



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Facultad Regional Multidisciplinaria

FAREM-Estelí

Evaluación de un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de caldera térmica para el tratamiento de secado de madera en FAREM-Estelí, durante el año 2017.

Autores:

Br. Gonzalo Meza López.

Br. Zamir Castillo Castillo.

Br. Luis Octavio Ramírez Villareyna.

Tesis de grado para optar al título de Ingeniería en Energías Renovables.

Tutor: MSc. Fuentes Peralta.

Asesor: MSc. Pablo Muñoz.

Estelí, enero 2018



INDICE

| | |
|--|----|
| I. Introducción | 1 |
| II. Antecedentes | 2 |
| Antecedentes nacionales:..... | 3 |
| III. Justificación | 5 |
| IV. Planteamiento del problema | 6 |
| 4.1 Caracterización del Problema..... | 6 |
| 4.2 Delimitación del Problema | 7 |
| 4.3 Formulación del Problema..... | 7 |
| 4.4 Sistematización del problema..... | 8 |
| V. Objetivos..... | 9 |
| 5.1 Objetivo General..... | 9 |
| 5.2 Objetivos Específicos | 9 |
| VI. Marco teórico | 10 |
| 6.1 Transferencia de calor | 10 |
| 6.1.1 Conducción..... | 10 |
| 6.1.2 Convección: | 11 |
| 6.1.3 Transferencia de calor por radiación | 12 |
| 6.2. Números adimensionales de transferencia de calor..... | 12 |
| 6.2.1. Número de Nusselt | 12 |
| 6.2.2. Número de Reynolds | 12 |
| 6.2.3. Número de Prandtl..... | 13 |
| 6.2.4. Número de Rayleigh..... | 13 |
| 6.3. Radiación solar | 13 |
| 6.3.1 Espectro Electromagnético | 14 |

| | |
|---|----|
| 6.3.2. Tipos de radiación. | 14 |
| 6.3.2.2. Radiación directa | 15 |
| 6.3.2.3. La radiación difusa | 15 |
| 6.3.3 Aprovechamiento de la energía solar. | 16 |
| 6.4. Teoría del secado de madera. | 16 |
| 6.4.1 Anatomía de la madera. | 16 |
| 6.4.2. Propiedades generales de la madera. | 18 |
| 6.4.3. Estados en las que se encuentra el agua en el interior de la madera..... | 20 |
| 6.4.4. Métodos industriales para determinar la cantidad de humedad en la madera: .. | 21 |
| 6.4.5. Humedad de equilibrio higroscópico..... | 21 |
| 6.4.5.1. Esta temperatura depende de múltiples variables, a saber..... | 22 |
| 6.5. Mecanismos de secado | 24 |
| 6.5.1. Primera Fase: | 25 |
| 6.5.2. Segunda fase: | 25 |
| 6.5.3. Tercera fase: | 26 |
| 6.6. Factores que determinan el secado | 27 |
| 6.6.1. Magnitudes o factores que dependen del aire..... | 28 |
| 6.6.2. Temperatura..... | 28 |
| 6.6.3. Humedad relativa..... | 28 |
| 6.6.4. Velocidad..... | 29 |
| 6.6.5. Presión | 29 |
| 6.6.6. Factores que dependen del tipo la madera..... | 29 |
| 6.6.7. Defectos que aparecen durante el secado | 30 |
| 6.7. Tecnologías utilizadas para el secado de la madera. | 32 |
| 6.7.1. Secado por convección: | 32 |

| | |
|---|----|
| 6.8. Secadores solares..... | 40 |
| 6.8.1. Clasificación de secadores solares..... | 40 |
| 6.8.2. De acuerdo a la capacidad de carga:..... | 41 |
| 6.8.3. De acuerdo al modo que se produce la circulación del aire: | 41 |
| 6.8.4. De acuerdo a la incidencia de la radiación solar sobre el producto a secar:..... | 41 |
| 6.8.5. De acuerdo a la fuente de energía principal: | 41 |
| 6.8.6. De acuerdo al tipo de cámara de secado:..... | 42 |
| VII. Hipótesis | 43 |
| VIII. Diseño Metodológico..... | 44 |
| 8.1 Ubicación del área de estudio..... | 44 |
| 8.1.1 Área de conocimiento..... | 44 |
| 8.2 Tipo de estudio | 45 |
| 8.3 Universo y muestra..... | 46 |
| 8.3.1 El tipo de muestreo | 46 |
| 8.4 Matriz de Operacionalización de Variables..... | 47 |
| 8.5. Métodos técnicos e instrumentos para la recolección de datos de información. | 50 |
| 8.6 Procedimientos para la recolección de datos e información..... | 51 |
| 8.7 Plan de tabulación y análisis de datos e información | 56 |
| IX. Resultados. | 57 |
| X. Conclusiones..... | 86 |
| XI. Recomendaciones..... | 87 |
| Bibliografía..... | 88 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Secador solar SD300..... | 2 |
| Figura 2. Horno de secado de madera hibrido Solar-gas natural..... | 3 |
| Figura 3. Estructura de la cámara de secado | 4 |
| Figura 4. Espectro electromagnético. | 14 |
| Figura 5. Tipos de radiación..... | 15 |
| Figura 6. Anatomía de la madera..... | 18 |
| Figura 7. Magnitudes que dependen del aire..... | 28 |
| Figura 8. Tipos de secadores solares | 42 |
| Figura 9. Ubicación geográfica. | 44 |
| Figura 10. Regímenes de capa laminar..... | 61 |
| Figura 11. Obtención de datos de la carta psicométrica. | 64 |
| Figura 12. Analogía eléctrica en serie | 65 |
| Figura 13. Radiación solar en el año 2017. | 72 |
| Figura 14. Revestimiento del prototipo. | 95 |
| Figura 15. Prototipo concluido. | 95 |
| Figura 16. Mediciones de radiación solar..... | 95 |
| Figura 17. Pesaje de las muestras. | 95 |
| Figura 18. Muestras apilonadas. | 95 |
| Figura 19. Medidas de temperatura en el dispositivo térmico..... | 95 |
| Figura 20. Desechos biomásico en el dispositivo térmico. | 95 |
| Figura 21. Dispositivo térmico en funcionamiento. | 95 |
| Figura 22. Aplicación de la encuesta..... | 95 |
| Figura 23. Secador solar industrial ubicado en santa cruz Estelí | 95 |
| Figura 24. Caldera térmica para el aprovechamiento de los residuos biomásico..... | 95 |
| Figura 25. Madera apilonada en secador industrial..... | 95 |
| Figura 26. Ventilador para flujo de aire forzado. | 95 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Operacionalización de objetivo. | 47 |
| Tabla 2. Operacionalización de objetivo. | 48 |
| Tabla 3. Operacionalización de objetivo. | 49 |
| Tabla 4. Edad de los encuestados | 66 |
| Tabla 5. Nivel académico de las personas encuestadas | 67 |
| Tabla 6. Diferentes usos de la madera. | 68 |
| Tabla 7. Diferentes métodos de secado de la madera..... | 69 |
| Tabla 8. Implementación del secado industrial para la madera..... | 70 |
| Tabla 9. Pesos de las muestras. | 74 |
| Tabla 10. Humedad en las muestras en secado al aire libre. | 75 |
| Tabla 11. Secado sin extracción mecánica. | 77 |
| Tabla 12. Secado de las muestras sin extractor. | 78 |
| Tabla 13. Secado de las muestras sin extracción mecánica más caldera térmica..... | 79 |
| Tabla 14. Porcentaje de humedad de las muestras sin extracción mecánica más caldera térmica. | 80 |
| Tabla 15 Presupuesto de remodelación | 94 |

INDICE DE GRAFICA

| | |
|--|----|
| Grafica 1. Edad de la persona encuestada _____ | 67 |
| Grafica 2. Nivel académico _____ | 68 |
| Grafica 3. Uso que le da a la madera _____ | 69 |
| Grafica 4. Diferentes métodos de secado de la madera _____ | 70 |
| Grafica 5. Implementación de un secador _____ | 71 |
| Grafica 6. Radiación solar en el área de evaluación del prototipo. _____ | 73 |
| Grafica 7. Radiación solar en el área de evaluación del prototipo. _____ | 73 |
| Grafica 8. Pesos de las muestras y el tiempo de secado _____ | 75 |
| Grafica 9. Humedad en las muestras y el tiempo de secado. _____ | 76 |
| Grafica 10. Secado de las muestras sin extracción mecánica. _____ | 77 |
| Grafica 11. Humedad de las muestras sin extractor. _____ | 78 |
| Grafica 12. Pesos de las muestras sin extracción mecánica más caldera térmica. _____ | 80 |
| Grafica 13. Humedad de las muestras en el prototipo. _____ | 81 |
| Grafica 14. Secado de Cedro Macho a 45° _____ | 82 |
| Grafica 15. Secado de Cedro Macho a 45° con un flujo de renovación _____ | 83 |
| Grafica 16. Comparación de secado _____ | 83 |
| Grafica 17. Masas normalizadas _____ | 84 |
| Grafica 18. Masas Normalizadas a una temperatura de 55° _____ | 84 |
| Grafica 19. Comparación entre ambas temperaturas 45° y 55° _____ | 85 |

Resumen

La presente investigación tiene por objetivo general, evaluar los factores que inciden en el proceso de secado mediante un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de un dispositivo térmico para el tratamiento de secado de madera, durante el año 2017.

Haciendo trabajo de campo y de investigación logramos diseñarlo a escala de prototipo para someterlo a pruebas de funcionamiento, donde sus características físicas más importantes son la transferencia de calor por convección y conducción seguida de los movimientos de los fluidos como sus características y regímenes.

Una vez que se definió y se comprendió su funcionamiento de cómo opera internamente se analizaron los resultados obtenidos tanto de las muestras como las condiciones ambientales de radiación solar y concluimos esa etapa haciendo comparaciones con los resultados del prototipo y el secado en condiciones al aire libre o naturales.

También se investigó el impacto social del secado de la madera a base secadores solares por convección forzada en el municipio de Estelí.

Es una investigación del método experimental, y según su profundidad es descriptivo y correlacional, como también por el período y secuencia del estudio es transversal, según el análisis y alcance de los resultados el estudio es analítico. Para la aplicación de las encuestas se consideró una muestra de 15 personas, siendo este un muestreo teórico.

Dedicatoria

A Dios.

Por darnos la vida, la fortaleza, sabiduría y entendimiento para concluir con éxito nuestra carrera.

Dedico este proyecto investigación a mis padres **Gonzalo Meza** y **Geronima López**, a mi hermana **Karla Máyela Meza** y a mi tío **Bayardo Jesús Meza** por el apoyo incondicional brindada ya que ha sido la base de mi formación durante todo este tiempo.

Con amor, Gonzalo Meza.

Agradezco y dedico este proyecto de investigación a mi abuela **Martha Castillo** y a mi tía **María Victoria Ramírez Castillo** que han sido como mis dos madres brindándome su apoyo incondicional para poder lograr culminar mi carrera a mis padres por haberme dado la vida y a mis familiares.

Con amor, Luis Octavio.

Dedico este proyecto de investigación primeramente a mis padres **Martin Castillo Cano** y **Susana Castillo**, a mis hermanas **Sarah Castillo** y **Yamileck Castillo** por su apoyo incondicional en los momentos de dificultad y la motivación para poder culminar mis estudios profesionales.

Con amor, Zamir Castillo.

Al tutor:

MSc. Luis Lorenzo Fuentes Peralta por haber guiado con dedicación y sabiduría nuestro trabajo final.

Al cuerpo docente:

A quienes les debemos parte de nuestros conocimientos, gracias por prepararnos para un futuro competitivo como profesionales y como grandes personas.

A nuestros amigos:

Colegas de clase que con apoyo grupal hemos logrado llegar al final de nuestra carrera universitaria.

I. Introducción

La aplicación de los secadores solares para el secado de madera ha adquirido una gran importancia en la actualidad como una solución amigable con el medio ambiente y rentable para acelerar la producción y comercialización, como también ayudando a eliminar los microorganismos que producen mojos o deformaciones anatómicas de la madera, todo esto a bajo costo económico y energético.

Por ende de la gran importancia de esta tecnología alternativa en nuestra universidad Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM-Estelí) decidimos continuar con la construcción y remodelación para la posteriormente evaluar la funcionalidad de un secador solar por convección forzada y adición de calor por dispositivo térmico.

Dado que este es un diseño experimental que se puede implementar a gran escala en las industrias madereras de Estelí, cuyo grado de aceptación de este método de secado es bastante alto en la persona que trabajan con madera.

Siendo su funcionamiento principal el secado de madera a través de radiación solar donde el ahorro energético es la principal cualidad cuando se trabaja de esta manera, donde el aire caliente producto de la captación calorífica del colector avanza por las muestras apilonadas de forma uniforme absorbiendo la humedad higroscópica de la madera hasta ser absorbido por el extractor situado en la parte inferior del secador solar.

Como funcionamiento secundario de este prototipo esta la implementación de una caldera denominada así en esta investigación (dispositivo térmico externo), en el cual se aprovecha los desechos de aserríos o rastrojos orgánicos para ser quemados y generar calor en la cámara de secado, en este régimen de trabajo la importancia de los extractores es mover el fluido hacia la chimenea de la caldera y dirigirla hacia las muestras apilonadas para posteriormente ser extraído por el extractor en la parte inferior.

II. Antecedentes

Datos relevantes de algunos secadores solares para madera a nivel internacional:

Canadá

En el 2005 la empresa Wood-Mizer desarrolla el secador SD3000 con una capacidad de 3,000 pies, que ha sido diseñado para ser construido por el usuario, el cual incluye planos, instrucciones de ensamblaje, ventiladores, piezas especiales, y una lista de materiales para su construcción. Incorpora un colector solar pasivo, con tres paredes aisladas, piso de concreto, un techo de plástico transparente con un declive en ángulo de 45°, el cual se ubica hacia el sur en el hemisferio norte, y hacia el norte en el hemisferio sur.

La desventaja de este equipo de autoconstrucción es que sólo es para latitudes arriba de los 40° latitud norte (Suarez, 2010).



Figura 1. Secador solar SD300

Fuente: (Suarez, 2010)

Australia

La empresa Solar Dryers Australia (2007), desarrolló un secador híbrido (solar-gas natural) construido con estructura de aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado. Utiliza la energía de la combustión del gas natural para calentar el agua que pasa por los radiadores dentro de la cámara y solo utiliza la energía solar para calentar el agua por medio de colectores colocados en la parte superior del secador. Tiene una capacidad de 10 m³, requiere energía eléctrica de 240 V para operar los ventiladores y tiene una cámara de secado de forma rectangular, sin embargo, no presenta información sobre el tiempo de secado, así como en el funcionamiento de los dispositivos.



Figura 2. Horno de secado de madera híbrido Solar-gas natural.

Fuente: (Suarez, 2010)

Antecedentes nacionales:

En Nicaragua, el municipio de San Juan de Oriente, departamento de Masaya, fue inaugurado uno de los primeros secadores solares para madera que ayudará a fortalecer la competitividad de las micro, pequeñas y medianas empresas del sector artesanal.

El proyecto consta de un secador híbrido solar-biomásico de 30 metros cuadrados, con capacidad para dejar listos en cada ciclo alrededor de 15 metros cúbicos de madera.

Este proyecto es de gran importancia porque les permite crear una nueva fuente de empleo y actividad productiva que mejorará la calidad de los muebles que se fabrican en este municipio, en este sentido, al tener materia prima de calidad y el resultado del producto es mejor, además este proyecto les garantiza sostenibilidad y armonía con el medio ambiente.

Este proyecto fue desarrollado con colaboración de la Secretaría General del Sistema de Integración Centroamericana (SG-SICA) y la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), a través de su programa “Alianza en Energía y Ambiente con Centroamérica (AEA)” (MEM, 2013).

En Estelí se realizó un proyecto de cooperación internacional entre la Universidad Carlos III y la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Para abordar el estudio del secado solar se utilizaron un procedimiento experimental, para ello se construyó un secador de pruebas. En dicho secador se realizaron diferentes ensayos a fin de caracterizar su funcionamiento. Estos ensayos se agruparon en dos vías principales:

a) Caracterización tanto del colector térmico como del estado higrométrico de la cámara de secado haciendo uso de sensores de humedad, temperatura y gasto másico.

b) Medición de la velocidad de secado conseguida para diferentes geometrías y especies de madera.

El modelo construido fue un secador pasivo (movido por convección natural) y mixto, es decir, con captación de radiación directamente sobre la madera (directo) y también indirecto con captación sobre un colector solar térmico que proporciona una corriente de aire caliente (Ruiz, 2012).



Figura 3. Estructura de la cámara de secado

Fuente: (Ruiz, 2012)

III. Justificación

La investigación tiene como conveniencia el estudio del Rubro de la madera con un proceso de secado eficiente para que haya una industrialización, incrementando su atractivo comercial y constituyendo en una opción de actividad económica sostenible, bajo un manejo adecuado de los bosques.

Es de gran importancia para la sociedad por que a nivel municipal no se han realizados pocos estudios en tan relevante tema con la línea de investigación de energía solar térmica, en base a evaluación de secadores solares para madera, por lo cual se beneficiarían con el uso de secadores solares del tipo que se propone, los dueños de talleres de carpintería en general.

Con este estudio se pretende enriquecer los conocimientos a nivel personal y futuros estudiantes de la carrera en ingeniería en energías renovables, también a investigadores y personas particulares interesados en fomentar un proyecto para su negocio de procesamiento de madera.

Los secadores solares para madera son una alternativa económica a los hornos convencionales eléctricos, especialmente para operaciones pequeñas, como aficionados o artesanos, que se ahorraría dinero puesto, que no se consumiría grandes cantidades de energía.

Así mismo tienen un impacto ambiental positivo debido a que los desechos generados por talleres de carpintería, aserríos, ingenios arroceros, empresas de acopio de café, etc., pueden utilizar la combustión de estas y convertirlas en una fuente de calor que se integra a los secadores solares.

IV. Planteamiento del problema

4.1 Caracterización del Problema

En Nicaragua el secado de madera se hace mayormente en hornos eléctricos o al aire libre, bajo condiciones no controladas, ocasionando en algunos casos que la madera este semi verde o genere fisuras y aun así el gasto de energía suele ser muy alto y por lo tanto se incrementan los costos de producción, lo que afecta económicamente a la industria de la madera a nivel nacional.

Toda la problemática relacionada con el movimiento (expansión y contracción) de la madera puede ser acotada mediante tecnologías apropiadas.

Una gran parte de esa agua debe ser eliminada antes de transformar la madera útil para la elaboración de productos que puedan cumplir con los estándares de calidad requeridos por el mercado.

Uno de los mecanismos para lograr este objetivo es el secado técnico de la madera. Por tal motivo el secado es uno de los procesos más exigentes en la preparación de la madera para usos industrial y doméstico, de hecho, de su correcto desarrollo depende que este material ofrezca los requerimientos de estabilidad dimensional, cualidades de trabajo y resistencia al ataque biológico, que son características esenciales para su uso efectivo de decoraciones, muebles y la industria en su conjunto.

4.2 Delimitación del Problema

En el departamento de Estelí la mayoría de estas fábricas industriales cuentan con sus propios talleres de ebanistería que requiere de la fabricación de cajas para el empaque de los puros que se exportan fuera a distintos países como Estados Unidos y Europa quienes exigen estándares de alta calidad en los productos y su presentación.

En la mayoría de estos talleres hacen uso de energía eléctrica para el secado de la madera y en otros casos aprovechan las condiciones ambientales, para este proceso de secado, y ninguno de estos talleres a nivel municipal cuentan con la tecnología alternativa de secadores solares por la poca información y de igual manera están acostumbrados a estos métodos tradicionales lo que tiene como consecuencia el desaprovechamiento del recurso solar para implementarlo de forma sostenible.

Un aspecto importante a considerar es que no se realiza aprovechamiento de los desechos de la biomasa en estos talleres en los que se fabrican los productos a base de la madera tales lo son el aserrín de colocho, costoneras, que se tiran a los botaderos y no le dan un uso secundario a este sub producto como podría ser el uso para secado de la madera en hornos de flujo forzado y aprovechar el poder calorífico que estos posee haciendo un uso novedoso y sostenible que acelerara los tiempos de secado y de producción en conjunto con el aprovechamiento de la energía solar .

4.3 Formulación del Problema

A partir de la caracterización y delimitación del problema antes expuesta, se plantea la siguiente pregunta principal del presente estudio:

¿Cuáles son los factores que inciden en el proceso de secado de madera mediante un prototipo de secador solar por convección forzada en FAREM-Estelí, durante el año 2017?

4.4 Sistematización del problema

Las preguntas del proceso de sistematización correspondientes se presentan a continuación:

1. ¿Cuáles son las características los parámetros físicos de funcionamiento del prototipo de secador solar por convección forzada con y adición de calor por dispositivo térmico?
2. ¿De qué manera podríamos conocer el nivel de percepción de las personas que se dedican al proceso de secado de la madera para fines industriales?
3. ¿Cuál es la relación causa-efecto que determina el tiempo de secado necesario para reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un nivel apto para el uso?

V. Objetivos

5.1 Objetivo General

Evaluar los factores que inciden en el proceso de secado mediante un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de un dispositivo térmico para el tratamiento de secado de madera en FAREM-Estelí, durante el año 2017

5.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar los parámetros físicos de funcionamiento del prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor por dispositivo térmico.
2. Describir el nivel de percepción de las personas que se dedican al proceso de secado de la madera para fines industriales.
3. Determinar relación causa-efecto del tiempo de secado necesario para reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un nivel apto para el uso.

VI. Marco teórico

El marco teórico que se desarrollara a continuación permite conocer los conceptos básicos necesarios para el entendimiento del desarrollo de nuestra investigación, Está basado en aspectos conceptuales que implican los mecanismos de transferencia de calor hasta los procesos de secado de la madera.

6.1 Transferencia de calor

La transferencia es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor pretende no solo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esta transferencia (Holman, 1998).

6.1.1 Conducción

Cuando en un cuerpo existe una gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde la región de alta temperatura hacia la región de baja temperatura. De acuerdo a (Holman, 1998) indica que “energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura”.

$$\frac{q}{A} \sim \frac{dT}{dX}$$

Ecuación 1: Conducción de calor

$$q = -k_A \frac{dT}{dX}$$

Ecuación 2: Constante de proporcionalidad a la ecuación de Fourier

Donde q es el flujo de calor y dt/dx es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. La constante positiva K se denomina como la conductividad térmica del material,

el signo negativo es para satisfacer el segundo principio de la termodinámica; esto es, el calor debe fluir hacia las temperaturas decrecientes.

6.1.2 Convección:

La convección es otro mecanismo de transferencia de calor utilizada en distintas aplicaciones de ingeniería por lo que es bien conocido que una placa de metal caliente se enfriará más rápidamente cuando se coloca delante de un ventilador que cuando se expone al aire en calma. Se dice que el calor se ha cedido hacia fuera de la placa y al proceso se le llama transferencia de calor por convección. El término convección proporciona al lector una noción intuitiva en lo referente al proceso de transferencia de calor; sin embargo, esta noción intuitiva debe ampliarse para permitir que se llegue a un tratamiento analítico adecuado del problema (Holman, 1998).

$$\text{Ecuación 3:} \quad \frac{dT}{dt} = -K(T - T_a)$$

$$\text{Ecuación 4:} \quad \frac{dT}{dt} = K(T - T_a)$$

6.1.2.1 Convección forzada

Es el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida). (Revilla, Egliomar, & Hernandez, 2009)

6.1.2.2 Convección libre o natural

La transferencia de calor por convección natural ocurre cuando un cuerpo se coloca en fluido a una temperatura mayor o menor que la del cuerpo. Como resultado la diferencia de temperatura, el calor fluye entre el fluido y el cuerpo y ocasiona un cambio de densidad del fluido en la velocidad de la superficie. La diferencia de la densidad conduce a un flujo hacia abajo de fluido más pesado y aun flujo hacia arriba del más ligero. Si el movimiento del fluido se ocasiona únicamente por diferencia en densidad resultante de gradientes de

temperatura y no se asiste por una bomba o ventilador, al mecanismo de transferencia de calor asociado se le denomina convección natural. (Kreith, Manglik, & Bohn, 2011)

6.1.3 Transferencia de calor por radiación

Es otro mecanismo de transferencia de calor en el que según (Holman, 1998) “El calor puede transferirse a través de las zonas que exista un vacío perfecto en este punto el mecanismo es la radiación electromagnética que se propaga como resultado de una transferencia de temperatura a este fenómeno se le llama radiación térmica.”

La radiación térmica se encuentra en el intervalo que va desde 0.1 μm aproximadamente, hasta 100, μm , mientras que la porción de luz visible del espectro es muy estrecha, extendiéndose desde 0,35 μm aproximadamente, hasta 0,75 μm .

$$Eb = \sigma * T^4$$

Ecuación 5: Transferencia de calor por radiación.

Donde E_b es la energía radiada por unidad de tiempo y por unidad de área por el radiador ideal, y σ es la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es: $\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$.

6.2. Números adimensionales de transferencia de calor.

Son números que no tienen unidades físicas que lo definan y por lo tanto es un número puro. Los números adimensionales se definen como productos o cocientes de cantidades que sí tienen unidades de tal forma que todas éstas se simplifican. Dependiendo de su valor estos números tienen un significado físico que caracteriza unas determinadas propiedades para algunos sistemas.

6.2.1. Número de Nusselt (Nu): Representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si sólo existiese conducción.

$$\text{Ecuación 6: } Nu = \frac{hc*L}{K}$$

6.2.2. Número de Reynolds (Re): Permite caracterizar la naturaleza del flujo, es decir, si se trata de un flujo laminar, flujo transicional o de un flujo turbulento, además indica la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición de este estado dentro de una longitud determinada.

$$\text{Ecuación 7: } Re = \frac{u \cdot L}{\nu}$$

6.2.3. Número de Prandtl (Pr): es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica.

$$\text{Ecuación 8: } Pr = \frac{V}{\alpha} = \frac{\mu \cdot CP}{K}$$

6.2.4. Número de Rayleigh (Ra): Es un número adimensional asociado con la transferencia de calor en el interior del fluido. Cuando el número de Rayleigh está por debajo de un cierto valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por conducción; cuando está por encima del valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por convección.

$$\text{Ecuación 9: } Ra = Gr * Pr \frac{-g * \beta * \Delta T * L^3}{\nu * \alpha}$$

6.3. Radiación solar

Según (Villena, 2014) el Sol es una estrella enana amarilla. En sus regiones interiores es allí donde ocurren temperaturas de unos 20 millones de grados K necesarios para producir las reacciones nucleares que producen su energía.

Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. El Sol se comporta prácticamente como un Cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de unos 6000 K.

La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra, Su unidad es el W/m² (vatio por metro cuadrado).

6.3.1 Espectro Electromagnético

Según (Rodríguez García & Virgós Rovira, 1998) es el conjunto de frecuencias que contiene, y puede ser descrito o continuo. En principio todos los estudios sobre ondas luminosas se referían a las ondas correspondientes al espectro visible, comprendidas entre $4 \cdot 10^{-5}$ y $7,5 \cdot 10^{-5}$ cm.

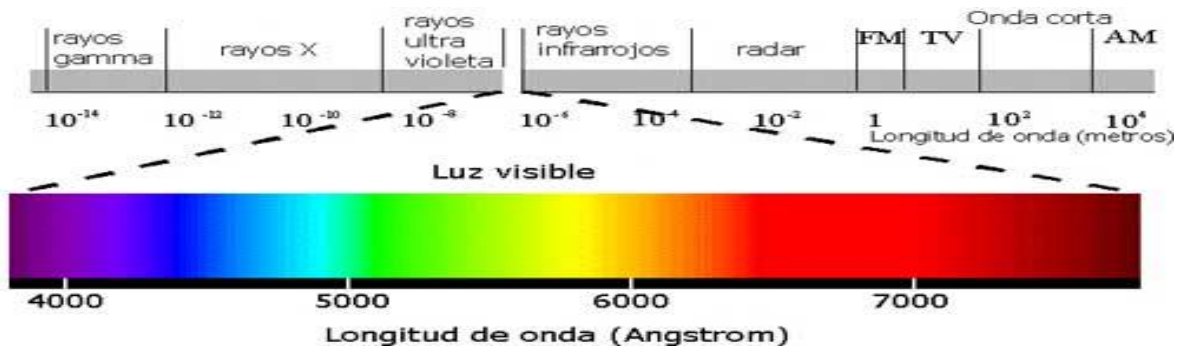


Figura 4. Espectro electromagnético.

Fuente: (García, 2011).

6.3.2. Tipos de radiación.

La radiación solar sufre ciertas transformaciones al incidir sobre la atmósfera.

6.3.2.1 Radiación solar extraterrestre

La Tierra se mueve en torno al Sol limitando el plano eclíptico. Y lo hace a una distancia media de $149,5 \cdot 10^6$ km, distancia que recibe el nombre de unidad astronómica (UA). Su órbita es ligeramente elíptica (variación de un 1,7 %), aunque deja al Sol situado en uno de sus focos y hace que esta distancia varíe desde las 1,017 UA (máximo llamado afelio) hasta las 0,983 UA (mínimo llamado perihelio) a lo largo del año. Aun así, la Tierra tiene otros movimientos de períodos mucho más largos. El eje de rotación terrestre rota, a la vez, describiendo un círculo como lo haría una peonza cuando está a punto de detenerse. Es el movimiento de precesión, con un período de 22.000 años. A la vez también varía su ángulo de declinación (concepto que veremos más adelante) con un período de 41.000 años. Y por último, la excentricidad de la órbita también varía, como si la órbita fuera elástica, con un período de 100.000 años. (Ortega Rodríguez, 1999)

6.3.2.2. Radiación directa:

La que se recibe directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es, por tanto, radiación directa.

6.3.2.3. La radiación difusa:

Es la que se recibe del Sol, después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro, aun de día, como sucede por ejemplo en la Luna. (Suarez, 2010).

6.3.2.4. Radiación terrestre

La radiación que llega a la Tierra al nivel extra-atmosférico, en superficie perpendicular y a una UA de distancia es una constante y toma un valor de 1.367 W/m^2 , como hemos visto anteriormente. Pero en el nivel terrestre y a efectos prácticos en el diseño de sistemas de aprovechamiento de la radiación solar, este valor se verá notablemente reducido, esencialmente por dos factores a tener en cuenta:

- a) Los fenómenos de absorción y dispersión de la energía radiante solar existentes en la atmósfera.
- b) La posición del Sol en el cielo, para una localización terrestre y momento determinados a lo largo del año. (Ortega Rodriguez, 1999)

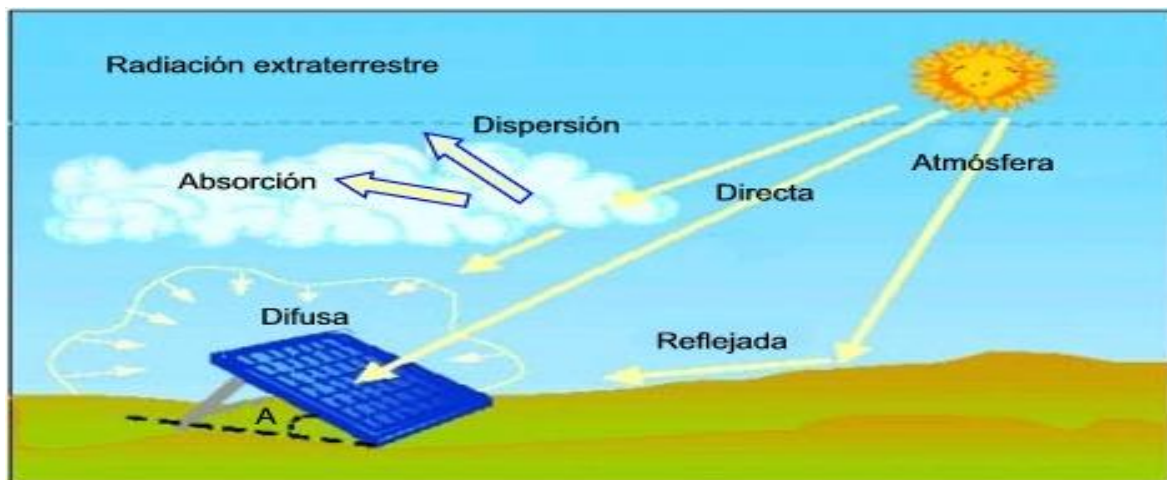


Figura 5. Tipos de radiación

Fuente: (Andrade, 2009)

6.3.3 Aprovechamiento de la energía solar.

El utilizar la energía solar para secado de madera es un método muy económico. El diseño de los secadores solares debe estar pensado con el fin de poder captar la mayor cantidad de energía solar, por lo que generalmente se diseñan con una inclinación que permite que los rayos solares incidan en el techo.

En el secado solar, la radiación de onda corta penetra la cubierta transparente, la que puede ser de vidrio o plástico, para llegar a la lámina absorbente, la que aumenta su temperatura y transmite el calor a la atmósfera dentro del horno, donde queda atrapado.

Existen pérdidas de calor por la absorción del vidrio y de las paredes del secador, las que aumentan a medida que aumenta la velocidad del viento dentro de la cámara. Se pueden aminorar las pérdidas con la utilización de vidrios dobles; también instalando ventiladores dentro del horno y recuperando el calor de los ductos de salida de aire. Además, se debe considerar una buena aislación, la que se puede hacer con lana de fibra de vidrio, paredes sólidas de ladrillo con aislamiento por espacio de aire o con espuma, dentro de los métodos más usados (Suarez, 2010).

6.4. Teoría del secado de madera.

En esta sección abordaremos los conceptos sobre el secado de madera que se utilizarán a lo largo del proyecto, los mecanismos internos que suceden en la madera durante el proceso y los factores que lo condicionan.

6.4.1 Anatomía de la madera.

La madera es un material vivo, y por lo tanto tiene una serie de características anatómicas que influyen notablemente en sus propiedades físicas como son:

6.4.1.1. La corteza muerta o exterior:

Su función es proteger al árbol de los cambios extremos de temperatura, sequía y agresiones mecánicas.

6.4.1.2. La corteza interior.

Realiza las funciones de conducción de la savia elaborada desde las hojas hasta aquellas zonas activas o de almacenaje.

6.4.1.3 Cambium.

Es una capa meristemática delgada que se encuentra entre la corteza interior y el tronco propiamente dicho. Esta capa produce corteza hacia el exterior y madera hacia el interior. La producción de madera y corteza sólo se da cuando el cambium está activo (primavera y verano).

Las diferencias en la actividad de esta capa es la que marca los ciclos vegetativos del árbol y forma los anillos de crecimiento. Ya que la madera formada durante primavera es más clara y menos densa que la formada en verano.

Finalmente en el interior del tronco encontramos tres zonas diferentes.

6.4.1.4. Albura

Es generalmente la parte de color más claro del árbol. Está formada por células vivas encargadas de las funciones de conductoras de savia y del almacenamiento de elementos nutrientes.

6.4.1.5. Duramen

Es la parte del tronco encargada del soporte estructural. Está formado por células muertas y es la parte de mayor grosor del árbol, donde el duramen representa la zona más oscura del interior del tronco. La madera que pertenece al duramen suele ser más oscura y densa, debido fundamentalmente a la cantidad de extractivos (minerales depositados) presentes en su interior, lo cual aumenta notablemente su durabilidad.

6.4.1.6. Médula

Se encuentra en el centro del tronco, es un cilindro con un diámetro aproximado de 1,25 cm formado por un tejido blando alrededor del cual se formó el primer anillo de crecimiento.

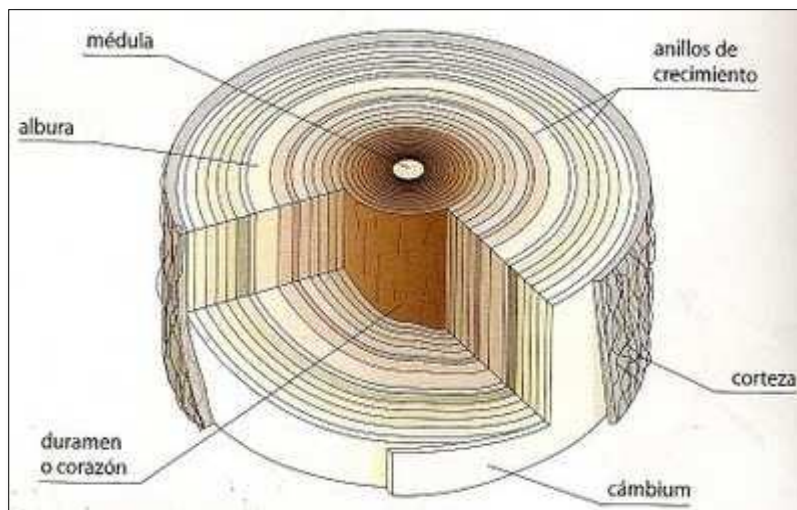


Figura 6. Anatomía de la madera

Fuente: Fuente especificada no válida.

6.4.2. Propiedades generales de la madera.

6.4.2.1. Anisotropía

La madera es un material natural que presenta una fuerte variación de sus propiedades en función de la dirección escogida. Dicha variación es especialmente importante cuando la madera se contrae debido al proceso de secado.

6.4.2.2. Cambios dimensionales: hinchazón y merma

La contracción o merma es un fenómeno por el cual la madera disminuye su tamaño al secarse. Esto ocurre sólo cuando la humedad disminuye por debajo del punto de saturación de las fibras (momento en el cual se elimina el agua ligada a la madera, ya que antes de llegar a este punto, se está eliminando el agua libre presente en el interior de las células y no el agua unida a las mismas, por tanto las células no disminuyen de

tamaño. A partir de ese punto se elimina el agua ligada a las paredes celulares, disminuyendo el tamaño de éstas.

La anisotropía de la madera hace que la contracción no sea uniforme, mermando mucho en dirección tangencial (tangente a los anillos de crecimiento) y radial (perpendicular a los anillos de crecimiento), sin embargo la merma en la dirección longitudinal (siguiendo el eje del árbol) es casi despreciable.

De la misma forma que la madera merma al secarse, cuando gana humedad se produce el fenómeno contrario, hinchándose y aumentando su tamaño. Dicha hinchazón se produce hasta alcanzar el punto de saturación de las fibras. A partir de ese momento la ganancia de humedad aumentará el peso pero no cambiara las dimensiones de la madera.

Desde el punto de vista del secado la contracción de la madera es un factor de gran importancia en lo que se refiere a la calidad del producto final, si la madera no está convenientemente secada pueden darse cambios dimensionales en las piezas finales, creando multitud de problemas.

Además, si el proceso de secado no se realiza convenientemente, las inevitables tensiones internas generadas durante una contracción desigual pueden ser superiores a la resistencia mecánica de la madera, produciéndose grietas y otros defectos.

6.4.2.3. Densidad

A diferencia de la mayoría de los materiales de construcción, la madera es un cuerpo higroscópico en el que la masa y el volumen varían continuamente. Por este motivo se definen varios tipos de humedad:

6.4.2.3.1. Densidad anhidra:

Es la densidad que presenta la madera completamente seca, suele ser un dato científico sin mucha utilidad en el secado.

6.4.2.3.2. Densidad normal

Es la densidad que presenta la madera con un 12% de humedad. Es el dato empleado cuando se quiere comparar las densidades de las diferentes especies.

6.4.2.3.3. Densidad

La densidad tiene gran importancia en el proceso de secado, debido a que una madera densa tiene paredes celulares más gruesas y numerosas que una madera poco densa. Por lo tanto, los obstáculos que se encuentra el agua en su camino al exterior de la pieza son mayores en una madera poco densa. Además, hay que tener en cuenta que la cantidad de agua en peso que hay que extraer de una madera más densa es mayor que en una poco densa a igualdad de humedades iniciales y finales.

Así que por norma general una madera más densa será más difícil de secar. Sólo el caso de secado a alta temperatura es una excepción, donde la densidad no tiene mucha influencia **Fuente especificada no válida..**

6.4.3. Estados en las que se encuentra el agua en el interior de la madera.

El agua es el fluido de transporte que emplean las plantas para su alimentación, unido a la higroscopicidad natural de la madera, hace que el agua siempre esté presente en el interior de la pieza, aun después de su secado. El nivel de humedad que alcanza la madera cuando está en equilibrio con el ambiente se conoce como humedad de equilibrio higroscópico, y depende de la especie de madera y las condiciones de ambientales (humedad relativa y temperatura). Así, si secamos una pieza por debajo de la humedad de equilibrio higroscópico, al exponerla al ambiente absorberá la humedad del aire y con el tiempo alcanzara la humedad de equilibrio higroscópico.

La actividad transportadora se da fundamentalmente en la albura, donde se forman canales ininterrumpidos desde las raíces a las hojas. Cuando las células pierden su función conductora (duramen), el agua contenida en el interior de las células puede ser parcial o totalmente sustituida por vapor de agua. A su vez las paredes celulares de la madera tienen una tendencia natural a absorber el agua, permaneciendo totalmente saturada en ella.

Por tanto en la madera recién cortada nos podemos encontrar agua en tres formas distintas:

En forma líquida, rellenando total o parcialmente el interior de las células conductoras.

En forma de vapor, en el interior de las células no conductoras.

En forma de agua ligada, en el interior de la pared celular. El intercambio de esa agua con el ambiente se realiza mediante procesos de adsorción (fijado del agua a la pared celular) y desorción (eliminación de esa agua durante el proceso de secado).

El agua contenida en el interior de las células, tanto en forma líquida como en forma de vapor, es conocida como agua libre. El agua libre es la primera en desaparecer, por tanto la presencia de agua libre en la madera sólo se da cuando el contenido de humedad de la madera es superior al del punto de saturación de las fibras, un valor de referencia para este punto es de un 30% en peso de humedad para todas las especies de madera.

Cuando la madera alcanza la humedad de equilibrio higroscópico está en un proceso constante de intercambio de agua con el ambiente, el agua ligada a las paredes celulares aumenta y disminuye constantemente mediante fenómenos de torsión.

6.4.4. Métodos industriales para determinar la cantidad de humedad en la madera:

6.4.4.1. Por medidas eléctricas: Es un método basado en la variación de la conductividad eléctrica de la madera con la humedad. Proporciona medidas rápidas y fiables de la humedad en un rango de 7-25%. Existen dos grandes familias: resistivos y capacitivos.

6.4.4.2. Desecación en estufa a $105 \pm 2^\circ$: Este método es muy exacto pero más lento y se suele utilizar para confirmar los resultados obtenidos por las medidas eléctricas. Nosotros utilizaremos este método para determinar el contenido de humedad de la madera utilizada en todos los ensayos. Los detalles serán mostrados en el apartado de humedad de la madera utilizada en todos los ensayos.

6.4.5. Humedad de equilibrio higroscópico

Cuando la madera verde entra en contacto con las condiciones atmosféricas una vez es abatido el árbol, su contenido de humedad disminuye hasta que es lo suficientemente bajo como para estar en equilibrio con el ambiente. Este nivel de humedad se conoce como Humedad de Equilibrio Higroscópico y es una propiedad de gran importancia en

el sistema agua madera, ya que determina la humedad final de la madera en un ambiente dado.

6.4.5.1. Esta temperatura depende de múltiples variables, a saber:

- La especie de madera
- La localización del tronco (albura y duramen)
- Presencia de anomalías de crecimiento (madera de reacción)
- Las sollicitaciones externas a las que está sometida (la humedad de equilibrio disminuye con los esfuerzos de compresión y aumenta con los de tracción)

Sin embargo los más importantes se detallan a continuación:

6.4.5.2. Influencia de la humedad relativa del medio

Este es el factor más importante. Existen curvas que relacionan la humedad de equilibrio higroscópico con la humedad relativa a temperatura constante, llamadas isotermas de adsorción. Al disminuir la humedad relativa del ambiente disminuiríamos la humedad de equilibrio, dadas las condiciones normales de humedad y temperatura de la localidad de Estelí, unos 22°C y 70% humedad relativa, las humedades de equilibrio higroscópico en Estelí rondarían el 13% de humedad (Galvez, 2011).

6.4.5.3. Influencia de la temperatura de secado

Al aumentar la temperatura tiene el efecto de disminuir la humedad de equilibrio higroscópico. Sin embargo exponer a la madera altas temperaturas durante periodos prolongados de tiempo provoca un descenso permanente de la higroscopicidad de la madera. La magnitud de este fenómeno depende del nivel de temperatura del proceso de secado y de la duración del mismo.

Este fenómeno se asocia con una parcial descomposición de la pared celular, encargada de adsorber el agua. Esto tiene consecuencias directas en las propiedades de la madera seca.

Por un lado esta disminución de la higroscopicidad natural de la madera hace que la influencia del ambiente en la humedad de la madera sea menor, lo que es deseable debido a que la variación de humedad en la madera trae consigo variaciones del volumen

de la misma (hinchazón y merma), lo que afecta a los objetos y estructuras hechas de madera.

Como contrapartida nos encontramos con una ligera degradación de sus propiedades mecánicas.

6.4.5.4 Historia previa del material o histéresis

En el sistema agua madera se observa el proceso de histéresis, es decir, que la humedad de equilibrio en un proceso de desorción es mayor que en uno de adsorción posterior a los mismos niveles de temperatura y humedad relativa.

Este fenómeno es especialmente patente cuando se hace uso de las isotermas de adsorción correspondientes a la desorción inicial (desde el estado verde) y la de adsorción inicial, una vez la madera está seca.

Normalmente la magnitud de este efecto se expresa mediante la fracción A/D, siendo A la humedad de equilibrio durante el proceso de adsorción y D la correspondiente al proceso de desorción a la misma temperatura y humedad relativa (Galvez, 2011).

Dicha fracción depende de múltiples factores (especie, número de ciclos, presencia de extractivo, etc.) El factor más importante es la humedad relativa.

La teoría más extendida que explica este fenómeno establece que durante el proceso de desorción inicial las moléculas de celulosa que forman las paredes celulares se acercan entre si y se unen mediante puentes de hidrógeno. Esto representa una traba interna para la hinchazón asociada al posterior proceso de adsorción. Es como si la pieza estuviera sometida a compresión.

Controlar y reducir en lo posible la histéresis de la madera es fundamental para mantener la estabilidad dimensional de la misma.

6.4.5.5. Punto de saturación de las fibras

El punto de saturación de las fibras corresponde al máximo valor de humedad de equilibrio higroscópico, el cual se da cuando la atmosfera circundante está saturada en agua. En estas circunstancias no existe agua libre, pero las paredes celulares están

completamente saturadas de agua. Su valor es de difícil determinación, no obstante se considera un valor aproximado del 30% para todas las especies.

Con respecto al proceso de secado este punto tiene gran trascendencia debido a que:

Una vez alcanzado este punto se produce una merma de las dimensiones y un aumento de las propiedades mecánicas, este aumento de propiedades se traduce en la posibilidad de realizar un secado más intenso.

El consumo de energía del proceso de secado por unidad de agua eliminada aumenta significativamente, debido que la evaporación del agua hay que sumar la energía consumida por el proceso de desorción, la cual aumenta exponencialmente al disminuir la humedad de la madera (Galvez, 2011).

6.5. Mecanismos de secado

El secado de madera es un fenómeno consistente en la eliminación superficial del agua al tiempo que esta migra desde el interior de la pieza hasta la superficie de la misma.

En las etapas iniciales se crea un frente de evaporación en la superficie exterior de la pieza. El agua migra desde el interior en forma líquida hasta la superficie donde se evapora. Dicho movimiento está alimentado por la tensión superficial del agua. Conforme avanza el proceso, el frente de evaporación que antes estaba en la superficie pasa al interior de la pieza, migrando el agua hasta la superficie en forma de vapor, mediante un fenómeno que sigue las leyes de la difusión. Dicho frente va penetrando en la pieza hasta que llega al centro, momento en el cual toda el agua libre se ha eliminado de la pieza.

Simultáneamente al avance de este frente de evaporación, las capas superficiales llegan al punto de saturación de las fibras. Al rebasar este punto empieza el proceso de desorción del agua ligada, dicho agua se desprende de las paredes celulares en forma de vapor y avanza hacia el exterior por un proceso de difusión.

Finalmente el fenómeno termina al alcanzarse la humedad de equilibrio higroscópico en toda la pieza.

A la vista de lo antes expuesto, el proceso de secado se puede dividir en tres partes fundamentales en función de los procesos internos que suceden.

6.5.1. Primera Fase:

En esta fase el agua libre se encuentra en toda la pieza, incluida su superficie. Esta fase sólo se da cuando el contenido de humedad es elevado (madera verde). El agua presente en la superficie está en contacto directo con el agente secante (en nuestro caso aire húmedo) y se evapora como si estuviera en una superficie libre.

Durante esta fase del secado el frente de evaporación se mantiene en la superficie de la pieza, manteniéndose está a la temperatura de bulbo húmedo. Mientras tanto se realiza un aporte continuo de agua líquida desde el interior de la pieza. Dicho aporte tiene como motor las fuerzas capilares, que hacen fluir el agua a través de los elementos anatómicos presentes para este fin (radios leñosos y puntiagudos de paso). Esta fase suele ser muy corta y disminuye tan sólo unos puntos la humedad de la madera totalmente verde, debido a que el ritmo de evaporación suele ser mayor que el movimiento del agua libre.

Esta fase se caracteriza por un ritmo de secado elevado y constante, ya que depende exclusivamente de las condiciones del aire externo.

6.5.2. Segunda fase:

Cuando el ritmo de evaporación en la superficie es superior al aporte de agua desde el interior de la pieza (lo que acaba sucediendo tarde o temprano) Se rompen los canales de aporte de agua líquida y la superficie de la pieza acaba por eliminar toda el agua libre. A partir de este momento el frente de evaporación comienza a penetrar en el interior de la pieza. Por lo tanto la superficie de la pieza comienza a aumentar su temperatura por encima de la temperatura de bulbo húmedo.

Este frente de evaporación interno ofrece una menor superficie de evaporación y, por tanto, un ritmo de secado notablemente inferior.

En esta fase continúa hasta que el frente de evaporación alcanza el interior de la pieza, momento en el cual se ha eliminado toda el agua libre de la pieza.

La duración y la velocidad de secado de las fases primera y segunda están determinadas por el flujo de agua libre dentro de la madera. Dicho flujo viene dado por las fuerzas capilares que son generadas por los meniscos creados en las interfaces vapor-agua que aparecen en el interior de las células al eliminarse el agua líquida. Además la presencia de burbujas de aire o vapor en el interior de las células (lo que se da en la mayoría de los casos salvo en maderas muy impermeables) acelera este movimiento, ya que al aumentar la temperatura se expanden empujando el agua fuera de la célula.

En las maderas impermeables el aporte de agua es pequeño y la superficie alcanzará con rapidez el punto de saturación de las fibras, internándose el frente de evaporación rápidamente en el interior de la pieza (Galvez, 2011).

Esta fase se caracteriza por un ritmo de secado decreciente. Esto es debido a que conforme el frente de evaporación va penetrando el aporte de la difusión como motor del movimiento de la humedad aumenta.

El vapor, cuando difunde a través de la pieza no le sirven de ayuda los radios leñosos ni las pateaduras de paso, pensadas para el transporte de líquidos. Por lo tanto, el vapor atraviesa las paredes celulares de la madera cuando difunde hacia el exterior y el ritmo de la difusión disminuirá al aumentar la cantidad de paredes celulares que debe atravesar. Así, según se introduce el frente de evaporación en la pieza disminuirá el ritmo de secado.

6.5.3. Tercera fase:

Esta fase comienza cuando la pieza alcanza el punto de saturación de las fibras en la pieza, no quedando agua libre en ella. En este momento el agua es extraída de las paredes celulares mediante un proceso de desorción y el transporte de vapor de agua está regido por las leyes de la difusión.

El proceso de difusión es debido a dos gradientes presentes en la pieza:

Gradiente de humedad en la pieza: al estar la superficie más seca que el interior, el agua tiende a migrar de las zonas húmedas a las secas favoreciendo la extracción de agua de la misma.

El gradiente de temperatura en la madera la cual es un material aislante, por lo que el interior de la pieza está a una temperatura inferior que la superficie. La humedad tiende a migrar de las zonas más calientes a las frías, por lo tanto este gradiente tiende a introducir el agua en el interior de la pieza, entorpeciendo el proceso.

A la vista de que estos fenómenos están en contraposición, un buen proceso de secado debe asegurar que su balance sea positivo o que trabajen en la misma dirección, calentando más el interior que el exterior de la pieza como ocurre en el secado por radiofrecuencia (Mendez, 2012).

Esta fase también se caracteriza por un ritmo de secado decreciente, debido a que en esta etapa sólo hace acto de presencia el agua ligada. Según disminuye el contenido de humedad el coeficiente de difusión disminuye, por lo tanto el ritmo de secado será decreciente hasta llegar a cero al alcanzar el punto de saturación de las fibras.

El coeficiente de difusión aumenta exponencialmente con la temperatura razón por la cual al disminuir la humedad por debajo del punto de saturación de las fibras, e ir ralentizándose el proceso de difusión, es conveniente elevar gradualmente la temperatura de proceso.

6.6. Factores que determinan el secado

Seguidamente se analizarán los principales factores que intervienen en el secado, los separaremos en aquellos que dependen de la madera y los que dependen del aire.

6.6.1. Magnitudes o factores que dependen del aire

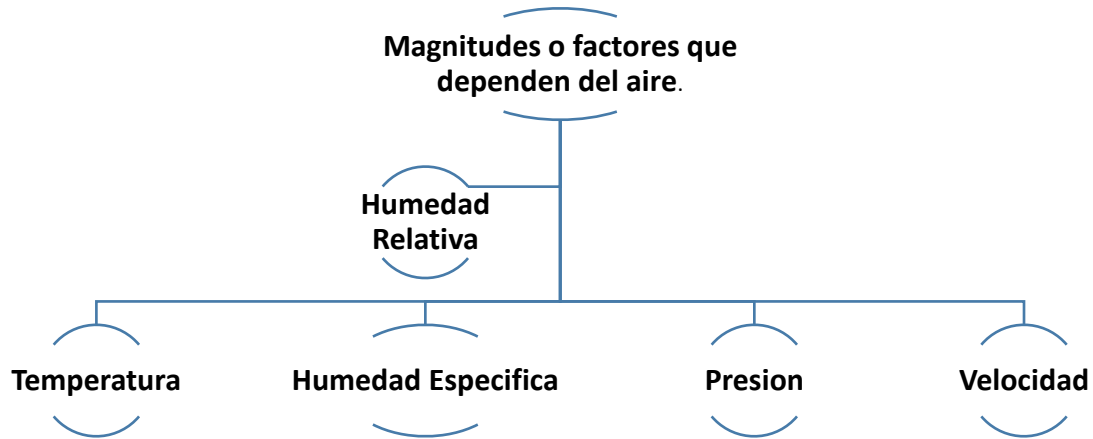


Figura 7. Magnitudes que dependen del aire.

Fuente: Elaboración propia.

6.6.2. Temperatura

La temperatura del aire tiene gran importancia en todas las etapas del proceso de secado. Un aumento de temperatura favorece el movimiento del agua libre y aumenta notablemente el ritmo de difusión de humedad.

6.6.3. Humedad relativa

Muy importante durante las etapas primera y del proceso de secado, donde se da un proceso de evaporación superficial. Es esta etapa es conveniente mantener la madera en un ambiente con la humedad relativa lo suficientemente elevado para evitar la aparición de grietas superficiales.

6.6.4. Velocidad

La velocidad del aire es importante durante las primeras etapas del proceso, donde es la evaporación del agua libre la que rige el proceso de secado. Aquí cuanto mayor sea la velocidad del aire (y por tanto el coeficiente de convección) más rápido será el secado.

6.6.5. Presión

Para un estado higrotérmico dado, la velocidad de circulación de la humedad en la madera aumenta conforme disminuye la presión, así a una presión de 80 mbar la velocidad de circulación de humedad es 5 veces mayor (Mendez, 2012).

6.6.6. Factores que dependen del tipo la madera

6.6.6.1. La dirección considerada

La madera es un material anisotrópico, así que tanto el movimiento del agua libre como la difusión de humedad variarán en función de la dirección considerada. La circulación es mayor en la dirección longitudinal que en la transversal, siendo esta diferencia tanto mayor como cuanto más impermeable es la madera.

Este fenómeno es de gran importancia en el secado, ya que si no se toman oportunas medidas, las testas (los cortes realizados en las tablas en dirección transversal) se secan demasiado rápido, lo que puede provocar la aparición de grietas.

6.6.6.2. La densidad

La densidad tiene gran influencia en el ritmo de secado. El motivo es que al movimiento por difusión del vapor de agua no le sirven de ayuda las estructuras anatómicas pensadas para la circulación de flujos de agua, por lo tanto difunde a través de las paredes celulares. Al aumentar la densidad, el espesor y cantidad de paredes celulares que el vapor debe atravesar aumenta, por lo tanto el ritmo de secado disminuirá.

Además hay que tener en cuenta el hecho de que una madera más densa contiene más cantidad de agua que una ligera a igualdad de humedad. Por lo tanto la cantidad de tiempo y de energía necesaria para secarla será mayor.

En la primera etapa de secado, la velocidad será independiente de la densidad de la pieza.

6.6.6.3. Espesor

El espesor tiene una influencia similar a la densidad en cuanto a que una tabla más gruesa contiene más agua que una fina a igualdad de humedad, anchura y longitud. Además, al igual que ocurre en una madera densa, la cantidad de paredes celulares que el vapor debe atravesar conforme el frente de evaporación penetra en la pieza aumenta con el espesor.

A partir del momento en el que la pieza alcanza el punto de saturación de las fibras y el movimiento de agua es por difusión el tiempo de secado es directamente proporcional al cuadrado del espesor.

6.6.6.4. El contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera es un factor determinante en el ritmo de secado a lo largo de todo el proceso. El ritmo de secado es máximo en la primera etapa, disminuyendo progresivamente en las otras dos.

Que la madera se encuentre en una etapa o en otra depende fuertemente del contenido de humedad de la misma. Ya que en las dos primeras necesita la presencia de agua libre, el ritmo de difusión depende del contenido de humedad. Por lo tanto el ritmo de secado disminuye conforme disminuye el contenido de humedad, llegando a cero en la humedad de equilibrio higroscópico.

6.6.7. Defectos que aparecen durante el secado

La madera al secarse se contrae, teniendo en cuenta que la madera es un material anisotrópico, se contrae preferentemente en las direcciones tangencial y radial y muy poco en la longitudinal. Este fenómeno genera en el interior de la pieza fuertes esfuerzos que terminan por causar roturas. Un secado sea de calidad es un factor fundamental ya que si al estropeamos las piezas de madera al secarla se vuelven inservibles. Esto es causante de numerosos problemas durante el secado y de cuantiosas pérdidas económicas (Mendez, 2012).

6.6.7.1. Defectos debido a un mal proceso de secado:

Tipos Grietas

6.6.7.2. Grietas superficiales: Aparecen al principio del proceso de secado, son debidas a altas tensiones causadas por grandes diferencias de humedad entre la superficie y el interior de las piezas.

6.6.7.3. Grietas internas: se desarrollan al final del proceso de secado en el núcleo de la madera, La causa es que la contracción del núcleo estado tensional al que estuvieron sometidas, Por un secado demasiado intenso al principio del proceso.

6.6.7.4. Grietas de Testa: Son grietas que se extienden desde las testas de las tablas hacia el interior, Suelen tener pocos centímetros de longitud, que las diferencia de las grietas de medula, que suelen atravesar toda la pieza.

6.6.7.5. Colapso: Es un fenómeno ocurrido durante las primeras etapas de secado. Si la madera es muy impermeable y el secado inicial es muy intenso los valores de tensión superficial generados en los lúmenes celulares pueden ser demasiado grandes, hasta el punto de provocar el aplastamiento de las células y provocar el colapso de la madera.

6.6.7.6. Deformaciones: Si la madera es apilada de manera incorrecta puede manifestarse la “deformación por rastrel” donde las tablas se curvan describiendo una ondulación. (Ruiz, 2012)

6.7. Tecnologías utilizadas para el secado de la madera.

6.7.1. Secado por convección:

La mayoría de las instalaciones industriales utilizan este método, ya que por otra parte es el que mejor reproduce las condiciones naturales de secado y el que menos problemas técnicos presenta. El aire actúa como agente secante aportando la energía necesaria y transportando el vapor de agua.

El secado solar se puede englobar dentro de esta categoría, pero debido a la naturaleza del proyecto describiremos ese método en su propio apartado (Duffie & Beckman, 2009).

Como sabemos en el proceso de convección desde una pared sólida a un fluido está determinado por la ecuación del flujo de calor de Newton:

$$\text{Ecuación 10: } q = h * (T_s - T_\infty)$$

Por lo tanto es fundamental mantener un valor del gradiente térmico ($T_s - T_\infty$) elevado para mantener una transferencia de calor aceptable. Esto es fácil durante las primeras etapas del secado ya que por el proceso de evaporación superficial, la temperatura de la superficie permanece relativamente baja.

Sin embargo conforme avanza el proceso la humedad va quedando concentrada en el centro de la pieza y la temperatura superficial aumenta, lo cual obliga a aumentar la del aire para mantener una transmisión de calor aceptable (Duffie & Beckman, 2009).

6.7.1.2. Secado por convección al aire libre:

Este es el método más antiguo y sencillo de secado, que lleva practicándose desde la antigüedad. Actualmente una gran proporción de madera en el mundo se seca total o parcialmente al aire libre.

El método consiste en apilar la madera recién aserrada en pilas ubicadas a la intemperie o, preferentemente, bajo cobertizos que la protejan de la lluvia.

La forma de realizar el apilado es fundamental para realizar un secado correcto, ya que hay que conseguir una buena circulación del aire a través de la pila.

La circulación horizontal se consigue separando las capas de madera entre sí mediante listones, la vertical separando las tablas que forman cada capa entre 1 y 6 centímetros. En ocasiones también se deja un espacio vacío en el interior con forma de chimenea para mejorar el flujo.

El secado al aire libre tiene ciertas ventajas, como la reducción de defectos en la madera debido al ritmo lento de secado o su bajo coste. Sin embargo también tiene inconvenientes, a saber:

- La creación de fuertes inmovilizados de madera debido a que el ritmo de secado es muy lento. Dicho ritmo depende de las condiciones ambientales (tales como temperatura y humedad relativa) y de la especie de madera a secar, pero puede oscilar entre 2 y 5 meses para obtener un 20% de humedad desde su estado verde.
- La imposibilidad de disminuir del 14-16% de contenido en humedad, lo que imposibilita el uso de la madera para su uso en interior (W.Nutsch, 2000).

En Nicaragua estos problema se agravan debido a su elevada humedad ambiental, siendo muy difícil lograr secados por debajo del 20-22% de contenido en humedad aún después de muchos meses.

Además se pierde parte de la madera debido al deterioro de la madera por el ataque de hongos e insectos.

6.7.1.3. Secado en cámara

A comienzos del siglo XX los industriales se dieron cuenta de las limitaciones que tenía el secado al aire libre, por lo que desarrollaron métodos de secado en cámaras que permitiese utilizar aire a temperaturas más elevadas.

Después de los malos resultados iniciales que obtuvieron al hacer uso simplemente de aire caliente, se dieron cuenta de que era necesario regular las condiciones higrométricas dentro de la cámara de secado dando lugar a los métodos que se describen a continuación:

6.7.1.4. Secado a temperatura intermedia

Es lo que se entiende por secado tradicional o convencional, el método consiste en una vez apilada la madera es introducida en la cámara de secado, donde se expone la pila a una corriente de aire a una humedad relativa controlada (entre el 40 y el 85%) y a una temperatura de entre 45° y 85° C.

El aire al entrar en contacto con la madera se enfría y se carga de humedad, siendo seguidamente expulsado al exterior

Los secaderos industriales suelen contar con los siguientes elementos:

- Cámara de secado: se trata de una caja convenientemente aislada y estanca al vapor de agua, donde se introduce la pila de madera.

- Sistema de circulación de aire: Se trata normalmente de sistemas de circulación forzada que han de ser calculados cuidadosamente a fin de conseguir una circulación óptima. El rendimiento del proceso y la calidad del secado dependen en gran medida de este factor.

- Dispositivos de acondicionamiento: son los sistemas encargados de regular las condiciones térmicas e higrométricas dentro de la cámara de secado. Están compuestos por calefactores e humidificadores que elevan la temperatura y humedad del aire hasta los valores necesarios para producir un secado correcto. Dichos sistemas están a su vez controlados por termostatos y humidostatos situados a la entrada de aire de la pila de madera (Hall & Witte, 1998).

Los valores de humedad y temperatura óptimos dependen de la etapa del proceso de secado en la que nos encontremos, siendo necesario por tanto medir continuamente la humedad de la pila de madera mediante:

a) Xilómetros de resistencia: instrumentos que determinan la humedad de la madera mediante la medida de su resistencia eléctrica. Son precisos y ofrecen valores continuos para la regulación automática, pero su uso está restringido a humedades mayores del 25%.

b) Testigo: piezas de madera de las que se conoce su peso anhidro y, por tanto, su contenido en humedad. Este método es válido para cualquier contenido en humedad.

Este método de secado tiene múltiples ventajas, aumenta la calidad del secado, se reduce de forma importante el inmovilizado de madera debido a la enorme reducción del tiempo de secado, que pasa de meses a días o, como mucho, semanas.

También hay que tener en cuenta que el secado artificial permite regular el ritmo de secado para adaptarse a la demanda de madera o al ritmo de trabajo que haya en la etapa de transformación de la madera. El precio de estas mejoras es el aumento del coste del secado. Debido a un aumento del coste de las instalaciones y a un elevado consumo de energía (Vignote Peña & Martínez Rojas, 2006).

6.7.1.5. Secado baja temperatura: Pre secaderos

Éste es un escalón tecnológico intermedio entre el secado al aire libre y el secado industrial descrito en el apartado anterior.

Consisten en grandes cámaras de secado con una ligera circulación de aire y poco climatizadas. Se diferencia del anterior método en que no hay una regulación fina de la humedad y que la temperatura de trabajo es muy reducida.

La madera recién aserrada es introducida en enormes naves industriales con paredes provistas de un buen aislamiento e impermeables al vapor de agua (Conde & Fernandez Golfín, 2007).

El equipo necesario consiste en:

- Ventiladores que consigan una circulación de aire suficiente para permitir el intercambio térmico entre la madera y el aire. (En ocasiones se puede prescindir de ventiladores y hacer uso de la propia convección natural del aire).

- Calefactores que mantengan una temperatura interior del orden de 30-33°C

- Sistemas de expulsión de aire humedad que mantengan la humedad relativa del ambiente entre el 75% y 80%.

Este método de secado permite obtener maderas con un contenido de humedad del 25% en tiempos del orden de semanas, frente a los meses que llevaría si se secaran al aire libre.

Debido a la baja temperatura a la que se trabaja es posible mezclar diferentes especies y espesores, así que las cámaras de procesamiento pueden funcionar como almacenes, donde la madera espera a su secado final. Además la calidad del secado es muy superior debido a las suaves condiciones empleadas.

El mayor inconveniente de este sistema es la fuerte inversión inicial necesaria (Oñate, 2005)

6.7.1.6. Secado a alta temperatura

Dado que al aumentar las temperaturas de trabajo se reduce el tiempo de secado, es normal querer lograr temperaturas lo más altas posible.

Lo primero que hay que tener en cuenta es que los mecanismos de secado son distintos cuando se trabaja a temperaturas superiores al punto de ebullición del agua. En este caso, al principio del secado se crea una ligera sobrepresión al evaporarse el agua libre (Conde & Fernandez Golfín, 2007).

Esta presión impulsa un flujo de vapor desde la línea humedad hasta la superficie, y dicho flujo es favorecido por los radios leñosos y las puntea duras de paso, a diferencia de los secados a temperatura inferior, donde vimos que dichas estructuras no eran efectivas en el transporte por difusión.

Una consecuencia es que el secado a alta temperatura necesita de maderas muy permeables.

El factor limitante en este caso será la difusión térmica dentro de la madera, que permitirá el calentamiento de la parte interna.

Es conocido algunas especies soportan sin riesgos temperaturas de 120°C sin riesgos, el problema es que cada especie reacciona de manera diferente ante este tipo de secado.

Así que los avances en este campo pasan por la experimentación práctica en cada especie de madera.

En principio podemos decir que el secado a alta temperatura funciona bien con coníferas (permeables) y mal con frondosas (poco permeables). Se han logrado secados en 20-24 horas en pino americano y australiano, en vez de las 80-90 que tardaría un secado a temperatura intermedia.

Este método tiene como principal ventaja una reducción notable del tiempo de secado (20-24 horas), además el consumo energético por kilogramo de agua evaporada disminuye o se mantiene.

Sin embargo el sistema presenta varios inconvenientes.

- Todavía se encuentra en fase de desarrollo.
- No es aplicable a todas las especies, sólo a aquellas suficientemente permeables.
- Degradación de las propiedades físico-mecánicas de la madera.
- Suele exigir un cepillado posterior debido a que se decoloran las superficies de las piezas (Conde & Fernandez Golfín, 2007).

6.7.1.7. Secado por conducción

El secado por conducción se basa en colocar la madera en contacto con placas calefactoras. Tiene el inconveniente de inducir fuertes gradientes térmicos en las piezas, eso restringe su uso a maderas con bajo contenido en humedad.

Estos problemas hacen que no sea un método muy utilizado a no ser que no se disponga de alternativa, como es el caso del secado al vacío.

6.7.1.7. Secado por radiación

Este apartado incluye aquellos métodos que hacen uso de la aplicación directa de campos electromagnéticos a la madera para conseguir su calentamiento. Existen varios tipos en función del tipo de radiación empleada:

6.7.1.8. Secado por radiaciones infrarrojas

En este método se aplica directamente a la madera radiaciones infrarrojas mediante lámparas especiales.

Esta radiación produce un calentamiento superficial que se transmite al resto de la pieza por conducción.

Este método viene condicionado por el hecho de que la difusión térmica en la madera es difícil y que el tiempo para alcanzar el centro de la pieza aumenta mucho con el espesor. Esto limita su uso a piezas pequeñas pues de lo contrario se corre el riesgo de la aparición de defectos.

Debido a esto y al elevado consumo energético tiene poca presencia en la industria.

6.7.1.9. Secado al vacío

El secado al vacío se basa en dos fenómenos que suceden al disminuir la presión: La disminución del punto de ebullición del y el aumento del coeficiente de difusión.

De esta manera se puede acelerar notablemente el proceso, logrando tiempos de secado similares a los conseguidos con el secado a alta temperatura, sin correr el riesgo que implican temperaturas elevadas, que no siempre son soportadas por la madera, especialmente en frondosas. Tiene especial utilidad en el secado de frondosas duras y valiosas.

En la industria se suele trabajar con temperaturas de ebullición del agua de entre 40°C y 60°C, con esto se consigue una ebullición interna que causa un flujo de vapor.

Dicho flujo puede ser, bien condensado y expulsado al exterior en forma líquida o ser succionado directamente por la acción continúa de la bomba de vacío.

Sin embargo el uso de vacío hace que el diseño de la cámara de secado sea radicalmente diferente ya que para hacer uso del vacío hacen falta cubas herméticas.

El problema fundamental radica en que no se puede transmitir el calor por convección, dada la presencia de vacío (Conde & Fernandez Golfin, 2007).

6.7.1.10. Secado por radiofrecuencia

Este método se basa en el fenómeno de que al situar una pieza de madera entre dos electrodos planos de un circuito de corriente alterna, ésta se calienta fuertemente debido a la agitación molecular.

La madera actúa a modo de dieléctrico, definido por su constante dieléctrica. Dicha constante en la madera crece con el peso específico y con el contenido de humedad.

La consecuencia de este fenómeno es un calentamiento de la madera en toda su masa, siendo tanto mayor cuanto mayor sea el contenido de humedad (Conde & Fernandez Golfin, 2007).

Dado que el mayor contenido en humedad suele estar en el centro de las piezas, esta técnica logra que se caliente más el centro de la pieza que el exterior.

Esto conlleva un notable aumento de la circulación del agua debido a que suman los efectos del gradiente térmico (que ahora impulsa el agua hacia el exterior) y de humedad.

Esto tiene como consecuencia una notable reducción del tiempo de secado, del orden de una vigésima parte del tiempo empleado en el secado tradicional.

El gran inconveniente estriba en su alto costo, excesivo todavía para su empleo en la industria a gran escala.

Una posibilidad es utilizar el método discontinuo, donde a intervalos regulares se abre la cámara para restituir la presión atmosférica y calentar después la madera por convección.

Si se desea tener un sistema que trabaje en continuo, será necesario otro sistema de calentamiento, a saber:

- Por conducción: El calentamiento se realiza mediante placas calefactoras en contacto con la madera.
- Por radiación: usando paneles radiantes colocados en la periferia de la pila
- Por radiofrecuencia: En este caso se utilizan campos electromagnéticos para calentar la madera simultáneamente en toda su masa.
- Por vapor sobrecalentado: En este caso se hace circular el vapor extraído de la madera por las baterías de calefacción, donde se sobrecalienta, y después se hace circular transversalmente por la pila de madera impulsado por ventiladores especialmente diseñados.

Es de señalar que los métodos que implican radiación o la acción del vapor apenas si tienen presencia en el mercado, si bien el uso de la radiofrecuencia está ganando aceptación, sobretodo en piezas de gran grosor (Conde & Fernandez Golfín, 2007)

6.8. Secadores solares

Es un equipo de secado convencional se caracteriza por mantener las condiciones de trabajo constantes en el periodo que se requiera.

En el secado solar el proceso es más complejo debido a la variabilidad de las condiciones meteorológicas.

Por ejemplo, la radiación solar tiene distinta intensidad durante el día, no aporta durante la noche, y aún puede ser distinta para los días subsiguientes ya sea por la nubosidad o por la época del año.

6.8.1. Clasificación de secadores solares

En algunas publicaciones, se propone una clasificación simple de secadores solares

Basada en el modo de utilización de la energía solar.

Otro criterio de clasificación es según la fuente de energía que los activa.

Híbrido cuando puede ser activado por más de una fuente de energía.

Otra clasificación está referida a la escala productiva.

6.8.2. De acuerdo a la capacidad de carga:

- Familiar, son de uso doméstico
- Mediano, para uso de pequeños productores
- Industrial, requieren de mayores cargas y eficiencias optimizadas

6.8.3. De acuerdo al modo que se produce la circulación del aire:

- Pasivos, no requieren suministro de energía convencional, utilizan circulación natural aprovechando la diferencia de densidad del aire.
- Activos, utilizan circulación forzada con ventiladores.

6.8.4. De acuerdo a la incidencia de la radiación solar sobre el producto a secar:

- Directos:

En este método los rayos solares inciden directamente sobre el cuerpo a secar, son los sistemas más sencillos ya que no necesitan mecanismos de circulación de aire ni paneles solares. Sin embargo la exposición directa de radiación solar a la madera puede causar en algunos casos decoloraciones superficiales.

- Indirectos:

En este tipo de secadores los rayos solares no inciden en el cuerpo a secar, sino que inciden en un colector térmico, normalmente un colector de aire (aunque también se pueden utilizar colectores planos de agua mediante el uso de un intercambiador aire agua). A través de dicho colector de aire pasará el aire que atravesará más tarde la pila de madera.

- Mixtos:

Este es una mezcla de los dos anteriores. En este tipo de secadores se hace incidir la radiación solar directamente sobre el producto a secar y también disponen de colector térmico, que calienta el aire que se hará circular posteriormente por la pila de madera.

6.8.5. De acuerdo a la fuente de energía principal:

- Solares, solo utilizan energía solar
- Híbridos, puede ser activado por más de una fuente de energía (Mauthner & Weiss, 2014).

6.8.6. De acuerdo al tipo de cámara de secado:

- Caja, el producto recibe radiación solar, tiene un solo nivel de producto y por lo general funciona con convección natural.
- Gabinete, el producto puede o no recibir radiación, posee varios niveles de bandejas y generalmente tiene un calentador solar de aire.
- Túnel, el producto se coloca en varios niveles de bandejas, generalmente en carros, el túnel no recibe radiación y además tiene un banco de colectores solares para el calentamiento por convección forzada.
- Invernadero, el producto recibe la radiación solar aprovechando la estructura de un invernadero, el producto se coloca en varios niveles de bandejas, el secado generalmente es en tandas (Mauthner & Weiss, 2014).

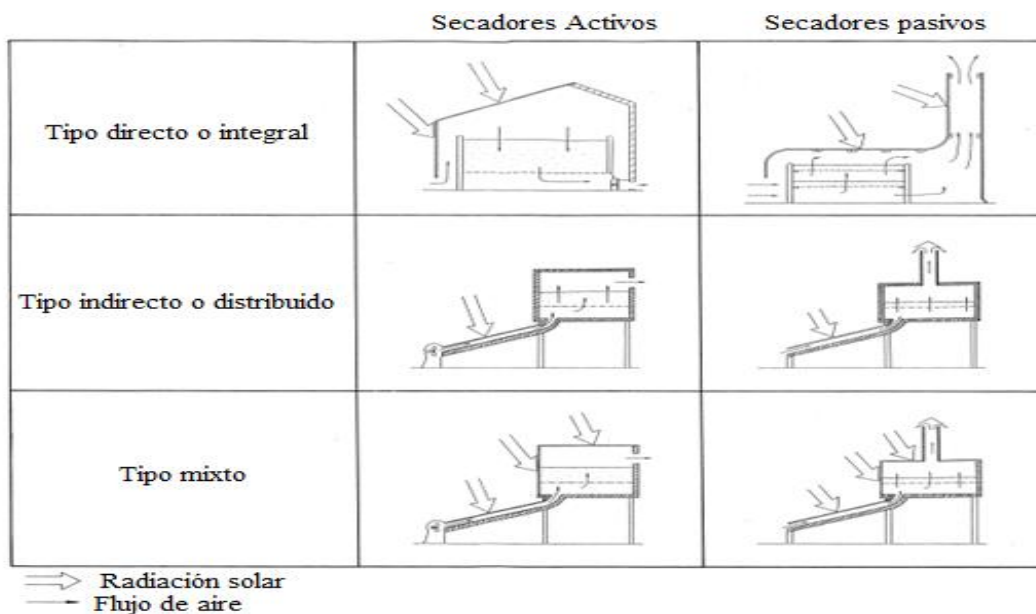


Figura 8. Tipos de secadores solares

Fuente: (Prakash & Kumar, 2004).

VII. Hipótesis

El proceso de secado está directamente relacionado con los parámetros físicos: humedad, radiación, temperatura, y flujo de aire incidente siempre y cuando estos factores permiten agilizar el proceso de secado a cualquier escala.

VIII. Diseño Metodológico

8.1 Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en Nicaragua en el municipio urbano de Estelí, departamento de Estelí específicamente en el parque solar de la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM-Estelí.)

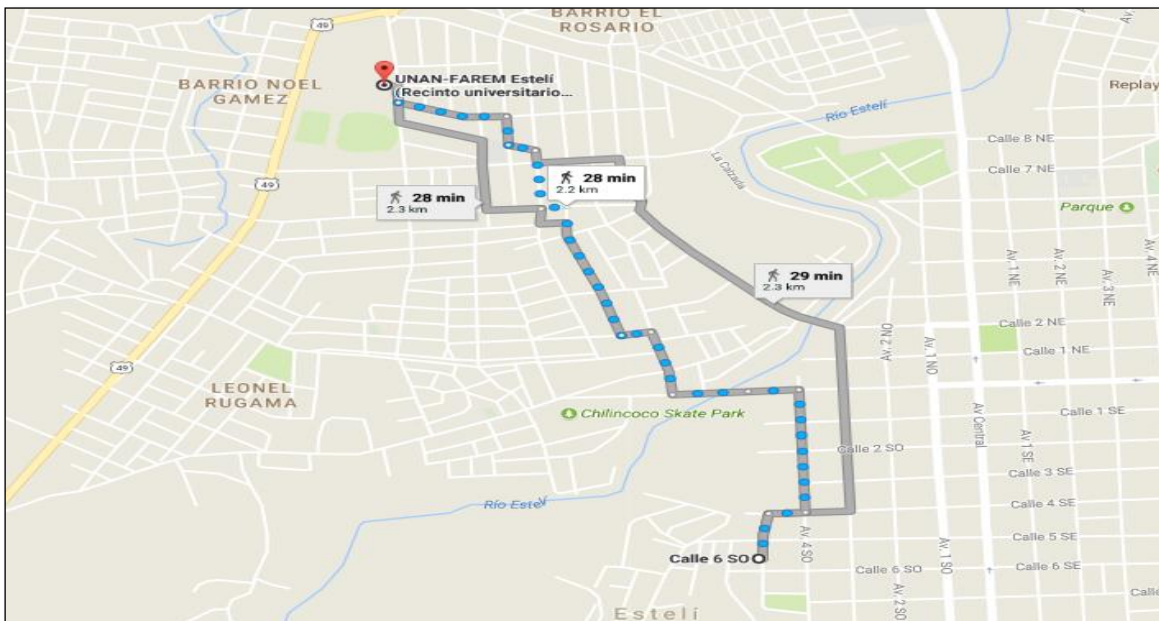


Figura 9. Ubicación geográfica.

Fuente: (Google Earth, 2017)

Dirección: Barrio 14 de abril, contiguo a la subestación de ENEL.

Coordenadas: X: 13.099472, Y: -86.368489, Z: 0.

8.1.1 Área de conocimiento

El área de estudio a la que pertenece el tema de la presente investigación es el **Área 6:** Energías Renovables, **Línea de Investigación 2:** Energía Solar Térmica **Tema:** secadores solares, dentro de las líneas definidas por el Centro de Investigación en Energías Renovables (CIER).

8.2 Tipo de estudio

De acuerdo al método de investigación el presente estudio es experimental (Pedroza, 1993) y Según el nivel de profundidad del conocimiento es descriptivo (Lopez, 2006) .

De acuerdo a la clasificación (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) el tipo de estudio es correlacional.

De acuerdo, al tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información, el estudio es retrospectivo, por el período y secuencia del estudio es transversal y según el análisis y alcance de los resultados el estudio es analítico (Canales, De Alvarado, & Pineda, 1994) .

En cuanto al enfoque filosófico, por el uso de los instrumentos recolección de la información, análisis y vinculación de datos, el presente estudio se fundamenta en la integración sistémica de los métodos y técnicas cualitativas y cuantitativas de investigación, realizada mediante un Enfoque Mixto de Investigación (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014)

8.3 Universo y muestra

El universo de este estudio serán todos los tipos de secadores en el municipio de Estelí, utilizados en las actividades de secado de madera.

La población objeto de estudio son todas las personas que utilizan o han utilizado un método de secado de madera.

8.3.1 El tipo de muestreo

Muestreo probabilístico (aleatorio) debido a que todos los diferentes tipos de secadores tienen la probabilidad de ser analizados, por lo tanto el tipo de muestreo utilizado en nuestra investigación se utilizó un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de caldera térmica.

8.4 Matriz de Operacionalización de Variables.

Objetivo General: Evaluar los factores que inciden en el proceso de secado mediante un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de un dispositivo térmico para el tratamiento de secado de madera en FAREM-Estelí, durante el año 2017.

| Objetivos Específicos | Variable Conceptual | Subvariable o Dimensiones | Variable Operativa Indicador | Técnicas de Recolección de Datos e Información y Actores Participantes | | | | | |
|---|---|---------------------------|--|--|--------------------|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | <u>Encuesta</u> | <u>Entre vista</u> | <u>G-Focal</u> | <u>Experimento</u> | <u>Laboratorio</u> | <u>Anal. Doctal</u> |
| 1) Caracterizar los parámetros físicos de funcionamiento del prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor por dispositivo térmico. | Parámetros físicos de funcionamiento del prototipo de secador solar | 1.1. Temperatura | 1.1.1 Cantidad de Temperatura en el secador solar. (°C) | | | | X Investigadores | X Investigadores | |
| | | 1.2. Tipo de fluido. | 1.4.1 Velocidad, números adimensionales | | | | | | |
| | | 1.4. Humedad relativa | 1.4.1 Cantidad de humedad relativa que se encuentra en el exterior. | | | | | | |

Tabla 1. Operacionalización de objetivo.

| Objetivos Específicos | Variable Conceptual | Subvariable o Dimensiones | Variable Operativa Indicador | Técnicas de Recolección de Datos e Información y Actores Participantes | | | | | |
|---|---|--|---|--|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | | | | <u>Encuesta</u> | <u>Entrevista</u> | <u>G- Focal</u> | <u>Experimento</u> | <u>Laboratorio</u> | <u>Anal. Doctal</u> |
| 2) Describir el nivel de percepción de las personas que se dedica el proceso de secado de la madera para fines industriales. | Percepción por las persona que se dedican el proceso de secado de la madera | 1. 1. Ahorro de tiempo. 1.2. Ahorro económico. 1.3.1 Ahorro energético. | 1.1.1 Cantidad de tiempo que se reduce al operar el secador solar de madera. 1.2.1 Cantidad de dinero que se pueda economizar con el secado de madera a través de secadores solares. 1.3.1 Cantidad de energía que se aprovecha mensualmente a través de uso de secadores solares. | X Investigadores | X Investigadores | X Investigadores | | | |

Tabla 2. Operacionalización de objetivo.

| Objetivos Específicos | Variable Conceptual | Subvariable o Dimensiones | Variable Operativa Indicador | Técnicas de Recolección de Datos e Información y Actores Participantes | | | | | |
|--|---|--|--|--|-------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | | | | <u>Encuesta</u> | <u>Entrevista</u> | <u>G-Focal</u> | <u>Experimento</u> | <u>Laboratorio</u> | <u>Anal. Doctoral</u> |
| 3) Determinar relación causa-efecto del tiempo de secado necesario para reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un nivel apto para el uso. | 1. Proceso de secado de la madera desde su estado inicial hasta su nivel requerido de humedad para uso industrial. | 1.1 Radiación solar incidente 1. 1. Condiciones ambientales 1.2 Condiciones anatómicas del tipo madera. | 1.1. Cantidad de radiación incidente en el plano captador. Cantidad de días de experimento. 1.2.1 Cantidad de masa y humedad después del secado. | | | | X Investigadores | X Investigadores | |

Tabla 3. Operacionalización de objetivo.

8.5. Métodos técnicos e instrumentos para la recolección de datos de información.

Cuantitativo: Según (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) el enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

Observación:

Por ser fundamental en todos los campos de la ciencia la observación basada en el uso sistemático de nuestros sentidos orientados a la captación de la realidad que queremos estudiar. Se llevó un registro y se formalizó la observación encaminada a seleccionar, organizar y relacionar los datos referentes a nuestro estudio de un prototipo de secador solar. Los medios que se utilizaran para registrar la información son: cuaderno de campo, programas informáticos, computadora portátil, cuadros de trabajo, gráficos.

Cualitativo: Según (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) el enfoque cualitativo utiliza la recolección de datos sin medición numérica para descubrir o afinar preguntas de investigación en el proceso de interpretación.

Encuesta: Es un método de investigación y recopilación de datos utilizados para obtener información de personas sobre diversos temas. Las encuestas tienen una variedad de propósitos y se pueden llevar a cabo de muchas maneras dependiendo de la metodología elegida y los objetivos que se deseen alcanzar.

Técnica: Encuesta estructurada.

Población: Todas las personas que trabajan en el rubro del secado de la madera en el municipio de Estelí.

Muestra: 15 personas que trabajan en el rubro del secado de la madera en el municipio de Estelí.

Tipo de muestreo: Según (Hernandez Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014) No es probabilístico por que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador.

8.6 Procedimientos para la recolección de datos e información

Para lograr el objetivo específico número 1: Caracterizar los parámetros físicos de funcionamiento del prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor por dispositivo térmica

Se realizara la evaluación de funcionamiento mediante un problema matemático del secador solar por convección forzada atreves de la determinación de:

Cálculos de relación de humedades a la entrada y salida del secador y su caudal de aire.

Ecuación 11: Caudal volumétrico

$$Q = V * A$$

Ecuación 12: Flujo másico.

$$\dot{m} = Q * \rho$$

Ecuación 13: Continuidad.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sal} \Rightarrow \sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal}$$

Velocidad máxima y número de Reynolds.

Ecuación 14: Velocidad Máxima.

$$V_{max} = \frac{ST}{ST - D} * V$$

Ecuación 15: Número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho * Vm * l}{\mu}$$

Número de Prandtl, Número de Nusselt y coeficiente medio de transferencia de calor.

Ecuación 16: Prandtl.

$$Pr = \frac{Cp * \mu}{K}$$

Ecuación 17: Nusselt.

$$NuD = 0.23 * (Re)^{0.8} * Pr^{0.4}$$

Ecuación 18: Coeficiente medio de transferencia de calor.

$$\bar{h} = \frac{NuD * K}{D}$$

Temperatura de la salida del fluido, la diferencia media logarítmica de temperatura y su velocidad de transferencia de calor.

Ecuación 19: Temperatura del fluido.

$$Te = Ts - (Ts - Ti) \exp\left(-\frac{As * \bar{h}}{\dot{m} * CP}\right)$$

Ecuación 20: Diferencia media logarítmica.

$$\Delta Tln = \frac{(Ts - Te)}{\ln[(Ts - Te)/(Ts - Ti)]}$$

Ecuación 21: Velocidad de transferencia de calor en forma de potencia.

$$\dot{Q} = \bar{h} * As * \Delta Tln$$

Temperatura de bulbo seco y humedad relativa a la salida del secador mediante carta psicométrica.

Conducción a través de paredes planas en serie.

$$q = \frac{\Delta T}{RT}$$

Ecuación 22: conducción de calor

Resistencia total y Analogía eléctrica en serie.

$$RT = \frac{1}{\frac{1}{RA} + \frac{1}{RB} + \frac{1}{RC}}$$

Ecuación 23: Resistencia total

Para lograr el objetivo específico número 2: Describir la percepción por empresa o persona que se dedican al proceso de secado de la madera para fines industriales.

Se realizaron visitas a los locales que trabajan directamente con la madera para su uso industrial y que implementan un tipo de secado convencional, en el cual se le aplicó un tipo de encuesta estructurada con preguntas abiertas y cerradas para observar las diferentes variables con el programa informático SPSS

Para lograr el objetivo específico número 3: Determinar relación causa-efecto del tiempo de secado necesario para reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un nivel apto para el uso.

Se realizarán diferentes medidas tales como: humedad, peso, radiación solar, y flujo de aire. Realizando cuatro ensayos diferentes y se comparará con un estudio y construcción de una instalación de secado de madera mediante energía solar realizado por (Ruiz, 2012).

Ensayo 1. Secado solar por convección forzada

Ensayo 2. Secado natural a la intemperie

Ensayo 3. Secado solar sin el extractor de salida

Ensayo 4. Secado solar con dispositivo térmico (caldera)

Para ser comparados y poder apreciar cuál de ellos es el método más óptimo para el secado de la madera, y poder establecer la relación causa y efecto.

En este caso la muestra un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de caldera térmica. Tomando como tratamiento el tipo de madera CEDRO MACHO a través de la continuidad de la realización de los experimentos, utilizando los aparatos de medición tales como: balanza analítica KERN, higrómetro PCE-333, Piranómetro PCE-SPM1, termómetro TENMARS DT-82. Los que serán esenciales en el estudio de este fenómeno, con una serie de pasos para la recolección de datos por lo que se llega a percibir mayor objetividad en el proceso de investigación, siendo este un componente esencial para el investigador.

En esta etapa se determinarán las características iniciales del tratamiento, tomándose los datos iniciales de su peso y su humedad higroscópica, posteriormente se introducirán en el secador solar por convección forzada de manera que haya espacios en las muestras para que haya una circulación de aire entre ellas la temperatura a la que estarán expuestas será proporcional a la cantidad de radiación solar durante determinado tiempo.

Posteriormente se tomarán medidas cada 24 horas aplicando el proceso de pesado en la balanza analítica y medición de humedad higroscópica para conocer el porcentaje de humedad y peso respectivamente, para luego ser introducida nuevamente en el secador solar

durante el tiempo que sea necesario hasta llegar a un nivel de humedad higroscópica apta para su uso que oscila entre un 10 y 12 % de humedad. Una vez concluido el proceso de secado se procederá a la extracción de la muestra respectivamente para cada uno de los ensayos mencionados.

Con la recolección de los datos obtenidos en las pruebas mediante los diferentes ensayos que se realizaron al tratamiento se busca establecer la relación de secado en dependencia de los parámetros físicos de funcionamiento, con el objetivo de conocer el tiempo que tarda la madera en secarse de su estado inicial hasta un nivel apto para el uso, haciendo comparaciones con diferentes tipos de secados como secado antes mencionados de igual manera se comparará con la instalación de secado de madera mediante energía solar realizado por (Ruiz, 2012).

A través de la monitorización de las condiciones ambientales, como lo es la humedad relativa en el ambiente, radiación solar, temperatura, humedad de la madera, peso de la madera. Con los datos obtenidos se realizarán gráficas individuales y agrupadas para ver la curva de secado en relación al su peso en dependencia de los parámetros establecidos.

8.7 Plan de tabulación y análisis de datos e información

A partir de los datos que sean recolectados, se diseñará la base datos correspondientes, utilizando el software estadístico SPSS v. 20 y Excel 2013, para Windows. Una vez que se realice el control de calidad de los datos registrados, serán realizados los análisis estadísticos pertinentes.

De acuerdo a la naturaleza de cada una de las variables son cuantitativas y guiados por el compromiso definido en cada uno de los objetivos específicos, serán realizados los análisis descriptivos correspondientes a las variables nominales y/o numéricas, entre ellos:

- (a) El análisis de frecuencia
- (b) Las estadísticas descriptivas según cada caso. Además, se realizarán gráficos del tipo:
- (c) pastel o barras de manera univariadas para variables de categorías en un mismo plano cartesiano
- (d) barras de manera univariadas para variables dicotómicas, que permitan describir la respuesta de múltiples factores en un mismo plano cartesiano.

IX. Resultados.

En este apartado se abordará los resultados obtenidos acerca de los factores que inciden en el proceso de secado, mediante un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de un dispositivo térmico, para el tratamiento de secado de madera. Esta etapa se realizó de acuerdo a los objetivos específicos de la investigación.

OE1: Caracterizar los parámetros físicos de funcionamiento del prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor por dispositivo térmico.

A continuación se presenta el diseño del prototipo del secador solar por convección forzada, como se puede apreciar en la **Figura 10**. El secador solar posee varios elementos que contemplan su funcionamiento entre ellos está su área captadora con dimensiones de área de vidrio templado de 1.32 m^2 y 4 mm de espesor.

Su alto máximo es de 1.16 m y alto mínimo 0.74 m siendo una caída de inclinación de 13.2 grados y una entrada a la cámara de secado de 0.40 m x 0.40 m y una área de 0.16 m^2 .

Posee dos extractores, uno de absorción y extracción de fluido.

- a) Absorción de fluido cuenta con 6 hélices de 1 pulgada de ancho cada una.
- b) Extractor de fluido cuenta con 9 hélices de $\frac{1}{2}$ pulgada de ancho cada una.

Las paredes del prototipo son de láminas de yeso denglass con un recubrimiento de cemento especial conocido como muro seco que a la misma vez se comporta como material de aislamiento térmico.

Muestras en forma apilonada en el prototipo

La madera (**Cedro Macho**) están en sesiones encima una tras otra con dimensiones de 0.10 m x 0.30 m que permite la canalización del aire a través de todas las reglillas

Además cuenta con un dispositivo térmico que es de forma cilíndrica y cuenta con un volumen neto de 0.19 m^3 . Y está contenida en una cámara de un volumen de 0.136 m^3 construida de láminas de hierro de 2 mm de espesor.

Como también una chimenea que concentra el calor para fácilmente ser cedido con el movimiento del fluido por los extractores a la cámara de secado. Cuyas dimensiones son 10 cm de alto por 5 cm de ancho.

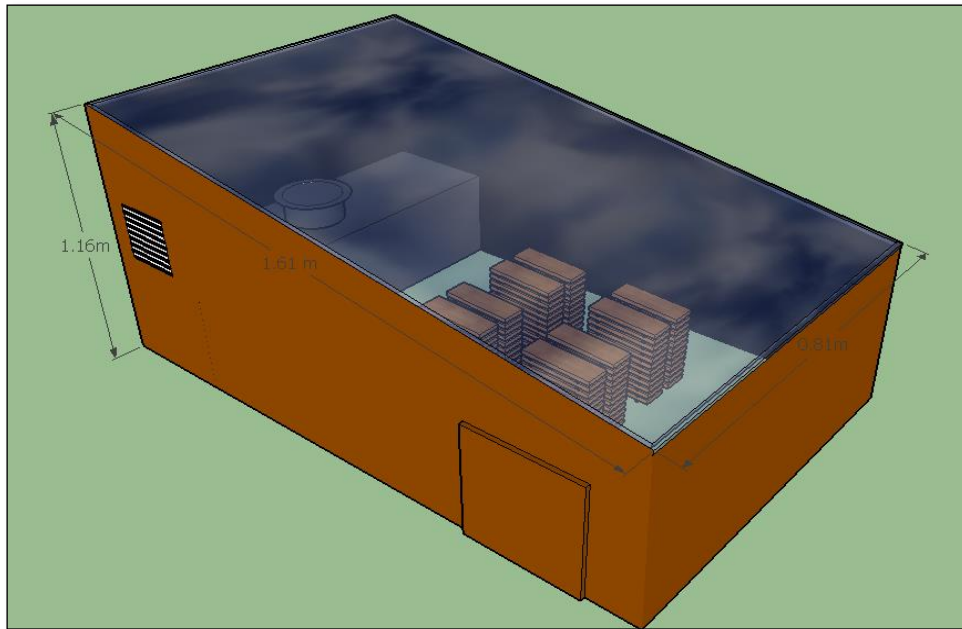


Figura 10. Diseño finalizado del secador solar.

Fuente: Elaboración propia en programa Google Sketchup Pro 2016.

A continuación se presenta planteamiento de un problema con el fin de realizar los cálculos para la evaluación del prototipo de secador solar por convección forzada.

Se pretende mejorar el proceso de secado de la madera, mediante la evaluación de un prototipo de secador solar por convección forzada. Tomándose en cuenta las condiciones ambientales correspondientes para el municipio de Estelí. Temperatura ambiente 27 °C, humedad relativa 75%.

El secador solar consiste un suministro de aire de 258 m³/h un conducto a la entrada de 20cm, a la salida un extractor de 15cm, de diámetro una longitud de 80 cm entre las paredes respectivamente se supone una temperatura en la superficie constante a 50 °C donde se absorberá el contenido de agua de la madera a secar.

(Condiciones estacionarias propiedades del aire)

Según (CENGEL, 2004) las condiciones estacionarias son:

$$T^{\circ} k = 300, \rho = 1.1774 kg/m^3, CP = 10057 kJ/kg.k, \mu = 1.8462 * 10^{-5} kg/m.s, \\ K = 0.02624 W/m.^{\circ}C, Pr = 0.708$$

1-Relación de humedades a la entrada y salida del secador y su caudal de aire.

Caudal volumétrico.

$$Q = V * A$$

$$Q_{ent} = 258 m^3/h * \frac{1h}{3600s}$$

$$Q_{ent} = \frac{258 m^3}{3600s} = 0.0716 m^3/s$$

Flujo másico entrada

$$\dot{m}a = Q * \rho$$

$$\dot{m}a = (0.0716 m/s * 1.1774 kg/m^3) = 0.084 kg/s$$

Caudal volumétrico.

$$Q_{sal} = V * A$$

$$A = \pi * r^2 = 1.88 m^2$$

$$V_{sal} = \frac{Q}{A} = \frac{0.0716m^3/s}{1.88m^2} = 0.038 \text{ m/s}$$

$$Q_{sal} = (0.038m/s * 1.88m^2) = 0.0716m^3/s$$

Flujo másico salida.

$$\dot{m}a = Q * \rho$$

$$\dot{m}a = (0.0716m^3/s * 1.1774kg/m^3) = 0.084kg/s$$

Conservación de la masa (continuidad).

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sal} \Rightarrow \sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal}$$

$$\sum \dot{m}_{ent} = 0.084 \text{ kg/s} = \sum \dot{m}_{sal} = 0.084 \text{ kg/s}$$

2-Velocidad máxima y número de Reynolds.

Velocidad Máxima.

$$V_{max} = \frac{ST}{ST - D} * V$$

$$V_{max} = \frac{0.05}{0.05 - 0.2} * (0.071) = 0.056 \text{ m/s}$$

Reynolds.

$$Re = \frac{\rho * Vm * l}{\mu}$$

$$Re = \frac{1.1774kg/m^3 * 0.056m/s * 0.8m}{1.8462 * 10^{-5}}$$

$$Re = 2,857.08$$

Regímenes de capa laminar sobre una placa plana.

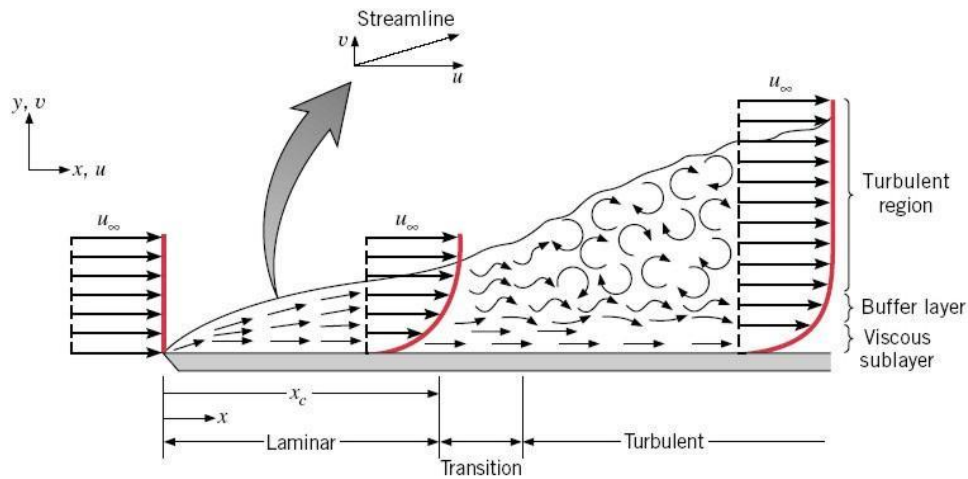


Figura 10. Regímenes de capa laminar

Fuente: (CENGEL, 2004)

$Re > 2,100 = \text{flujo laminar}$

$2,100 \leq Re < 4,000 = \text{flujo transitorio}$

$Re \geq 4,000 = \text{flujo turbulento}$

3-Numero de Prandtl, Número de Nusselt y Coeficiente medio de transferencia de calor.

Prandtl.

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{K}$$

$$Pr = \frac{10057 \text{ kJ/kg k} * 1.8462 * 10^{-5}}{0.02624 \text{ W/m k}}$$

$$Pr = 7.0759 = 0.707$$

Nusselt.

$$NuD = 0.23 * (Re)^{0.8} * Pr^{0.4}$$

$$NuD = 0.23 * (2,857.08)^{0.8} * (0.707)^{0.4}$$

$$NuD = 116.47$$

Coefficiente medio de transferencia de calor.

$$\bar{h} = \frac{NuD * K}{D}$$

$$\bar{h} = \frac{116.47 * 0.02624 \text{ W/m k}}{0.2m}$$

$$\bar{h} = 15.41 \text{ W/m}^2 \text{ k}$$

4-Temperatura de la salida del fluido, la diferencia media logarítmica de temperatura y su velocidad de transferencia de calor.

Temperatura del fluido.

$$Te = Ts - (Ts - Ti) \exp\left(-\frac{As * \bar{h}}{\dot{m} * CP}\right)$$

$$Te = 50^\circ\text{C} - (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \exp\left(-\frac{0.5m^2 * 15.41 \text{ W/m}^2 \text{ k}}{5.06 \text{ kg/s} * 10057 \text{ kj/kg.k}}\right)$$

$$Te = 50^\circ\text{C} - (50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) \exp\left(-\frac{7.70}{844.42}\right)$$

$$Te = 50^\circ\text{C} - (50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) \ln(9.1207 * 10^{-3})$$

$$Te = 50^\circ\text{C} - (50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) * (-4.70)$$

$$Te = 50^\circ\text{C} - (50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}) * \left(\frac{1}{4.70}\right)$$

$$Te = (27^\circ\text{C}) * \left(\frac{1}{4.70}\right)$$

$$Te = 5.74^\circ\text{C}$$

$$Te = (50^\circ\text{C} - 5.74^\circ\text{C}) = 44.26^\circ\text{C}$$

Diferencia media logarítmica.

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln[(T_s - T_e)/(T_s - T_i)]}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(50^\circ\text{C} - 5.74^\circ\text{C}) - (50 - 27)}{\ln[(50^\circ\text{C} - 5.74^\circ\text{C})/(50^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C})]}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(22.26^\circ\text{C})}{[(0.6545^\circ\text{C})]}$$

$$\Delta T_{ln} = 34^\circ\text{C}$$

Velocidad de transferencia de calor en forma de potencia.

$$\dot{Q} = \bar{h} * A_s * \Delta T_{ln}$$

$$\dot{Q} = 15.41 \text{ W/m}^2 * 0.5 \text{ m}^2 * 34^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = 261.97 = 0.26197 * 10^3 \text{ W}$$

5-Temperatura de bulbo seco y humedad relativa a la salida del secador.

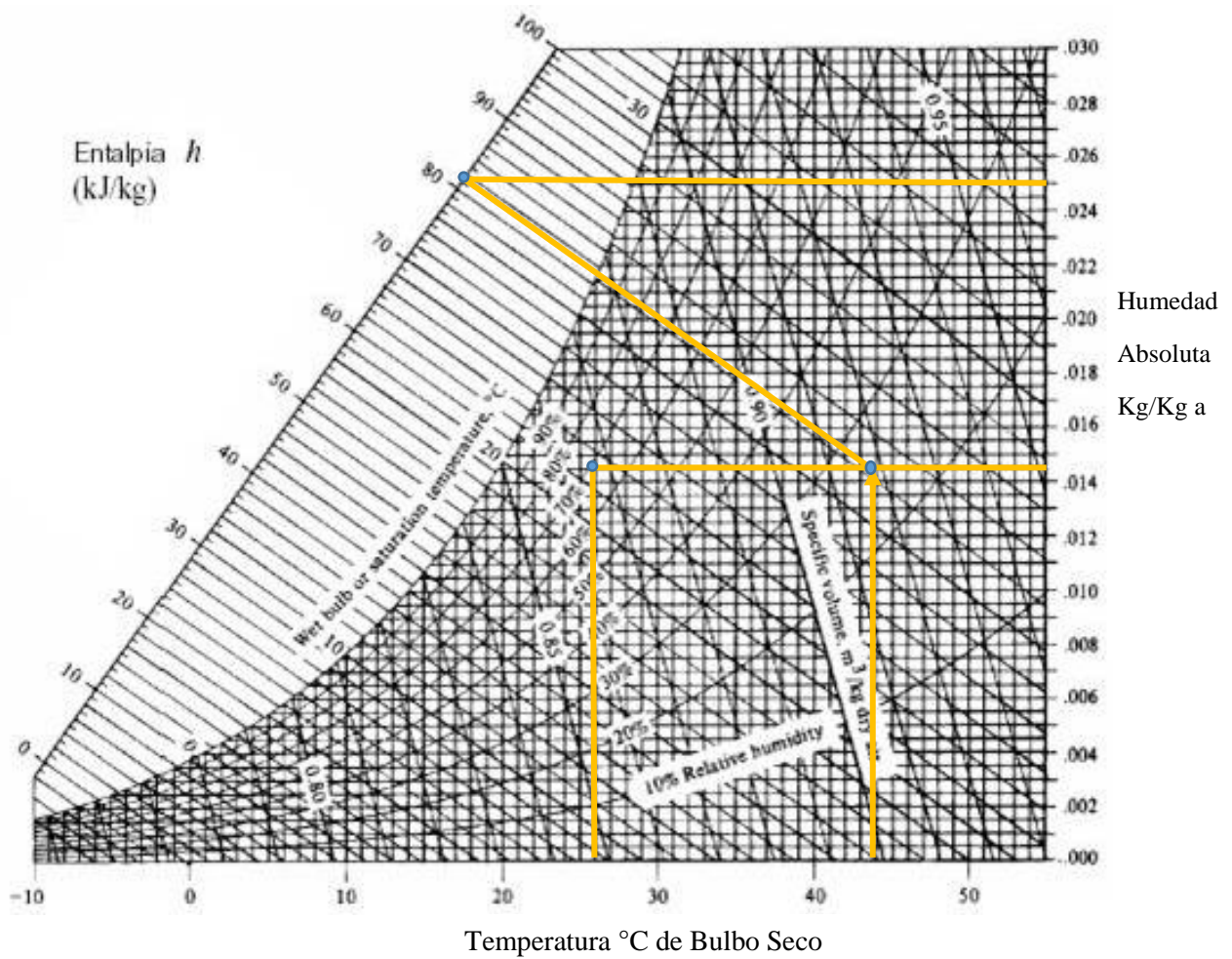


Figura 11. Obtención de datos de la carta psicométrica.

Fuente: (Vega, 2013)

Como se muestra en la **Figura 12** los datos que se obtienen son:

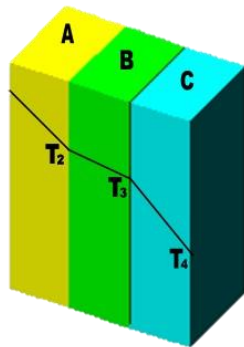
Temperatura: $T_1 = 27\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 44.2\text{ }^\circ$

Humedad relativa: 77%

Entalpia(h)kJ/kg: 80%

Humedad absoluta: $W_1=0.14$ $W_2=0.24$

Análisis de flujo de calor por conducción en paredes compuestas.



| Materiales | Conductividad térmica W/m.k |
|----------------------------|-----------------------------|
| A=Recubrimiento de cemento | A= 0.530 |
| B=Yeso | B= 0.488 |
| C=Aluminio | C=202 |

$$q = \frac{\Delta T}{RT}$$

$$RT = \frac{1}{\frac{1}{RA} + \frac{1}{RB} + \frac{1}{RC}}$$

$$RT = \frac{1}{\frac{1}{0.53} + \frac{1}{0.488} + \frac{1}{109}}$$

$$RT = 11.44 \text{ W/m} * k$$

$$q = \frac{296 \text{ k}}{11.44 \text{ W/m} * k} = 25.87 \text{ W/m}^2$$

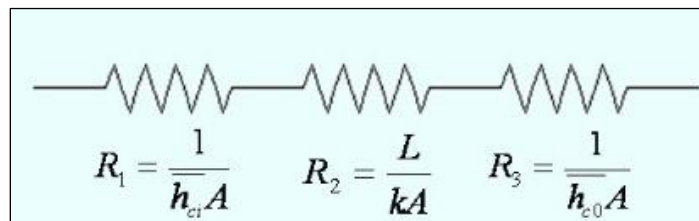


Figura 12. Analogía eléctrica en serie

Fuente: (CENGEL, 2004).

OE2: Describir el nivel de percepción por empresa o persona que se dedican el proceso de secado de la madera para fines industriales.

Se aplicó encuesta estructurada con una serie de preguntas abiertas y cerradas, con el objetivo de indagar sobre los tipos de maderas que utilizan las fábricas y ebanisterías así como la transformación que se le da a esta y la aceptación de un secador solar por convección forzada más adición de calor por una caldera térmica con el fin de aprovechar los residuos biomásico que estas producen.

Estas encuestas fueron aplicadas personalmente y quienes respondieron fueron 15 personas trabajadoras de diferentes fábricas y ebanisterías del casco urbano del municipio de Estelí, posteriormente se procedió a elaborar base de datos para incorporarlos al programa SPSS y hacer el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

Edades de las personas encuestadas en fábricas y ebanisterías.

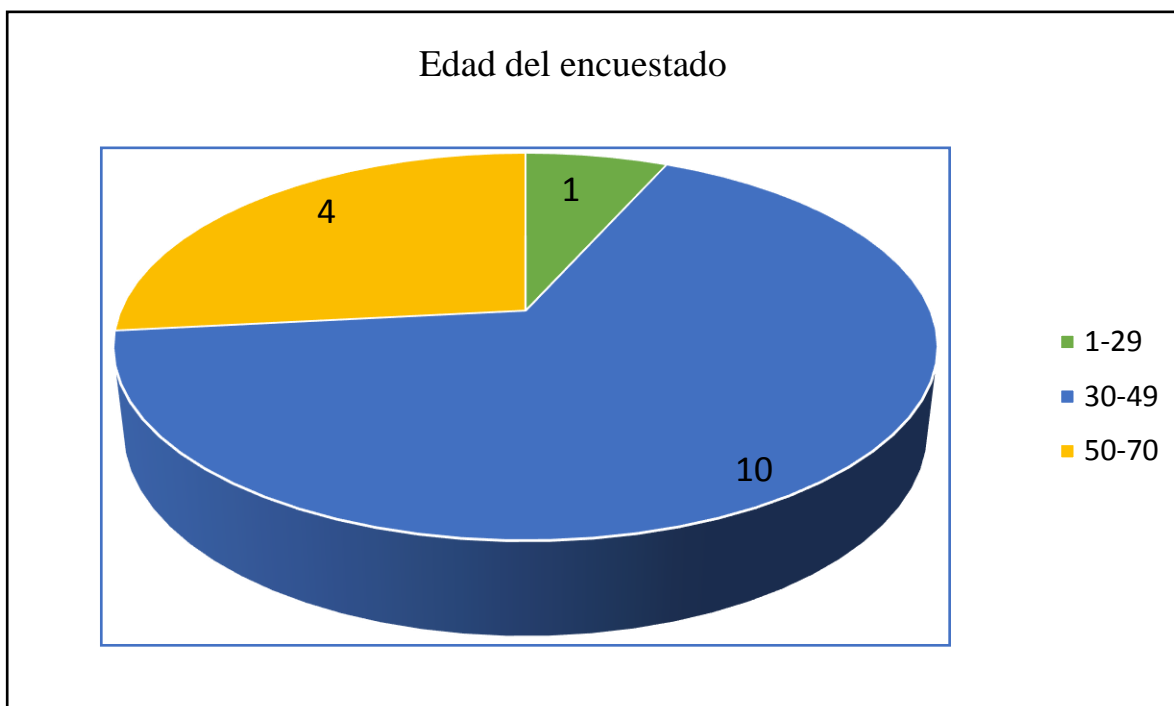
En la siguiente tabla se observa que el número de las personas a las que se les aplico la encuesta su edad oscila entre 30 y 40 que equivalen al 62.5 % de los encuestados a como se aprecia en la **gráfica 1**.

| Edad del encuestado | | | | | |
|---------------------|---------|------------|------------|-------------------|----------------------|
| | | Frecuencia | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido | 1-29 | 1 | 6.3 | 6.7 | 6.7 |
| | 30-49 | 10 | 62.5 | 66.7 | 73.3 |
| | 50-70 | 4 | 25.0 | 26.7 | 100.0 |
| | Total | 15 | 93.8 | 100.0 | |
| Perdidos | Sistema | 1 | 6.3 | | |
| Total | | 16 | 100.0 | | |

Tabla 4. Edad de los encuestados

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2013.

Gráfica de pastel de las edades de las personas encuestadas en fábricas y ebanisterías.



Gráfica 1. Edad de la persona encuestada

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2013.

Nivel académico de las personas encuestadas.

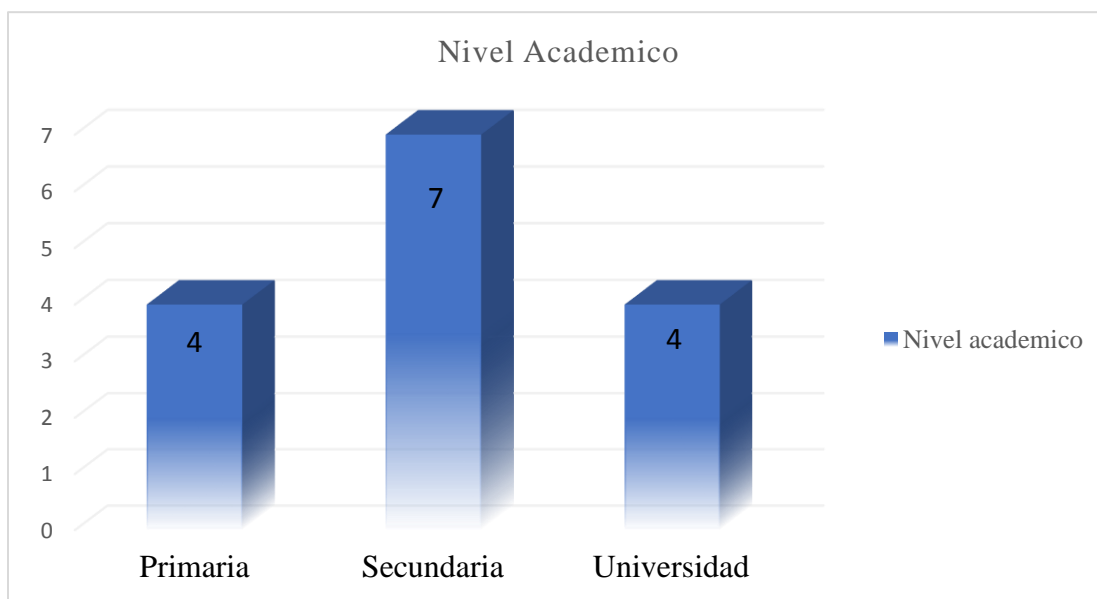
Según los datos obtenidos a través de la encuesta se puede apreciar que el 43.8% de las personas que trabajan el rubro de la madera cursaron la secundaria, un 25.0% cursaron la primaria y un 25% terminaron sus estudios de universidad pudiéndose observar que gran parte de la mano de obra en la industria o ha terminado un estudio profesional o técnico.

| Nivel Académico | | | | | |
|-----------------|-------------|------------|--------------|-------------------|----------------------|
| | | Frecuencia | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido | Primaria | 4 | 25.0 | 26.7 | 26.7 |
| | Secundaria | 7 | 43.8 | 46.7 | 73.3 |
| | Universidad | 4 | 25.0 | 26.7 | 100.0 |
| | Total | 15 | 93.8 | 100.0 | |
| Perdidos | Sistema | 1 | 6.3 | | |
| Total | | 16 | 100.0 | | |

Tabla 5. Nivel académico de las personas encuestadas

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2013.

Nivel académico de los encuestados.



Grafica 2. Nivel académico

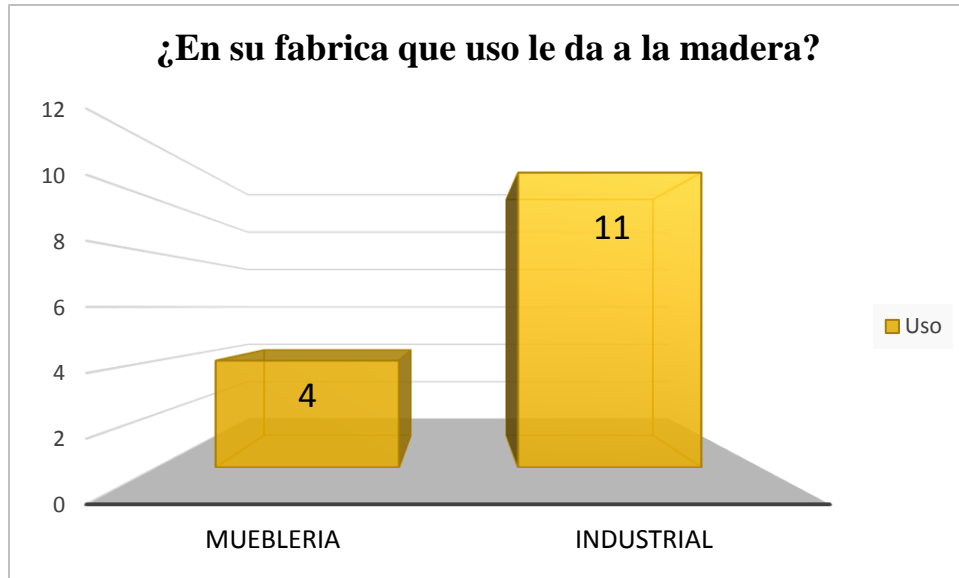
Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Uso que se le da a la madera en fábricas y ebanisterías del casco urbano de Estelí.

La importancia que tiene este producto para la economía de las personas que se dedican a trabajar con este rubro siendo unos de los más destacados en el casco urbano de Estelí puesto que la mayoría de las fábricas se dedican a realizar cajas para la industria tabacalera según la encuesta aplicada siendo este la de mayor envergadura, siguiendo la producción de muebles como se observa en la **Figura 3**

| Uso que se le da a la madera | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|--------------|-------------------|----------------------|
| | | Frecuencia | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido | Mueblería | 4 | 25.0 | 26.7 | 26.7 |
| | Industrial | 11 | 68.8 | 73.3 | 100.0 |
| | Total | 15 | 93.8 | 100.0 | |
| | Sistema | 1 | 6.3 | | |
| Total | | 16 | 100.0 | | |

Tabla 6. Diferentes usos de la madera.



Grafica 3. Uso que le da a la madera

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

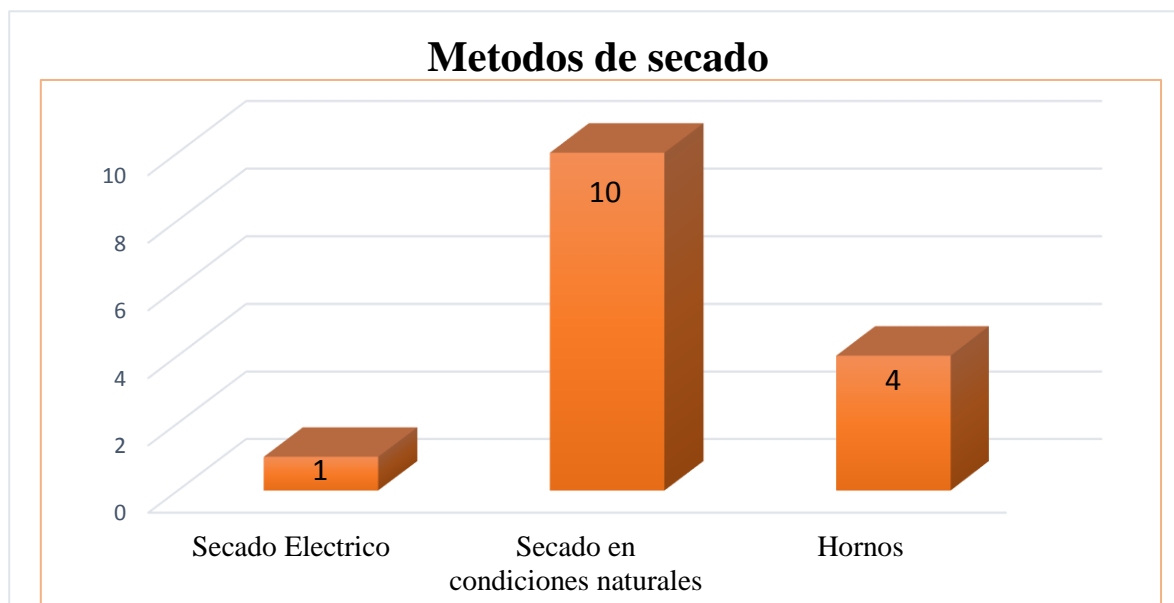
Método que utilizan para el proceso de secado de la madera.

| ¿Qué métodos utiliza para el secado de la madera en su trabajo? | | | | | |
|---|---------------------------------|------------|--------------|-------------------|----------------------|
| | | Frecuencia | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido | Secado Eléctrico | 1 | 6.3 | 6.7 | 6.7 |
| | Secado en condiciones naturales | 10 | 62.5 | 66.7 | 73.3 |
| | Hornos | 4 | 25.0 | 26.7 | 100.0 |
| | Total | 15 | 93.8 | 100.0 | |
| Perdidos | Sistema | 1 | 6.3 | | |
| Total | | 16 | 100.0 | | |

Tabla 7. Diferentes métodos de secado de la madera

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Según la encuesta el método más utilizado es el secado en condiciones naturales como se observa en la **Grafica 4**.



Grafica 4. Diferentes métodos de secado de la madera

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

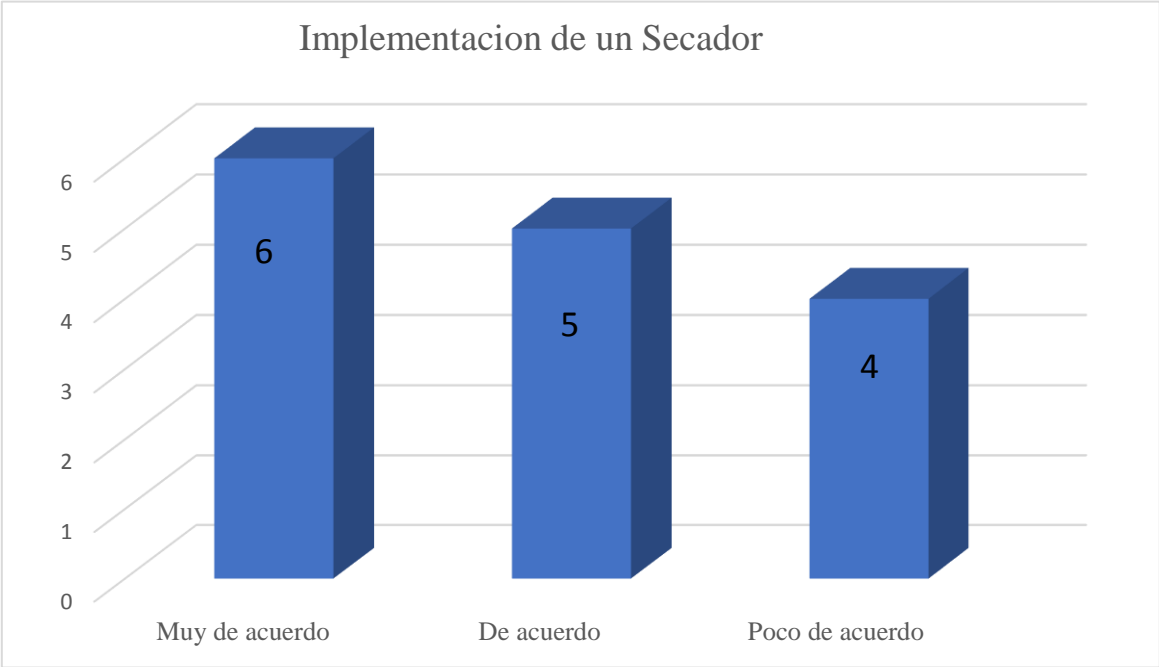
Grado de aceptación

| ¿Estaría de acuerdo usted en la implementación de un sistema industrial de secado de madera con energía solar y sistema de calor externo? | | | | | |
|---|-----------------|------------|--------------|-------------------|----------------------|
| | | Frecuencia | Porcentaje | Porcentaje válido | Porcentaje acumulado |
| Válido | Muy de acuerdo | 6 | 37.5 | 40.0 | 40.0 |
| | De acuerdo | 5 | 31.3 | 33.3 | 73.3 |
| | Poco de acuerdo | 4 | 25.0 | 26.7 | 100.0 |
| | Total | 15 | 93.8 | 100.0 | |
| Perdidos | Sistema | 1 | 6.3 | | |
| Total | | 16 | 100.0 | | |

Tabla 8. Implementación del secado industrial para la madera

Según la recolección de los datos obtenido las personas encuestadas respondieron estar muy de acuerdo con la implementación de secadores solares por convección forzada más adición

de calor por un dispositivo térmico para el aprovechamiento de los residuos biomásico como se aprecia en la **Grafica 5**.



Grafica 5. Implementación de un secador

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

OE3: Determinar relación causa-efecto del tiempo de secado necesario para reducir el contenido de humedad de la madera desde el estado verde hasta un nivel apto para el uso.

A continuación se muestra la radiación solar incidente con datos obtenidos por la NASA en el municipio de Estelí en el año 2017, igual así los parámetros de temperatura en el aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento y temperatura en la tierra.

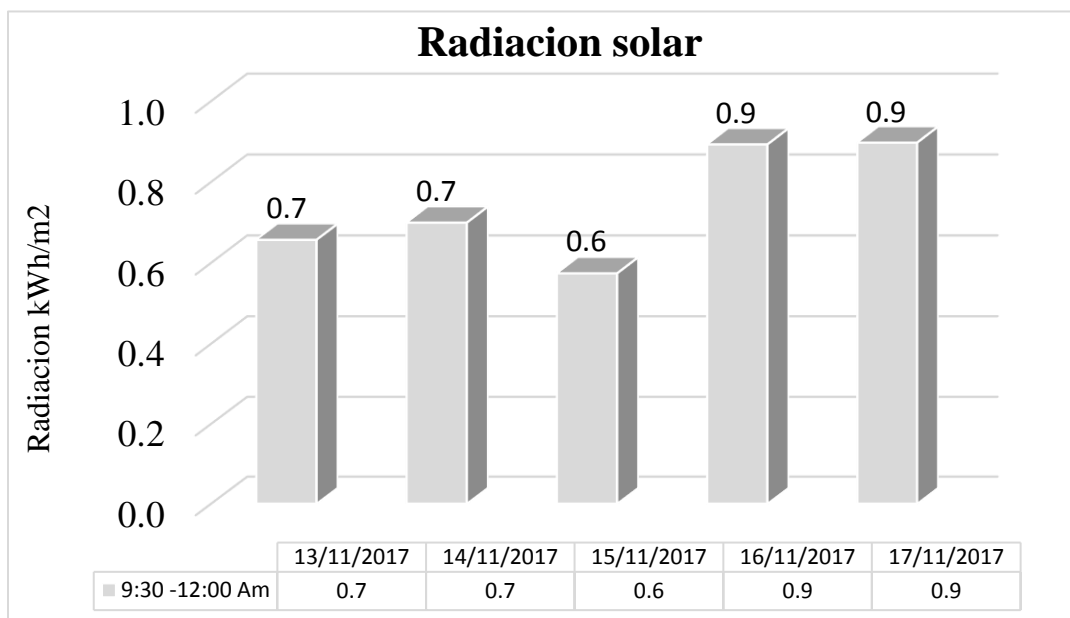
| Month | Air temperature | Relative humidity | Daily solar radiation - horizontal | Atmospheric pressure | Wind speed | Earth temperature |
|-----------------|-----------------|-------------------|------------------------------------|----------------------|------------|-------------------|
| | °C | % | kWh/m ² /d | kPa | m/s | °C |
| January | 22.8 | 67.1% | 5.10 | 95.3 | 5.1 | 24.2 |
| February | 24.0 | 60.8% | 5.71 | 95.2 | 4.8 | 26.2 |
| March | 25.3 | 55.7% | 6.43 | 95.1 | 4.3 | 28.6 |
| April | 26.4 | 55.0% | 6.36 | 95.1 | 4.0 | 30.2 |
| May | 25.4 | 69.1% | 5.73 | 95.1 | 3.5 | 27.7 |
| June | 24.2 | 79.4% | 5.67 | 95.1 | 3.7 | 25.1 |
| July | 23.9 | 77.6% | 5.58 | 95.2 | 4.1 | 24.6 |
| August | 24.0 | 77.8% | 5.63 | 95.2 | 3.7 | 24.8 |
| September | 23.8 | 80.3% | 5.28 | 95.1 | 3.2 | 24.5 |
| October | 23.3 | 80.2% | 5.08 | 95.1 | 3.8 | 23.9 |
| November | 22.8 | 77.0% | 4.95 | 95.2 | 4.2 | 23.3 |
| December | 22.6 | 72.0% | 4.92 | 95.2 | 4.9 | 23.4 |
| Annual | 24.0 | 71.0% | 5.54 | 95.1 | 4.1 | 25.5 |
| Measured at (m) | | | | | 10.0 | 0.0 |

Figura 13. Radiación solar en el año 2017.

Fuente: (NASA, 2017).

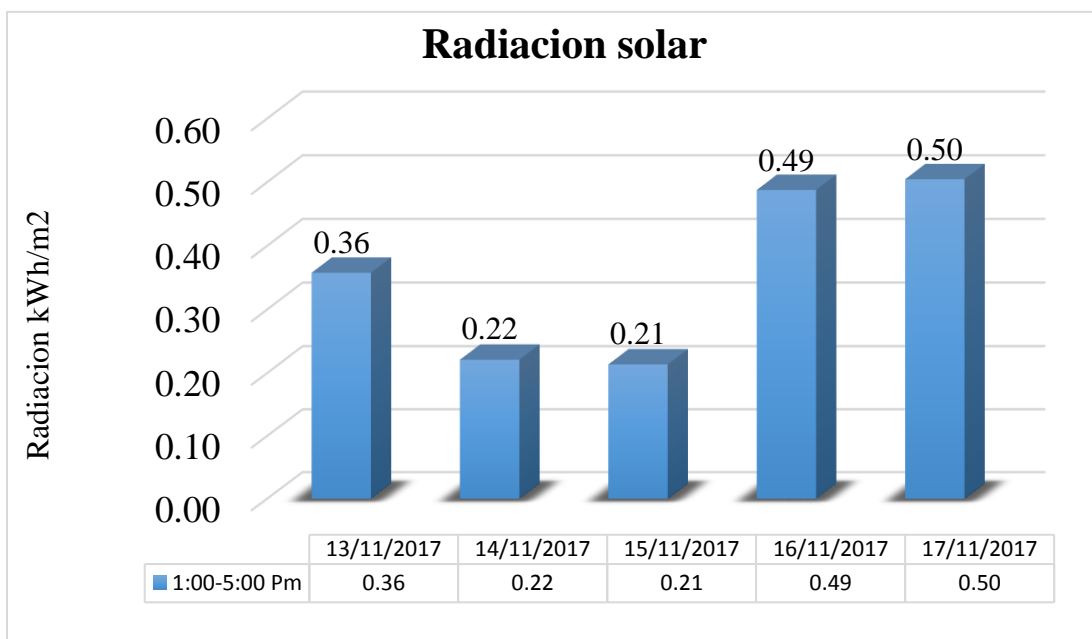
En la tabla anterior se aprecia el promedio de la radiación solar mensual en kWh/m²/día con los valores máximos y mínimos durante el año 2017. Donde el mes con menor radiación es diciembre con 4.92 kWh/m²/día y el mes con mayor radiación es marzo con 6.43 kWh/m²/día.

Gráfico de barra de la Irradiancia promedio que hay entre las horas 9:30 Am hasta las 12:00 Am



Grafica 6. Radiación solar en el área de evaluación del prototipo.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.



Grafica 7. Radiación solar en el área de evaluación del prototipo.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Ensayo Numero 1

Comparación del secado en el prototipo con adición y extracción de aire y el secado al aire libre.

En esta tabla se aprecia la suma de todos los pesos de cada una de las muestras contenidas en el prototipo y al aire libre, a medida que transcurre el tiempo de secado.

| Fecha | 21/09/2017 | 22/09/2017 | 25/09/2017 | 29/09/2017 | 03/10/2017 | 08/10/2017 |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Horas | 0:00:00 | 21:20:00 | 93:20:00 | 189:20:00 | 286:05:00 | 406:05:00 |
| Gr | Peso | Peso | Peso | Peso | Peso | Peso |
| Secador | 2270 | 2117 | 2037 | 1943 | 1924 | 1924 |
| Exterior | 2275 | 2154 | 2131 | 2088 | 2058 | 2025.9 |

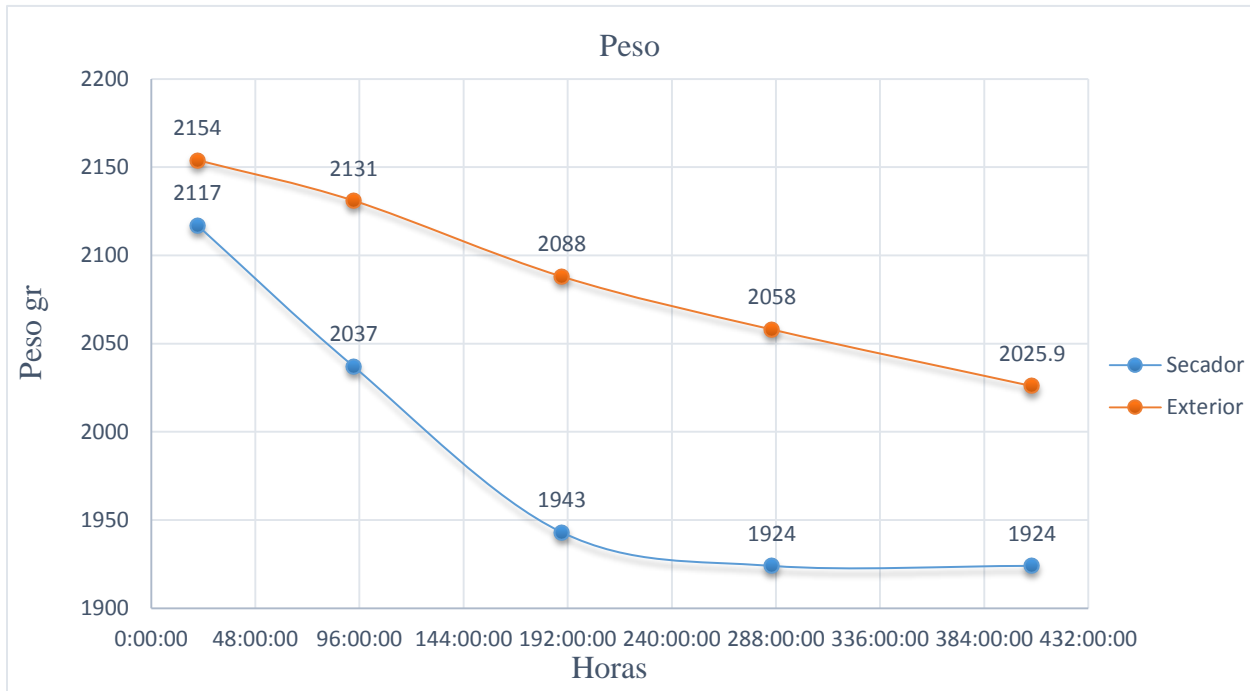
Tabla 9. Pesos de las muestras.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Gráfica de comparación de peso de las muestras en el prototipo y al aire libre.

Con los datos de pesos obtenidos en el proceso de secado, se ingresaron al software de análisis en el cual se puede apreciar la disminución del peso con respecto al tiempo de secado.

Tanto en el ensayo realizado en el prototipo como en el ensayo realizado al aire libre, se aprecia una mayor disminución en el proceso de secado realizado en el prototipo en comparación al aire libre, de acuerdo a sus parámetros de funcionamiento destacando que estos se realizaron en tiempo de invierno, lo cual entorpecieron el secado al aire libre no pudiendo ser controlado por lo tanto tardo más tiempo.



Grafica 8. Pesos de las muestras y el tiempo de secado

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Comparación de porcentaje de humedad de las muestras en los ensayos realizados en el prototipo y al aire libre.

Al porcentaje de humedad se le realizó un promedio de todas las medidas obtenidas durante el tiempo que tardaron las muestras en secarse.

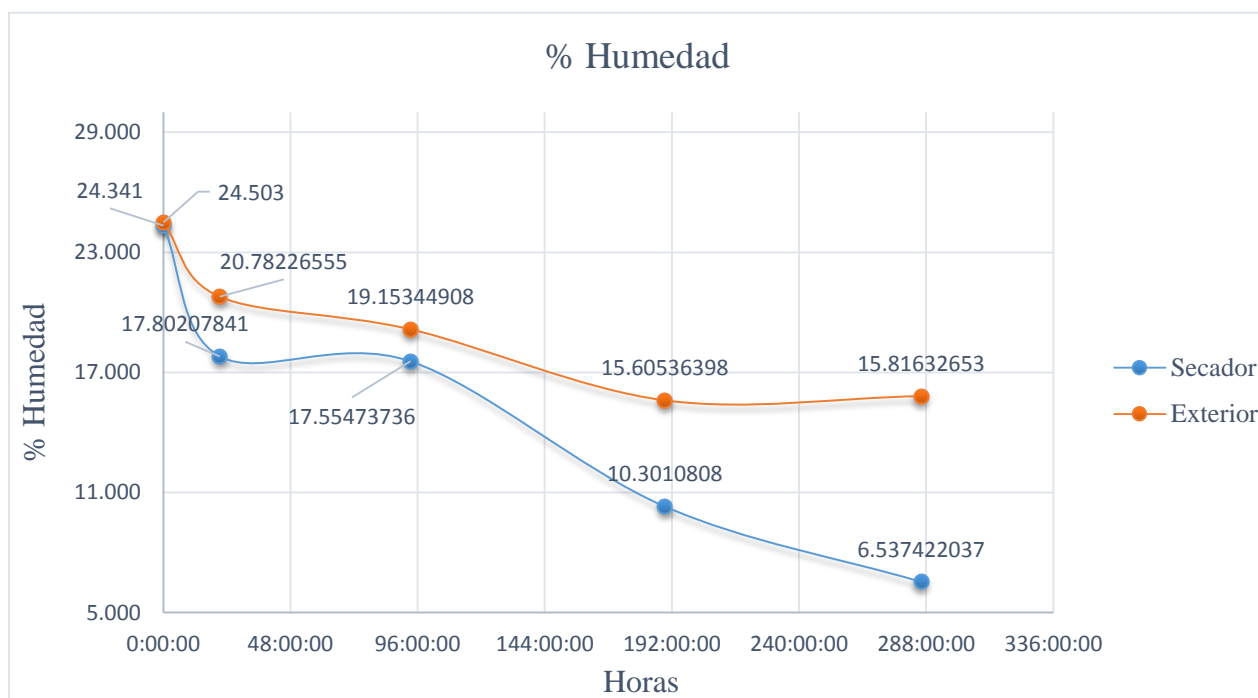
| Horas | 0:00:00 | 21:20:00 | 93:20:00 | 189:20:00 | 286:05:00 | 406:05:00 |
|----------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Muestras | Humedad | Humedad | Humedad | Humedad | Humedad | Humedad |
| Secador | 24.341 | 17.80207841 | 17.55473736 | 10.3010808 | 6.537422037 | 6.537422037 |
| Exterior | 24.503 | 20.78226555 | 19.15344908 | 15.60536398 | 15.81632653 | 11.5736216 |

Tabla 10. Humedad en las muestras en secado al aire libre.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Comparaciones de porcentaje de humedad de las muestras contenidas en el prototipo y al aire libre.

Estos ensayos se realizaron en temporada de invierno, por lo que tiende a haber más transferencia de humedad del ambiente siendo de igual manera afectadas las muestras tanto dentro del secador como al aire libre que estaban siendo tratadas, retardando su proceso de secado y disminución de humedad por las condiciones climáticas. En la gráfica podemos apreciar como varia la humedad respecto al tiempo la cual se tardó más que en condiciones ideales.



Grafica 9. Humedad en las muestras y el tiempo de secado.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Ensayo Numero 2

Proceso de secado en el prototipo sin extracción mecánica.

En esta tabla podemos apreciar la suma de todos los pesos de cada una de las muestras contenidas en el prototipo, en la cual se observa la disminución del peso con respecto al tiempo de secado.

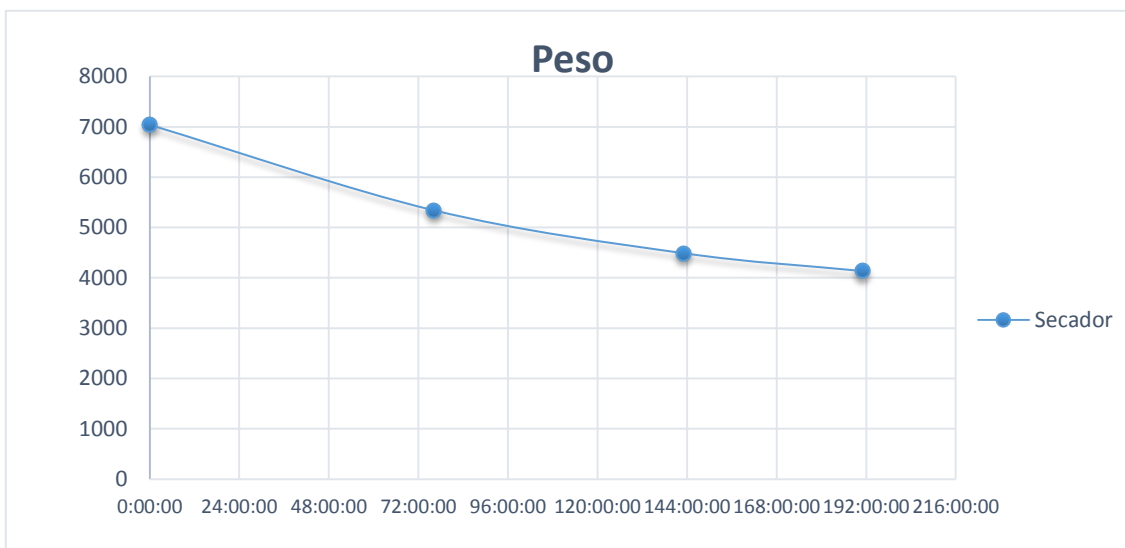
| Fecha | 24/10/2017 | 27/10/2017 | 30/10/2017 | 01/11/2017 |
|---------|------------|------------|------------|------------|
| Horas | 0:00:00 | 76:07:00 | 143:01:00 | 191:02:00 |
| gr | Peso | Peso | Peso | Peso |
| Secador | 7039 | 5341 | 4489 | 4134 |

Tabla 11. Secado sin extracción mecánica.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016.

Grafica de línea de pesos de las muestras en el prototipo sin extracción mecánica

En la siguiente gráfica, se evidencia la reducción del peso respecto al tiempo que fue sometida la muestra, en el ensayo donde se aprecia una reducción de peso con respecto al tiempo en que tardaron las muestras en secarse.



Grafica 10. Secado de las muestras sin extracción mecánica.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

Porcentaje de humedad de las muestras en el ensayo realizado en el prototipo sin extracción mecánica.

Al porcentaje de humedad medido a cada una de las muestras se les calculó un promedio durante el proceso de secado.

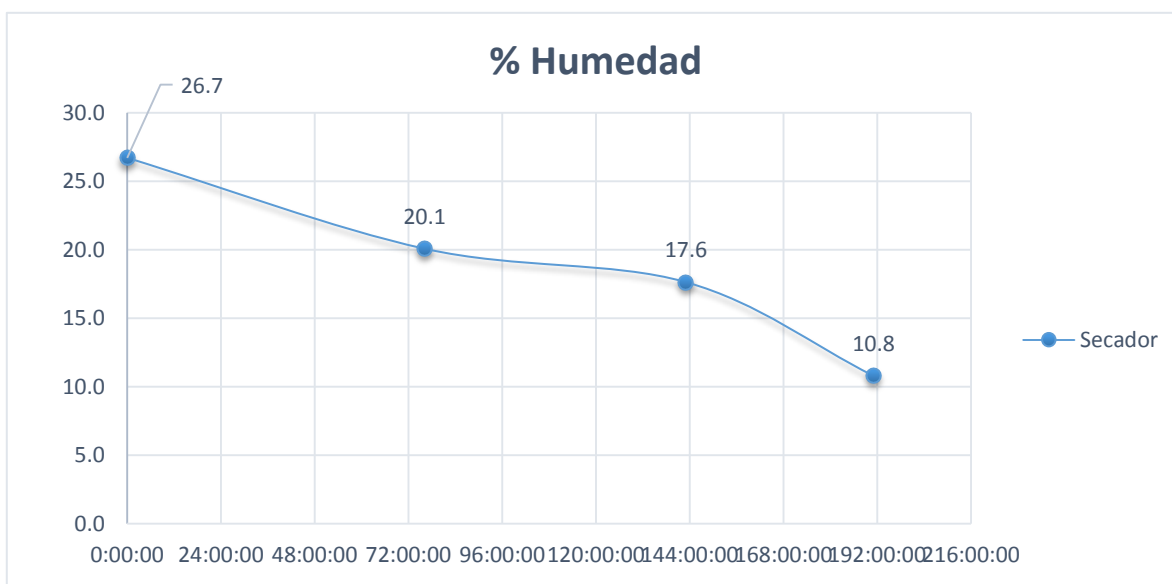
| | | | | |
|---------|------------|------------|------------|------------|
| Fecha | 24/10/2017 | 27/10/2017 | 30/10/2017 | 01/11/2017 |
| Horas | 0:00:00 | 76:07:00 | 143:01:00 | 191:02:00 |
| % | Humedad | Humedad | Humedad | Humedad |
| Secador | 26.7 | 20.1 | 17.6 | 10.8 |

Tabla 12. Secado de las muestras sin extractor.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

Gráfica de línea del porcentaje de humedad de las muestras contenidas en el prototipo sin extracción mecánica.

Considerando el tiempo de secado se pudo apreciar la disminución del Porcentaje de humedad en las medidas realizadas a las muestras, destacándose que sin el uso del extractor de salida ocurre una mayor disminución en la humedad.



Gráfica 11. Humedad de las muestras sin extractor.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

Ensayo número 3

Proceso de secado en el prototipo sin extracción mecánica más adición de calor utilizando caldera térmica para acelerar el proceso de secado.

En la siguiente tabla se puede contemplar los datos de peso obtenidos de las muestras contenidas en el prototipo más la adición de calor con caldera térmica, siendo este un medio para poder agilizar aún más el proceso de secado los cuales fueron realizados en el mes de noviembre con mejores condiciones climáticas.

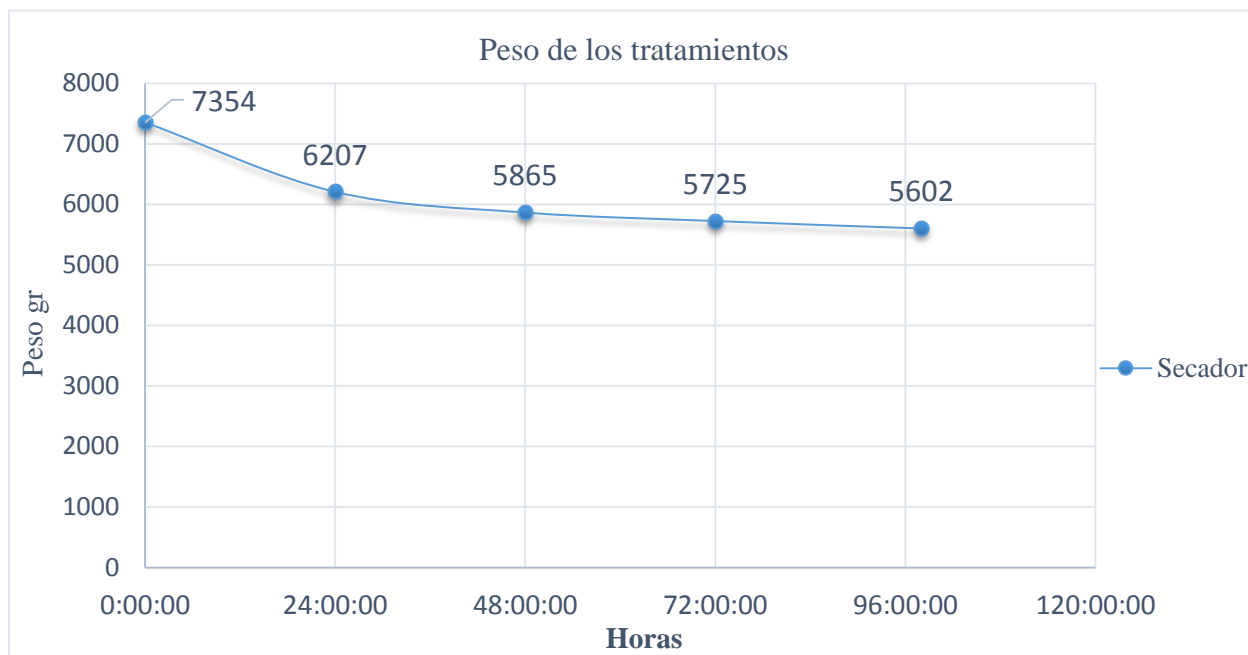
| Fecha | 13/11/2017 | 14/11/2017 | 15/11/2017 | 16/11/2017 | 17/11/2017 |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Horas | 0:00:00 | 24:00:00 | 48:00:00 | 72:00:00 | 98:00:00 |
| gr | Peso | Peso | Peso | Peso | Peso |
| Secador | 7354 | 6207 | 5865 | 5725 | 5602 |

Tabla 13. Secado de las muestras sin extracción mecánica más caldera térmica.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

Pesos de las muestras en prototipo y adición de calor con caldera.

Apreciemos la reducción del peso respecto al tiempo que fue sometida la muestra en el presente ensayo, destacando que en el tiempo que se desarrolló dicho ensayo las condiciones climáticas eran óptimas, para garantizar agilidad en el proceso de secado, más la influencia que tuvo la utilización de la caldera térmica utilizada en este proceso.



Grafica 12. Pesos de las muestras sin extracción mecánica más caldera térmica.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

Porcentaje de humedad de las muestras en el prototipo sin extracción mecánica más adición de calor con caldera térmica.

A la suma de todos porcentajes de humedad obtenidos en el proceso de secado se le realizó un promedio para saber la cual es la humedad promedio en un tiempo determinado.

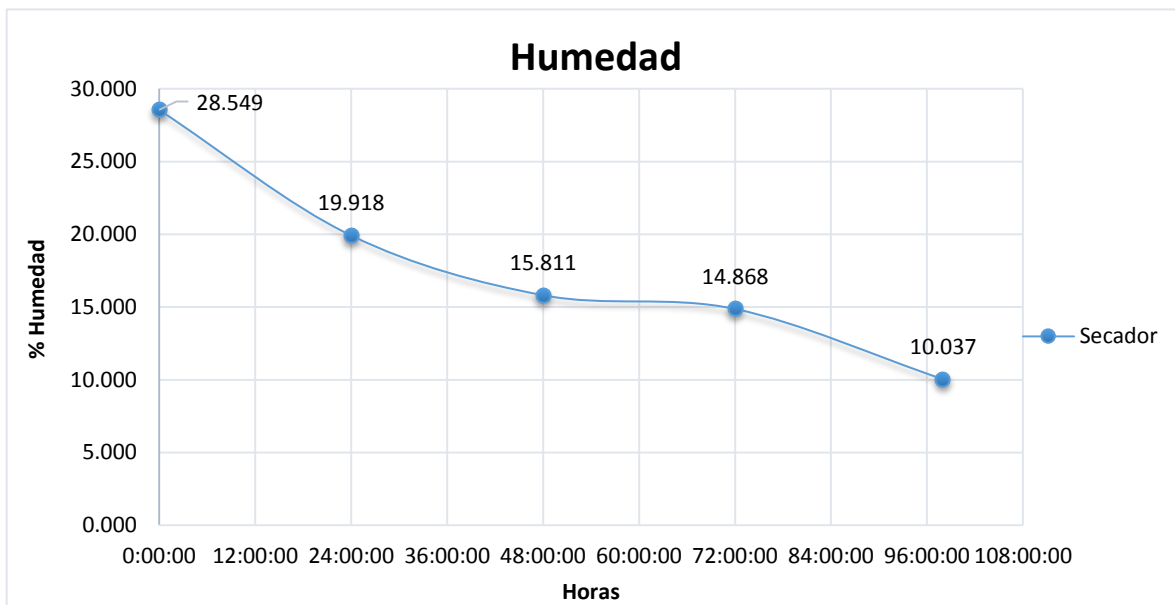
| Fecha | 13/11/2017 | 14/11/2017 | 15/11/2017 | 16/11/2017 | 17/11/2017 |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Horas | 0:00:00 | 24:00:00 | 48:00:00 | 72:00:00 | 98:00:00 |
| % | Humedad | Humedad | Humedad | Humedad | Humedad |
| Secador | 28.549 | 19.918 | 15.811 | 14.868 | 10.037 |

Tabla 14. Porcentaje de humedad de las muestras sin extracción mecánica más caldera térmica.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

Gráfica de comparación de porcentaje de humedad de las muestras en el prototipo y adición de calor con caldera.

En la presente gráfica, se puede observar la disminución de humedad desde su estado inicial hasta nivel óptimo para su uso, durante el tiempo que fue sometida la muestra tanto por el proceso de secado en el prototipo, mas adición de calor a través de la caldera térmica haciendo uso de los residuos biomásico, funcionando el prototipo como un sistema hibrido solar-biomasa logrando acelerar el tiempo de secado hasta un 50% que en los ensayos anteriores.



Grafica 13. Humedad de las muestras en el prototipo.

Fuente: Elaboración propia en programa Excel 2016

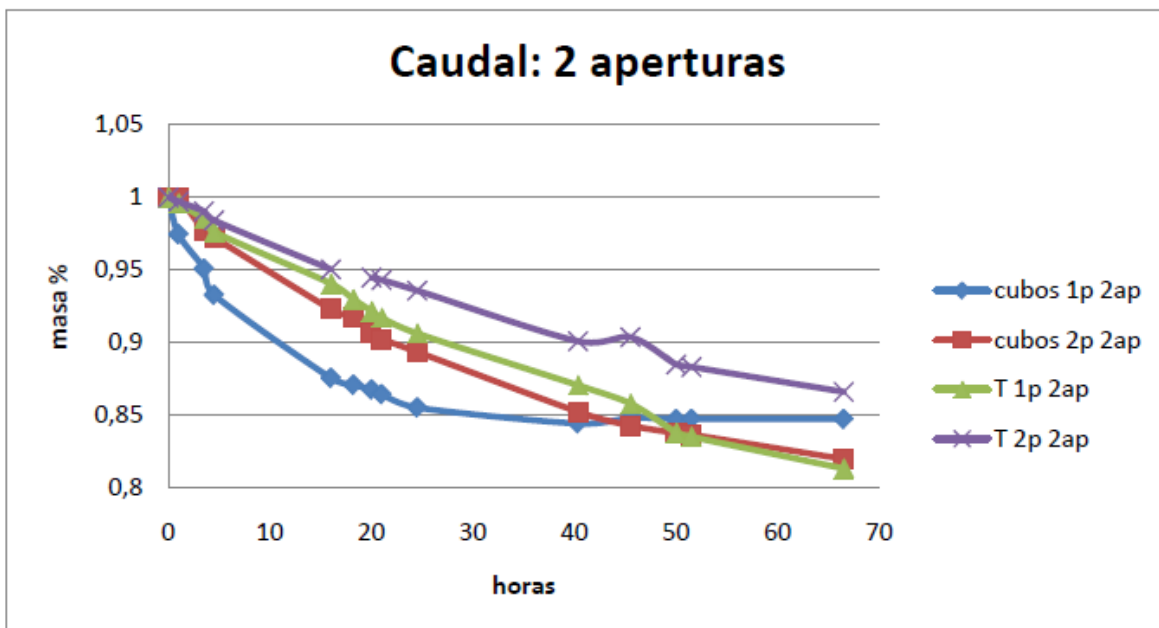
Como estudio retrospectivo tomamos datos de secado de madera al horno eléctrico con muestras de cedro macho que realizo José Manuel García Ruiz en su Tesis de grado.

Así mismo utilizo varias geometrías diferentes, las mismas que utilizo para el secador solar, a saber:

- Tablas de 5,08 cm de espesor y 20,32 cm de longitud.
- Tablas de 2,54 cm de espesor y 20,32 cm de longitud.
- Cubos de 2,54 cm de arista.
- Cubos de 5,08 cm de arista.
- La humedad inicial de la muestra es del 31%.

Ensayos a temperatura constante de 45 °C

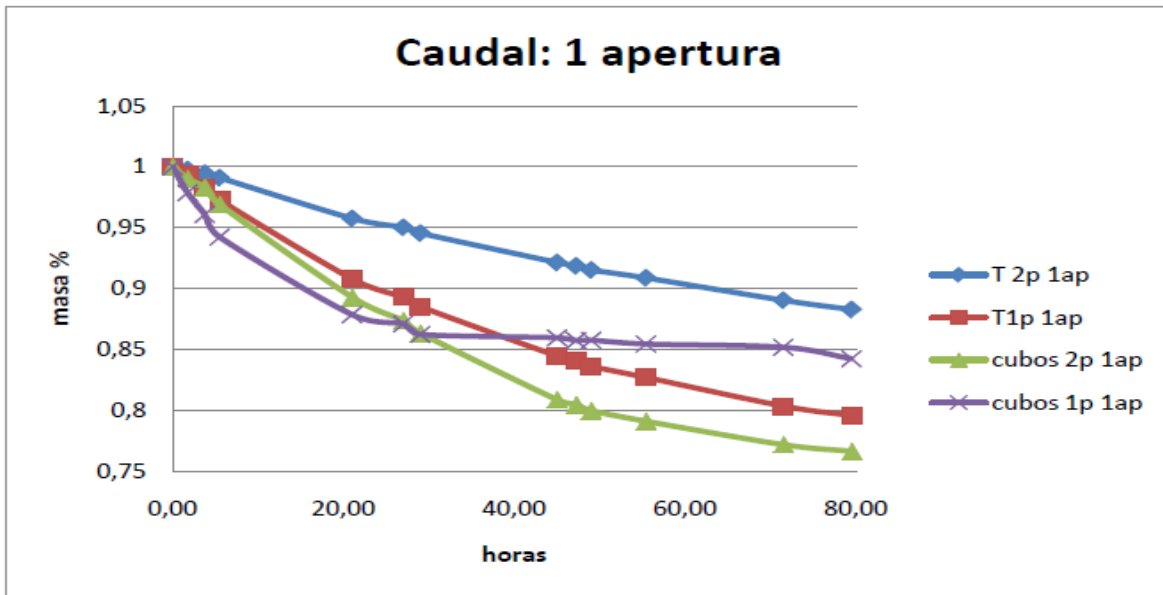
Para el ensayo a temperatura constante agrupo las muestras por geometría para ver mejor los resultados.



Grafica 14. Secado de Cedro Macho a 45°

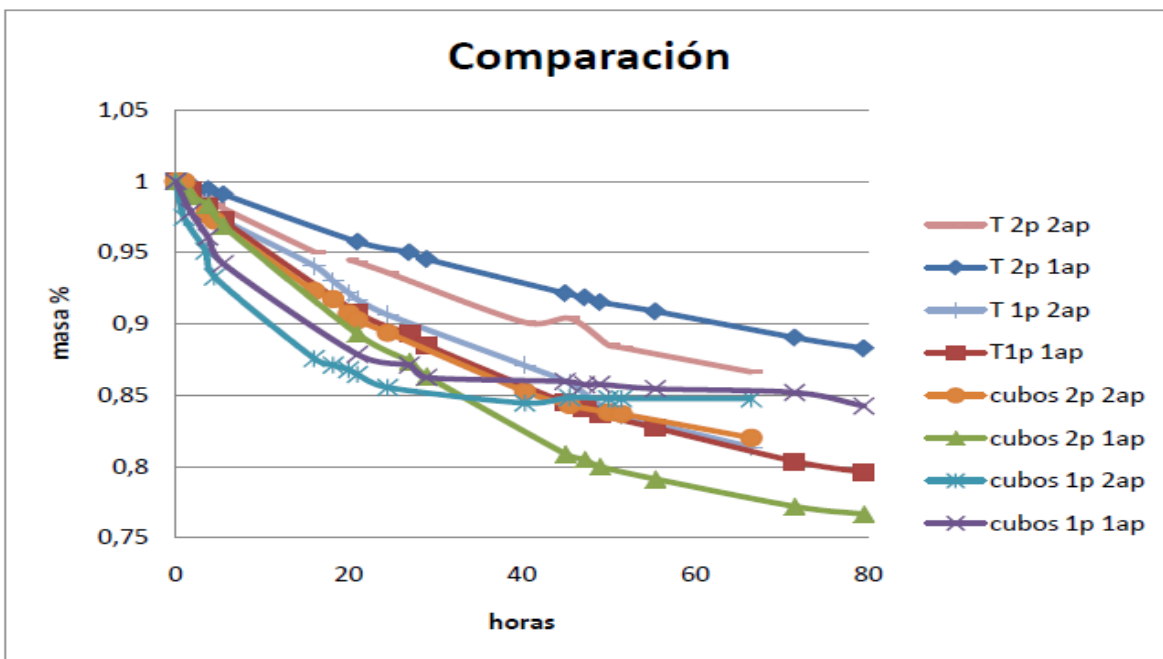
Fuente: (Ruiz, 2012)

Observamos que, como ya es habitual los cubos de 1 pulgada secan más rápido que el resto debido a la anisotropía de la circulación antes expuesta.



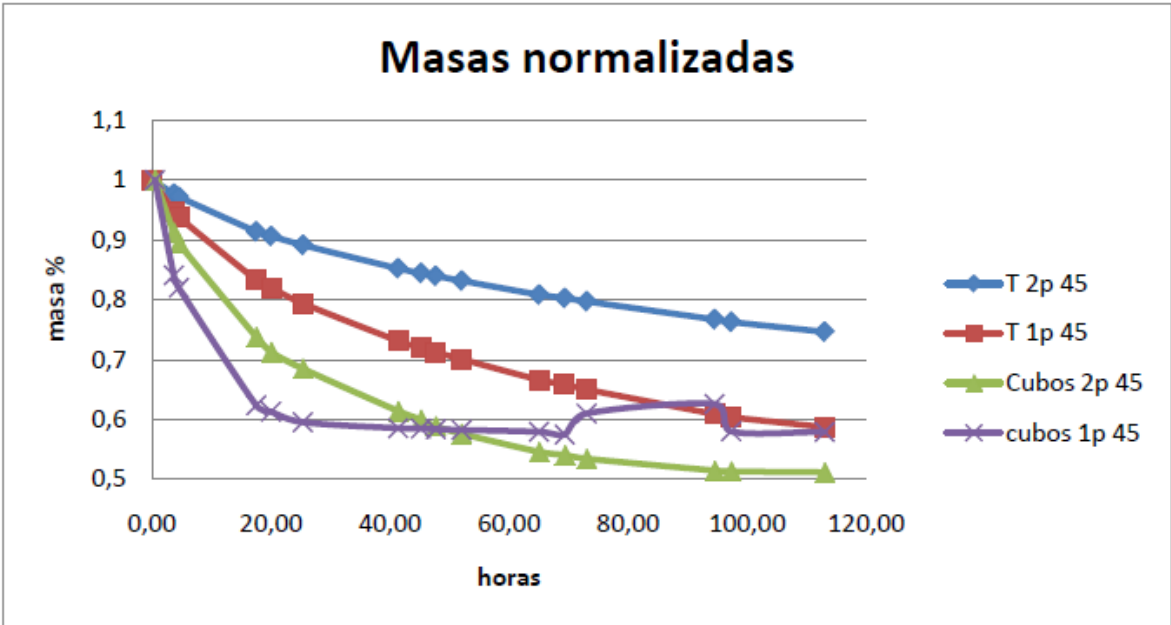
Grafica 15. Secado de Cedro Macho a 45° con un flujo de renovación

Fuente: (Ruiz, 2012)



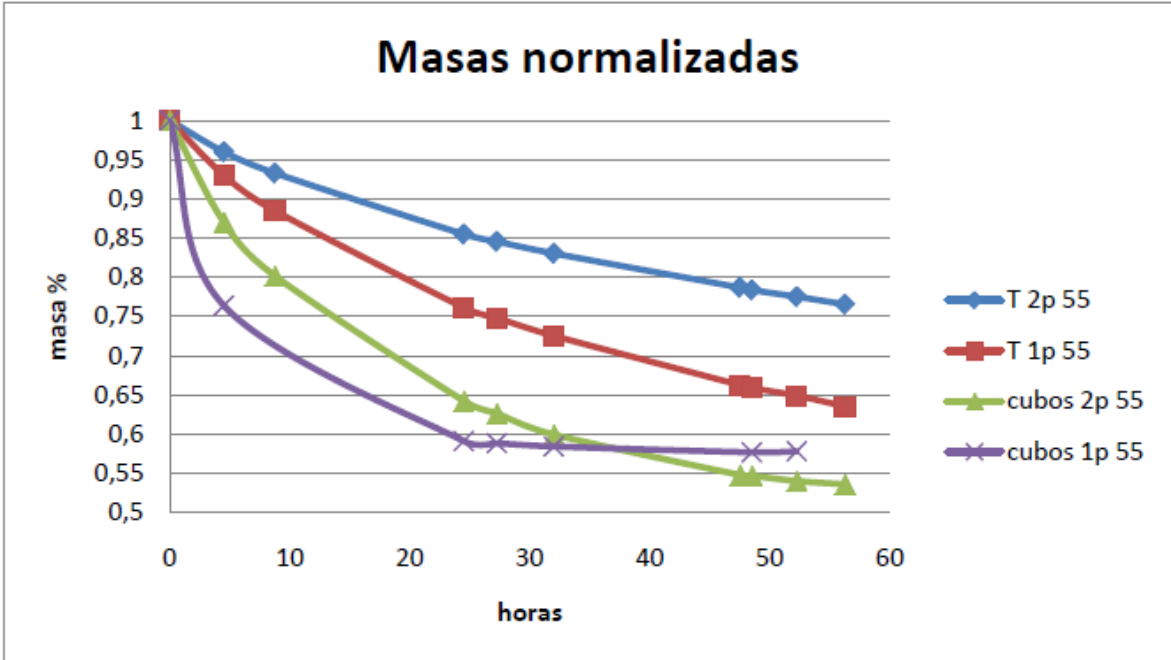
Grafica 16. Comparación de secado

Fuente: (Ruiz, 2012)



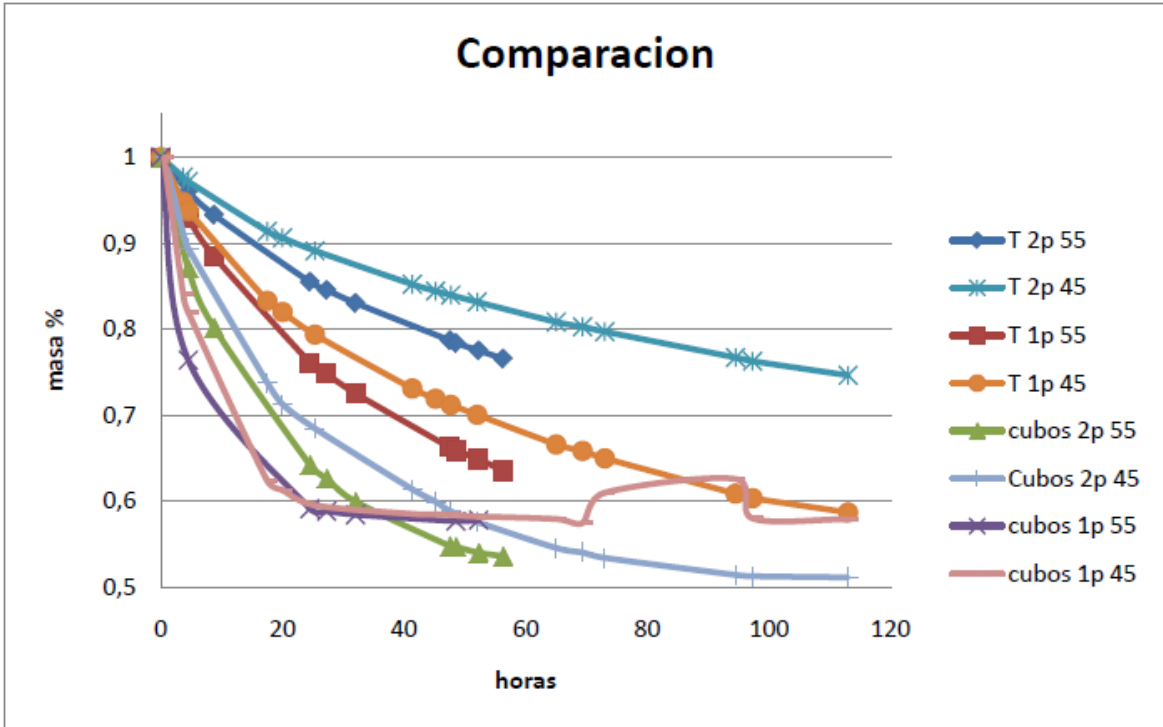
Grafica 17. Masas normalizadas

Fuente: (Ruiz, 2012)



Grafica 18. Masas Normalizadas a una temperatura de 55°

Fuente: (Ruiz, 2012)



Grafica 19. Comparación entre ambas temperaturas 45° y 55°

Fuente: (Ruiz, 2012)

X. Conclusiones

Por medio de la evaluación de los factores que inciden en el proceso de secado mediante un prototipo de secador solar por convección forzada con adición de calor a través de un dispositivo térmico para el tratamiento de secado de madera en FAREM-Estelí podemos concluir que:

1. La implementación técnica del diseño fue un éxito al operar en diferentes condiciones ambientales como en el caso de aumentos de temperatura por la radiación solar o por grandes temperaturas que alcanzo el dispositivo térmico sin crear ningún defecto en la estructura, y las muestras tratadas.
2. El prototipo logro alcanzar un nivel de entendimiento de su funcionamiento gracias a los cálculos de datos reales, que explican lo que ocurre matemáticamente en el interior de él, gracias a los principios básicos de transferencia de calor.
3. La investigación permitió, conocer el nivel de percepción de las personas que trabajan directamente con el secado de madera y las diferentes aplicaciones en la comercialización y el uso industrial. A través de la implementación de una encuesta donde la gran mayoría de las personas expresaron efectivamente que la implementación de un secador solar por convección forzada es de gran importancia y una alternativa viable para su desarrollo laboral en Estelí.
4. Los resultados de las muestras tratadas mostraron que los parámetros de funcionamiento incidieron de forma correcta en los lapsos de tiempo, hasta su punto ideal para el uso industrial. Donde las muestras coincidían con los diferentes rangos de trabajo, donde su temperatura variaba, utilizando el dispositivo térmico, las diferentes variaciones de radiación solar, o un secado mixto.

XI. Recomendaciones

En función de los resultados obtenidos y las conclusiones formuladas, se plantean las siguientes recomendaciones, dirigidas a los futuros investigadores de la carrera de ingeniería en energías renovables o personas particulares que deseen implementar un secador solar por convección forzada con adición de calor por dispositivo térmico en su lugar de trabajo.

- 1- En la etapa de construcción del secador solar si el área captadora es mayor de 1 m² y es de vidrio se debe seccionar en dos o más partes para evitar rupturas debido a la dilatación térmica lineal.
- 2- Para un mayor aprovechamiento del calor se recomienda implementar sistemas de recirculación de aire para aprovechar el fluido que ya está caliente.
- 3- En el área del dispositivo térmico se debe hacer un ducto de salida del humo ya que afecta cuando no está muy bien encendido.
- 4- Implementar un ventilador en la caldera para que el fuego este encendido de manera permanente y no sea una persona que lo asista ya que al hacerlo inhala grandes cantidades de humo que afecta a su salud.
- 5- Para nuevas investigaciones sobre esta temática se propone continuar con la investigación de este prototipo de secador en temporada de verano, para una mayor comprensión del fenómeno del secado en condiciones óptimas y así darnos cuenta las variaciones que ocurren.

Bibliografía

- Andrade, R. (4 de septiembre de 2009). *T.Udom*. Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/7542/Capitulo3.pdf>
- Canales, F. H., De Alvarado, E. L., & Pineda, E. B. (1994). *Metodología de la investigación*. (Segunda ed.). Washington DC: 525 Twenty-third Street, N.W.
- CENGEL, Y. A. (2004). *Transferencia de calor*. Mexico, D.F: INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Conde, M., & Fernandez Golfin, J. (2007). *Manual tecnico del secado de maderas*. Madrid: Centro de investigación forestal - Aitim.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2009). *solar Ingineering* . Oxford: Copyright.
- Galvez, B. (23 de Junio de 2011). Madera estructural tipología y calculo de uniones. Valencia, Valencia, España.
- García, S. (22 de Enero de 2011). *Instrumentos de observacion* . Obtenido de <http://webs.um.es/gregomc/IntroduccionAstronomia/Temas/04%20INSTRUMENTOS%20DE%20OBSERVACION.pdf>
- Hall, M., & Witte, G. (1998). *Maderas del sur de chile*. Santiago de chile: Universitaria.
- Hernandez Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. Ciudad de Mexico: INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor* (Octava ed.). Madrid: Concepción Fernandez Madrid.
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2011). *Principios de la tansferencia de calor* (Séptima ed.). Ciudad de Mexico: Cengage Learning.
- Lopez, J. P. (2006). *Introduccion a la metodologia de la investigacion cientifica*. Managua: El Amanecer.
- Mauthner, F., & Weiss, W. (2014). *Solar-Heat-Worldwide*. Gleisdorf: Institute for Sustainable Technologies.
- MEM. (08 de 04 de 2013). *Ministerio de energia y minas*. Obtenido de <http://www.mem.gob.ni/index.php?s=1&idp=174&idt=2&id=771#>
- Mendez, E. M. (7 de Enero de 2012). *Humedad de equilibrio higroscopico y sus valores*. Sevilla, Sevilla, España: gremieditorscat S.A.

- NASA. (16 de Noviembre de 2017). *ADMOSPHERIC SCIENCIE DATA CENTER*.
Obtenido de <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=13.099472&lon=-86.368489&submit=Submit>
- Nonhebel, G., & Moss, A. (2002). *El secado de los solidos en la industria quimica*. Buenos Aires: REVERTE S.A.
- Oñate, J. A. (2005). *Manual de toneleria*. Barcelona: Mundi-prensa.
- Ortega Rodriguez, M. (1999). *Energias Renovables*. Madrid: PARANINFO.
- Pedroza, M. E. (1993). *El modelo de gestion de la investigacion*. Managua: UNAN-Managua.
- Prakash, O., & Kumar, A. (2004). *Solar drying Technology*. Oxford: Departament of mechanical engineering.
- Revilla, C., Eglomar, S., & Hernandez, I. (2009). *Transferencia de Calor*. Mexico: opyright.
- Rodriguez Garcia, J., & Virgós Rovira, J. M. (1998). *Fundamentos de opticas ondulatorias*. Asturias: Universidad de Oviedo.
- Ruiz, J. M. (23 de Abril de 2012). Estudio y construccion de una instalacion de secado de madera mediante energia solar termica. Esteli, Esteli, Nicaragua.
- Suarez, I. P. (11 de 09 de 2010). *cdigital*. Obtenido de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/33015/1/pozossuarez.pdf>
- Vega, J. (24 de Marzo de 2013). *Psicrometría*. Obtenido de <http://psicrometria-imi131.blogspot.com/2013/11/carta-psicrometrica.html>
- Vignote peña, S., & Martinez Rojas, I. (2006). *Tecnologia de la madera* (Tercera ed.). Barcelona: Mundi-prensa.
- Villena, R. M. (23 de julio de 2014). *EcuRed*. Argentina: Chiado. Obtenido de Energia solar: https://www.ecured.cu/Radiaci%C3%B3n_solar
- W.Nutsch. (2000). *Tecnologia de la madera y el mueble*. Barcelona: REVERTE S.A.

ANEXOS

Anexo 1: Encuesta aplicada a personas que trabajan con el rubro de la madera en el municipio de Estelí.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

Encuesta para personas que se dedican al rubro de la madera.

Introducción

El siguiente instrumento (Encuesta) tiene como finalidad conocer los aspectos relacionados con el nivel percepción que tiene las personas que trabajan en el proceso de secado de la madera para propósitos industriales. Por lo que de la manera más atenta se le solicita por favor responder de forma objetiva a cada una de las preguntas que se le plantean, dado que son de mucha importancia para el análisis de nuestro estudio.

I. Datos Generales

1.1 Fecha de encuesta: ____/____/____

1.2 Lugar donde trabaja _____

1.3 Edad: 1-29 30-49 50-70

1.4 Sexo: Masculino Femenino

1.5 Preparación académica: Primaria Secundaria Técnico

Universidad

1.6 Ocupación: Propietario Gerente Carpintero Comerciante

Otros

II. Aspectos relacionados con el proceso de secado de la madera

A) ¿En su fábrica que uso le da a la madera?

1) Comercio Mueblería Industrial Otros

B) ¿Cuáles son los tipos de madera que acostumbra trabajar?

1) Cedro macho Cedro real Caoba Pino Otros

C) ¿En qué estado compran la madera?

1) Seca Verde Ambas

D) ¿En qué época del año la madera comercial es más cara?

1) Invierno Verano Ambas

E) ¿Qué métodos utiliza para el secado de la madera en su trabajo?

1) Secado eléctrico Secado en condiciones naturales Secado solar
Hornos Otros

F) ¿Aproximadamente cuánto tiempo tarda en secar la madera?

1) Días Semanas Meses

G) ¿Qué beneficios les trae el tiempo de secado de la madera en su empresa o negocio?

1) Mayor demanda Más producción Mayor ganancia económica
Ninguno

H) ¿Conoce acerca del secado de la madera a base de hornos solares?

1) Sí No

D) ¿Qué piensa sobre este tipo de secado?

1) Muy bueno Bueno Regular Deficiente

J) ¿Está de acuerdo en implementación del secado de madera por medio de un horno solar en su lugar de trabajo?

1) De acuerdo Poco de acuerdo En desacuerdo

K) ¿Cree que un secador solar contribuye directamente con el medio ambiente?

1) Si No Talvez

L) ¿Considera usted importante el aprovechamiento de los residuos de la madera para el tratamiento de secado con dispositivo térmico?

1) Muy poco importante Poco importante Medianamente importante
Importante Muy importante

M) ¿Estaría de acuerdo usted en la implementación de un sistema industrial de secado de madera con energía solar y sistema de calor externo?

1) Muy de acuerdo De acuerdo Poco de acuerdo En desacuerdo

N) ¿Cree que la implementación de secadores solares en la industria de la madera en Estelí contribuya al desarrollo económico?

1) Sí No

Anexo 2: Presupuesto de construcción

Según diseños anteriores de secadores solares los componentes y sus costos son variables dependiendo de su diseño. A continuación se muestran los cotos de los componentes que van a formar nuestro diseño.

| Presupuesto | | | | |
|--------------------|------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------|
| N° | Descripción | Cantidad | Costo Unitario C\$ | Total C\$ |
| 1 | Tubos de hierro de 1" | 2 | 260.00 | 520.00 |
| 2 | Soldadura | 1 | 60.00 | 60.00 |
| 3 | Lamina de Gypsum Denglass | 3 | 702.00 | 2,106.00 |
| 4 | Muro seco | 1 | 200.00 | 200.00 |
| 5 | Esquinero Metálico | 3 | 30.00 | 90.00 |
| 6 | Esquinero de Aluminio | 1 | 30.00 | 30.00 |
| 7 | Vidrio | 1 | 600.00 | 600.00 |
| 8 | Tornillos de forro | 100 | 0.40 | 40.00 |
| 9 | Cinta de malla | 1 | 60.00 | 60.00 |
| 10 | Lamina de Zinc Liso | 1 | 200.00 | 200.00 |
| 11 | Lamina de Zinc Liso Metálica | 1 | 250.00 | 250.00 |
| 12 | Caja metálica 2x4 | 2 | 23.00 | 46.00 |
| 13 | Protoduro | 5 | 35.00 | 175.00 |
| 14 | Conectores Romex | 3 | 9.00 | 27.00 |
| 15 | Wire Nut | 5 | 5.00 | 25.00 |
| 16 | Extractores | 2 | 500 | 1000 |
| 17 | Grapas Plásticas | 100 | 0.50 | 50.00 |
| 18 | Interruptor | 1 | 60.00 | 60.00 |
| 19 | Enchufe | 1 | 35.00 | 35.00 |
| 20 | Aislador Térmico | 5 | 40.00 | 200.00 |
| Total | | | 2,649.90 | 5,774.00 |

Tabla 15 Presupuesto de remodelación

Anexo 3: Nomenclaturas o lista de símbolos.

Q: Caudal volumétrico
V: Velocidad
 \dot{m} : Flujo másico
 ρ : Densidad
 Σ : Sumatoria
Re: Número de Reynolds
Vm: Velocidad máxima
L: Longitud
 μ : Viscosidad Dinámica
ST: Sección Transversal
Pr: Número de Prandtl
Cp: Calor específico
k: Constante de conductividad
 Nu_D : Número de Nusselt
 \bar{h} : Coeficiente medio de transferencia de calor
T.Q: Transferencia de calor
D: Diámetro
Te: Temperatura del fluido
Ts: Temperatura de superficie
Ti: Temperatura ambiente
Exp: Exponencial
As: Área de la sección
 ΔT_{ln} : Diferencia media logarítmica
 ln : Logaritmo natural
 \dot{Q} : Velocidad de transferencia de calor
 ΔT : Diferencia de temperatura
RT: Resistencia total
HR: Humedad relativa

P: Presión

Anexo 4: Fotos de mejoras del prototipo.



Figura 14. Revestimiento del prototipo.



Figura 15. Prototipo concluido.

Anexo 4: Etapa de campo.



Figura 16. Mediciones de radiación solar.



Figura 17. Pesaje de las muestras.



Figura 18. Muestras apilonadas.



Figura 19. Medidas de temperatura en el dispositivo térmico.



Figura 20. Desechos biomásico en el dispositivo térmico.



Figura 21. Dispositivo térmico en funcionamiento.



Figura 22. Aplicación de la encuesta.



Figura 23. Secador solar industrial ubicado en santa cruz Estelí



Figura 24. Caldera térmica para el aprovechamiento de los residuos biomásico.



Figura 25. Madera apilonada en secador industrial.



Figura 26. Ventilador para flujo de aire forzado.