 1. Valores máximos y mínimos de censo medición directa

Valores	Temperatura promedio Horno (°C)	Temperatura paredes promedio General. (°C)	HR promedio General. (%)	Temperatura promedio Colector (°C)	Temperatura promedio Ambiente (°C)
Máximo	54.2	55.00	33.35	82	39.60
Mínimo	30	35.05	74.13	36	27.67

Para la medición de la humedad en la madera se diseñó un diagrama de circuito de sensor resistivo. Dos clavos se insertaron en la madera separados por 31.75 mm y una profundidad de 8 mm, análogamente a Wandel (2010).

El acondicionamiento de la medición con Arduino se utilizó el método de divisor de voltaje para medir la resistencia de la madera, reemplazando el multímetro con una resistencia de 10Mohm. Se empleó un seguidor de voltaje para el acoplamiento de la impedancia, un amplificador operacional como seguidor de voltaje, pero al usar una fuente de 24V en el circuito el Arduino registra valores no concluyentes en relación al contenido de humedad, es decir, no es apreciable las variaciones de resistencia. Por lo tanto, con el fin de aumentar la sensibilidad en el circuito se agregó un segundo amplificador operacional (Op-amp) quedando el circuito de la siguiente manera:

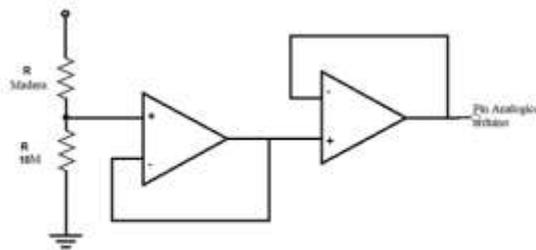


Figura 3. Diagrama circuito sensor resistivo

El Op-amp LM358 se utilizó porque su impedancia de salida es muy baja en comparación al multímetro. Por tanto, se despreció la impedancia del multímetro debido a que el voltaje de salida fue leído como una entrada analógica por el Arduino (Wandel, 2010).

Este sensor mostró las variaciones de resistencia con respecto a la humedad contenida en la madera y los datos leídos por el Arduino fueron valores analógicos de 0 a 1023. Por tal motivo se encontró una ecuación logarítmica que transforme los valores analógicos a valores de HR, obteniéndose $Y=14.9921\ln(x)-58.629$.

En el caso de la medición de la temperatura en la madera, se empleó el sensor de temperatura tipo sonda DS18B20. Los datos obtenidos fueron almacenados en un lector MICRO SD para su posterior análisis en conjunto con un módulo de tiempo, reloj RTC, para el registro de fecha y hora de las mediciones tomadas.

En el sistema de convección forzada, los ventiladores internos, extractores superiores e inferiores fueron accionados por un contactor, su control está en mando del módulo relay. El cierre y apertura de las compuertas para los extractores fue dirigido con servo motores, controlando la reposición del aire dentro del sistema de secado del horno. Todo el sistema funcionó con electrónica de baja potencia y fue alimentado por un transformador rectificador.

La posición del panel para exteriores del centro de monitoreo se ubicó en el costado norte del horno. Posteriormente, se realizó el montaje de los elementos dentro del panel de control como se muestra en la Figura 4.

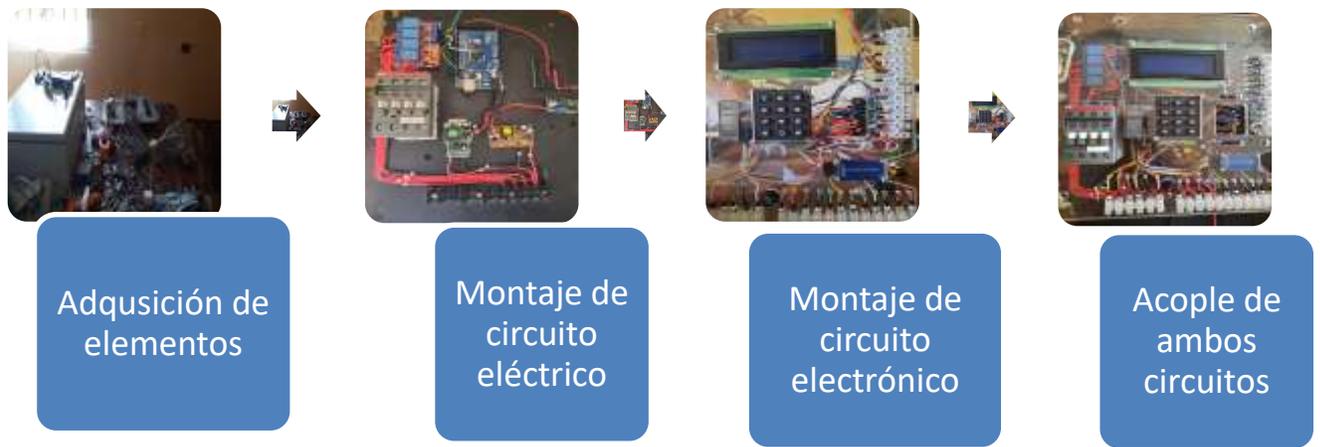


Figura 4. Proceso de construcción de prototipo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del comportamiento de la cinética del secado de la madera en condiciones de convección natural en el interior del Horno y la madera.

En el censo de datos del comportamiento de la temperatura y HR en la cámara interna del horno durante 37 días en el periodo comprendido entre los meses de junio y julio 2021 (Figura 5), se detectaron variaciones de la HR con respecto a la temperatura oscilaron entre 53% - 88% y 28.40°C – 40.49°C, respectivamente. La variación entre rangos máximos y mínimos de la HR fue de 35%. Esto fue debido a que el horno funcionaba en convección natural con total dependencia a los cambios de temperatura en base a las condiciones ambientales (Cueto, 1997). El comportamiento de variables mostró que la temperatura influye directamente en la HR en el transcurso del tiempo, porque cuando la temperatura va en aumento la HR va en disminución y viceversa. Por tanto, el aumento de temperatura eleva el movimiento del agua interior de la madera (Callata Umpire, 2014) debido al calor cedido por transferencia de calor provocando la evaporación del agua en la superficie de la madera.

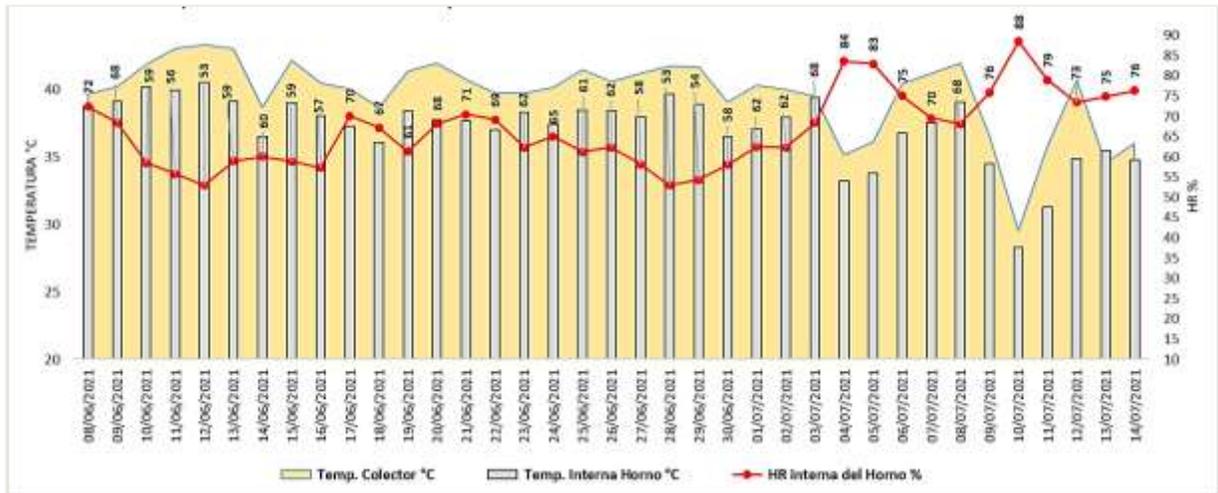


Figura 5. Registro de humedad relativa y temperatura en cámara interna del horno de secado y del colector obtenida con el sensor DHT22 en condiciones de convección natural (junio y julio)

La relación de dependencia entre las variables se muestra en la tabla 2. La temperatura del colector incide directamente sobre la temperatura interna del horno siendo el valor aproximado de 0.89. La HR en el interior del horno está indirectamente ligadas a la temperatura del colector y la temperatura del horno debido a que la correlación es alta pero negativa con valores de -0.79 y -0.81, respectivamente.

Tabla 2. Correlación entre humedad relativa - temperatura interna del horno en convección natural

	Temp. Colector	Temp. Interna Horno	HR interna del Horno
Temp. Colector	1		
Temp. Interna Horno	0.899538024	1	
HR interna del Horno	-0.794729265	-0.814013662	1

La figura 6 evidencia que el comportamiento de la temperatura de la madera fue variable, en los primeros 9 días la humedad de la madera alcanzó la humedad deseada (14%) mostrando una tendencia a un rápido secado. En cuanto a los siguientes días, a causa de las precipitaciones los rangos HR oscilaron entre 17.6% - 13.5% y la temperatura de la madera oscilaron entre 28.9°C – 32.1°C. Por lo tanto, El contenido de humedad de la madera depende de la HR del aire interna del horno de secado (Muñoz, 2006) porque al ser un material higroscópico al estar en contacto con las condiciones de interna esta absorbe o pierde humedad.

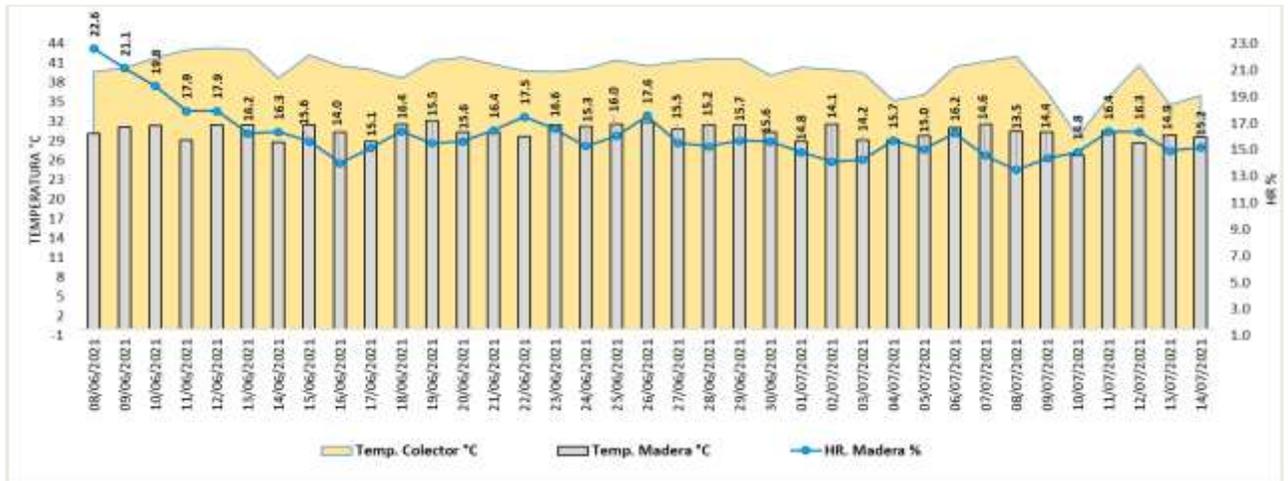


Figura 6. Registro de humedad relativa y temperatura del secado de madera y del colector en condiciones de convección natural (junio y julio)

En la tabla 3 se calculó las correlaciones entre las variables del colector y madera, constatando que la temperatura y humedad de la madera esta medianamente relacionada con la temperatura del colector (0.58). En cambio, la temperatura del colector y la HR de la madera se observó una correlación muy baja y positiva (0.20), ya que el sistema estuvo expuesto a las constantes infiltraciones durante climas húmedos, a esto se le suma la falta de evacuar la humedad evaporada, dando como resultado un sistema de alta temperatura y humedad.

Tabla 3. Correlación entre humedad relativa - temperatura de la madera en convección natural

	Temp. Colector °C	Temp. Madera °C	HR. Madera %
Temp. Colector °C	1		
Temp. Madera °C	0.586360874	1	
HR. Madera %	0.207419832	0.150566037	1

Análisis del comportamiento de la cinética del secado de la madera en condiciones de convección forzada

El registro de HR y temperatura en convección forzada (Figura 7) por un periodo de 26 días durante los meses de septiembre y octubre, la temperatura osciló entre 33.5°C – 37.5°C, y la HR en la cámara interna del horno osciló entre 77% - 89% con una diferencia de variación entre los rangos máximos y mínimos del 12%. Esto se debe a que la temperatura del horno se reguló por medio de la circulación de aire caliente mediante los ventiladores y extracción del aire húmedo.

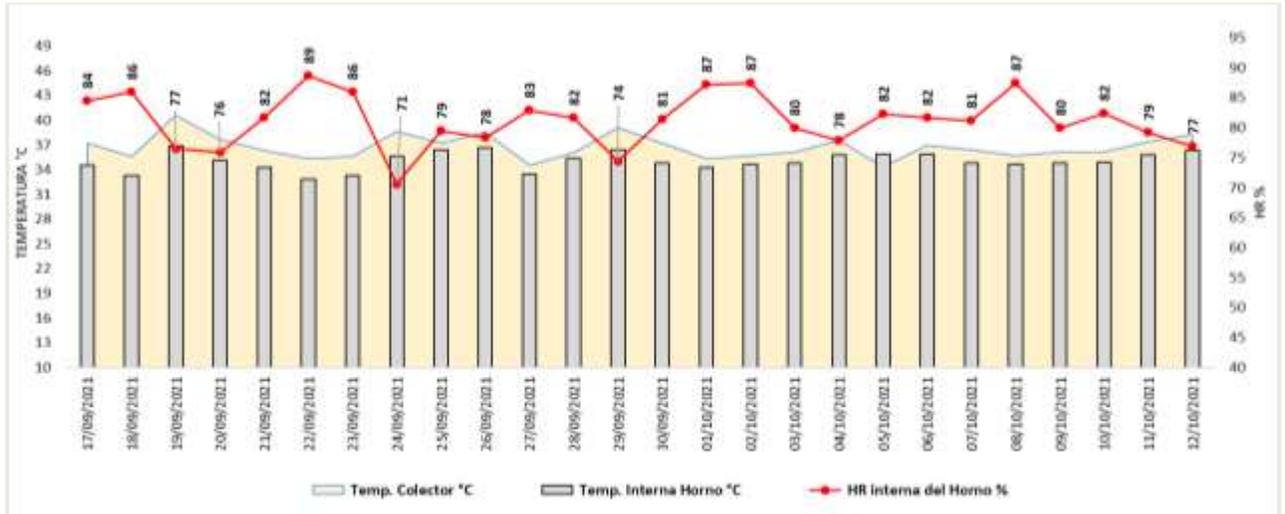


Figura 7. Registro de humedad relativa y temperatura en cámara interna del horno de secado y del colector obtenida con el sensor DHT22 en condiciones de convección forzada (septiembre y octubre).

En la tabla 4, la correlación entre la temperatura del colector y la temperatura interna del horno están considerablemente relacionadas (0.72) porque el sistema trasladó forzosamente el aire caliente de la superficie del colector al interior del horno. La correlación respecto a la humedad interna del horno mostró ser muy alta negativamente (-0.76) debido a la dependencia inversamente proporcional entre la temperatura y la HR, además el aire caliente húmedo fue evacuado por los extractores.

Tabla 4. Correlación entre humedad relativa - temperatura interna del horno en convección forzada

	Temp. Colector	Temp. Interna Horno	HR interna del Horno
Temp. Colector	1		
Temp. Interna Horno	0.720226211	1	
HR interna del Horno	-0.760086448	-0.71935089	1

En la Figura 8, la HR de la madera osciló entre los rangos 14.0% - 19.8% de HR y 24.1°C – 28.9°C, temperatura. En el día 18, la HR inició su descenso de manera continua hasta el día 26 oscilando entre los rangos 14.0% - 14.6%. En este periodo las variaciones de la HR en el interior del horno de un día a otro osciló en 1% y 7%, un comportamiento casi constante, estas condiciones permitieron a que la madera alcance un equilibrio entre la presión de agua del aire y la presión de agua de la madera para que la humedad de la madera no varíe más.

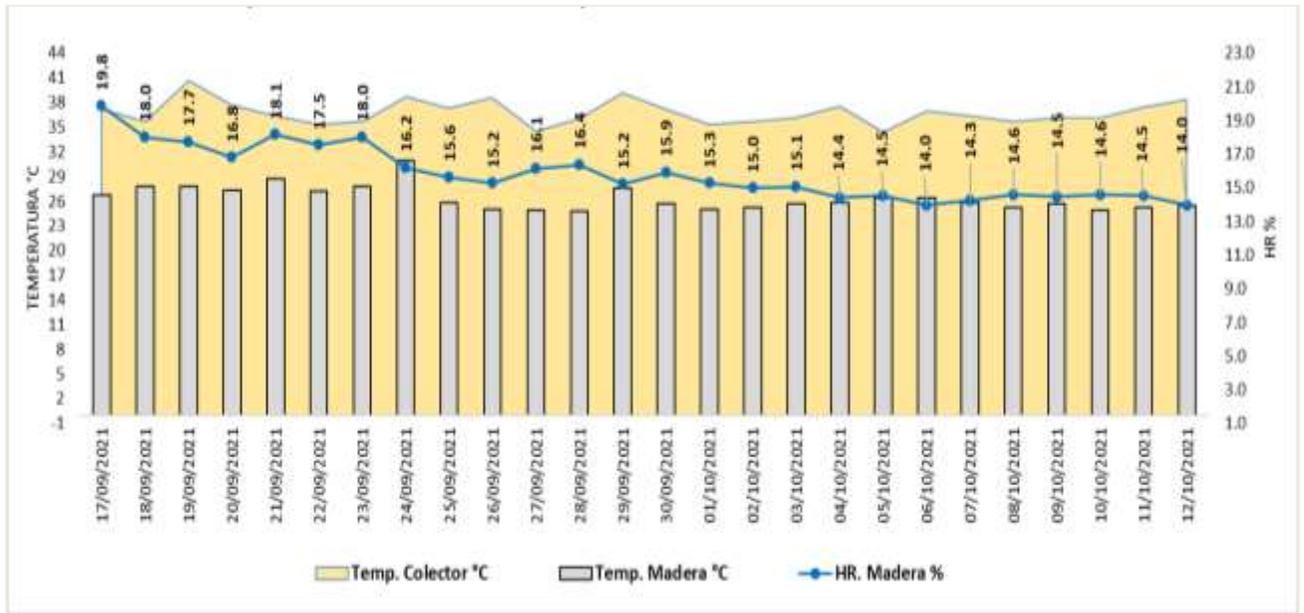


Figura 8. Registro de humedad relativa y temperatura del secado de madera y del colector en condiciones de convección natural (septiembre y octubre)

Las correlaciones entre la temperatura del colector y de la madera mostradas en la tabla 5 fueron bajas (0.34). Esto se debió al ingreso de aire a temperatura ambiente mediante los ventiladores con la finalidad de mantener en rangos pequeños la variación de temperatura en el horno.

Tabla 5. Correlación entre humedad relativa - temperatura de la madera en convección forzada

	Temp. Colector	Temp. Madera	HR. Madera
Temp. Colector	1		
Temp. Madera	0.343245857	1	
HR. Madera	0.046516626	0.518077144	1

Comparativa de la cinética del secado de madera en convección natural y convección forzada.

Analizando los comportamientos promedios diarios de las temperaturas dentro del horno en convección natural, la figura 9 muestra un comportamiento de campana de Gauss, donde las temperaturas más bajas, suceden entre las 7 pm y las 5 am, iniciando su ascenso hasta llegar a su punto máximo entre las 12 pm y 2:00 pm. Durante el proceso de secado de la madera al transcurrir el tiempo su temperatura aumenta lo que ocasiona el desplazamiento de vapor de agua y ser reemplazado por aire seco (Sandoval-Torrez y col., 2013). Adicionalmente, en la tabla 6 se observó una notoria correlación superior al 0.9 entre las temperaturas del colector, madera y temperatura interna del horno.

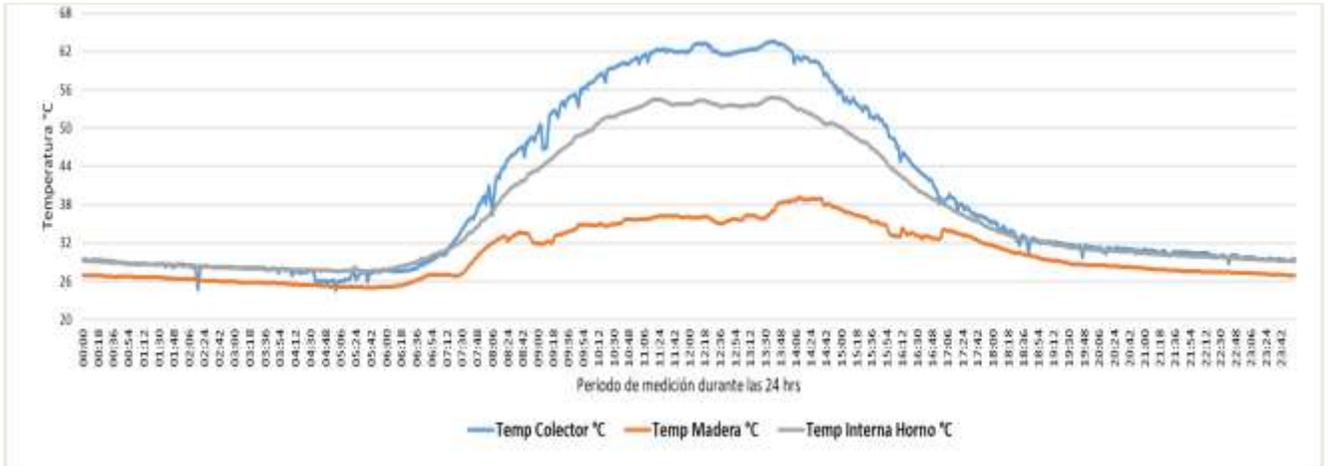


Figura 9. Comportamiento de temperaturas promedios diarios del sistema en convección natural.

Tabla 6. Correlación Temperaturas promedios diario del sistema en convección natural

	Temp. Colector	Temp. Madera	Temp. Interna Horno
Temp. Colector	1		
Temp. Madera	0.948776808	1	
Temp. Interna Horno	0.998290081	0.954974031	1

Por otra parte, se observó que la humedad extraída y evaporada de la madera reingresa nuevamente en el transcurso del día, por falta de la extracción del aire húmedo circundante dentro del horno (Figura 10).

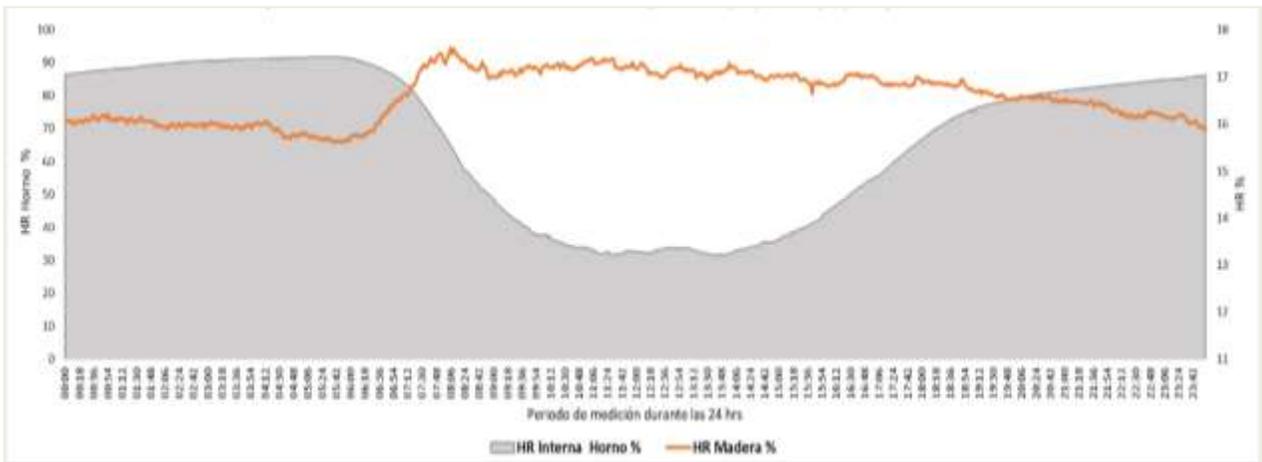


Figura 10. Comportamiento de humedad relativa promedios diarios del sistema en convección natural.

En la figura 11, el comportamiento diario de la temperatura en condiciones de convección forzada fue parecido al de convección natural durante las horas nocturnas y horas solares. Una vez alcanzadas la temperatura de accionamiento del sistema, inicia la convección forzada, siendo característico un comportamiento de equilibrio térmico, en el que las altas temperaturas

del colector son transferidas hacia la madera, hasta que la radiación solar sea tan escasa, que las temperaturas desciendan y el sistema detenga la convección forzada.

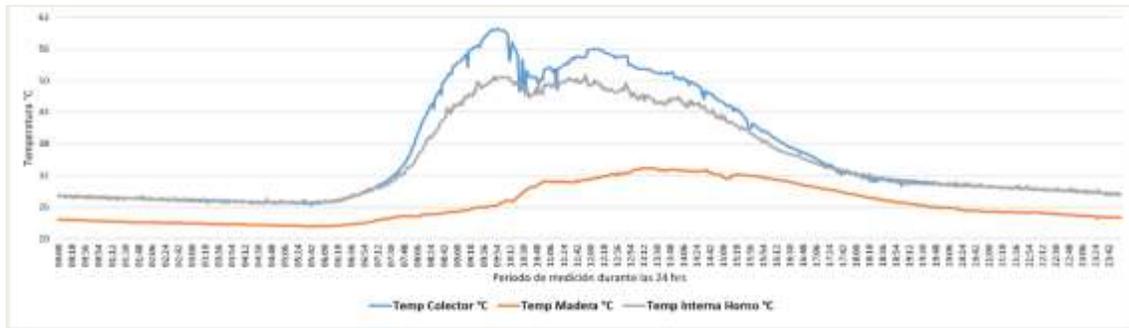


Figura 11. Comportamiento de temperaturas promedios diarios del sistema en convección forzada.

En la tabla 7 se observa una excelente correlación entre las temperaturas del colector y el ambiente interno del horno (0.99), demostrando una excelente distribución del calor obtenido. En el caso de la madera mostró menor correlación entre las temperaturas interna del horno (0.77) y colector (0.73), puesto que el sistema realizó reposición de aire y el calor en la madera fue extraído con más facilidad.

Tabla 7. Correlación Temperaturas promedios diario del sistema en convección forzada

	Temp Colector	Temp Madera	Temp Interna Horno
Temp Colector	1		
Temp Madera	0.731828992	1	
Temp Interna Horno	0.992125634	0.779323886	1

Mientras en la figura 12, la HR de la madera durante horas nocturnas ascendió, pero en horas solares desde las 7:00 am hasta las 04:00 pm descendió consecutivamente, porque aún la humedad de la madera no se encontraba en equilibrio. Por lo tanto, la madera en contacto con las condiciones interna del horno absorbió y perdió humedad.

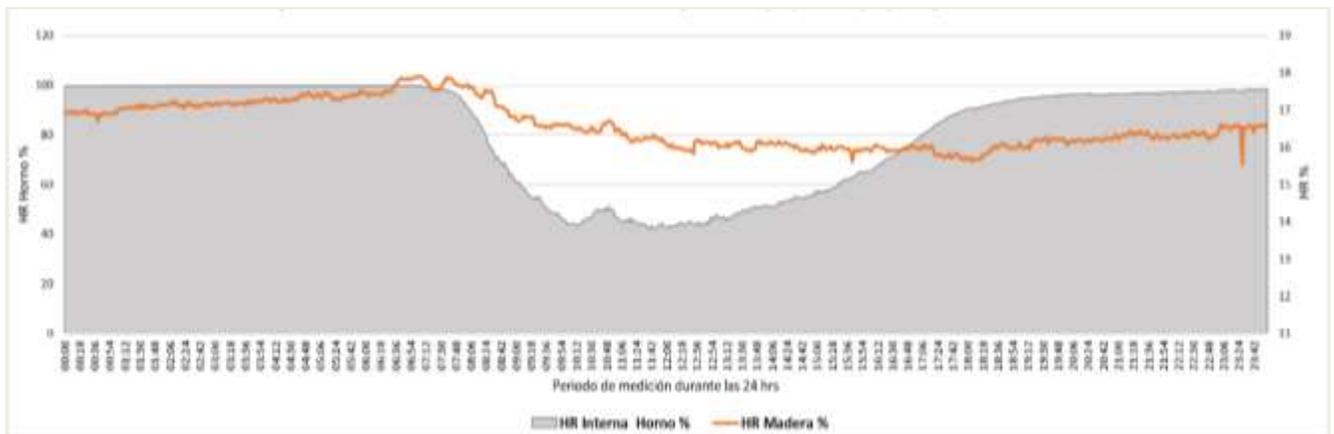


Figura 12. Comportamiento de humedad relativa promedios diarios del sistema en convección forzada.

CONCLUSIONES

En este estudio se comprobó que el sistema automático creado es capaz de operar en condiciones variantes y brindar datos aceptables, la integración de este sistema tuvo como fin la regulación y control del proceso de secado de madera en horno solar con nivel de asimilación sencillo para el operador del mismo. Dicho sistema, ayuda al análisis del comportamiento de la cinética del secado en madera por convección natural o forzada para lograr una parametrización en los niveles de humedad, temperatura y tiempo necesarios para cada proceso de secado.

En base a los datos obtenidos por el sistema se comprobó que la convección natural es un proceso muy irregular, capaz de obtener un secado rápido cuando se mantienen altas temperaturas en la cámara de secado, de igual manera es vulnerable a ganar humedad cuando las temperaturas del horno descienden por consecuencia a la falta de reposición de aire y eliminación de la humedad extraída, resultando en la prolongación del proceso de secado.

En cambio, la convección forzada es un proceso controlado donde se obtienen pocas irregularidades en las temperaturas y una constante eliminación del aire húmedo, logrando un mejor aprovechamiento del calor recibido en la cámara.

REFERENCIAS

- Callata Umpire, C. (2014). Diseño y construcción de horno solar prototipo para secado de madera.
- Cueto, E. M. P. (1997). Diseño y ensayo de un secador solar para madera. *Madera y Bosques*, 3(2), 13-28.
- Fernandez - Golfín Seco , J. I., y Conde Garcia, M. (2007). Manual técnico de secado de maderas.
- Garita, C. S., Roque, R. M., y Foglia, R. C. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(14), 30-55.
- Muñoz, F. (2006). Uso de tabla psicrométrica en la industria de la madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(7), 75-81.
- Roa Marín, G. L., y Ortega Torres, D. B. (2011). *Diseño y Construcción de un Secador Solar por Convección de Aire Caliente Automatizado de Pequeña Escala, para el Secado de café para la Universidad Nacional de Loja*. Universidad Nacional de Loja, Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables. Ecuador: Universidad Nacional de Loja.

- Sandoval-Torres, S., Hernández-Bautista, E. y Rodríguez-Ramírez, J. (2013). Simulación multi-física del secado de madera en COMSOL Multiphysics 3.4. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(3), 389-398.
- Villegas, J. A., y Guevara, E. B. (2017). Diseño y construcción de un horno solar para el secado de madera dirigido a las pequeñas y medianas empresas del sector madera en Nicaragua. Managua.

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Mary Triny Gutiérrez Mendoza: Es Ingeniero Mecánico, Con Maestría en Gerencia de Proyectos de Desarrollo, investigadora acreditada de la Universidad Nacional de Ingeniería, desarrolla proyectos en diseño mecánico y mantenimiento Industrial.



Brayan Alexander Álvarez Torres: Es Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Tecnología de la Industria.



Brian Ernesto Espinoza Vicente: Es Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Tecnología de la Industria.



Rodrigo José Mendoza Zeledón: Es Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Tecnología de la Industria.