



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
VICERRECTORADO
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL

INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS HORNOS DE SECADO DE MADERAS TROPICALES EN LA CIUDAD DE EL ALTO

PROYECTO FINANCIADO CON RECURSOS DEL IMPUESTO DIRECTO
A LOS HIDROCARBUROS (IDH)

EL ALTO – BOLIVIA
2020

UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

AUTORIDADES

M.Sc. Freddy Gualberto Medrano Alanoca
RECTOR

Dr. Carlos Condori Titirico
VICERRECTOR

Dr. Antonio S. López Andrade Ph.D.
DIRECTOR DICyT

Ing. Marco Antonio Bohorquez Llave
**DECANO ÁREA DE INGENIERÍA
“DESARROLLO TECNOLÓGICO PRODUCTIVO”**

Ing. Néstor Genaro Fernández Aranda
**DIRECTOR DE CARRERA
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL**

Ing. M.Sc. Freddy Tarqui Ayala
**COORDINADOR DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL**

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Ing. Henry Favio Arramayo Navarro
Lic. German Alcalá Cruz

COMITÉ DE REVISIÓN TÉCNICA ESPECIALIZADA

Ing. Cipriano Justino Quispe Vinaya
Ing. Henry Néstor Sánchez Quisbert

COMITÉ DE REVISIÓN DE ESTILO Y FORMA

Ing. Edwin José Ajacopa Laime
Ing. Grover León Nina

INSTITUCIONES

Asociación de Carpinteros 19 de Marzo
Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural (MDP y EP)

COLABORACIÓN

Centro de Innovación Productiva CIP - ProBolivia
Instituto de Investigaciones Industriales – UMSA

DERECHOS RESERVADOS: Universidad Pública de El Alto

DEPÓSITO LEGAL: 4-1-150-20-PO

ISBN: 978-9917-9835-1-4

EDITORIAL: INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN - INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL

IMPRENTA: Editorial Europa

Dirección UPEA: Av. Sucre s/n Zona Villa Esperanza
Teléfono: 2840040
Web: <https://www.upea.bo/>

Octubre, 2020
El Alto - Bolivia

PRESENTACIÓN

El Instituto de Investigación de la Carrera de Ingeniería en Producción Empresarial de la Universidad Pública de El Alto se complace en presentar el proyecto de investigación titulado “INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS HORNOS DE SECADO DE MADERAS TROPICALES EN LA CIUDAD DE EL ALTO” financiado con fondos del Impuesto Directo a los Hidrocarburos – IDH, proyecto de investigación desarrollado con la Asociación de Carpinteros “19 de Marzo” de la ciudad de El Alto del departamento de La Paz.

Este proyecto de investigación presenta estudios para realizar el diseño de un horno de secado solar híbrido para maderas tropicales utilizadas por los pequeños productores de manufacturas en madera de la ciudad de El Alto.

Por lo tanto, en este documento se detalla un diagnóstico de la situación actual de los productores de muebles de madera de la ciudad de El Alto, las experiencias nacionales e internacionales respecto a la aplicación de hornos de secado solar híbridos para maderas tropicales, los materiales aislantes propuestos para aislamiento térmico e impermeabilidad del horno solar híbrido, los cálculos necesarios para diseñar un horno de secado solar híbrido que responda a las necesidades de los pequeños productores de manufacturas en madera y el análisis comparativo de costos del secado solar híbrido de secado de la madera en nuestro medio.

A partir de esta información se presenta un diseño de horno solar híbrido de secado de madera que sirva como una alternativa económica para los pequeños productores de madera a fin de mejorar la calidad de la madera que se utiliza en los productos de madera, mejorar la calidad de sus productos terminados.

Este proyecto de investigación es considerado de mucha importancia para el Instituto de Investigación de la Carrera de Ingeniería en Producción Empresarial debido a que significa un aporte muy importante a los fabricantes de productos de madera y sobre todo al desarrollo de procesos productivos innovadores para mejorar la calidad y productividad de uno de los sectores industriales más importantes de la ciudad de El Alto.



Ing. M.Sc. Freddy Tarqui Ayala
Coordinador del Instituto de Investigación
Ingeniería en Producción Empresarial

CONTENIDO

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	13
1.1.Introducción	14
1.2.Antecedentes.	16
1.3.Planteamiento del problema.	18
1.4.Justificación	20
1.4.1. Justificación académica	20
1.4.2. Justificación social	21
1.4.3. Justificación económica	21
1.4.4. Justificación ambiental	21
1.5.Objetivos	21
1.5.1. Objetivo general	21
1.5.2. Objetivos específicos	21
1.6. Alcance del proyecto	22
1.6.1. Alcance institucional	22
1.6.2. Alcance territorial	23
1.6.3. Alcance en función al tiempo de duración	23
1.7.Hipótesis de investigación	23
1.7.1. Formulación de hipótesis	23
1.7.2. Variables	23
1.7.2.1. Variables independientes	23
1.7.2.2. Variables dependientes:	24
1.8.Metodología de la investigación	24
1.8.1. Método hipotético - deductivo.	26
1.8.2. Instrumentos de la recolección de datos	27
2. ANÁLISIS PRODUCTIVO DEL SECTOR MADERERO²⁷	
2.1. Normativa vigente	27
2.1.1. Zonas con mayor potencial forestal	28
2.2. Análisis del sector productivo	30
2.2.1. Cadena productiva	30
2.2.2. Análisis del contexto	31
2.2.3. Debilidades del sector maderero	33
2.2.4. Medidas posibles para solucionar la crisis	34

3. MARCO TEÓRICO³⁵

3.1. Clasificación de la madera	35
3.2. Propiedades y características de la madera	36
3.3. Estructura de la madera	36
3.3.1. Propiedades físicas de la madera	38
3.3.2. Densidad	38
3.3.3. Densidad de referencia	40
3.3.4. Densidad básica	40
3.3.5. Densidad nominal	41
3.3.6. Contenido de humedad	41
3.3.7. Agua libre	44
3.3.8. Agua de constitución	45
3.3.9. Agua de saturación higroscópica	45
3.3.10. Habilidad	47
3.4. Propiedades mecánicas de la madera	47
3.4.1. Dureza	47
3.4.2. Elasticidad	48
3.4.3. Flexibilidad	49
3.5. Resistencia	50
3.5.1. Compresión	50
3.5.2. Resistencia al corte	51
3.5.3. Resistencia al choque	52
3.5.4. Resistencia a la tracción	52
3.6. Fundamentos de secado	53
3.6.1. Contenido de humedad	54
3.6.2 Secado de la madera	54
3.6.3. Factores que intervienen en el secado de la madera	55
3.6.4. Clasificación de secado de la madera	55
3.6.5. Secado natural	56
3.6.6. Tipos de sistemas de secado solar	57
3.6.7. Secado artificial.	60
3.6.8. Secado por condensación	61
3.6.9. Secado por convección	62
3.6.10. Proceso de secado.	62
3.6.11. Fase de calentamiento	62
3.6.12. Fase de secado	63
3.6.13. Fase de tratamiento posterior	63
3.6.14. Dificultades del proceso de secado	63
3.6.15. Mejoramiento del proceso de secado	64

4. DESARROLLO DEL TRABAJO64

4.1.Recolección de información.	65
4.2.Prueba experimental	73
4.3.Pruebas de aislamiento térmico y permeabilidad de materiales.	78
4.4.Diseño de un sistema hibrido hornos de secado de maderas tropicales	79
4.4.1. Tamaño y capacidad del sistema hibrido – horno de secado	80
4.4.2. Apilamiento de la madera	81
4.4.3. Dimensionamiento vertical de la cámara del horno de secado de madera	81
4.4.4. Dimensionamiento de los separadores	83
4.4.5. Dimensionamiento horizontal de la cámara del horno de secado de madera	84
4.4.6. Volumen de secado de la madera.	87
4.4.7. Componentes del sistema hibrido del sistema hibrido – horno de secado de madera	89
4.4.8. Estructura del horno de secado	89
4.4.9. Techo y colector	91
4.4.10. Radiación solar en la ciudad de el alto	92
4.4.11. Angulo del techo del horno - secador	94
4.4.12. Ventilador	98
4.4.13. Termómetros de bulbo seco y bulbo húmedo	99
4.5.Quemador a gas	99
4.5.1. Determinación de la potencia del quemador	99
4.5.2. Instalación de gas natural	107
4.5.3. Costo del sistema hibrido – horno de secado de madera.	112
4.5.4. Material	113
4.5.5. Mano de obra	115
4.5.6. Equipos	115
4.5.7. Costo total del sistema hibrido – horno de secado de madera	116
5. CONCLUSIONES	
	116
6. RECOMENDACIONES	
	119
7. BIBLIOGRAFÍA.	
	120
ANEXO I: Formato de encuesta	121
ANEXO II: Resultados de encuestas	125
ANEXO III: Productos elaborados por los carpinteros	133
ANEXO IV :Cotización de pruebas de laboratorio, contrato de alquiler de equipos	141
ANEXO V: Planos de diseño de sistema hibrido – horno de secado de madera	147

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Relación de Variables Independientes - Variables Dependientes	24
Tabla 2: Categorías de bosques del Estado Plurinacional de Bolivia	30
Tabla 3: Densidad aparente de algunas especies madereras	39
Tabla 4: Porcentaje de humedad de las maderas verdes, recién cortadas	42
Tabla 5: Contenido de Humedad para productos terminados	42
Tabla 6: Estado de la madera en diferentes estados de corte	46
Tabla 7: Tipo de madera utilizado por los carpinteros de la “Asociación 19 de marzo”	73
Tabla 8: Características de Higrómetro MD812P	74
Tabla 9: Termómetro TP 500	75
Tabla 10: Dimensión de las tablas de madera elegida	80
Tabla 11: Dimensiones internas del Horno de Secado	87
Tabla 12: Valores de conductividad y resistencia térmica de materiales constructivos	90
Tabla 13: Valores de conductividad y transmitancia térmica de materiales constructivos	92
Tabla 14: Coordenadas geográficas de la ciudad de El Alto	95
Tabla 15: Comportamiento del sol en la ciudad de El Alto (Fecha 21/12/2018)	97
Tabla 16: Cumplimiento V.A.S.A. para la instalación de Gas Natural	108
Tabla 17: Costo del material a utilizar en el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera	113
Tabla 18: Costo de Mano de Obra para el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera	115
Tabla 19: Costo de los equipos a utilizar en el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera	115
Tabla 20: Costo total para implementar el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Población de carpinteros y operadores de procesamiento de madera	17
Figura 2: Secado Tradicional de la Madera empleado en las carpinterías de la ciudad de El Alto	19
Figura 3: Imagen de un prototipo de Sistema Solar para el Secado de Madera	25
Figura 4: Esquema de diseño metodológico secuencial de la investigación	26
Figura 5: Zonas forestales y regiones productoras	29
Figura 6: Esquema de los actores involucrados dentro de una cadena productiva	30
Figura 7: Estructura de la Madera	37
Figura 8: Determinación de la humedad de la madera	43
Figura 9: Agua libre de la madera	44
Figura 10: Agua de constitución de la madera	45
Figura 11: Agua de saturación higroscópica de la madera	46
Figura 12: Hendibilidad de la Madera	47
Figura 13: Dureza de la Madera	48
Figura 14: Elasticidad de la Madera	49
Figura 15: Flexibilidad de la Madera	50
Figura 16: Resistencia a compresión de la Madera	51
Figura 17: Pandeo de la Madera	51
Figura 18: Resistencia al corte de la Madera	52
Figura 19: Apilado de la madera en secado natural	56
Figura 20: Tipos de sistemas de secado solar	58
Figura 21: Cámaras de secado artificial (Horno de vapor)	60
Figura 22: Diversificación de árboles antes del proceso de talado en la localidad de Ixiamas	65

Figura 23: Proceso de tala de la madera en el Departamento de La Paz.	67
Figura 24: Proceso de poda de los árboles en el Norte del Departamento de La Paz.	68
Figura 25: Transporte de la madera por carretera – río en el municipio de Ixiamas del Departamento de La Paz.	69
Figura 26: Aserradero que se encuentra cerca del municipio de Ixiamas	70
Figura 27: Madera cortada - tronzada	70
Figura 28: Secado de la madera cortada	71
Figura 29: Proceso de cepillado de madera	72
Figura 30: Productos elaborados con madera	72
Figura 31: Mediciones realizadas a madera durante el proceso de secado al aire libre	76
Figura 32: Medición realizada a madera secada en hornos industriales	77
Gráfico 3: Medición experimental realizada a madera roble – Secado al aire libre	77
Figura 33: Dimensión de las tablas de madera elegida	81
Figura 34: Dimensionamiento de la altura de la cámara de Horno de Secado.	82
Figura 35: Medidas de espacio de los separadores para la pila de madera	84
Figura 36: Dimensionamiento del ancho y largo de la cámara de Horno de Secado.	86
Figura 37: Radiación Global Horizontal en Bolivia	93
Figura 38 : Comportamiento del sol en la ciudad de El Alto – Bolivia	97
Figura 39: Quemador Eclipse Bayonet – Eclipse	107

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1:	
Exportaciones e importaciones de madera (2005 – 2015) expresado en Millones de Dólares	32
Gráfico 2:	
Importaciones y Exportaciones de madera y sus productos de manufactura, según país de origen y destino al año 2014	32
Gráfico 3:	
Medición experimental realizada a madera roble – Secado al aire libre	77

INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS HORNOS DE SECADO DE MADERAS TROPICALES EN LA CIUDAD DE EL ALTO

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

- TITULO DEL PROYECTO.

El presente proyecto de investigación titula: “SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNOS DE SECADO DE MADERAS TROPICALES EN LA CIUDAD DE EL ALTO”.

- LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

Desarrollo Empresarial.

- TIPO DE PROYECTO

En función a la línea de investigación y a su orientación, es un proyecto de investigación experimental.

- ORIGEN DEL PROYECTO.

En la actualidad, en la ciudad de El Alto existen aproximadamente 20000 unidades productivas pertenecientes al sector maderero, de las cuales el 90% son microempresas dedicadas a la fabricación de muebles (carpinterías).

El crecimiento del mercado internacional de productos de madera (fabricación de muebles, artesanías, etc.) es cada vez mayor, así como las exigencias que tienen los clientes. Dentro de las exigencias, se puede mencionar las siguientes: Madera fina, durabilidad, diseño, producto de buena calidad, etc.

Para cumplir estas exigencias y para obtener productos de mayor calidad, es muy importante reducir el contenido de humedad de la madera de acuerdo a las necesidades de los clientes.

Para el proceso de secado de la madera, diversas microempresas no tienen acceso a hornos de secado; es por ello que recurren a técnicas empíricas como la exposición de la madera a la acción directa del sol y del aire deteriorando la calidad de la madera y obteniendo productos de baja calidad.

En función a lo mencionado anteriormente, este proyecto de investigación se enfocará a mejorar el proceso de secado de la madera dentro de estas unidades productivas, alcanzando contenidos óptimos de humedad para la fabricación de productos de buena calidad, y de esta manera mejorar la productividad de dichas microempresas respondiendo a las exigencias de los clientes.

- **DIFUSIÓN DE RESULTADOS.**

Presentación de libro, manual y/o texto científico.

1.1. **INTRODUCCIÓN**

El desarrollo y progreso de los países se ha dado indiscutiblemente por las empresas, quienes por medio del desarrollo de sus actividades se han convertido día a día en el motor que mueve la economía mundial.

Por tal motivo, es de vital importancia que en un país existan empresas, microempresas, pymes eficientes en cada uno de los procesos que realiza, haciendo un uso óptimo de los recursos con los que cuentan y de este modo satisfacer las necesidades de cada uno de sus clientes.

El secado es una técnica común para la conservación de varios productos, éste es un proceso mediante el cual se elimina o reduce el porcentaje de humedad por medio de la evaporación del agua localizada en la superficie de la misma.

Este proceso se emplea en muchas industrias que pertenecen a los diferentes sectores de la economía, entre ellas la industria maderera, en donde éste tiene como finalidad minimizar el grado de humedad presente en la madera y así contrarrestar el crecimiento o desarrollo de microorganismos que deterioran la misma, mejorando las propiedades características de la madera y aumentando la calidad del producto.

Durante los últimos años ha surgido la necesidad de emplear nuevos tipos de energía procedentes de fuentes naturales y renovables. Estas nuevas fuentes son muy importantes para el continuo desarrollo de países que cuentan con grandes cantidades de recursos naturales. Estas fuentes de energía se denominan “energías alternativas”, “energías verdes” y/o “energías renovables”, entre las cuales se destacan energía hídrica, energía eólica y la energía solar.

La madera para ser utilizada debe cumplir ciertas características, que dependen del tipo de utilización que se le vaya a dar (artesanía, construcción, decoración, mueblería). El valor agregado que se otorga a la madera, mediante diferentes métodos, tales como el secado, es sin lugar a dudas muy importante para su valorización, por lo tanto, la eliminación del agua es importante para diversos propósitos que son indispensables para conseguir la buena calidad de los productos acabados y adquirir un mejor precio en el mercado nacional.

El comportamiento de la madera está determinado por las relaciones de humedad, siendo uno de los parámetros más importantes a considerar para los distintos propósitos en que será utilizada. Es por ello que de acuerdo a la utilización que se le vaya a dar, es muy importante eliminar y/o reducir su contenido de humedad a un nivel apropiado antes de su transformación en productos.

El secado de la madera consiste en la eliminación y/o reducción de agua en exceso localizada en la superficie de la misma, se efectúa con el fin de protegerla contra el ataque de los hongos de pudrición, facilitar su manipulación, proporcionando a la madera una humedad de equilibrio e incrementar sus características de resistencia mecánica con el propósito de optimizar su posterior procesamiento y/o utilización.

La madera puede ser secada de las siguientes maneras: Secado completo al aire libre o secado natural y Secado completo en hornos. El secado al aire abierto presenta bajos gastos económicos, pero éste a menudo resulta en productos no garantizados. **(Ratti, Mujumdar 1997).**

El uso de Hornos o Secaderos Industriales presenta ciertas limitaciones ya que tienen un coste elevado para los microempresarios de la ciudad de El Alto. Por el contrario, la energía solar no es la única forma de energía amigable con el ambiente, pero es una alternativa que se encuentra disponible.

En la ciudad de El Alto, desde hace varios años el método más empleado para el secado de la madera es la exposición de la madera a la acción directa del sol y del aire (**secado al aire abierto**), un método empírico y poco técnico. Es por ello que a medida que ha transcurrido el tiempo ha tomado gran importancia el desarrollo de máquinas y/o equipos capaces de funcionar con grandes cantidades de madera y tomen un menor tiempo de secado. Para ello se ha optado por implementar sistemas de integración tecnológica de energías renovables, como es el caso de la energía solar.

Por lo cual, viendo la necesidad y la importancia del secado de madera; en el presente proyecto se realizará los cálculos necesarios para diseñar un Sistema híbrido – Horno de secado de maderas tropicales para la ciudad de El Alto, el cual combine la utilización de energía solar, energía eléctrica y la energía proveniente del gas natural; donde se vayan adaptando las condiciones internas del horno

(cámara de secado) para que la madera alcance la humedad final requerida en un menor tiempo mejorando y optimizando la calidad de secado de la madera y de esta manera plantear soluciones que permitan mantener y crecer a los microempresarios de la rama maderera.

Este sistema consiste en calentar el aire a través de la radiación solar para llevar a cabo el secado de la madera, tomando en cuenta variables como la temperatura, humedad relativa, humedad de equilibrio dentro del horno (cámara de sacado); obteniendo las condiciones adecuadas para el desarrollo de tareas que impliquen altas exigencias de calidad.

1.2. ANTECEDENTES.

A nivel nacional, no se han encontrado antecedentes sobre investigaciones del aprovechamiento solar para el secado de madera. Se conocen un par de intentos de construcción de hornos solares realizados por la Fundación Bolinvest a finales de la década de los noventa que no llegaron a concluirse y por lo tanto, no se cuenta con información sobre los resultados que pudieran haberse obtenido en caso de que los mismos hubieran entrado en operación.

A nivel internacional se han encontrado que en los últimos 45 años se han construido una amplia variedad de hornos solares que han sido construidos tanto en latitudes tropicales como en latitudes templadas. La mayoría de ellos fueron construidos por institutos de investigación para propósitos de evaluación y prueba y solo unos cuantos para su uso comercial.

En nuestro país no se cuenta con antecedentes de investigaciones realizadas sobre hornos de secado solar híbrido para fines de investigación y menos para uso comercial.

En la ciudad de El Alto, en la actualidad existen aproximadamente 20000 unidades productivas pertenecientes al sector maderero, de las cuales el 90% son microempresas dedicadas a la fabricación de muebles (carpinterías).

El crecimiento del mercado internacional de productos de madera (fabricación de muebles, artesanías, etc.) es cada vez mayor, así como las exigencias que tienen los clientes. Dentro de las exigencias, se puede mencionar las siguientes: Madera fina, durabilidad, diseño, producto de buena calidad, etc. Para cumplir estas exigencias y para obtener productos de mayor calidad, es muy importante reducir el contenido de humedad de la madera de acuerdo a las necesidades de los clientes.

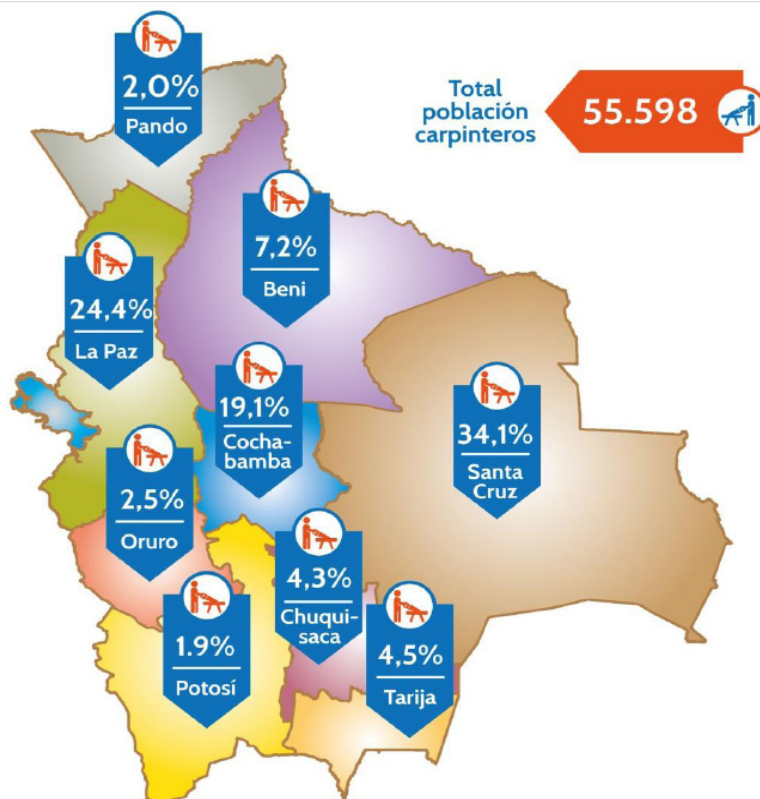
Para el proceso de secado de la madera, diversas microempresas no tienen acceso a hornos de secado; es por ello que recurren a técnicas empíricas de secado como la exposición de la madera a la acción directa del sol y del aire

deteriorando la calidad de la madera y obteniendo productos de baja calidad.

Las microempresas del sector maderero establecidas en la ciudad de El Alto constituyen un gran porcentaje de la totalidad de empresas dedicadas a este tipo de trabajos (procesamiento de la madera para obtener un producto final).

De acuerdo a información del Instituto Nacional de Estadísticas del 19 de marzo del 2017, en el Estado Plurinacional de Bolivia, 55.598 personas declararon realizar la actividad de carpintería y artesanía de la madera, donde el 24.40 % de esta población recae en las ciudades de La Paz y El Alto.

Figura 1: Población de carpinteros y operadores de procesamiento de madera



Fuente: Informe del Instituto Nacional de Estadística (Bolivia) 2017, según Censo 2012.

En los últimos años, a nivel internacional se implementaron diferentes sistemas de secado de maderas a través de la radiación solar. Dentro del Estado Plurinacional de Bolivia, no existe información sobre la implementación de Sistemas Híbridos de Hornos para el secado de madera con fines investigativos, es por ello que la implementación de este sistema sería el primero dentro del territorio nacional.

Uno de los problemas de la madera es cuando empieza a perder sus características como durabilidad, resistencia, entre otras; esto se debe a que al momento de realizar los diferentes productos la madera no se encuentra del todo seca (o contiene altos contenidos de humedad) o todavía continúa secándose y presenta estos problemas.

Una de las consideraciones dentro de este proyecto, es la búsqueda de alternativas, diseños de equipos, aparatos y/o sistemas más eficientes respecto a los sistemas tradicionales empleados por estas microempresas, además de ser un sistema con un menor impacto hacia el medio ambiente.

En función a lo mencionado anteriormente, este proyecto de investigación se enfocará a mejorar el proceso de secado de la madera dentro de estas unidades productivas, alcanzando contenidos óptimos de humedad para la fabricación de productos de buena calidad, y de esta manera mejorar la productividad de dichas microempresas y así responder a las exigencias de los clientes.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La madera en su estado natural puede presentar algunas contrariedades ya que puede ser atacada por diferentes organismos vivos; los cuales pueden afectar las propiedades características de la madera en sí.

Las industrias madereras y carpinterías en general, se abastecen de madera en estado húmedo; y si no se cuenta con adecuados métodos para secarla, ya sea por medio de secado al aire o secado artificial, ésta pasa hacia su transformación sin ningún control en cuanto a su contenido de humedad, dando como resultado problemas durante su manufactura, acabado y/o servicio.

El trabajar con madera con altos contenidos de humedad, puede causar muchos problemas para la transformación y fabricación de diferentes productos (muebles, artesanías, productos de decoración, puertas, etc.), ya que se reducen los ingresos de los pequeños productores de manufacturas en madera que trabajan con este material debido a que los productos elaborados con el pasar del tiempo presentan deficiencias como aparición de hongos, dobladuras, rajaduras, cortes, etc.

Los pequeños productores de manufacturas en madera de la ciudad de El Alto aspiran a incrementar el nivel de producción y dar un mayor valor agregado a los productos que realizan, debido a que existe un gran potencial en la mano de obra que se tiene, pero el mayor problema para lograr este propósito es el secado de la madera. Este proceso de secado a niveles óptimos y deseables, permite fabricar productos de buena calidad.

En la ciudad de El Alto, muchos de los pequeños productores de manufacturas en madera no tienen acceso a Hornos Industriales para el secado de su madera, es por ello que optan por secar la madera al aire libre con la acción directa del sol; este proceso de secado no es el más satisfactorio afectando directamente en la calidad y durabilidad de los productos elaborados y por ende en la competitividad de estas microempresas para ingresar a mercados internacionales.

Esta situación hace que los pequeños productores de manufacturas en madera recurran a métodos empíricos de secado, como la exposición de la madera a la acción directa del sol y del aire, donde los contenidos de humedad que se logran a través de este secado no son los óptimos para trabajar con este material; lo cual deteriora la calidad de la madera y afectando también en la durabilidad de los productos elaborados.

Figura 2: Secado Tradicional de la Madera empleado en las carpinterías de la ciudad de El Alto



Fuente: Foto tomada en Maderera E.D.I.R. en fecha 24 de julio de 2019

La falta de tecnología en las diferentes industrias a nivel nacional, el retardo económico y el contexto del proceso de la globalización económica obligan a las diferentes industrias a adaptarse a los nuevos requerimientos y exigencias de calidad; debido a esto las industrias nacionales deben apuntar a un desarrollo técnico-científico, donde la rama maderera no queda al margen de este fenómeno.

El tiempo de secado está influenciado por múltiples variables como el tipo de producto a secar, el clima de la región y el diseño de la cámara de secado (Horno). El método más comercial de secado de la madera se realiza mediante el empleo de hornos industriales de secado. Este proceso es realizado por un quemador de gas o por una resistencia eléctrica mediante el cual empujan el aire caliente por la acción de un abanico o bomba de aire. El combustible que se usa normalmente

para llevar a cabo este proceso de secado es el gas natural y la electricidad, ambas energías no renovables, cuyo costo es alto, además de que contribuyen con el deterioro medioambiental.

De acuerdo a un informe del Gobierno Municipal de la ciudad de El Alto, en la urbe Alteña existen al menos 16 asociaciones de carpinteros dentro de sus 14 distritos, teniendo alrededor de 3.500 carpinteros afiliados. Desde hace 4 años la Alcaldía de la ciudad de El Alto comenzó a capacitar a los diferentes afiliados. El resultado de todo este proceso de capacitación se nota en el aumento de la calidad y cantidad de la oferta de productos maderables; acotando que se tiene mano de obra calificada dentro de esta ciudad para exportar dichos productos con mayor valor agregado.

Formulación del Problema

Por lo expuesto anteriormente es importante contar con energía renovable en el proceso de secado, determinando la necesidad de implementar soluciones técnicas a través del diseño de un "SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERAS TROPICALES EN LA CIUDAD DE EL ALTO" y así obtener un buen procesamiento e industrialización de la madera, lo cual nos aseguraría tener una presencia competitiva para las microempresas que comprenden dicho sector.

El sistema consiste en una mejora de los sistemas tradicionales, el cual pretende construir Hornos de Secado en base a una combinación de energía solar, energía eléctrica y gas natural; la implementación de este sistema implicaría una inversión muy baja en relación a la utilización de hornos industriales dentro del proceso de Secado.

1.4. JUSTIFICACIÓN

1.4.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Este proyecto promueve la investigación mediante la aplicación de conocimientos de ingeniería en el área de transferencia de calor dejando un material de conocimiento base para los estudiantes de la Universidad Pública de El Alto (UPEA), que sirve de ejemplo de aplicación a través de la difusión de sus resultados.

1.4.2. JUSTIFICACIÓN SOCIAL

Este proyecto tiene finalidad de contribuir a mejorar la calidad de producto obtenido de los pequeños productores de manufacturas en madera, a través de la investigación y/o implementación de un sistema eficiente de secado de la madera sin generar contaminación al medio ambiente.

Mejorar la competitividad de los pequeños productores del sector maderero de la ciudad de El Alto, las cuales podrán acceder a una tecnología alternativa para el secado de la madera.

1.4.3. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

Reducir los costos y el tiempo del proceso de secado de las microempresas del sector maderero de la ciudad de El Alto, obteniendo así productos con mayor valor agregado y de mayor calidad y duración a través de la investigación y/o implementación del Sistema Híbrido - Hornos de Secado de Maderas Tropicales.

1.4.4. JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

Dentro del estudio de este proyecto, se estudia la implementación de energías renovables para el secado de la madera; por lo cual los impactos negativos que podrían generar en la utilización de este sistema de secado serían mínimos en comparación a los procesos de secado mediante la utilización de hornos industriales.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño de un horno de secado solar híbrido para maderas tropicales utilizadas por los pequeños productores de manufacturas en madera de la ciudad de El Alto.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OBJETIVO ESPECÍFICO 1

Realizar encuestas a pequeños productores de manufacturas en madera para

conocer sus necesidades en cuanto proceso de secado de la madera.

OBJETIVO ESPECÍFICO 2

Investigar experiencias nacionales e internacionales de hornos de secado solar híbridos para maderas tropicales.

OBJETIVO ESPECÍFICO 3

Evaluar el historial y el potencial del recurso energía solar en la ciudad de El Alto.

OBJETIVO ESPECÍFICO 4

Realizar pruebas de aislamiento térmico e impermeabilidad de materiales alternativos para la construcción del horno solar híbrido.

OBJETIVO ESPECÍFICO 5

Realizar los cálculos necesarios para diseñar un horno de secado solar híbrido que responda a las necesidades de los pequeños productores de manufacturas en madera de la ciudad de El Alto.

OBJETIVO ESPECÍFICO 6

Realizar un análisis comparativo de costos del secado solar híbrido y otros métodos convencionales de secado de la madera en nuestro medio.

OBJETIVO ESPECÍFICO 7

Evaluar otras energías renovables compatibles para su uso en hornos de secado solar híbrido.

OBJETIVO ESPECÍFICO 8

Elaborar un documento con los resultados de la investigación.

OBJETIVO ESPECÍFICO 9

Difundir los resultados del proyecto de investigación.

1.6. ALCANCE DEL PROYECTO

1.6.1. ALCANCE INSTITUCIONAL

Carrera de Ingeniería en Producción Empresarial por medio del Instituto de Investigaciones y Posgrado de la Carrera de Ingeniería en Producción Empresarial y Posgrado (IIPGIPE).

1.6.2. ALCANCE TERRITORIAL

El proyecto de investigación se realizará en el Estado Plurinacional de Bolivia - Departamento de La Paz - Ciudad de El Alto, con la colaboración mediante carta de intención de la “Asociación de Carpinteros 19 de marzo”.

1.6.3. ALCANCE EN FUNCIÓN AL TIEMPO DE DURACIÓN

El proyecto de investigación tendrá una duración aproximada de 8 meses a partir de la fecha de designación.

1.7. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Las hipótesis de investigación se derivan del análisis del problema a investigar y se toma en cuenta la teoría propuesta en el proyecto de investigación. En cierta medida, una hipótesis es una respuesta provisional a las interrogantes formuladas en el planteamiento del problema y objetivos del proyecto basadas en variables de estudio.

1.7.1. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

Investigación del proceso de secado de la madera mediante el adecuado aprovechamiento de la energía solar, energía eléctrica y la energía proveniente del gas natural bajo condiciones controladas en un horno de secado solar híbrido para maderas tropicales utilizadas por los pequeños productores en madera de la ciudad de El Alto, el cual permitirá secar la madera en condiciones óptimas de costo y calidad.

1.7.2. VARIABLES

1.7.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

Variable de Entrada: Investigación de los procesos de secado de madera al aire libre

Variable de Salida: Aprovechamiento eficiente de la energía solar, energía eléctrica y la energía proveniente del gas natural bajo condiciones controladas durante el proceso de secado de la madera.

1.7.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES:

Variable de Entrada: Mejoramiento del proceso de secado de madera.

Variable de Respuesta: Costo, calidad y cantidad de madera seca.

Según Hernández Sampieri, la relación se enmarca entre la variable independiente y la variable dependiente.

Tabla 1: Relación de Variables Independientes - Variables Dependientes

Variable	Dimensión	Indicador
Variable Independiente: Proceso de secado de madera	Cantidad de madera a secar	Pie Tablar
	Tiempo de proceso	Meses
Variable Dependiente: Mejoramiento del proceso de secado de madera.	Calidad de la madera seca	Pie Tablar
	Costos de proceso de secado	Bs. / Pie Tablar

Fuente: Relación de variables establecida en el libro de Metodología de la Investigación - Hernández Sampieri.

1.8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación se puede definir como la descripción, el análisis y la valoración crítica de los métodos de investigación. Es el instrumento que enlaza el sujeto con el objeto de la investigación.

Existen dos clases de métodos de investigación:

- **Métodos lógicos:** Aquellos que se basan en la utilización del pensamiento en sus funciones de deducción, análisis y síntesis.
- **Métodos empíricos:** Se aproximan al conocimiento del objeto mediante sus conocimientos directos y el uso de la experiencia, entre ellos encontramos la observación y la experimentación.

La ejecución del presente proyecto de investigación será de tipo descriptiva – aplicativa y experimental, aplicando un análisis cualitativo y cuantitativo. Para ejecutar la propuesta, el plan metodológico plantea un proceso secuencial de realización de actividades por distintas fases.

Fase I: Como primer paso se procede a realizar un análisis del proyecto, el cual contempla consideraciones de la información recolectada a pequeños productores de manufacturas en madera de la ciudad de El Alto, conociéndose así sus necesidades y/o expectativas sobre el proceso de secado de la madera.

Se debe vislumbrar consideraciones del proceso de secado de la madera, en cuanto se refiere a: cálculos de carga, cantidad producción, tiempos de secado (tiempo de calentamiento del horno), tipo de energía a utilizar (energía solar, energía eléctrica y energía proveniente del gas natural) para posteriormente realizar los cálculos necesarios para diseñar el Sistema Híbrido - Hornos de Secado de Maderas Tropicales.

También se debe obtener y/o recolectar información sobre el comportamiento de la energía solar en la ciudad de El Alto, así como las energías alternativas (energía eléctrica y gas natural) que podrían utilizarse dentro de este sistema híbrido.

Fase II: Evaluar y analizar la técnica de secado de madera al aire libre, verificando mediante pruebas experimentales cual es el Contenido de Humedad al que llega la madera antes de ser utilizado para la fabricación de sus productos.

Fase III: Realizar pruebas de aislamiento térmico de materiales que podrían utilizarse dentro del Sistema Híbrido, además de realizar algunas consideraciones adicionales que se puedan implementar dentro del diseño del Sistema Híbrido - Hornos de secado de maderas tropicales en la ciudad de El Alto.

Fase IV: Realizar los cálculos necesarios para diseñar un Sistema Híbrido - Hornos de secado de maderas tropicales en la ciudad de El Alto de acuerdo a las consideraciones realizadas, recolección de información y presupuesto fijado para su ejecución; comprobando así el funcionamiento del sistema.

Figura 3: Imagen de un prototipo de Sistema Solar para el Secado de Madera



Fuente: Prototipo del Proyecto Modernización del Sector Forestal de Honduras (MOSEF)

Fase V: Esta etapa contempla la revisión, publicación y difusión de los resultados obtenidos del presente proyecto de investigación.

Esquemáticamente el diseño metodológico se puede resumir en el siguiente esquema.

Figura 4: Esquema de diseño metodológico secuencial de la investigación



Fuente: Elaboración en función al plan de trabajo presentado para el proyecto: “Investigación de sistemas híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

1.8.1. MÉTODO HIPOTÉTICO - DEDUCTIVO.

En este método de investigación, se plantea una hipótesis o explicación inicial, que luego serán a su vez comprobadas experimentalmente para obtener conclusiones particulares. Es decir, inicialmente planteamos la hipótesis mediante procedimientos inductivos y en segundo caso mediante procedimientos deductivos, comprendiendo un paso inicial de inferencias empíricas que permiten deducir una hipótesis inicial, la cual será comprobada de manera experimental.

Para tal efecto y para la recolección de datos, inicialmente se realizará un revisión y análisis documental, posteriormente se diseñarán instrumentos para la recolección de información cualitativa (entrevistas a informantes claves) como instrumentos para la recolección de datos de los pequeños productores de manufacturas en madera.

El procesamiento de la información recogida permitirá obtener conclusiones que mejor se aproximen a la realidad que se pretende estudiar.

1.8.2. INSTRUMENTOS DE LA RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos e información pertinente al presente proyecto de investigación se obtendrá mediante: Revisión y Análisis documental, entrevistas y/o encuestas a los pequeños productores de manufacturas en madera de la “Asociación de carpinteros 19 de marzo” con quien se tiene firmada una carta de intención de colaboración al presente proyecto.

2. ANÁLISIS PRODUCTIVO DEL SECTOR MADERERO

2.1. NORMATIVA VIGENTE

La Ley 1700¹ promulgada el año 2011, promueve actividades forestales eficientes, otorgando derechos y responsabilidades, además de establecer procedimientos en cuanto a las extracciones de los recursos maderables y los planes de manejos forestales, precautelando de esta manera la protección y la sostenibilidad del manejo forestal.

El poder Ejecutivo del Estado Plurinacional de Bolivia, a través de la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra (ABT), regula toda actividad del sistema forestal.

La ley forestal también concede la participación de Gobernaciones y Alcaldías de acuerdo a sus atribuciones que se prescriben en la Ley Forestal en su Capítulo III Artículo 24 y 25, otorgando recursos financieros a favor de los Gobiernos Municipales, recursos provenientes del pago de patentes de las concesiones y autorizaciones de aprovechamiento forestal comercial.

¹ Ley Forestal: Norma las extracciones de los recursos forestales y regular el aprovechamiento en forma sostenida.

La Ley Forestal también establece obligaciones a las Gobernaciones y Alcaldías, obligaciones como la creación de unidades forestales municipales, realizando inspecciones de prevención de actividades forestales, así como la prestación de servicios a favor de los usuarios forestales, que se desarrollen dentro de su jurisdicción.

La Ley Forestal (Ley 1700), carece de mecanismos efectivos de prevención, protección y mitigación respecto a los recursos forestales debidos a la existencia de vacíos jurídicos, incumplimiento de disposiciones por parte de la sociedad, desconocimiento de la norma respecto a las comunidades originarias que se encuentran ubicadas en el lugar **(Jorge Ávila, 2015)**.²

2.1.1. ZONAS CON MAYOR POTENCIAL FORESTAL

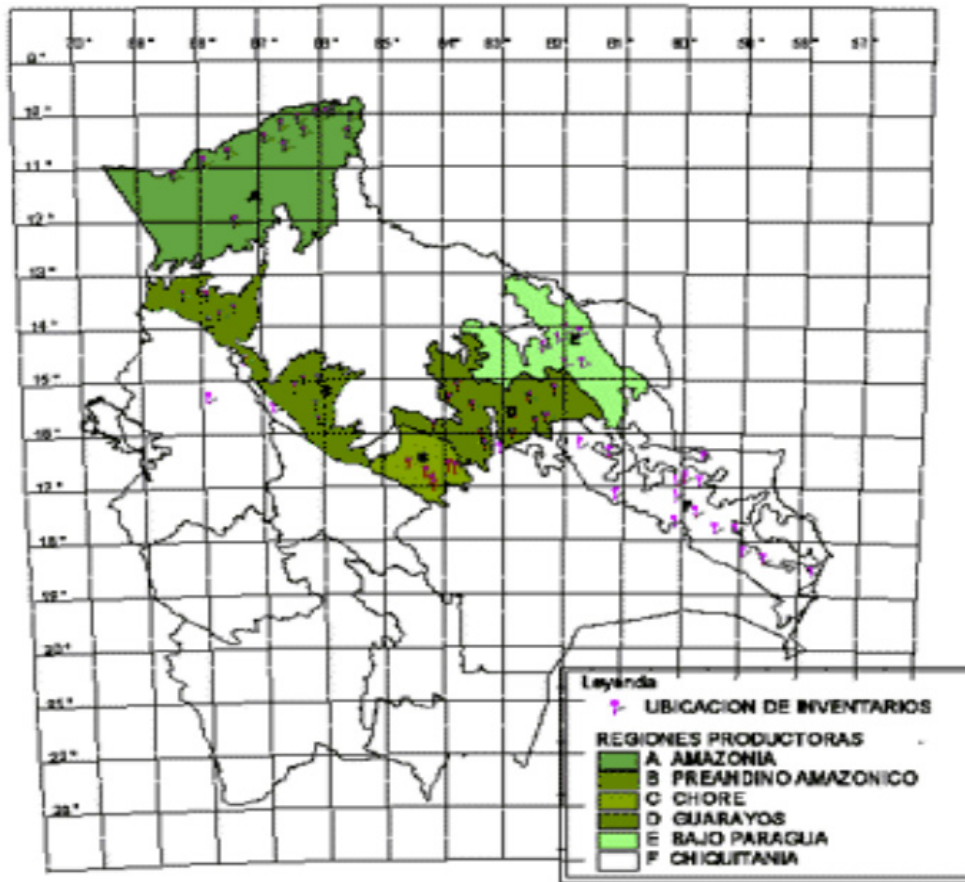
Los bosques naturales o zonas forestales están situados sobre paisajes de llanura con topografía plana a ondulada, definiendo las regiones productoras forestales constituidas de especies maderables y no maderables con diferentes características.

Según la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra (ABT) en base a los Planes Generales de Manejo Forestal, define las siguientes regiones forestales de producción:

- ✓ La Amazonia
- ✓ Pre andino
- ✓ El Chore
- ✓ Guarayos
- ✓ El Bajo Paragua
- ✓ La Chiquitania

² Presidente de la Cámara Forestal de Bolivia (CFB)

Figura 5: Zonas forestales y regiones productoras



Fuente: Informe de la Cámara nacional de Comercio del proyecto: Potencial de los bosques naturales de Bolivia para la producción forestal permanente, 2014

De acuerdo al mapa de las zonas forestales y regiones productoras, la cobertura y uso de la tierra (Brokmann et al, 1978), en Bolivia se tiene una superficie de 53.5 Millones de Hectáreas, de las cuales 28 Millones el área productiva.

Tabla 2: Categorías de bosques del Estado Plurinacional de Bolivia

Región	Área [Millones de Hectáreas]
Amazónica	22,2
Chiquitanía	7,5
Chaqueña	10,1
Andina	13,7
TOTAL	53,5

Fuente: Información emitida por el Ministerio de Desarrollo Sostenible

De la tabla anterior, de todo este potencial de recursos forestales que se tiene en el país, solo seis millones de hectáreas (11.22 %) se encuentran bajo manejo. Sobre el resto, no se sabe qué es lo que pasa en cuanto a desmontes o explotación.³

2.2. ANÁLISIS DEL SECTOR PRODUCTIVO

2.2.1. CADENA PRODUCTIVA

Una cadena productiva articula a un conjunto de los actores involucrados que intervienen en un proceso productivo, desde la Producción Primaria (provisión de insumos y materias primas), industrialización (procesamiento, transformación y producción de bienes intermedios y finales) hasta su transporte, comercialización, distribución y consumo final (Bourgeois, 1999).

Figura 6: Esquema de los actores involucrados dentro de una cadena productiva



Fuente: Elaboración de acuerdo a un análisis de la cadena productiva forestal

³ Redmy Padilla, Jefe nacional de Fiscalización y Control de la Autoridad de Bosques y Tierra (ABT)

Dentro de la cadena productiva forestal maderable intervienen varias organizaciones (micro y pequeñas empresas, organizaciones grandes, entre otros) que son importantes para llevar el producto final, operando en distintas etapas productivas. La cadena productiva forestal involucra varios procesos, dentro de las cuales están los procesos de extracción, transformación y consumo; además de etapas que se encuentran dentro de los mismos. Los procesos son los siguientes:

- La producción y provisión de insumos forestales.
- Transporte de la madera.
- Industrialización (procesos de transformación).
- Comercialización.
- Distribución a mayor y menor escala.
- Consumo final

Para responder a la problemática de los productores forestales primeramente se debe hacer un enfoque de la cadena productiva, con el fin de ver la totalidad de la cadena, desde la unidad productiva hasta la actividad de venta del producto final. Muchas veces cuando se hacen enfoques a cadenas productivas, generalmente se dejan al margen a organizaciones, contexto, estructuras, la capacidad instalada o las interacciones entre sí.

2.2.2. ANÁLISIS DEL CONTEXTO

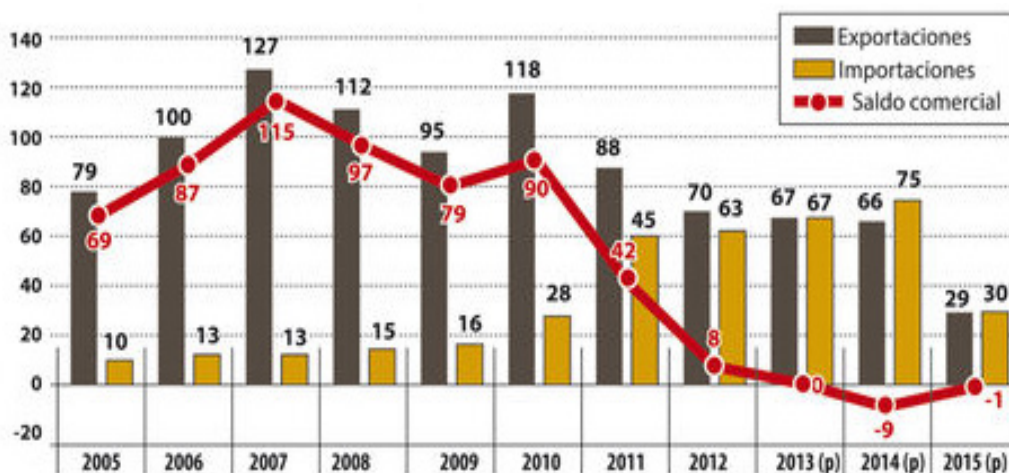
La exportación de madera en Bolivia se ha visto reducida en un 50%, una de las causas es la industrialización de dicha materia prima; no exportarla solamente como materia prima bruta, procurando exportar productos transformados y acabados. “Se prohibió la exportación de ciertas maderas, porque de aquí las estaban sacando casi en troncos. Con la maquinaria local solo sacaban la cáscara y eso se exportaba hacia

China, Estados Unidos o Ecuador; lugares con mayor tecnología y donde aprovechan al máximo la madera”.⁴

El desplome en las exportaciones a causa de la falta de materia prima (madera), además del ingreso de materias primas y productos del exterior (Brasil, Perú y China), políticas establecidas por el Gobierno Nacional y por último los fenómenos climatológicos pusieron en dificultades al sector maderero a nivel nacional.

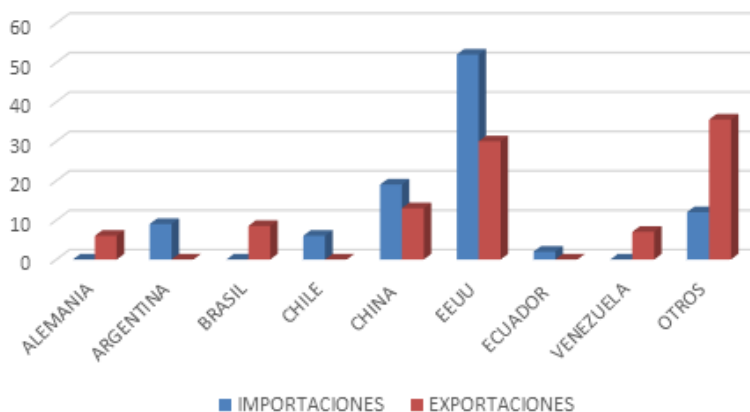
⁴ Remy Padilla, jefe nacional de Fiscalización y Control de la Autoridad de Bosques y Tierra (ABT)

Gráfico 1: Exportaciones e importaciones de madera (2005 – 2015) expresado en Millones de Dólares



Fuente: Datos de la Cámara Forestal de Bolivia (CFB), 2015

Gráfico 2: Importaciones y Exportaciones de madera y sus productos de manufactura, según país de origen y destino al año 2014



Fuente: Datos de la Cámara Forestal de Bolivia (CFB), 2015

Desde el 2011 hasta el año 2014, el sector maderero estuvo en crisis debido a cinco factores principales que causaron el cierre de al menos 67 micro y pequeñas empresas. Desde el año 2014, por primera vez las importaciones de madera y sus productos anexos superaron a las exportaciones.

Las cinco causas que originaron el debilitamiento del sector maderero fueron: (1) El excesivo control estatal en la producción de la materia prima ha burocratizado la producción, (2) El racionamiento de diésel para la industria, (3) El incremento de las importaciones de productos madereros por falta de medidas de protección para la industria maderera nacional, (4) La falta de acceso a créditos productivos y (5) El cambio climático a nivel mundial. Hace cinco años, el 80% de la materia prima que se compraba en el mercado boliviano era nacional; hoy ese porcentaje bajó a 25. Se “está matando a nuestra industria”.⁵

La industria maderera y anexos de Bolivia han estado en tremenda crisis, debido al excesivo control normativo desde el 2011 y la importación de materia prima, productos acabados como muebles que ingresan con precios relativamente bajos en comparación a los precios de los productos nacionales.⁶

En el 2018, después de 6 periodos en déficit; la industria forestal y sus anexos dentro de su cadena productiva se vivifica a través de la vinculación con exportaciones y la apertura de nuevos mercados como Corea del Sur, Cuba, Vietnam y una pequeña participación a China. La demanda se centra en madera semielaborada, pisos y enseres de jardín. Por ejemplo, con el mercado vietnamita se concretó la venta de nueve especies de madera boliviana de la zafra de 2018, por un valor de \$us 5,5 millones.⁷

2.2.3. DEBILIDADES DEL SECTOR MADERERO

Si bien se ha oxigenado al sector maderero a través de la exportación de productos; dentro del mercado nacional existe otro aspecto importante donde los productos bolivianos no tienen competencia frente a los productos importados. Este aspecto hace que muchas pequeñas y micro empresas corran el riesgo de cerrarse y dejar de producir para el mercado interno.

La situación es crítica y no hay un cambio respecto a la entrada de materiales melamínicos. Los más de 1.000 socios de la entidad esperan que el Ejecutivo del Estado Plurinacional de Bolivia ayude con el acceso a créditos para acceder a nuevos métodos y tecnologías para obtener productos de mejor calidad seguir ingresando en los mercados del exterior.⁸

5 Jorge Avila, Presidente de la Cámara Forestal de Bolivia (CFB)

6 Cliver Rocha, Director Ejecutivo de la Autoridad de Bosques y Tierras (ABT)

7 Jorge Avila, Presidente de la Cámara Forestal de Bolivia (CFB)

8 Wilford Ojeda, Secretario general de la Confederación Nacional de Carpinteros, Ebanistas y Artesanos en madera de Bolivia (Conceambol)

Entre los años 2011 y 2014, se cerraron al menos 3.800 micro y pequeñas empresas del sector maderero en las ciudades de La Paz, El Alto, Cochabamba y Santa Cruz, y muchas tuvieron que reducir el personal empleado para contrarrestar la crisis del sector.⁹

CONSECUENCIAS

- Baja producción (50% de la capacidad instalada).
- Subida de los precios internos de la madera (2011 – 2013)
- Incremento exponencial de las importaciones
- Cierre de micro y pequeñas empresas.

2.2.4. MEDIDAS POSIBLES PARA SOLUCIONAR LA CRISIS

- ✓ Incrementar los volúmenes de producción sustentable y formal, debe ser un objetivo estratégico de la administración pública.
- ✓ Aplicar mayores medidas impositivas que nivelen los precios de los productos importados (melaminas y tableros) en relación a los precios de los productos nacionales como una medida de protección a la industria nacional de muebles de madera.
- ✓ Aplicar políticas de incentivo para la evolución y/o cambio tecnológico en cada uno de los copartícipes de la cadena productiva del sector maderero (donde nuestro enfoque dentro de este proyecto es la ayuda a las micro y pequeñas empresas que transforman la madera a través de la fabricación de muebles y otros productos derivados de la madera).

Uno de los objetivos del presente proyecto de investigación es implementar sistemas de integración tecnológica de energías renovables, como es el caso de la energía solar, energía eléctrica y el gas natural contribuyendo de gran manera en el mejoramiento del proceso de secado de la madera a un bajo costo a través del acceso a una tecnología alternativa para mejorar la calidad de los productos elaborados y mejorar la competitividad de las micro y pequeñas empresas del sector.

⁹ Cámara Forestal de Bolivia (CFB).

3. MARCO TEÓRICO

Desde un punto de vista científico e industrial, la madera es un conjunto de tejidos de XILEMA, que forman las masas de los troncos, las raíces y las ramas de los vegetales leñosos desprovistos de corteza. **Peraza, C (La madera y sus propiedades)**

En las industrias madereras, carpinterías, etc., se aprovecha principalmente la madera del tronco y algunas ramas de los árboles.

La madera es un material fibroso y duro, situado debajo de la corteza que es la que forma el cuerpo de los árboles. Está formada por millones de células microscópicas y longitudinales en forma de tubos.

La madera es una sustancia higroscópica, la cual retiene cantidades de agua, dependiendo de la humedad relativa del ambiente en que se encuentre; la eliminación de esta humedad y la forma en cómo se lo realiza es el objeto de estudio del presente proyecto de investigación.

3.1. CLASIFICACIÓN DE LA MADERA

Existe una gran cantidad de diferentes tipos de madera con numerosas propiedades y características individuales para los diversos propósitos y fines que se utilizará la madera. La madera puede ser clasificada de diferentes maneras: Madera sin labrar, madera de rollo, madera al hilo, madera escuadra en bruto, etc. Para el presente proyecto de investigación y de acuerdo a nuestros objetivos, clasificaremos la madera de acuerdo a las siguientes categorías.

SEGÚN SU RESISTENCIA O DUREZA: Blandas y Duras.

Madera Blanda o Conífera: Son las maderas ligeras de los árboles de rápido crecimiento, normalmente de las coníferas (en su estructura presenta anillos bastantes separados, pocos nudos y bastante resina), árboles con hoja perenne (hojas en forma de aguja). Son fáciles de trabajar y de colores generalmente muy claros. Constituye la materia prima para hacer el papel, embalajes, cajas, etc. (Ejemplos: álamo, abedul, acacia, cedro, pino, sauce, etc.)

Madera Dura o Latifoleada: Maderas procedentes de árboles de lento crecimiento y de hoja caduca, es una madera más compacta (En su estructura presenta anillos muy juntos y los colores son más castaños o claros), de mayor densidad, más difícil de trabajar, y en general de mayor calidad y precio, además de que presenta una amplia gama de colores. Se utilizan para la fabricación de muebles más compactos, en construcciones resistentes, instrumentos musicales, en suelos de parquet, para algunas herramientas. (Ejemplos: cerezo, caoba, nogal, olivo, olmo, roble, etc.)

POR SU HUMEDAD: Verdes, desecadas y Secas.

Madera verde: Son las maderas recién cortadas que no deben usarse para trabajos, pues al secarse por la contracción se encogen y agrietan. Tiene un alto contenido de humedad (50 -65%).

Madera desecada: Su grado de humedad se reduce del 10 – 12% por procesos naturales, apilándolas de manera adecuada y permitiendo que el aire circule entre las tablas para ir reduciendo el exceso de agua.

Madera seca: Su grado de humedad se reduce hasta el 3% empleando procesos artificiales (hornos de secado industrial, donde las maderas se secan de forma más rápida).

3.2. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

3.3. ESTRUCTURA DE LA MADERA

La madera está compuesta por un conjunto de células tubulares de forma y longitud muy variable las cuales constituyen la mayor parte del tronco y las ramas del árbol. En un corte transversal realizado al tronco de un árbol, se puede establecer las siguientes partes:

Médula: Constituye el centro del tronco, del que parten radios medulares hacia la periferia y está conformada por células muertas que están muy lignificadas. Generalmente su aspecto es seco y duro, de la cual se separan sustancias resinosas.

Forma un cilindro en el eje del árbol y está constituida por células redondeadas que dejan grandes meatos en sus ángulos de unión.

Duramen o corazón: Es la parte inmediata a la médula, formado por madera dura y consistente impregnada de tanino y de lignina. Es la parte de la madera localizada en zona central del tronco y sustentadora del árbol, conserva su fuerza sustentadora en tanto viven las capas exteriores. Es de color más oscuro y tiene mayor dureza.

Albura o leño: Es la capa siguiente conformada por células vivas en su parte exterior, es la madera joven que posee más savia y con el tiempo engrosa el duramen al ser sustituido el almidón por tanino que se fija en las membranas celulares volviéndolas más densas. Es la parte joven de la madera, corresponde a los últimos ciclos de crecimiento del árbol teniendo un aspecto blanquecino y es de menor dureza.

Cambium o capa generatriz: Está debajo de la corteza, conformada por una capa de células vivas de paredes muy delgadas que son capaces de transformarse por divisiones sucesivas en nuevas células entre la albura y la corteza interna. En

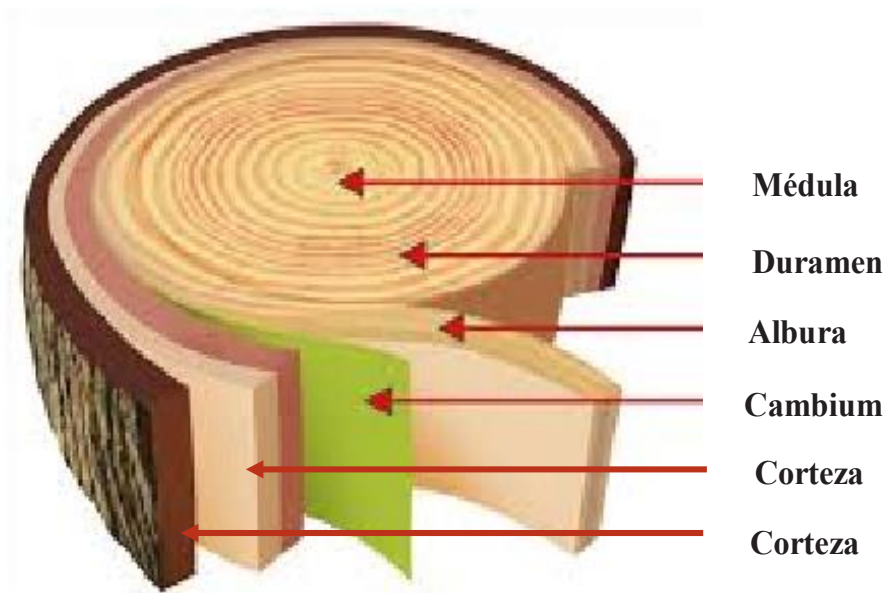
la cara interna se forman células de xilema o madera nueva y en la externa se transforma en célula de floema.

Las capas de xilema están formadas por la madera de primavera y verano de color claro y blanda, alternándose con la madera de otoño, más oscura y compacta, formando los anillos de crecimiento claramente diferenciados.

Corteza interna, floema o líber: Está formada por tejido vivo y es por donde circula la savia elaborada, además de transportar en sentido descendente, hasta las raíces, los alimentos fabricados en la fotosíntesis y el oxígeno absorbido del aire usado en la respiración. El floema puede tener fibras de líber, que son muy fuertes, y en algunas especies constituyen la materia prima de la que se obtienen fibras comerciales. Estas células viven un tiempo relativamente corto, después mueren y se convierten en súber para finalmente formar parte de la corteza externa protectora.

Corteza exterior o súbera: Es la piel del árbol, la cual está conformada por una capa de células muertas que protegen al árbol contra las inclemencias del tiempo (lluvias, frío y cuando incide el sol evita que se produzca una evaporación demasiado fuerte) y del ataque de insectos y parásitos.

Figura 7: Estructura de la Madera



Fuente: Imagen del libro "Tecnología de la madera y el mueble", W. Nutsch, Ed. Reverté, S.A. (1992)

3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Las considerables propiedades de la madera, varían de acuerdo al tipo de madera, edad del árbol, área o zona climática de procedencia. Las propiedades físicas de la madera que son muy importantes dentro del proceso de secado son: densidad, contenido de humedad, hendidabilidad.

3.3.2. DENSIDAD

La densidad de la madera se define como la relación de la masa a un volumen medido y un determinado contenido de humedad (cuando la humedad crece, la densidad de la madera también crece); como la madera es un material heterogéneo, su adaptabilidad a eventuales tratamientos y modificaciones, así como la posibilidad de utilización que ofrece. **(Cuevas, 2005).**

Debido a que la madera es un material poroso y estos poros contienen aire; por esta razón se distinguen dos tipos de densidades: la densidad real (cuando se pesa la madera sin poros) y la densidad aparente (cuando se pesa la madera con todos sus poros). La primera varía muy poco de unas maderas a otras, y está determinada por los componentes de la misma (celulosa, etc.); la segunda varía enormemente.

Cuanto más leñoso sea el tejido de una madera y más compactas sean sus fibras, tendrá menos espacio libre dentro de sus fibras, por lo que tendrá más peso que una madera de igual tamaño con vasos y fibras grandes.

El cálculo de la densidad de la madera se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde:

ρ = Densidad de la madera [kg/m^3]

m = Masa de la madera [kg]

V = Volumen de la madera [m^3]

La densidad de la madera varía con la humedad, la madera verde tiene valores de 50% a 60% y se reduce durante el secado. Por ejemplo, la densidad de la madera roble recién cortado es de alrededor de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ y en estado seco (12% de humedad) baja a $670 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Como la humedad influye tanto en el peso como en el volumen, para obtener resultados sobre la densidad, el grado de humedad en el que se tomen las medidas debe estar comprendido entre 0 y 30%, ya que en este rango el volumen varía en la misma proporción que la humedad.

La densidad real de las maderas es sensiblemente igual para todas las especies botánicas, aproximadamente 1,56 (Kg/m³). La densidad aparente varía no solo de unas especies a otras, sino aún en la misma especie dependiendo del grado de humedad y la condición climática donde crece el árbol.

La densidad aparente de algunas especies madereras secadas al aire, son:

Tabla 3: Densidad aparente de algunas especies madereras

Especie maderera	Densidad [Kg/m ³]
Álamo	0.45 0.70
Albeto	0.32 0.62
Alerce	0.44 0.80
Nogal	0.60 0.81
Olmo	0.56 0.82
Pino Común	0.32 0.76
Pino Negro	0.38 0.74
Roble	0.71 1.07

Fuente: Datos del libro "Materiales de Construcción", Orús Asso, F., Ed Dossat, S.A. (1963)

Una de las propiedades más importantes de la madera, que definen su calidad, es la densidad. **Zobel & Van Buijtenen (1989)** señalan que la importancia de la densidad de la madera ha sido enfatizada por muchos investigadores, los cuales concluyen que, de todas las propiedades de la madera, la densidad es la más significativa en la determinación del uso final.

Muchas propiedades mecánicas de la madera están fuertemente relacionadas con la densidad de la madera (**Haygreen y Bowyer, 1989**) y (**Zhang y Morgenstern, 1995**).

De acuerdo a (**Panshin, 1964**) citado por (**Zhang y Morgenstern, 1995**) las relaciones entre la densidad de la madera y la resistencia mecánica se expresan como una función potencial.

$$S = K(D)^N \quad (2)$$

Donde:

S = Propiedad de Resistencia

D = Densidad de la madera

N = Exponente que depende de la propiedad de resistencia de acuerdo al tipo de madera

3.3.3. DENSIDAD DE REFERENCIA

Es la relación entre masa y el volumen de la madera, ambos determinados a un mismo contenido de humedad, para este tipo de densidad se definen como densidad anhidra, y densidad normal.

- **Densidad anhidra:** Es la relación entre la masa y el volumen de la madera en estado anhidro (cuerpo que no contiene agua).

$$\rho_a = \frac{\text{Masade la madera anhidra}}{\text{Volumen de pieza anhidra}} = \frac{[Kg]}{[m^3]} \quad (3)$$

La densidad anhidra varía en las maderas de 0.1 g/cm³ a 1.4 g/cm³, sus valores varían entre especies y aún dentro de la misma especie.

- **Densidad normal:** Es la relación entre la masa y el volumen de la madera, ambos determinados a un mismo contenido de humedad igual a 12%.

3.3.4. DENSIDAD BÁSICA

Es la relación entre masa anhidra de la madera y el volumen de la madera en estado verde (volumen a un contenido de humedad mayor o igual a 30 %).

$$\rho_b = \frac{Po \text{ (Masa de la madera anhidra)}}{Vv \text{ (Volumen de madera saturada)}} = \frac{[Kg]}{[m^3]} \quad (4)$$

3.3.5. DENSIDAD NOMINAL

Es la relación de la masa de la madera anhidra y su volumen a un contenido de humedad, generalmente de 12%.

- Densidad anhidra o seca al horno para un Contenido de Humedad = 0%
- Densidad seca al aire o normal para un Contenido de Humedad = 12%
- Densidad verde para un contenido de humedad > 30%

Es una de las propiedades físicas más utilizada como guía para el secado de la madera, en general, la madera más dura seca más lentamente y con mayor tendencia a defectos del secado que las maderas menos duras (**Rivero, 2003**).

3.3.6. CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad de la madera (C.H.) se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado como porcentaje con respecto al peso de la madera seca al horno (peso del material leñoso) hasta que se obtiene un peso constante cuando el contenido de humedad es modificado. (**Cuevas, 2003**)

El contenido de humedad no es más que el porcentaje de agua contenido en una pieza de maderas dentro de sus espacios huecos y en sus paredes celulares; este contenido es muy variable en función a la especie maderera.

El contenido de humedad (C.H.) se expresa de la siguiente forma:

$$C.H. = \frac{P_V - P_S}{P_S} * 100 \quad (5)$$

Donde:

C. H.= Contenido de Humedad

P_V = Peso verde [Kg]

P_S = Peso seco [Kg]

A continuación, se presenta la siguiente tabla la cual indica el contenido de humedad de una especie maderera de acuerdo al agua contenida dentro de ella bajo sus diferentes formas.

Tabla 4: Porcentaje de humedad de las maderas verdes, recién cortadas

Especie maderera	Porcentaje de Humedad [%]
Ajunao	70
Cedro	80 – 100
Mapajo	140
Plumero	155
Quebracho Blanco	65
Roble	110
Serebo	130
Soto	50

Fuente: Datos del documento técnico “Guía para el secado de la madera en hornos” Silverio Viscarra (1998)

El Contenido de Humedad con el que se debe trabajar la madera depende de la aplicación y/o uso que se le dará y de las condiciones climáticas del lugar de procedencia de la madera.

El contenido de humedad también puede variar en función a las normas exigidas del país donde se va a exportar y/o vender los productos acabados; estas exigencias y/o requisitos puede variar de un país a otro en función a sus normas emitidas (Por ejemplo, México puede aceptar productos maderables acabados con un 15% de C.H., mientras que, en algunas regiones de EE.UU., el C.H. de productos maderables no debe ser mayor a 8%.)

Tabla 5: Contenido de Humedad para productos terminados

Aplicación y/o uso de la madera	Porcentaje de Humedad [%]
Madera de obra y construcción	12 a 18
Objetos y aparatos de madera al aire libre (muebles para exteriores)	12 a 16
Muebles de carpintería (puertas, ventanas, etc.) para instalaciones interiores	8 a 10
Puertas y ventanas para exteriores	12 a 15
Artículos deportivos	10 a 15

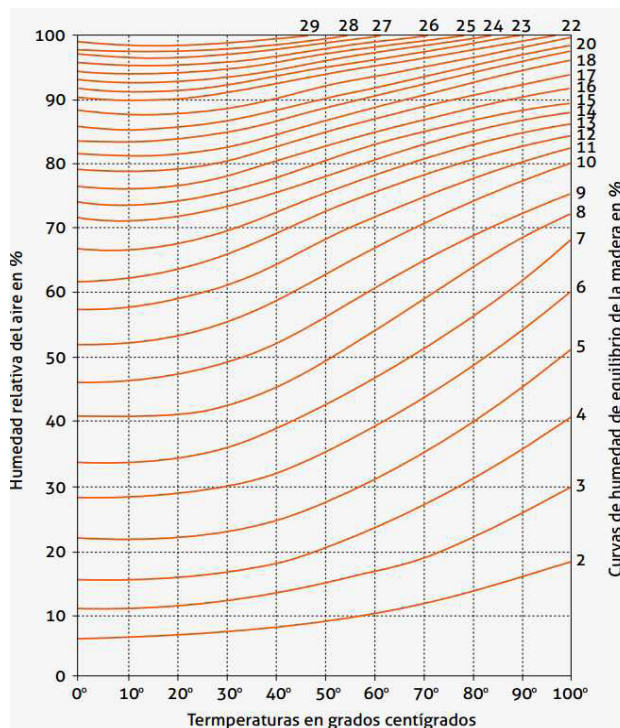
Muebles, puertas interiores, marcos donde hay calefacción	10 a 12
Cajas para empaque de maquinaria	8 a 12
Artesanías	6 a 8
Pisos de madera	8 a 10

Fuente: Datos del documento técnico “Guía para el secado de la madera en hornos”, Silverio Viscarra, Bolfor (1998)

El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas: agua libre, agua de constitución y agua de saturación higroscópica.

Otra manera de determinar el Contenido de Humedad (C.H.) de la madera, es conociendo el nivel de humedad relativa del aire y la temperatura ambiente del lugar. Mediante el siguiente ábaco podemos determinar el C.H. de la madera.

Figura 8: Determinación de la humedad de la madera



Fuente: Datos del libro “Tecnología de la madera y sus aplicaciones”, Kollman, F. (1959)

3.3.7. AGUA LIBRE

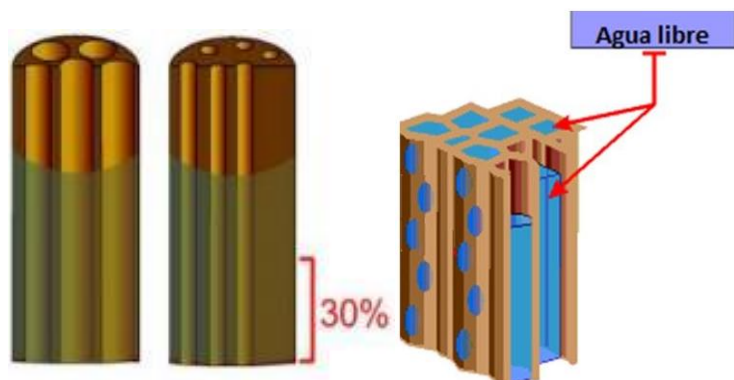
De acuerdo a **JUNAC, (1989)** el agua libre es el agua que llena y ocupa las cavidades celulares o el lumen de las células o tubos (vasos, elementos vasculares); esta forma de agua es la que da a la madera su condición de “verde”. La cantidad de agua libre que puede contener una madera está limitada por su volumen de poros al iniciarse el secado.

El agua libre posiblemente es más difícil de extraer en el momento de secado, pero se va perdiendo fácilmente mediante un proceso de evaporación, ya que el agua es retenida por fuerzas capilares muy débiles hasta el momento en que ya no contiene más agua de este tipo.

Al llegar a este punto la madera estará en lo que se denomina, “punto o zona de saturación de las fibras (PSF)”, que corresponde a un contenido de humedad variable entre el 21 y 32 %. Cuando la madera ha alcanzado esta condición, sus paredes celulares están completamente saturadas de agua y sus cavidades vacías. (**VISCARRA, 1998**)

Durante el proceso de secado de la madera, para la extracción de este tipo de agua no se advierte cambios dimensionales en la madera (hinchamiento) ni en sus propiedades mecánicas ya que no tiene más repercusión que la ocupación física de los huecos. (**VISCARRA, 1998**)

Figura 9: Agua libre de la madera

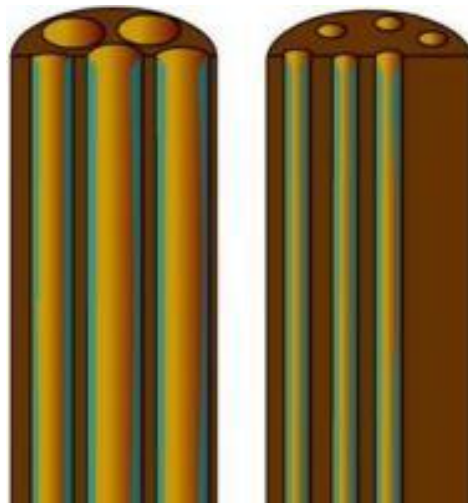


Fuente: Información de los documentos “Características y propiedades de la madera”, Calvache J. – “Secado de la madera”, Esquivel H.

3.3.8. AGUA DE CONSTITUCIÓN

Es la que forma parte de la materia celular (compuestos químicos) de la madera y que no puede ser eliminada utilizando las técnicas normales de secado. Forma parte integrante de la madera leñosa, su separación implicaría la destrucción total de la madera. **(JUNAC, 1982)**

Figura 10: Agua de constitución de la madera



Fuente: Información del documento "Características y propiedades de la madera", Calvache, J.

3.3.9. AGUA DE SATURACIÓN HIGROSCÓPICA

Se halla contenida en las paredes celulares relleno de los espacios microscópicos y está por debajo del punto de Saturación de las Fibras (PSF), menos del 30% del contenido de humedad de la madera. Se introduce dentro de la pared celular y es la causa de la contracción de la madera cuando la pierde, y de su expansión o hinchamiento cuando la recupera. Se puede eliminar por calentamiento hasta los 100 o 110 °C. **(JUNAC, 1982)**

Según **(BOLFOR, 1998)**, durante el secado de la madera cuando ésta ya ha perdido su agua libre por evaporación y continúa secándose, la pérdida de humedad ocurre con mayor lentitud hasta llegar a un estado de equilibrio higroscópico con la humedad relativa de la atmósfera circundante. Para la mayoría de las especies, el equilibrio higroscópico se encuentra entre el 12 y 18% de contenido de humedad,

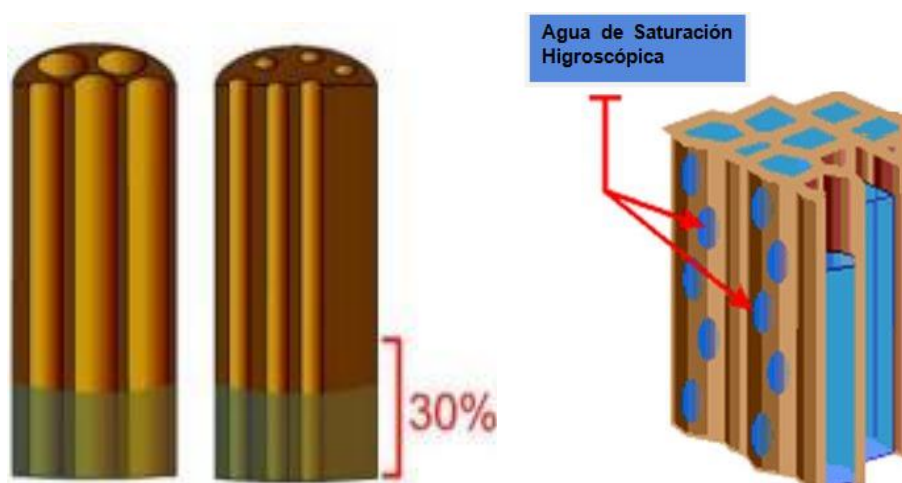
dependiendo del lugar donde se realiza el secado. Es por ello que la madera secada al aire libre solo puede alcanzar estos valores de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad menores, debe acudir al secado artificial para eliminar el resto del agua de saturación.

Tabla 6: Estado de la madera en diferentes estados de corte

Denominación del estado de la madera	Nivel de Humedad [%]	Lugar de ubicación
Madera verde	80 a 200	Bajo cubierta en el bosque
Madera húmeda	25 a 80	Recién cortada o a la intemperie
Madera poco seca	20 a 25	Al aire libre
Madera seca al aire	15 a 20	Bajo techo
Madera muy seca	8 a 15	Interiores (hornos)
Madera anhidrida	0 a 3	En laboratorio

Fuente: Datos del documento técnico “Guía para el secado de la madera en hornos”, Silverio Viscarra, Bolfor (1998)

Figura 11: Agua de saturación higroscópica de la madera



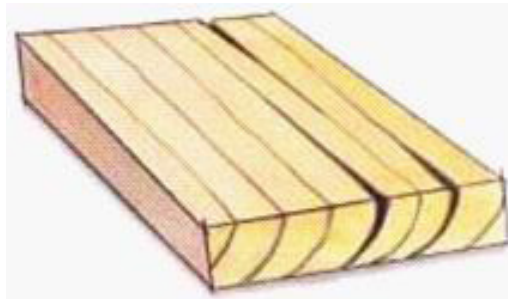
Fuente: Información de los documentos “Características y propiedades de la madera”, Calvache J. – “Secado de la madera”, Esquivel H.

3.3.10. HENDIBILIDAD

Es la capacidad de resistencia que tiene la madera frente a un esfuerzo de tracción que tiende a desgajar o cortar la madera en dos partes cuando la dirección del esfuerzo o la fuerza es paralela o transversal a la dirección de sus fibras. La madera de fibras largas, con nudos o verde es más hendible que las maderas secas (Maderas Hendibles: Abeto, Castaño. Maderas poco hendibles: Abedul, Olmo).

Esta propiedad de hendibilidad se puede apreciar cuando se procede a cortar madera para hacer leña, ya que cuando se somete la madera a un esfuerzo paralelo a la dirección de sus fibras, y la madera se separa en dos fácilmente.

Figura 12: Hendibilidad de la Madera



Fuente: Información recolectada del libro "Materiales de Construcción", Orús Asso, F. (1963)

3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA

Las propiedades mecánicas dependen de la especie botánica y de las condiciones climáticas en las que crece el árbol, puesto que estos factores determinan la velocidad de crecimiento y la presencia de defectos al igual que en las propiedades físicas, el grado de humedad influye notablemente sobre las propiedades mecánicas (**Rivero, 2003**).

3.4.1. DUREZA

Es una característica de la madera que depende de la cohesión de las fibras y de su estructura. Es la capacidad de resistencia que tiene la madera al desgaste, rayado, clavado, corte por otros cuerpos como ser herramientas, varía según la especie del árbol. La dureza depende de la especie, condición climática donde crece el árbol, edad del árbol.

La madera del duramen es más dura que la de la albura, La madera seca es más dura que la verde. La madera fibrosa es más dura y la madera más dura se pule mejor.

Figura 13: Dureza de la Madera



Fuente: Información recolectada del libro "Materiales de Construcción", Orús Asso, F. (1963)

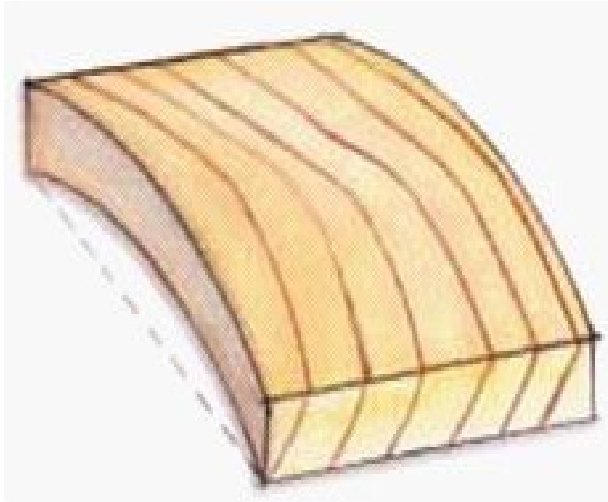
3.4.2. ELASTICIDAD

La madera se deforma de acuerdo con la ley de Hooke¹⁰ cuando es sometido a cargas pequeñas, por lo que las deformaciones son proporcionales a las tensiones. Cuando se sobrepasa el límite de proporcionalidad, la madera se comporta como un cuerpo plástico y se produce una deformación permanente. Al seguir aumentando la carga, se produce la rotura.

Este valor de elasticidad varía de acuerdo a la especie, naturaleza del árbol, humedad, dirección del esfuerzo y con la duración de aplicación de las cargas.

¹⁰ La ley de Hooke establece que el aumento de longitud que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo.

Figura 14: Elasticidad de la Madera



Fuente: Información recolectada del libro “Materiales de Construcción”, Orús Asso, F. (1963)

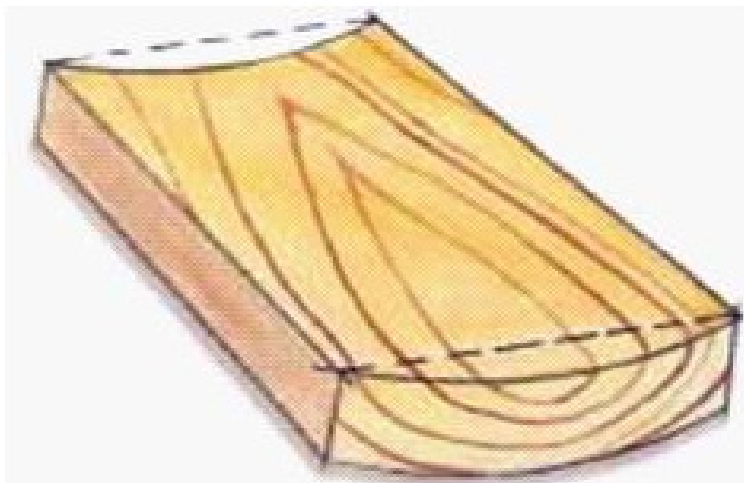
3.4.3. FLEXIBILIDAD

Es la propiedad que tiene la madera de poder ser doblada o ser curvada en su sentido longitudinal sin dañar su estructura o quebrarse y retornar a su forma inicial; es una característica de las maderas jóvenes, verdes, blandas y/o calentadas. **(Cuevas, 2005).**

Para aumentar su flexibilidad se puede tratar con vapor de agua, calentando la cara interna de la pieza (produciéndose contracción de las fibras interiores) y humedeciendo con agua la cara externa (produciéndose un alargamiento de las fibras exteriores) La operación debe realizarse lentamente.

Esta propiedad se aprovecha en la producción de muebles curvados como sillas, puertas, instrumentos musicales, ruedas, etc. Las maderas flexibles son abeto, fresno, olmo y pino.

Figura 15: Flexibilidad de la Madera



Fuente: Información recolectada del libro "Materiales de Construcción", Orús Asso, F. (1963)

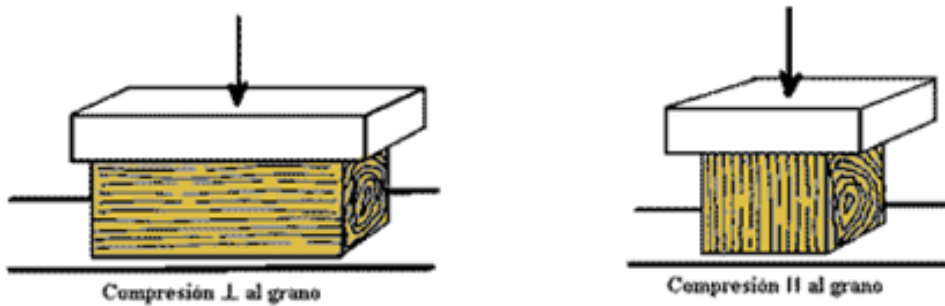
3.5. RESISTENCIA

3.5.1. COMPRESIÓN

La resistencia a compresión aumenta cuando el grado de humedad disminuye, esto quiere decir que, si el peso específico de la madera es mayor, mayor será su resistencia.

La dirección del esfuerzo (paralelo o perpendicular) a la que se somete la madera influye en la resistencia a la compresión. La madera resiste más al esfuerzo ejercido en la dirección de sus fibras que al esfuerzo ejercido de manera perpendicular a las fibras.

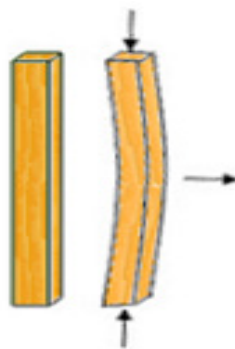
Figura 16: Resistencia a compresión de la Madera



Fuente: Información recolectada del libro "Tecnología de la madera y el mueble", W. Nutsch, Ed. Reverté, S.A. (1992)

El pandeo se produce cuando las piezas superan la resistencia sometidas al esfuerzo de compresión en el sentido de sus fibras, generando una fuerza perpendicular a ésta y produciendo que se doble en la zona de menor resistencia.

Figura 17: Pandeo de la Madera



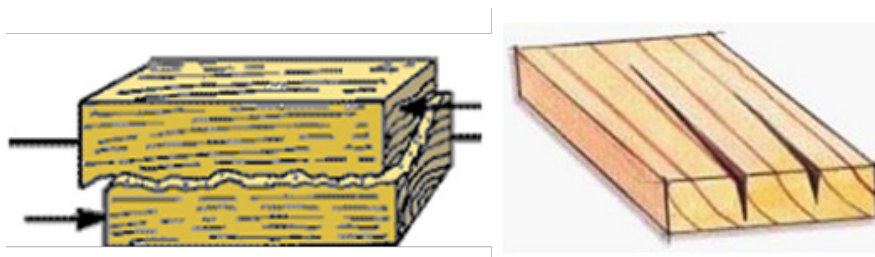
Fuente: Información recolectada del libro "Tecnología de la madera y el mueble", W. Nutsch, Ed. Reverté, S.A. (1992)

3.5.2. RESISTENCIA AL CORTE

Es la capacidad de resistencia que tiene la madera cuando es sometido a la acción de una fuerza que tiende a cortarla en dos partes mediante un esfuerzo de dirección perpendicular a la dirección de las fibras (paralelamente a ellas no puede producirse la rotura, porque la resistencia en esta dirección es alta).

Si el esfuerzo cortante en sentido perpendicular a las fibras es máximo será cortadura y si es mínimo en sentido paralelo a las fibras será hendibilidad o desgarramiento.

Figura 18: Resistencia al corte de la Madera



Fuente: Información recolectada de los libros "Tecnología de la madera y el mueble", W. Nutsch, Ed. Reverté, S.A. (1992) - "Materiales de Construcción", Orús Asso, F. (1963)

3.5.3. RESISTENCIA AL CHOQUE

Esta capacidad de la madera nos indica su comportamiento al ser sometida a un impacto y/o choque. La resistencia es mayor en el sentido axial de las fibras y menor en el transversal o radial en el cual influyen el tipo de madera, el tamaño de la pieza, la dirección del impacto con relación a la dirección de las fibras, densidad y la humedad de la madera, etc.

3.5.4. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La resistencia de la madera a la tracción en dirección paralela a las fibras es mucho mayor en comparación a la tracción en sentido perpendicular a las mismas; esto se debe a las moléculas de celulosa las cuales constituyen la pared celular en una mayor parte.

Al realizar una fuerza de tracción en la dirección axial, la magnitud de la deformación producida será menor que si el esfuerzo es de compresión, sobre todo en lo que concierne a las deformaciones plásticas, es decir que la rotura de la madera en tracción se producirá de forma brusca e imprevista.

3.6. FUNDAMENTOS DE SECADO

El secado consiste en remover el exceso de agua de un material controlando las variables que intervienen en este proceso además del comportamiento de las propiedades de material a secar para alcanzar la especificación estándar del contenido de humedad. De acuerdo al tipo de secado, el sistema empleado puede derivar en costos de inversión para la construcción del sistema de secado, costos de operación, consumos de energía entre otros.

El secado de un material puede hacerse mediante evaporación y/o vaporización con ayuda de calor (secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, etc.). Los principios del proceso de secado son independientes del tipo de energía que se utilice para secar un producto.

En el secado térmico se utiliza el flujo de aire que es impulsado por convección natural o forzada mediante la utilización de aire precalentado o a temperatura ambiente, produciendo transferencia de calor del aire al material a secar. A través de este tipo de secado se produce la vaporización de la humedad del producto hacia el aire (proceso simultáneo de masa y energía), y debido a la humedad ganada por el aire se revela la disminución en su temperatura. Ambos procesos mencionados anteriormente se producen de forma simultánea y se identifican de la siguiente manera:

- **Transferencia de calor (Energía):** Desde el agente desecante hacia la superficie del producto.
- **Transferencia de masa (Humedad):** Transportar la humedad del material hacia la superficie y aire de los alrededores.

Durante la transferencia de calor, la remoción de agua de la superficie del material depende de las condiciones externas como la temperatura, humedad del aire, flujo del aire, el área de superficie expuesta y la presión.

En el proceso de transferencia de masa, el movimiento de la humedad en el interior del material está en función de su naturaleza, temperatura, y de su contenido de humedad (**Mujumdar, 2006**).

3.6.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

El factor más influyente dentro del proceso de secado, es sin duda el contenido de humedad presente en el material a secar. Existen diferentes métodos para medir el contenido de humedad de un material:

- **Método Indirecto:** Medición rápida a través de un equipo especial, consiguiendo una medición rápida por medio de la conductividad eléctrica del material.
- **Método Directo:** Determinación del contenido de humedad a través de la medición de la masa húmeda del material y la masa seca después de eliminar el agua contenida en el material.

3.6.2 SECADO DE LA MADERA

Hay dos formas de extraer el agua de la madera: Secado natural o al aire libre y Secado artificial o en hornos industriales y/o convencionales.

El tiempo de secado, ya sea a través de un sistema natural o artificial, depende de factores internos (tipo de madera, espesor, contenido de humedad inicial y final) y factores externos (temperatura del aire, humedad relativa y la velocidad de circulación del aire).

Al secar la madera por medio de un proceso de secado al aire libre, los factores externos no pueden ser controlados, lo cual el tiempo de secado depende de los factores ambientales. En el secado artificial, los factores externos pueden ser controlados, reduciendo el tiempo de secado hasta 20 veces con respecto al secado al aire libre.

En las maderas blandas se pueden utilizar velocidades hasta de 3(m/s) esto dependiendo de la humedad y densidad de la madera. Mientras que en las maderas duras no es posible, porque la estructura es compleja y tienen una mayor densidad, por lo requiere mayor tiempo de secado. **(Klitzke, 2005)**

Para implementar un proceso de secado, primeramente, se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Especie de madera
- Densidad de la madera
- Espesor de la madera

- Humedad inicial antes del secado
- Humedad final requerida

3.6.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL SECADO DE LA MADERA

Los factores que intervienen en un proceso de secado de la madera son los siguientes:

Temperatura: Magnitud referida a las nociones comunes de calor para que las moléculas de agua en la madera puedan adquirir la energía cinética necesaria para la evaporación para absorber la humedad liberada por la madera, cuanto más elevada sea la temperatura del ambiente que rodea la madera, más intensa será la evaporación puesto que el aire podrá absorber más humedad (**Jiménez, 2003**).

Humedad Relativa: Relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la máxima cantidad que puede contener a una temperatura dada. Si aumentamos la temperatura, aumenta la capacidad del aire de contener vapor de agua, lo que quiere decir que puede absorber mayor cantidad de vapor de agua de la madera. Igualmente, si extraemos vapor de agua del aire y bajamos su humedad relativa, aumenta la capacidad de sacar vapor de la madera que contiene en sus capas. (**Jiménez, 2003**)

Velocidad del Aire: La circulación del aire es otro de los elementos que actúa sobre la velocidad de evaporación del agua durante el proceso de secado de la madera, para maderas de mayor densidad y secado lento se recomiendan velocidades de 2 m/s y de 5 m/s, para maderas de secado rápido se utilizan velocidades mayores; sin un debido control puede comprometerse la calidad de la madera. (**Inzunza, 2004**)

Contenido de Humedad de Equilibrio: Establece un equilibrio entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la que existe en el interior de la pieza de madera; cuando este equilibrio es alcanzado, la humedad de la madera no varía más y se dice que ha llegado al contenido de humedad de equilibrio o humedad límite, este contenido de humedad permanecerá constante mientras las características del aire que rodean a la madera no cambien. (**Vargas, 2007**)

3.6.4. CLASIFICACIÓN DE SECADO DE LA MADERA

La clasificación de los diferentes sistemas de secado de madera está en función a diferentes parámetros, principalmente en función a la temperatura de operación (alta y baja temperatura). Los sistemas de secado a alta temperatura utilizan combustibles fósiles convencionales, mientras que los de baja temperatura utilizan

energía solar, sistemas híbridos, etc.).

Se cuenta con una gran variedad de tipos de secado de madera, las cuales se clasifican según su tamaño, energía requerida, aplicación entre otros. A continuación, se señalan los tipos de secado de madera más utilizados.

3.6.5. SECADO NATURAL

El secado natural o al aire libre consiste en exponer la madera a la acción de los factores climáticos de un lugar. Estos factores son principalmente la temperatura, velocidad y la humedad relativa de la atmósfera y el aire que, en permanente movimiento, sirve de agente para establecer un equilibrio higroscópico entre el medio ambiente y la madera (CHE).

Mediante este tipo de secado, no se puede ejercer un control en el proceso ya que está sujeto a los factores ambientales. El tiempo de secado está en función a los factores ambientales, tipo de madera, espesor, apilado, velocidad del flujo del aire, contenido de humedad inicial y final, etc. Generalmente este proceso de secado es lento y no se alcanzan contenidos de humedad menores a los correspondientes a la humedad de equilibrio del lugar.

En el secado natural, la madera se dispone en pilas, para un adecuado apilado se necesita separar las tablas por lo menos unos 2.50 (cm) por medio de unas tablillas que se colocan cada 60 (cm), si los rástreles se colocan más juntos, se evita en gran medida la torcedura de la madera. Por lo general, las pilas deben hacerse sobre bases de hasta de 40 cm de alto según el tipo de piso, para evitar que la madera absorba la humedad del suelo y para crear corrientes ascendentes de aire que contribuyen al secado cuando no hay viento.

Figura 19: Apilado de la madera en secado natural



Fuente: Imagen del documento “Secado de la Madera” – Revista CIS Madera, (2005)

Si el aire ambiente es muy húmedo se pueden producir deformaciones, grietas, hongos y decoloraciones en la madera. Para este tipo de secado, es recomendable no exponer la madera a la acción directa del sol, todo esto para evitar grietas, deformaciones y pérdida de color de la madera.

Mediante este método, generalmente se puede llegar a un contenido de humedad de hasta un 20(%) en el lapso de 1 mes a 1 mes y medio unos 30-40 días por cada cm de espesor de la madera. Mediante el secado natural no es factible obtener una humedad final de la madera inferior a la humedad de equilibrio con las condiciones climáticas. Por otra parte, la velocidad de difusión del agua está por debajo de la zona de saturación de las fibras.

La ventaja principal de este método de secado es que tiene un bajo costo de implementación, la energía que se utiliza es una fuente no contaminante y renovable. Las desventajas del secado natural son: Duración del proceso de secado, dependencia de los factores climáticos, variación de la intensidad de radiación solar y finalmente a q no se obtienen contenidos de humedad requeridos en función al uso que se le dará a la madera.

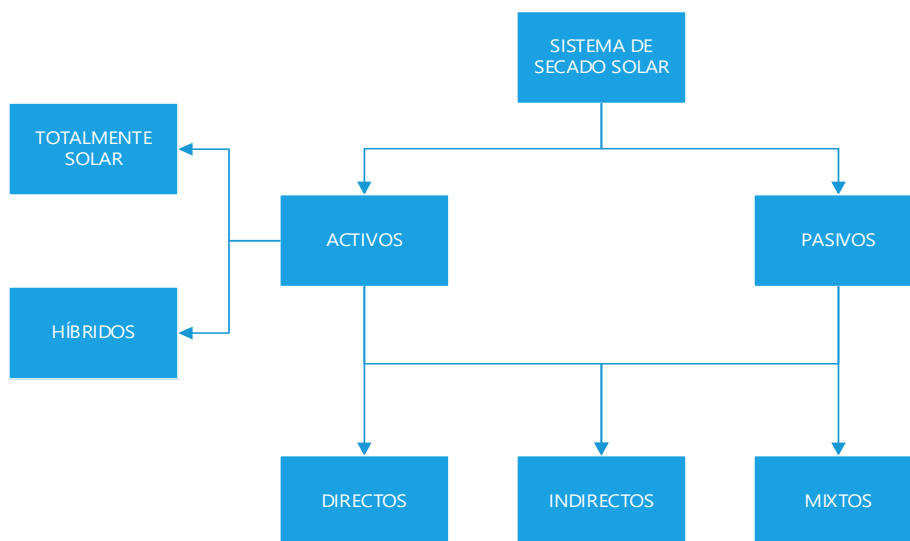
La variación de la radiación solar, es un aspecto muy importante en el cual se debe enfocar el diseño y control del sistema de secado para facilitar el secado efectivo. Aun así, esta desventaja puede solucionarse con la utilización de alguna fuente auxiliar (utilización de gas natural). La baja densidad energética de la radiación solar, da lugar a la necesidad de implementar colectores solares para el calentamiento del aire.

A continuación, se establecen los principales tipos de secado solar, estableciendo los parámetros fundamentales para la optimización del funcionamiento de los mismos.

3.6.6. TIPOS DE SISTEMAS DE SECADO SOLAR

Son sistemas de secado de baja temperatura, existiendo una gran variedad para los diferentes materiales a secar. La siguiente figura muestra un esquema de los tipos de sistema de secado solar.

Figura 20: Tipos de sistemas de secado solar



Fuente: Esquemas propuestos por (Ekechukwu & Norton, 1999), (Augustus, Kumar, & Bjhattacharya, 2002), (Pangayhane & Sawhney, 2002)

En función al esquema anterior y de acuerdo a la forma de circulación del aire, podemos clasificar este sistema en dos grandes grupos:

1. Sistemas solares activos o de convección forzada: Incorporan elementos externos como ventiladores para mover el aire caliente utilizando para la extracción de aire húmedo del producto. Según se requiera, este sistema puede ser “Totalmente solar”, en los que el aporte energético se obtiene en su integridad de la radiación solar, o sistemas “híbridos”, para los que además de la radiación solar se utiliza una fuente de energía auxiliar, por ejemplo, durante las operaciones de secado nocturnas o en periodos con bajos niveles de insolación.

a) Secaderos solares activos de tipo integral: Sistemas en los que la unidad de recepción de la radiación solar es la propia cámara de secado. A su vez pueden ser secaderos de absorción directa sobre el producto, secaderos con pared o cubierta colectora y secaderos tipo invernadero con cámara de absorción interna. **(Ekechukwu & Norton, 1999)**

b) Secaderos solares activos de tipo distribuido. El calentador solar de aire y la cámara de secado constituyen unidades separadas. Los cuatro componentes básicos del sistema distribuido son: la cámara de secado, el calentador de aire, el ventilador y el conducto de unión entre el calentador y la cámara. **(Ekechukwu & Norton, 1999)**

c) Secaderos solares activos de tipo mixto: Estos tipos de secaderos combinan las características de los secaderos integrales y los distribuidos. Los componentes típicos son los indicados para los secaderos indirectos con la salvedad de que la cámara de secado es de algún material translúcido que permite que el producto absorba directamente la radiación, al igual que en los sistemas directos. **(Montero, 2005)**

2. Sistemas solares pasivos o de convección natural: Dentro de su sistema, no incorpora elementos para forzar la circulación del aire desecante, produciéndose este movimiento por la variación de densidad del mismo provocada por la diferencia de temperaturas y/o como resultado de la presión del viento.

a) Secaderos solares pasivos de tipo integral: Al igual que en los sistemas activos directos, su principal característica está en que la cámara de secado cumple la función de colector, recibiendo la radiación solar. Su eficiencia es baja debido al escaso control que se posee sobre el proceso de secado, siendo éste uno de sus principales inconvenientes. Otra desventaja importante de estos dispositivos es la baja velocidad de secado provocada por el reducido flujo de aire. Para evitar este hecho, es habitual la instalación de una chimenea que favorezca la circulación y renovación del aire desecante.

b) Secaderos solares pasivos de tipo distribuido: El producto a secar se encuentra dentro de una cámara de secado opaca y es calentado por el aire circulante que proviene de un colector solar. Su principal inconveniente se encuentra en las fluctuaciones de la temperatura del aire precalentado, que provoca dificultades para mantener las condiciones constantes en la cámara. **(Augustus, 2002)**

c) Secaderos solares pasivos de tipo mixto. Combina las características de los secaderos integrales y distribuidos. Básicamente posee las mismas características estructurales que los secaderos pasivos del tipo distribuido, pero con la diferencia de que las paredes de la cámara de secado son de material transparente, de manera que la radiación solar incide directamente sobre el producto.

3.6.7. SECADO ARTIFICIAL.

La clasificación de las cámaras de secado artificial se efectúa de acuerdo a los requerimientos de lograr dentro de la cámara un efectivo control de las condiciones del aire de secado que circula a través de las pilas de madera, temperatura y humedad relativa. Este tipo de secado emerge como respuesta a las fallas que existen al implementar un sistema de secado natural.

Existen varias formas de secado artificial, se diferencian según la intensidad de la temperatura aplicada, fuente térmica y las características de las instalaciones. Los más habituales son los sistemas que utilizan el vapor de agua, agua caliente y/o aceite térmico. La siguiente figura muestra un tipo de cámara de secado artificial.

Figura 21: Cámaras de secado artificial (Horno de vapor)



Fuente: Imagen obtenida de un horno de secado de la empresa Direct Industry

Este sistema reduce el tiempo de secado y minimiza la aparición de defectos en la madera (deformaciones, retorcaduras, decoloraciones), alcanzando contenidos de humedad final tan bajos de acuerdo al uso final de la madera. Las condiciones de trabajo de este sistema pueden ser extremas, alcanzando temperaturas de aire de al menos 100 ° C al final del secado (es por eso que debe tomarse en cuenta esta condición para la construcción de las cámaras de secado, de tal forma que resistan estas temperaturas). El proceso de secado toma de 6 a 10 días para obtener madera entre el 18% y el 20% de contenido de Humedad dependiendo del uso final de la madera.

Los costos directos del secado artificial en cámaras son más altos que los del secado al aire libre, ya que a la inversión en instalaciones y equipos hay que agregar los costos de funcionamiento en combustibles, electricidad entre otros. Sin embargo, la rapidez del secado es hasta 20 veces más rápido que el sistema de secado al aire libre, dependiendo del espesor de la madera. **(CISMadera, 2008)**

Cualquiera que sea el método utilizado tienen que contemplarse dos fenómenos: Movimiento de agua contenida en la madera hacia el exterior y su evaporación a la superficie. La evaporación superficial no es difícil de conseguir suministrando algunas condiciones adecuadas de temperatura y humedad de aire, así como establecer una ventilación suficiente. La acción para conseguir un secado acelerado de la madera puede ocasionar en la madera la formación de alabeos, por lo que debe forzarse la circulación y evaporación del agua de una manera controlada. **(Vargas, 2007)**

Dentro de este tipo de secado, podemos mencionar los métodos más utilizados:

- Secado por condensación
- Secado por convección

3.6.8. SECADO POR CONDENSACIÓN

Su funcionamiento consiste en que el aire relativamente saturado de humedad será enfriado, el aire reduce su capacidad de absorción de agua y debido a esta circunstancia el exceso de agua evaporada empieza a condensarse y sale en forma líquida al exterior de la cámara de secado. De esta manera se mantiene la capacidad de absorción del aire, caso contrario, el aire se satura con el agua que contiene la madera y se determinara su funcionalidad como medio de secado. **(Vargas, 2007)**

La temperatura de secado oscila entre 35 a 45(°C), relativamente baja. Las principales desventajas que presenta este sistema son: Tiempo de secado (30 a 60 días), los contenidos de humedad obtenidos no alcanzan los requeridos no son bajos y tiene un alto costo de operación.

3.6.9. SECADO POR CONVECCIÓN

Este tipo de sistema trabaja con temperaturas más elevadas, normalmente oscila entre 60 a 80 (°C), utiliza por lo general intercambiadores de calor y como medio de calefacción se puede utilizar agua caliente, vapor de agua, aceite térmico y/o gases de combustión. En este sistema, el tiempo de secado se reduce considerablemente dependiendo del tipo de madera. **(Llorens Martin, 2005)**

Debido a que cada uno de los métodos de secado artificial tienen ventajas y desventajas, debe optarse por un sistema de acuerdo a las posibilidades que se tiene y principalmente que cumpla las necesidades requeridas.

3.6.10. PROCESO DE SECADO.

En el proceso de secado de la madera se debe tener en cuenta los siguientes factores: Temperatura de secado (°C), Humedad relativa (%), Equilibrio higroscópico (%), Gradiente de secado.

El proceso de secado consta de tres etapas distintas: Fase de calentamiento, Fase de secado y Fase de tratamiento posterior.

3.6.11. FASE DE CALENTAMIENTO

En esta fase, la madera se calienta a la temperatura de secado, el tiempo de secado de esta etapa depende de la potencia del sistema de calefacción que se encuentra instalada. Es importante que, en esta fase, la madera no empiece a desecarse, por el contrario, debe enfocarse a que se humedezcan las partes exteriores de la madera para que las células vuelvan a ablandarse. El costo de consumo de energía térmica en esta fase de inicio, es el más alto, se lo puede estimar en un 12(%) de la energía total requerida en el proceso de secado.

La temperatura en esta fase varía entre 45 (°C) hasta 80 (°C), dependiendo de la madera a secar, hasta llegar al Punto de saturación de las Fibras (PSF), manteniendo la temperatura entre 45 (°C) y 60 (°C).

3.6.12. FASE DE SECADO

Dentro de este proceso podemos identificar dos etapas:

- Período de secado hasta el Punto de saturación de las fibras (PSF): tiempo 1 (t_1).
- Período de secado desde Punto de saturación de las fibras (PSF) hasta la humedad final: Tiempo 2 (t_2).

Cuando la madera tiene un contenido de humedad superior al Punto de saturación de las fibras (PSF) tenemos el valor de (t_1). En el período de secado del Punto de saturación de las fibras (PSF) hasta la humedad final (t_2), es necesario incrementar la temperatura hasta 85 (°C) o 95 (°C).

3.6.13. FASE DE TRATAMIENTO POSTERIOR

En esta fase también conocida como fase de enfriamiento, se equilibra la humedad dentro de la madera secada bajando la temperatura hasta 50 (°C) o 40 (°C) intercambiando el aire caliente con aire frío, con el objetivo de igualar las diferencias de humedad final deseada en la madera.

La pérdida de agua se produce por un proceso de naturaleza diferente dependiendo de si el contenido de humedad está por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras. Cuando el secado alcanza contenidos de humedad por debajo del Punto de Saturación de la Fibras (PSF), el agua retenida en la madera se mueve más lentamente, retardando el proceso.

3.6.14. DIFICULTADES DEL PROCESO DE SECADO

Grietas Superficiales: Ocurren en la primera etapa de secado; por lo general, los lados de las grietas se cierran en la superficie al final del proceso y no son visibles en la superficie hasta que la tabla sea cepillada. Otra causa que pueden originar estas grietas es la aplicación de un tratamiento de humedad elevado cuyo centro ha secado bajo el punto de saturación de las fibras (PSF), seguido de un rápido proceso de resecado de la superficie.

Grietas Internas: Se originan en la última etapa de secado como resultado directo de rigurosas condiciones de secado en la primera etapa, que originan esfuerzos intensos de tensión en la superficie y de compresión en el centro. Este tipo de grietas se generan en el interior de la tabla pudiendo extenderse hasta la superficie.

Rajaduras: Las rajaduras en la madera, son separaciones longitudinales de las fibras que atraviesa de una cara de la madera a la otra. Ocurren en los extremos de una tabla debido a una rápida pérdida de agua que origina esfuerzos de tensión.

3.6.15. MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO

Cuando los cambios de temperatura se realizan de manera brusca o excesiva, pueden generar problemas en el secado del material. Mejorando el proceso y el tiempo de secado, se obtiene un material de mayor calidad, tomando en cuenta los cuidados necesarios (**Jiménez, 2003**).

Para poder optimizar un proceso de secado se debe tener en cuenta las siguientes variables:

- Tiempo de secado según el tipo de madera.
- El tipo de corte que se realiza a la madera: Radial, tangencial, transversal.
- Relación de la proporción de colapso: La albura colapsa en menor proporción que el duramen.
- Relación del tiempo de secado: La albura seca más rápido que el duramen.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO

El proceso de estudio y análisis de la presente investigación, se enmarcan dentro de un plan general de metodología. El esquema metodológico está dividido en cinco fases:

Fase I: Recolección de información.

Fase II: Realizar pruebas experimentales al proceso de secado de la madera que actualmente utilizan los pequeños productos de manufactura en madera, verificando a que Contenido de Humedad llega la madera previa a su utilización.

Fase III: Realización de pruebas de aislamiento y permeabilidad para la obtención de resultados.

Fase IV: Realizar los cálculos necesarios para diseñar un Sistema Híbrido - Horno de secado de maderas.

Fase V: Revisión, publicación y difusión de Resultados.

4.1. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.

En este punto se considera necesario recopilar la información sobre los productores de manufactura en madera, desde el proceso de tala hasta su proceso de transformación.

Para la verificación del proceso de la cadena productiva de la madera, se viajó a la localidad de Ixiamas de la provincia Iturralde del Departamento de La Paz, el objetivo del viaje fue realizar un análisis de algunas etapas/fases del proceso de transformación de la madera. Algunas etapas no pudieron verificarse debido a que no se tuvo acceso a las industrias que realizan dicha transformación. Parte de la evidencia documental de este viaje se presenta a continuación.

Figura 22: Diversificación de árboles antes del proceso de talado en la localidad de Ixiamas





Fuente: Fotos tomadas en la localidad de Ixiamas, julio de 2019

El proceso desde la extracción de la madera de los bosques como materia prima hasta la obtención de productos elaborados en base a madera, se compone de las siguientes fases:

1. **Tala:** Es la fase de explotación forestal. Detrás de la tala del árbol debe haber un estudio previo de gestión forestal, buscando la sostenibilidad para el monte en el que se encuentre el aprovechamiento. Esta fase consiste en cortar el tronco del árbol por su base.

Figura 23: Proceso de tala de la madera en el Departamento de La Paz.



Fuente: Fotografía del documento "Derechos Forestales – Atlas socioambiental de las tierras bajas y yungas de Bolivia", Daniel Larrea A. (2015)

2. **Poda:** Una vez derribados los árboles, se cortan sus ramas dejando el tronco liso y uniforme.

Figura 24: Proceso de poda de los árboles en el Norte del Departamento de La Paz.



Fuente: Fotografía publicada en el periódico "La Razón" en fecha 25/01/2013

- 3. Transporte:** Los troncos son transportados por carretera, ferrocarril o por agua dependiendo la situación hasta llegar a la serrería.

Figura 25: Transporte de la madera por carretera – río en el municipio de Ixiamas del Departamento de La Paz.



Fuente: Fotografía publicada en el Periódico “La Razón” en fecha 25/01/2013

- 4. Descortezado:** Se elimina la corteza de los troncos. Esta corteza será aprovechada para otras aplicaciones, al igual que las ramas que se extrajeron en la fase de poda. Se realiza en la serrería con cadena de rodillos.

Figura 26: Aserradero que se encuentra cerca del municipio de Ixiamas



Fuente: Fotografía obtenida del proyecto “Análisis de la cadena productiva de la madera del genero cedrella en Ixiamas, provincia Abel Iturralde (departamento de la paz)”, Francisco Arana P. (2015)

5. **Tronzado:** Los troncos se cortan en trozos según la longitud deseada. Después, los trozos son cortados en tablas y/o tablones de determinadas medidas.

Figura 27: Madera cortada - tronzada



Fuente: Fotografía tomada en unidades productivas pertenecientes a la “Asociación de Carpinteros 19 de marzo”, agosto de 2019

- 6. Secado:** Se reduce la cantidad de agua de la madera antes de trabajarla, así se evitan deformaciones y variaciones en sus dimensiones. La madera seca es más duradera y ligera.

Figura 28: Secado de la madera cortada



Fuente: Fotografía tomada en unidades productivas pertenecientes a la "Asociación de Carpinteros 19 de marzo", agosto de 2019

- 7. Cepillado:** Mediante este proceso se eliminan las irregularidades y se da a la madera un buen acabado y las medidas adecuadas.

Figura 29: Proceso de cepillado de madera



Fuente: Fotografía obtenida de la revista BricoMart – “Soluciones prácticas y tratamiento de la madera” (2018)

8. **Transformado:** Realización diferentes productos en base a madera como materia prima.

Figura 30: Productos elaborados con madera



Fuente: Fotografías tomadas en unidades productivas pertenecientes a la “Asociación de Carpinteros 19 de marzo”, agosto de 2019

Otro punto esencial dentro del proceso de recolección de información, es que se realizó entrevistas con los propietarios de las Carpinterías (Unidades Productivas manufactureras en madera) pertenecientes a la “Asociación de Carpinteros 19 de marzo” y otros; además de realizar una encuesta que se presenta en la sección del Anexo I del presente documento.

Dentro de la información recopilada mediante los diferentes métodos, se pudo evidenciar la información presentada en la siguiente tabla:

Tabla 7: Tipo de madera utilizado por los carpinteros de la “Asociación 19 de marzo”

Nombre Comercial	Nombre científico
Laurel	Nectandra sp
Tarara	Centrolobium microchaete
Yesquero	Cariniana estrellensis
Cedro	Cedrela odorata
Roble	Nothofagaceae.
Pino	Pinus palustris
Tambara	Dipteryx micrantha
Palo María	Calophyllum brasiliense
Bibosi	Ficus glabrata
Ochoa	Hura crepitans

Fuente: Elaboración con información obtenida en base a entrevistas y/o encuestas realizadas a los propietarios de la “Asociación de Carpinteros 19 de marzo”, (2019)

4.2. PRUEBA EXPERIMENTAL

En este punto se realizó pruebas experimentales, verificando el contenido de humedad al que llega la madera utilizando el método de secado al aire libre y también una medición de una madera secada en un horno industrial.

Para dicha prueba experimental se alquilaron dos equipos de la empresa HEMMEN, dichos equipos se describen a continuación:

- **Higrómetro:** Instrumento que se utiliza para medir el grado de humedad del aire o de otros gases. Estos instrumentos de medición de la humedad por lo general se basan en las mediciones de alguna otra magnitud como la temperatura, la presión o un cambio mecánico o eléctrico en una sustancia cuando absorbe la humedad.


Tabla 8: Características de Higrómetro MD812P

	Marca:	Dr. Meter
	Modelo:	MD812P
	Rango de medición de humedad:	5% ~ 65 % HR
	Precisión:	1 %
	Fuente de alimentación:	1 * 9V 6F22
	Color:	Negro + Naranja
	Tamaño:	14.50 * 8.7 * 3.20 cm
	Peso aproximado:	210 g.

Fuente: Información presentada en la Ficha Técnica de la empresa Dr. Meter

- **Termómetro digital:** Instrumento que se utiliza para medir la temperatura a la cual está la madera durante el proceso de secado de la madera al aire libre.

Tabla 9: Termómetro TP 500

	Marca:	KCASA
	Modelo	TP 500
	Uso:	Temperatura Senso
	Precisión:	$\pm 1^\circ \text{C} / \pm 1^\circ \text{F}$
	Resolución:	$0,1^\circ \text{C} / 0,1^\circ \text{F}$
	Tamaño total:	214 mm
	Rango de temperatura:	$-50^\circ \text{C} \sim 300^\circ \text{C} / -58^\circ \text{Fto} + 572^\circ \text{F}$
	Fuente De Alimentación:	1 batería de botón de 1.5V LR44

Fuente: Información presentada en la ficha técnica de la empresa KCASA

Los equipos de medición descritos anteriormente sirvieron para realizar las mediciones en las diferentes carpinterías de la ciudad de El Alto, las evidencias de las medidas se presentan a continuación.

Figura 31: Mediciones realizadas a madera durante el proceso de secado al aire libre



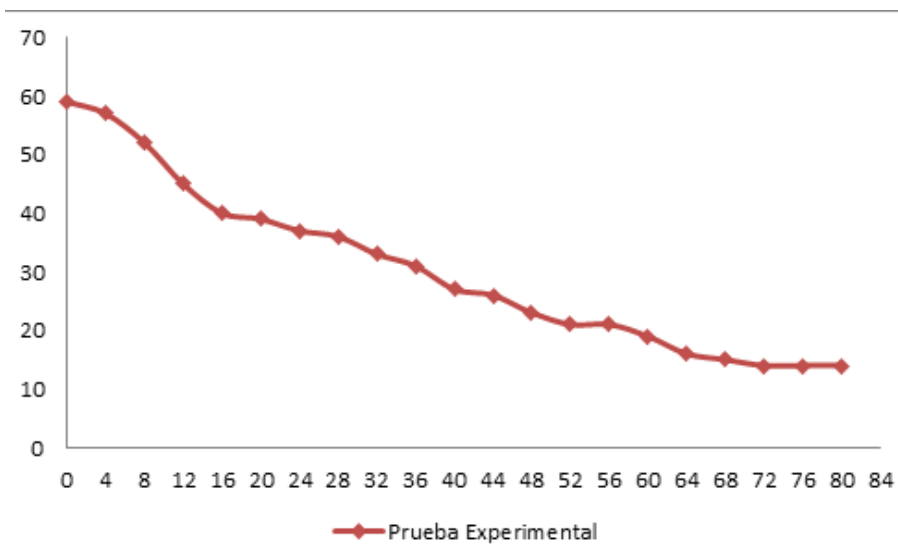
Fuente: Fotografías tomadas para realizar el ensayo (Noviembre – Enero), 2019

Figura 32: Medición realizada a madera seca en hornos industriales



Fuente: Fotografía tomada en la carpintería Vicorn, noviembre de 2019

Gráfico 3: Medición experimental realizada a madera roble – Secado al aire libre



Fuente: Elaboración en base a datos obtenidos del ensayo realizado a un tablón de madera Roble, 2020

La prueba experimental fue realizada en madera roble, ésta prueba consistía en realizar mediciones a la madera húmeda que llega a las carpinterías hasta que prácticamente, según los productores ya estaba lista para su utilización, además de una medición de un tablón de madera secado mediante hornos industriales. En las mediciones realizadas se observa que la madera llega a las unidades productivas a una humedad en el rango de (55 – 60%) llegando mediante el proceso de secado al aire libre a un contenido de humedad de equilibrio alrededor de (13 – 16%). Si bien el clima de la ciudad de El Alto favorece porque es un clima seco con una humedad relativa medianamente baja, la humedad de equilibrio final de la madera que se llega mediante este proceso no es la adecuada para la fabricación de muebles. Mientras que la madera secada en Hornos industriales llega a una Humedad de Equilibrio de (9 – 10 %) según el uso final que se le pueda dar a la madera.

En base a estas pruebas experimentales, se recomienda que en un futuro pueda aplicarse y/o establecerse un estudio de diseño técnico para la ejecución de la construcción de un Sistema de Secado de madera acorde a las necesidades de los pequeños productores de manufacturas en madera para que de esta manera la madera llegue a Contenidos de Humedad de Equilibrio acorde a su uso final.

4.3. PRUEBAS DE AISLAMIENTO TÉRMICO Y PERMEABILIDAD DE MATERIALES.

En esta fase se procura realizar pruebas de laboratorio de aislamiento térmico y permeabilidad de materiales (Bloques de cemento – tierra) que podrían utilizarse dentro del Sistema Híbrido - Hornos de secado de maderas tropicales en la ciudad de El Alto.

Reanalizadas las cotizaciones para las pruebas de aislamiento térmico y permeabilidad de materiales, se pudo constatar que el monto cotizado (Bs. 12.400.-) superaba bastante al monto presupuestado para dichas partidas (Bs. 3.600.-); es por ello que se procedió a no realizar las pruebas de aislamiento térmico y permeabilidad de materiales, la cotización se presenta en el Anexo IV del presente documento.

En función a ello, se consultó varias bibliografías, que pudieran proporcionar datos sobre las características del material mencionado, así como de otros materiales como el hormigón celular, dichos datos obtenidos se presentan en el siguiente acápite.

Las características del hormigón celular se presentan a continuación.

Hormigón Celular: Es un producto constituido por la combinación de arena de sílice, cemento y cal.

Propiedades y características del hormigón celular.

Poca conductividad térmica: Una de sus principales características es ser un muy buen aislante térmico, además de ser económico. Esto lo logra a través de su estructura molecular alveolar (estructura compuesta por millones de micro células de aire).

Durabilidad y Resistencia mecánica: Resiste condiciones climáticas extremas.

Resistencia al fuego: Al ser fabricado con materiales minerales no contienen materias combustibles, por lo que resiste altas temperaturas por períodos prolongados.

Costo: El hormigón celular es un material que ofrece amplias ventajas constructivas, además de que la construcción con este material puede conllevar a un importante ahorro monetario, reduciendo tanto costos de inversión como tiempos de ejecución en una obra.

Durabilidad: Se comporta de manera similar al concreto convencional, pero por el hecho de ser más poroso es más vulnerable a daños físicos y al utilizarse por debajo del nivel natural del terreno deben contener un aditivo hidrófugo especial para evitar el daño por contacto con agua.

En base a lo presentado anteriormente, se tomará en cuenta otras alternativas para el diseño del sistema híbrido - horno de secado de maderas tropicales en la ciudad de El Alto.

4.4. DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO HORNO DE SECADO DE MADERAS TROPICALES

Este punto trata sobre todas las características técnicas y parámetros necesarios para el Sistema Híbrido - Horno de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto, el cual combine la utilización de energía solar, energía eléctrica y la energía proveniente del gas natural

El funcionamiento del Sistema Híbrido – Horno de secado de madera se representa de dos maneras:

Funcionamiento mediante la energía solar: Al interior de la cámara del horno de secado se genera calor por medio de la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura y es absorbida en una de las superficies interiores, una vez que el aire se calienta al interior de la cámara es forzado a circular entre las pilas de madera a través del funcionamiento de un ventilador.

A medida que la temperatura se incrementa, la madera empieza a liberar el agua que contiene en su interior, aumentando así la humedad relativa del aire. Cuando la humedad relativa del aire sea superior, se debe expulsar la misma por medio de un conducto de evacuación superior del horno y ventilas en la parte lateral de la cámara que permitan intercambiar el aire húmedo que se encuentra al interior de la cámara de secado por un aire más seco del exterior de la misma.

Este funcionamiento permite que la madera descienda sus contenidos de humedad a niveles requeridos dependiendo del tipo de madera a secar y el uso que tendrá la misma.

Funcionamiento con Energía Eléctrica: La energía eléctrica será utilizada para el funcionamiento del tablero de control, el cual controlará el funcionamiento correcto de todos los elementos de la cámara de secado (ventiladores, visualizadores, etc.).

Funcionamiento con Gas Natural: Cuando existan días nublados, lluviosos donde la humedad al exterior de la cámara de secado sea alta, o simplemente para acelerar el proceso de secado de la madera; el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera funcionará con Gas Natural.

El funcionamiento del horno se realiza a través de un sistema de calefacción y ventilación, utilizando como medio de calefacción gases de combustión. Este tipo de secado trabajará a temperaturas más elevadas que con la utilización de la energía solar (igual o mayor a 50° C).

4.4.1. TAMAÑO Y CAPACIDAD DEL SISTEMA HÍBRIDO – HORNO DE SECADO

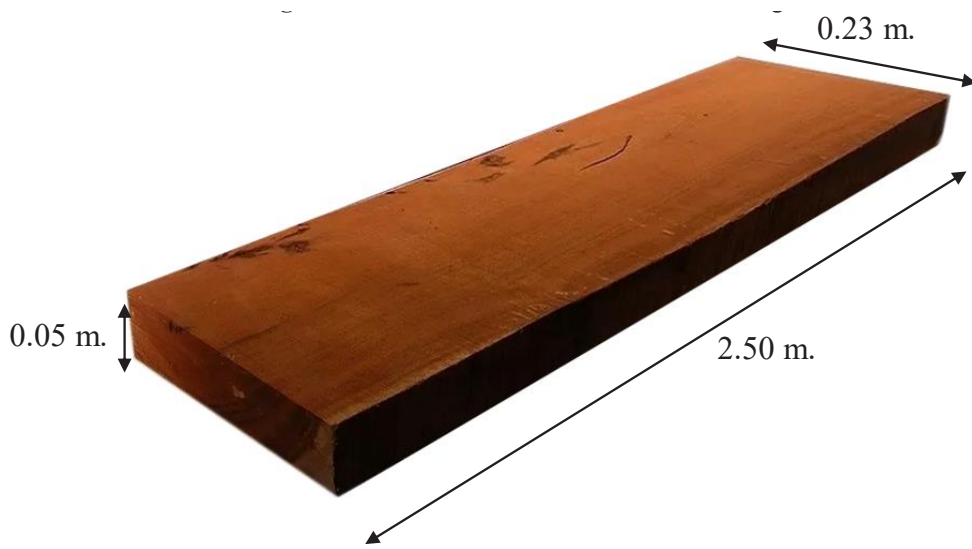
Los tamaños de los tablones de madera varían en cuanto al largo de la madera (96”, 98.43”, 120”, 144”, 168” y 192”), ancho (5”, 6”, 8”, 9” y 10”) y espesor (1”, 1.5”, 2” y 2.5”). Para el diseño de nuestro Horno de secado tomaremos las medidas que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10: Dimensión de las tablas de madera elegida

	Longitud (m)	Longitud (pulgadas)
Largo	2.50	98.43
Ancho	0.23	9
Espesor	0.05	2

Fuente: Elaboración en base a datos proporcionados por la “Asoc. de Carpinteros 19 de marzo”

Figura 33: Dimensión de las tablas de madera elegida



Fuente: Elaboración de acuerdo al Plan de trabajo presentado para el proyecto "Investigación de Sistemas Híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto"

4.4.2. APILAMIENTO DE LA MADERA

Según **PEDRAS FRANCISCO**, en la revista **Cis Madera (Secado de Madera: Recomendaciones prácticas)** para la formación de pilas, se recomienda que cada paquete deberá tener las siguientes dimensiones: $2.50 \times 1.85 \times 1.68 \text{ m}^3$. En cada paquete se colocarán 6 columnas de tablones, hasta un máximo de 25 tablones de altitud, para favorecer que la velocidad de paso de aire sea similar a la entrada y salida de las pilas

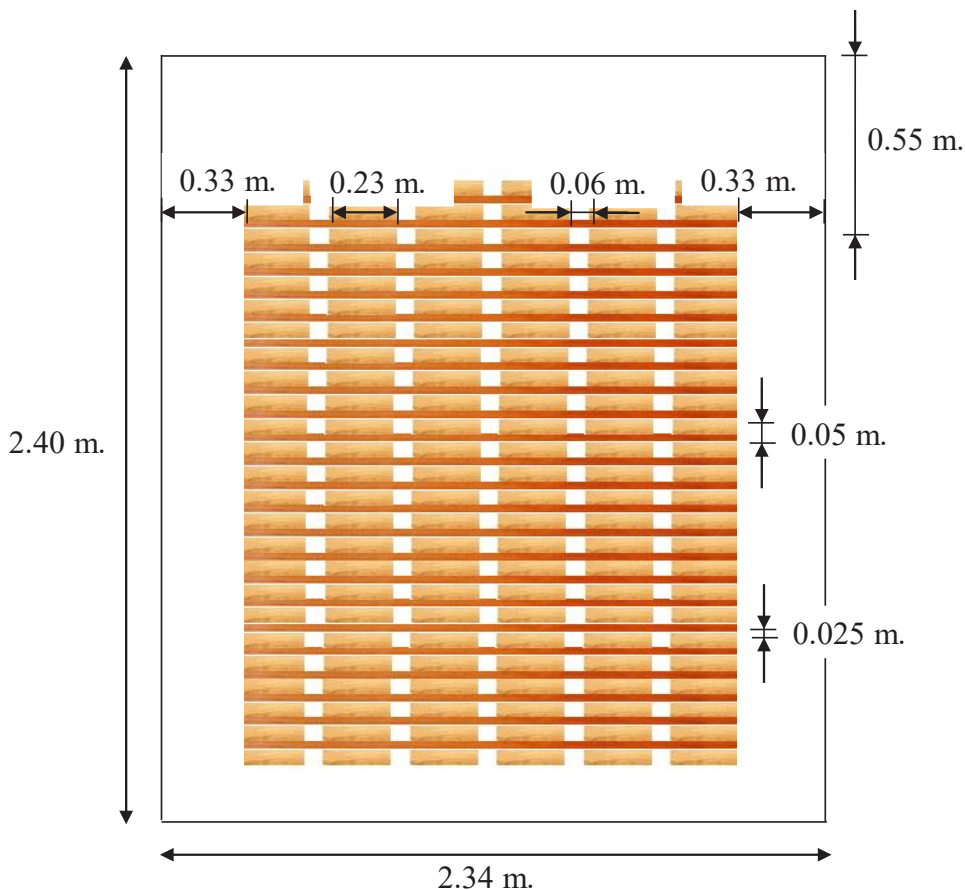
4.4.3. DIMENSIONAMIENTO VERTICAL DE LA CÁMARA DEL HORNO DE SECADO DE MADERA

Altura de la Cámara Interna.

El dimensionamiento de la altura de la cámara del Horno de secado de madera se realizará de acuerdo a las dimensiones de los tablones y la altura de la pila de madera. Tomando en cuenta que se acomodara los tablones en 6 columnas y 25 filas, haciendo un total de 150 tablones por paquete.

La siguiente imagen muestra el dimensionamiento de la cámara y la forma de acomodar las pilas de madera.

Figura 34: Dimensionamiento de la altura de la cámara de Horno de Secado.



Fuente: Elaboración de acuerdo al Plan de trabajo presentado para el proyecto “Investigación de Sistemas Híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

Como se observa en la imagen anterior, existe un espacio de 0.55 [m] que se encuentra en la parte superior de la pila de madera, este espacio sirve para el flujo de aire durante el proceso de secado, esta altura debe considerarse para el dimensionamiento de la altura de la cámara interna del Horno de Secado de madera.

$$h_{\text{Cámara}} = h_{\text{Pila de Madera}} + 0.55 \text{ [m]} \quad (6)$$

$$h_{\text{Pila de Madera}} = h_{\text{Tabla de madera}} + h_{\text{Separadores}} \quad (7)$$

$$h_{\text{Tabla de madera}} = E_{\text{Tabla de madera}} * N_{\text{Tablones}} \quad (8)$$

$$h_{\text{Separadores}} = E_{\text{Separadores}} * N_{\text{Separadores}} \quad (9)$$

Donde:

$h_{\text{Cámara}}$ = Altura interna de la cámara interna del horno de secado de madera [m].

$h_{\text{Pila de Madera}}$ = Altura de la pila de madera [m].

$E_{\text{Tabla de madera}}$ = Espesor del tablón de madera igual a 0.05 [m].

$N_{\text{Tabla de madera}}$ = Numero de tablones que componen la pila de madera igual a 25.

$E_{\text{Separadores}}$ = Espesor de los separadores igual a 0.025 [m].

$N_{\text{Tabla de madera}}$ = Numero de separadores que componen la pila de madera igual a 24.

Reemplazando datos en las anteriores ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$h_{\text{Tabla de madera}} = 0.05 \text{ [m]} * 25 = 1.25 \text{ [m]}$$

$$h_{\text{Separadores}} = 0.025 \text{ [m]} * 24 = 0.60 \text{ [m]}$$

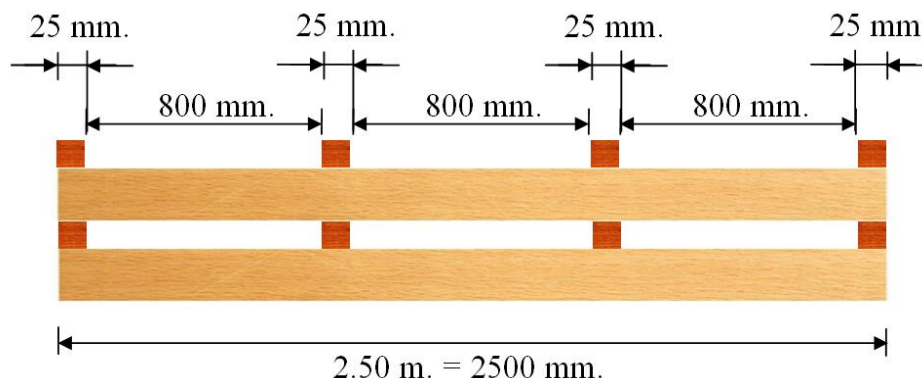
$$h_{\text{Pila de Madera}} = 1.25 \text{ [m]} + 0.60 \text{ [m]} = 1.85 \text{ [m]}$$

$$h_{\text{Cámara de Horno}} = 1.85 \text{ [m]} + 0.55 \text{ [m]} = 2.40 \text{ [m]}$$

4.4.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS SEPARADORES

Según **PEDRAS FRANCISCO**, en la revista **Cis Madera (Secado de Madera: Recomendaciones prácticas)** los separadores recomendados para espesores entre 40-65 mm son de 30-40 mm y la distancia recomendada entre separadores está entre 700-800 mm.

Figura 35: Medidas de espacio de los separadores para la pila de madera



Fuente: Información obtenida del libro “Secado de la Madera” - Francisco Esdras

4.4.5. DIMENSIONAMIENTO HORIZONTAL DE LA CÁMARA DEL HORNO DE SECADO DE MADERA

Ancho de la Cámara Interna.

Para calcular la dimensión del ancho de la cámara interna debemos tomar en cuenta que las pilas de madera se acomodarán en 6 columnas de tablones. Se debe tomar en cuenta los espacios que debe existir entre cada tablón de madera, la distancia recomendada entre tablones está entre 50- 80 mm. De acuerdo a **PEDRAS FRANCISCO**, en la revista **Cis Madera (Secado de Madera: Recomendaciones prácticas)**; para el diseño de nuestro sistema asumimos una distancia de separación de 60 mm.

Considerando el espacio a los extremos de cada paquete y los espacios para la circulación de aire caliente, se debe asumir espacios que comprenden de 300-350 mm. El dimensionamiento del ancho de la cámara interna del horno, se presenta a continuación.

$$A_{Cámara} = 0.33 [m] + A_{Pila de Madera} + 0.33 [m] \quad (10)$$

$$A_{Pila de Madera} = A_{Tabla de madera} + A_{Separación} \quad (11)$$

$$A_{Tabla de madera} = A_{Tabla de madera} * N_{Tablones} \quad (12)$$

$$A_{Separación} = A_{Separación} * N_{Espacios de Separación} \quad (13)$$

Donde:

$A_{Cámara}$ = Ancho de la cámara interna del horno de secado de madera [m].

$A_{Pila de Madera}$ = Ancho de la pila de madera [m].

$A_{Tabla de madera}$ = Ancho del tablón de madera igual a 0.23 [m].

$N_{Tabla de madera}$ = Numero de tablones en columna que componen la pila de madera, igual a 6.

$A_{Separación}$ = Ancho de separación entre maderas igual a 0.06 [m].

$N_{Espacios de Separación}$ = Cantidad de espacios de separación entre las columnas de los tablones de madera, igual a 5.

Reemplazando datos en las anteriores ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$A_{Tabla de Madera} = 0.23 [m] * 6 = 1.38 [m]$$

$$A_{Separación} = 0.06 [m] * 5 = 0.30 [m]$$

$$A_{Pila de Madera} = 1.38 [m] + 0.30[m] = 1.68 [m]$$

$$A_{Cámara} = 0.33 [m] + 1.68 [m] + 0.33 [m] = 2.34 [m]$$

Largo o Profundidad de la Cámara Interna.

Para calcular la dimensión de la profundidad de la cámara interna debemos tomar en cuenta que existen dos pilas o paquetes de madera, los espacios que se ven entre las pilas de madera como muestra la siguiente figura son para instalar equipos que se implementara en el sistema (termómetros de bulbo húmedo y seco, sensores de temperatura, sensores de control de humedad de la madera entre otros equipos); dichos equipos generalmente se instalan al centro de la cámara.

El dimensionamiento del largo o profundidad de la cámara interna del horno se presenta a continuación.

$$L_{Cámara} = 0.30 [m] + L_{Pila de Madera} + 0.30 [m] + L_{Pila de Madera} + 0.30 [m] \quad (14)$$

$$L_{Pila de Madera} = L_{Tabla de Madera} \quad (15)$$

Donde:

$L_{Cámara}$ = Longitud de profundidad de la cámara interna del horno de secado de madera [m].

$L_{Pila de Madera}$ = Longitud de la pila de madera [m].

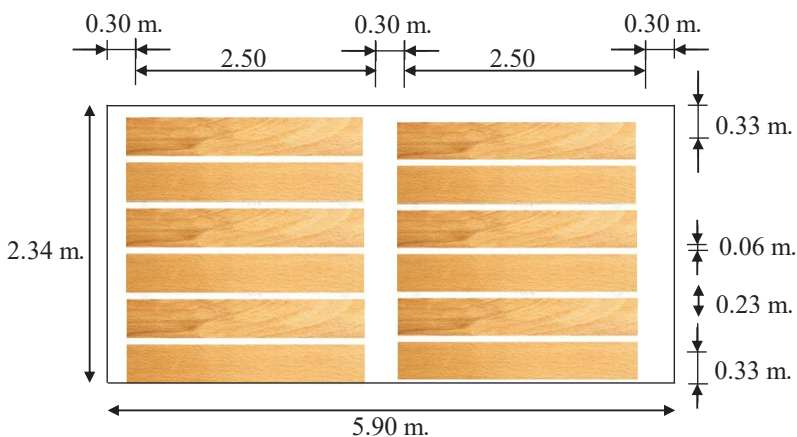
$L_{Tabla de madera}$ = Longitud del tablón de madera igual a 2.50 [m].

Reemplazando datos en las anteriores ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$L_{Cámara} = 0.30 [m] + 2.50 [m] + 0.30 [m] + 2.50 [m] + 0.30 [m]$$

$$L_{Cámara} = 5.90 [m]$$

Figura 36: Dimensionamiento del ancho y largo de la cámara de Horno de Secado.



Fuente: Elaboración de acuerdo al Plan de trabajo presentado para el proyecto “Investigación de Sistemas Híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

De acuerdo a los resultados obtenidos, a continuación, se muestra las dimensiones internas del Horno de Secado de Madera.

Tabla 11: Dimensiones internas del Horno de Secado

Longitud	(m)
Ancho	2.34
Profundidad/Largo	5.90
Altura	2.40

Fuente: Elaboración de acuerdo al Plan de trabajo presentado para el proyecto “Investigación de Sistemas Híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

Con los datos anteriores obtenemos las siguientes dimensiones de la cámara interna del Horno de secado de madera

$$V_{\text{cámara}} = h_{\text{cámara}} * A_{\text{cámara}} * L_{\text{cámara}} \quad (16)$$

Donde:

$V_{\text{cámara}}$ = Volumen de la cámara interna del horno de secado de madera [m^3].

$h_{\text{cámara}}$ = Altura de la cámara interna del horno de secado de madera [m].

$A_{\text{cámara}}$ = Ancho de la cámara interna del horno de secado de madera [m].

$L_{\text{cámara}}$ = Longitud de profundidad de la cámara interna del horno de secado de madera [m].

Reemplazando datos en las anteriores ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$V_{\text{cámara}} = 2.40 [m] * 2.34[m] * 5.90 [m]$$

$$V_{\text{cámara}} = 33.13 [m^3]$$

4.4.6. VOLUMEN DE SECADO DE LA MADERA.

Para determinar el volumen de secado de madera nos basamos en las imágenes anteriores, las cuales indican la forma de apilado y la cantidad de tablones que se relacionan con cada paquete de madera.

Tomando en cuenta los datos anteriores, determinamos la capacidad del Sistema Híbrido – Hornos de Secado en metros cúbicos y pie tablar. Para ello realizamos los siguientes cálculos.

$$V_{Madera\ a\ secar} = V_{tablón} * N_{tablon\ por\ pila\ de\ madera} * N_{Pilas\ de\ madera} \quad (17)$$

$$V_{tablón} = A_{tablón} * L_{tablón} * E_{tablón} \quad (18)$$

Donde:

$V_{Madera\ a\ secar}$ = Volumen de la madera a secar dentro del Horno de Secado [m^3].

$N_{tablon\ por\ pila\ de\ madera}$ = Número de tablon por cada pila de madera, igual a 150 tablon.

$N_{Pilas\ de\ madera}$ = Numero de pilas de madera, igual a 2 pilas de madera.

$A_{tablón}$ = Ancho de la tabla de madera, igual a 0.23 [m].

$L_{tablón}$ = Longitud de la tabla de madera, igual a 2.50 [m].

$E_{tablón}$ = Espesor de la tabla de madera, igual a 0.05 [m].

Reemplazando datos en las anteriores ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$V_{tablón} = 0.23 [m] * 2.50[m] * 0.05[m] = 0.029 [m^3]$$

$$V_{Madera\ a\ secar} = 0.029 [m^3] * 150 * 2 = 8.62 [m^3]$$

Para calcular el volumen de la madera a secar en la unidad de pie tablar [pt], realizamos la siguiente operación:

$$V_{Madera\ a\ secar} = V_{Madera} * 423.776 \quad (19)$$

Donde:

$V_{Madera\ a\ secar}$ = Volumen de la madera a secar dentro del Horno de Secado [pie tablar].

V_{Madera} = Volumen de la madera dentro del sistema de secado, igual a 8.62 [m^3].

Reemplazando datos en las anteriores ecuaciones tenemos lo siguiente:

$$V_{tablón} = 8.62 [m^3] * 423.776 = 3652.95 \cong 3653 [pie\ tablar]$$

En función a los resultados obtenidos concluimos que la capacidad de nuestro Sistema Híbrido – Horno de Secado de madera es de 300 tablones de madera de medidas $(0.23*2.50*0.05 \text{ m}^3)$, igual a $8.62 [\text{m}^3]$ y $3653 [\text{pie tablar}]$.

4.4.7. COMPONENTES DEL SISTEMA HIBRIDO DEL SISTEMA HIBRIDO – HORNO DE SECADO DE MADERA

Para el diseño del Sistema Híbrido – Horno de secado de madera, debemos tomar en cuenta aspectos relacionados al costo económico (implementación y construcción).

El material con el que se construya el horno de secado, debe estar en función a las especificaciones requeridas (aislamiento térmico y permeabilidad) y a la disponibilidad de dichos materiales los cuales deben mantener el calor al interior del Sistema.

4.4.8. ESTRUCTURA DEL HORNO DE SECADO

La estructura del horno debe estar sobre un cimiento que impida el contacto directo con el suelo, el cual garantice el retraimiento de humedad y temperatura procedente desde el suelo, este cimiento debe soportar el peso tanto de la estructura de horno de secado, así como de las pilas de madera a secar.

Para la construcción de la estructura del Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera, se pueden utilizar materiales como madera, acero galvanizado, ladrillo, bloques de hormigón, adobe, etc.

La siguiente tabla muestra tipos de material y su resistencia térmica. Para la estructura del Sistema debemos escoger materiales que tengan la capacidad de oponerse al flujo de calor tomando en cuenta el costo de los mismos.

Tabla 12: Valores de conductividad y resistencia térmica de materiales constructivos

Material	Conductividad térmica [W/m-°K]	Resistencia térmica [m ² -°K/W]
Ladrillo hueco	0.500	0.2100
Ladrillo macizo	1.500	0.0670
Bloques de Hormigón	2.300	0.0430
Bloques de Hormigón celular	0.090	1.1110
Adobe	1.100	0.0910
Acero Galvanizado	50.50	0.0001
Madera	0.180	0.7670
Lana mineral	0.040	2.5000
Lana de vidrio	0.035	2.8570
Lana de roca	0.037	-
Poliestireno extruido (XPS)	0.038	2.6320
Corcho expandido	0.049	2.0410
Poliuretano proyectado (PUR)	0.035	2.8570
Espuma de poliisocianurato (PIR)	0.025	4.0000

Fuente: Control de las características térmicas de los materiales - Luis Goldsack Jarpa, Arturo Ordoñez García.

En función a datos de la tabla anterior, uno de los elementos que se podía haber utilizado en la estructura del Horno son los bloques de Hormigón Celular (bloques de cemento tierra), debido a que tiene un valor intermedio de resistencia térmica. Por el contrario, es un material con una permeabilidad medianamente alta, de acuerdo a una evaluación térmica de muros de bloques de hormigón celular, realizado por la empresa “Arquisolar” en la ciudad de Buenos Aires – Argentina.

Cabe recalcar que uno de los objetivos del presente proyecto de investigación fue realizar pruebas de aislamiento térmico y de permeabilidad a bloques de Hormigón con la finalidad de saber con certeza las características de este material. De acuerdo a bibliografías consultadas, se pudo obtener datos referenciales sobre la capacidad de aislamiento térmico de los bloques de hormigón, datos presentados en la tabla anterior. El documento de respaldo de las pruebas a realizarse, se encuentra en el Anexo IV del presente proyecto de investigación.

De acuerdo a lo antecedido, para la construcción de la estructura del Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera, se optará por la combinación de diferentes materiales los cuales económicamente no sean muy caros como madera (4" x 2") con una capacidad de aislamiento térmico de 0.7670 [m²-°K/W], lana de vidrio la cual tiene una capacidad de 2.8570 [m²-°K/W] y planchas de acero galvanizado # 28 con una capacidad de 0.0001 [m²-°K/W]. Las ventilas serán colocadas en la parte lateral de la cámara de secado (horno).

Para la construcción de la estructura del Sistema (paredes, puerta, ventilas) se utilizará madera, forrado interna y externamente con las planchas de acero galvanizado. La lana de vidrio (en fibras) se utilizará como material aislante, el cual se colocará en los espacios que existe entre los forros interno/externo de las planchas de acero galvanizado evitando así las pérdidas de calor.

4.4.9. TECHO Y COLECTOR

El techo y el colector solar son muy importantes dentro del Sistema Híbrido – Hornos de Secado de Madera. Por medio del techo se captará la energía solar que pasa a través del mismo y llega al colector solar, utilizando la onda corta y una vez que lo atraviesa la energía no puede escapar ya que se refleja en forma de onda larga la cual queda atrapada en el interior de la cámara y produce un efecto invernadero. El colector solar proveerá la energía térmica que calentará el aire al interior de la cámara para secar la madera.

Es muy importante definir la inclinación del techo, ya que influirá en la cantidad de calor recibida proveniente de los rayos solares (energía solar). El tipo de material utilizado puede afectar la cantidad de calor obtenida por la energía solar, es por ello que en la siguiente tabla se presenta materiales con sus respectivos valores de conductividad y transmitancia térmica. En función a los datos presentados, se seleccionará el material más adecuado para nuestro Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera.

Tabla 13: Valores de conductividad y transmitancia térmica de materiales constructivos

Material	Conductividad Térmica [W/m-°K]	Transmitancia Térmica [W/ m ² -°K]
Vidrio (e = 4mm)	1.05	5.70
Policarbonato	0.20	
Polietileno (PE)		0.97
Madera	0.18	2.20
Lamina de Hierro	80.20	-

Fuente: Información obtenida de los documentos "Ciencia de los polímeros" - Fred W. Billmeyer; "Límites del vidrio" - Arq. Salvador Boada Xairó; "Ficha técnica de productos de la empresa Dott.Gallina" – EPSE; "Optimización Energética" - Eduard Pascual Sánchez

Uno de los determinantes principales de la apariencia de un material transparente, es su transmitancia, relación entre las intensidades de la luz que lo atraviesa y la luz incidente sobre la muestra. De los materiales que se muestra en la tabla anterior, el más meritorio para la construcción del techo es el vidrio, ya que es el material con mayor transmitancia térmica, estable, resistente a la degradación ocasionada por los rayos ultravioletas y también presenta pocas pérdidas de calor.

Para la construcción del colector solar, se utilizará una lámina de hierro, el cual se pintará de color negro para un mejor rendimiento y absorción.

4.4.10. RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE EL ALTO

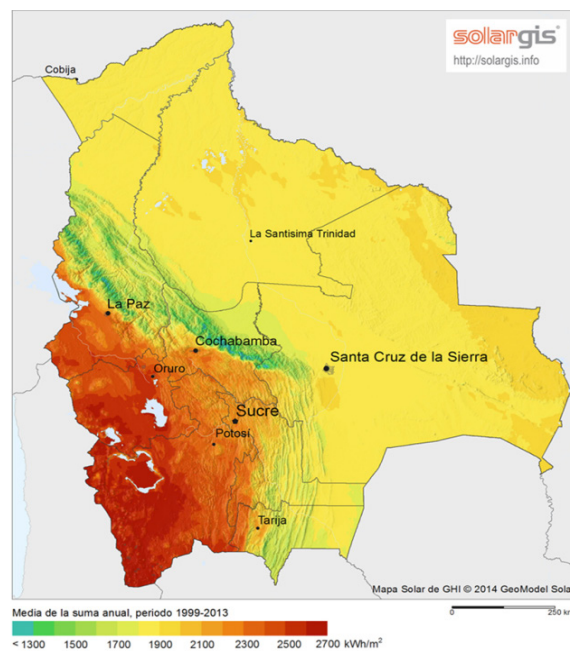
El sol irradia energía en todas las direcciones, con un espectro cercano al de un cuerpo negro a 6000 °K y debido a la inclinación de la tierra y su trayectoria variable en las diferentes épocas del año, la radiación en un lugar específico puede variar en un alto porcentaje.

Muchos factores causan la variación de la radiación solar total recibida en la superficie de la tierra (como ser las nubes, aerosoles, entre otros), donde la atmosfera es la que más radiación absorbe llegando alrededor de un 16 % de la radiación solar que llega a la tierra.

El conocimiento preciso de la radiación solar incidente sobre la tierra es de gran importancia para una variedad de aplicaciones, su intensidad, su variabilidad y el espectro solar, influyen en la implementación de sistemas solares (aplicación de sistemas desde la agricultura hasta generación de energía eléctrica) que utilizan la energía solar como fuente de energía.

Bolivia, caracterizada por su latitud ecuatorial y gran altura en muchas regiones del país, es uno de los países que recibe mayor radiación solar promedio por encontrarse en una latitud ecuatorial. Esta característica hace que la energía solar recibida sea utilizada como una fuente de energía potencial renovable. La mayor radiación solar recibida es en el sector del Altiplano, predominantemente en la ciudad de El Alto (4000 msnm), ciudad caracterizada por un clima seco y de baja humedad (lo que genera una menor dispersión de la radiación solar), donde los niveles radiación solar llegan a valores de 5.7 y 6.3 kW h/m²-día

Figura 37: Radiación Global Horizontal en Bolivia



Fuente: Información obtenida del artículo "Situación de la energía solar en Bolivia" realizada por la Fundación Solón, (2017)

4.4.11. ANGULO DEL TECHO DEL HORNO - SECADOR

Orientación óptima (ángulo acimutal).

Para el diseño del Sistema Híbrido – Horno de secado de madera, iniciamos con la dirección que debe orientarse la estructura del sistema para la captación de radiación solar. Para ello debemos saber de qué lado hay más radiación solar para poder utilizar dicha energía el mayor tiempo posible.

Para un mejor aprovechamiento de la radiación solar, debemos orientar el horno de secado hacia el Norte (ángulo acimutal igual a 180°) debido a que nos encontramos en el hemisferio sur, tomando en cuenta de que no tenga inconvenientes en la toma de los rayos solares (que no exista sombra debido a construcciones cercanas, arboles, etc.)

Esta orientación puede tener un cambio leve, orientando el sistema hasta 45° de la dirección NORTE (noreste y Noroeste), reduciendo el aprovechamiento de la radiación solar de 1 a 3 %. Realizando un cambio direccional de 90° (Dirección Este, Dirección Oeste) el aprovechamiento de la radiación solar reduce en un 30 % (**Simone B, 2011**).

Ángulo de inclinación.

Para determinar el ángulo de inclinación óptimo para el aprovechamiento solar del Horno de secado de madera, se debe tomar en cuenta la latitud geográfica donde se instalará el horno (ciudad de El Alto – Bolivia), además de la época del año en la que necesitamos obtener mayor radiación solar.

Cuanto más se incline le techo del horno de secado a los rayos solares, mayor aprovechamiento tendrá nuestro sistema de secado. El sol alcanza su máxima altura alrededor del mediodía, es ahí donde debemos alcanzar la máxima captación de energía.

Se debe tomar en cuenta que en el Solsticio de Verano (21 de diciembre) se tiene más horas de luz Solar donde el Sol alcanza su máxima altura anual a medio día; en cambio en el solsticio de Invierno (21 de junio) se tiene menos horas de luz solar y el Sol alcanza su mínima altura anual a medio día.

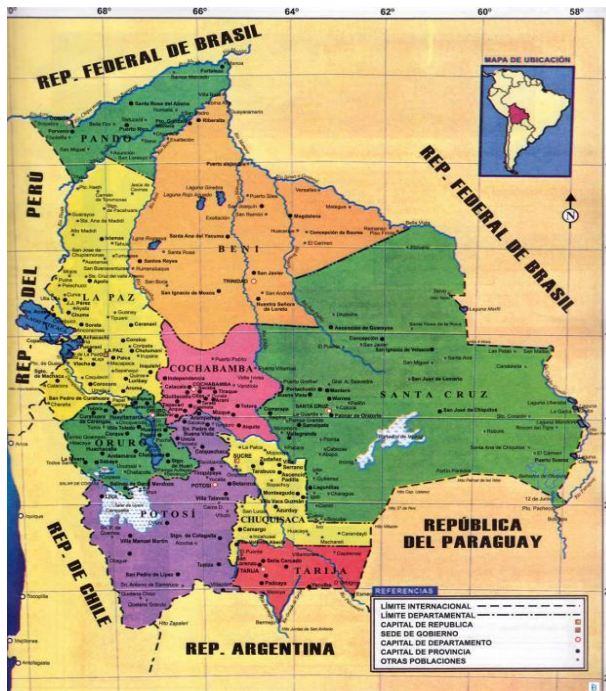
La posición del sol es otro factor muy importante en la intensidad de la radiación solar, ya que, con un cielo despejado, el valor de la radiación solar es más incidente sobre una superficie horizontal. En todas las latitudes, el sol se mueve de este a oeste y barre un arco de 15° cada hora, otros autores proporcionan respectivamente curvas de radiación media y datos completos sobre radiación en un lugar y hora determinados. (Fritz, 1960 & Drummound 1965)

Cálculo de la altura máxima del sol a medio día: Para realizar este cálculo necesitamos tener las coordenadas geográficas del lugar donde se instalará el horno de secado.

Tabla 14: Coordenadas geográficas de la ciudad de El Alto

País	Bolivia
Ciudad	El Alto
Provincia	Pedro Domingo Murillo
Coordenadas Geográficas	Latitud: -16.5001, Longitud: -68.2147 16° 30' 0" Sur, 68° 12' 53" Oeste
	-16.4935891,-68.1942523
Superficie	36.300 hectáreas 363,00 km ²
Altitud	4.015 msnm

Fuente: Información obtenida de la página web: <https://es.db-city.com>



Teniendo las coordenadas geográficas, procedemos a calcular la altura máxima del sol a medio día. Una vez determinada la latitud geográfica, se debe restar (Latitud Norte) o sumar (Latitud Sur) 23° , ángulo aproximado de inclinación de la tierra.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que en ciertos lugares del mundo donde el sol no tiene paso cenital, son aquellos cuyas latitudes son mayores de $23^{\circ}27'$ Norte y Sur, teniendo una diferencia de cálculo aproximada de 5 puntos. Debido a este aspecto, no tomamos en cuenta el ángulo de inclinación de la tierra.

Para saber qué grado de inclinación debe tener el techo del Horno de secado de madera, necesitamos saber la altura máxima y mínima del sol a medio día, es por eso que realizamos la siguiente operación:

$$\alpha = 90^{\circ} - \gamma + \varphi \quad (20)$$

Donde:

α = Ángulo de elevación, altura angular del sol en el cielo medido desde la horizontal.

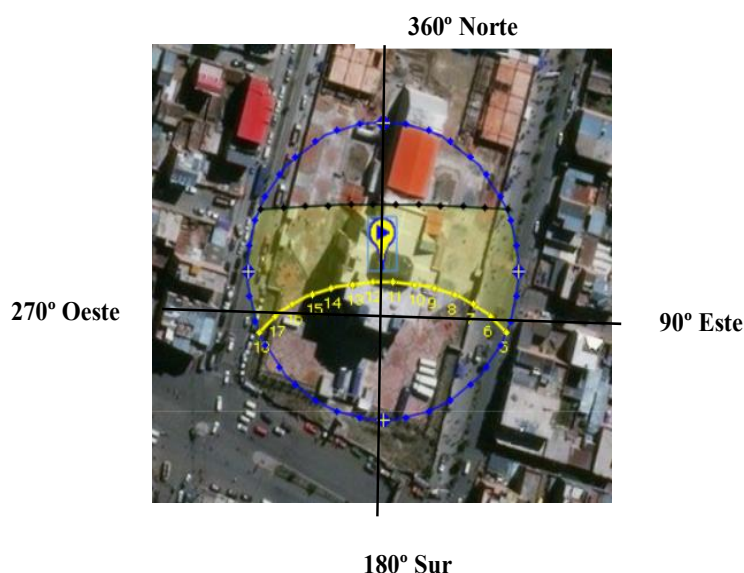
γ = Latitud geográfica.

φ = Ángulo de inclinación de la tierra, no tomar en cuenta para latitudes mayores de 23° Norte y Sur.

$$\alpha = 90^{\circ} - 16^{\circ} = 74^{\circ}$$

Para corroborar nuestro resultado, contrastamos el mismo con datos reales obtenidos en la red. La imagen y cuadro siguiente muestran el comportamiento del sol en la ciudad de El Alto – Bolivia en un solsticio de verano, exponiendo la altura máxima que alcanza el sol.

Figura 38 : Comportamiento del sol en la ciudad de El Alto – Bolivia



Fuente: Información obtenida de la página www.sunearthtools.com

Tabla 15: Comportamiento del sol en la ciudad de El Alto (Fecha 21/12/2018)

Hora	Elevación de Sol	Angulo relacionado respecto al horizonte de la tierra
05:00	-0.29 °	114.60°
06:00	12.98°	110.94°
07:00	26.52°	108.41°
08:00	40.23°	107.03°
09:00	53.98°	107.35°
10:00	67.57°	111.71°
11:00	79.95°	134.95°
12:00	80.27°	223.31°
13:00	67.99°	248.01°
14:00	54.41°	252.60°
15:00	40.66°	252.99°
16:00	26.95°	251.65°
17:00	13.40°	249.15°
18:00	0.13°	245.53°

Fuente: Información obtenida de la página web www.sunearthtools.com

Para obtener la máxima radiación solar y tomando en cuenta el valor real de la máxima elevación del sol durante el solsticio de verano (80.27°), se debe orientar el horno de secado de madera hacia el NORTE e inclinado a un ángulo de acuerdo al siguiente cálculo:

$$\phi = 90^\circ - \alpha$$

Donde:

γ = Ángulo de inclinación del techo del Horno de Secado de Madera.

α = Ángulo de elevación, altura angular del sol en el cielo medido desde la horizontal.

$$\phi = 90^\circ - 80.27^\circ = 9.73^\circ \cong 10^\circ$$

4.4.12. VENTILADOR

El ventilador es muy importante dentro de nuestro Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera ya que es el encargado del flujo de aire que existirá dentro de la cámara.

El aire circulará a través de la pila de madera a una velocidad que garantice el secado. El flujo de aire se realizará por medio de los ventiladores. La velocidad del aire que atraviesa la pila deberá tener un valor entre 1.5 a 2.5 m/s.¹¹

Existen dos tipos de ventiladores que pueden utilizarse dentro de nuestro sistema:

- **Centrífugos:** Está compuesto por una carcasa metálica en forma de caracol, donde una rueda compuesta de palas o aspas gira. Suministran bajos caudales a presiones estáticas altas.
- **Axiales:** Está compuesto por una hélice formada de varias aspas curvas que giran alrededor de un eje. Suministran altos caudales a presiones estáticas bajas.

El ventilador se seleccionará de acuerdo al caudal calculado anteriormente (, utilizando un ventilador axial, que será instalado cerca de la estructura del techo, de modo que haga fluir el aire caliente desde la parte superior al interior de la cámara

¹¹ Noboa, L. (2006). Manual de buenas prácticas de manufactura para el secado de madera aserrada.

4.4.13. TERMÓMETROS DE BULBO SECO Y BULBO HÚMEDO

En el Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera se instalará un termómetro de bulbo seco y un termómetro de bulbo húmedo, los cuales tendrán las siguientes funciones:

- **Termómetro de Bulbo Seco:** Facilita la lectura de la temperatura real del ambiente
- **Termómetro de Bulbo Húmedo:** Obtiene una lectura cercana a la del termómetro de bulbo seco. Este termómetro posee un bulbo cubierto con un paño de algodón empapado con agua, el cual medirá la temperatura húmeda del aire al interior de la cámara.

4.5. QUEMADOR A GAS

4.5.1. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL QUEMADOR

La potencia del quemador a gas está directamente relacionada con la cantidad de calor que se necesita en la etapa de calentamiento del Sistema – Horno de Secado de madera. La cantidad de calor requerida en la etapa de calentamiento está dada por la siguiente ecuación.

$$P_{\text{Quemador}} = Q_{\text{Etapa de Calentamiento}} = P * (Q_{CA} + Q_{CM} + Q_{CAR}) \quad (21)$$

Dónde:

$Q_{\text{Etapa de Calentamiento}}$ = Calor necesario en la etapa de calentamiento [kW]

P = Perdidas de calor generados por la estructura del horno [20 – 25 % adicional al calor de la etapa de calentamiento]

Q_{CA} = Calor necesario para calentar el agua de la madera [kW]

Q_{CM} = Calor necesario para calentar la madera [kW]

Q_{CAR} = Calor necesario para calentar el aire dentro del Horno [kW]

Calor necesario para el calentamiento de agua de la madera

Para determinar el calor requerido, es necesario tomar en cuenta ciertas particularidades, especialmente el tiempo de calentamiento del horno, la temperatura a la que se alcanzará en la etapa de calentamiento. Le ecuación para calcular el calor requerido se presenta a continuación.

$$Q_{CA} = \frac{m_{Agua} * Cp_{Agua} * \Delta T}{t_{calentamiento}} \quad (22)$$

Dónde:

m_{Agua} = Masa de agua contenida en la madera [kg]

Cp_{Agua} = Calor Específico del agua $\left[\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right]$

ΔT = Relación entre temperatura de calentamiento y la temperatura ambiente de inicio [°C]

$t_{calentamiento}$ = Tiempo de calentamiento [s]

De acuerdo a investigaciones y visitas realizadas a hornos de secado de madera, se pudo obtener información referente. En función a esta información y de acuerdo a la capacidad de nuestro horno nos sugieren un tiempo de calentamiento de alrededor de 3 horas y media.

En la etapa de calentamiento las temperaturas alcanzadas dentro de los hornos se encuentran alrededor de 40-45 [°C]. De acuerdo a la capacidad de nuestro Sistema Híbrido, utilizaremos como referencia una temperatura de calentamiento de 40 [°C] ΔT . tendrá el dato de la temperatura de calentamiento del Sistema Híbrido – Horno de secado restando la temperatura ambiente promedio de la ciudad de El Alto.

De la ecuación (22) debemos calcular la masa de agua, esto significa cuando la madera entra al Sistema Híbrido – Horno de secado; tomando en cuenta el contenido de humedad con el que ingresa, siendo este contenido alrededor de 60 [%].

Para calcular la masa de agua, utilizamos la siguiente ecuación:

$$m_{\text{Agua}} = \frac{m_{\text{húmeda}} * CH_{\text{verde}}}{100 + CH_{\text{verde}}} \quad (23)$$

Dónde:

$m_{\text{húmeda}}$ = Masa Húmeda de la Madera [kg]

CH_{verde} = Contenido de Humedad de la Madera en estado [%]

Finalmente, de la ecuación (23) determinamos la masa húmeda de la madera a partir de la siguiente ecuación.

$$\rho_{\text{húmeda}} = \frac{m_{\text{húmeda}}}{v_{\text{húmeda}}} \quad (24)$$

Dónde:

ρ = Densidad $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

m = Masa [kg]

v = Volumen [m^3]

De la ecuación (24), despejamos $m_{\text{húmeda}}$:

$$m_{\text{húmeda}} = \rho_{\text{húmeda}} * v_{\text{húmeda}}$$

$$m_{\text{húmeda}} = 590 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] * 8.62[\text{m}^3] = 5085.80 [\text{kg}]$$

Remplazando el resultado de $m_{\text{húmeda}}$ en la ecuación (23):

$$m_{\text{Agua}} = \frac{5085.80 [\text{kg}] * 60 [\%]}{100 + 60 [\%]} = \frac{305148 [\text{kg}] * [\%]}{160 [\%]} = 1907.17 [\text{kg}]$$

Finalmente reemplazamos el resultado de m_{Agua} en la ecuación (22), obteniendo así el calor necesario para calentar el agua contenido en la madera.

$$Q_{\text{CA}} = \frac{1907.17 [\text{kg}] * 4.178 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right] * 32.41[^\circ\text{C}]}{12600 [\text{s}]} = 20.50 [\text{kW}]$$

Calor necesario para el calentamiento de la madera

Es el calor que se requiere para calentar la madera. Para determinar el calor requerido, operamos la siguiente ecuación:

$$Q_{CM} = \frac{m_{Madera} * Cp_{Madera} * \Delta T}{t_{Calentamiento}} \quad (25)$$

Dónde:

m_{Madera} = Masa de la madera [kg]

Cp_{Madera} = Calor específico de la madera $\left[\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right]$

ΔT = Relación entre temperatura de calentamiento y la temperatura ambiente de inicio [°C]

$t_{Calentamiento}$ = Tiempo de calentamiento [s]

De la ecuación anterior, tomaremos en cuenta datos específicos como el Cp_{Madera} para un determinado tipo de madera. De acuerdo a las encuestas y entrevistas realizadas a los pequeños productores de manufactura en madera y como resultado de ellas, consideraremos el siguiente tipo de madera (Roble) con un $Cp_{Madera} = 0.57 \left[\frac{kcal}{kg \text{ } ^\circ C} \right] = 2.3849 \left[\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} \right]$.

La masa de la madera, calculamos con la siguiente ecuación.

$$m_{Madera} = m_{Húmeda} - m_{Agua} \quad (26)$$

Dónde:

$m_{húmeda}$ = Masa húmeda de madera [kg]

m_{Agua} = Masa de agua de la madera [kg]

De los resultados calculados $m_{húmeda}$, m_{Agua} en el punto anterior, reemplazamos en la ecuación (26).

$$m_{madera} = 5085.80 [kg] - 1907.17 [kg] = 3178.63 [kg]$$

Con este resultado, determinamos la cantidad de calor para calentar la madera reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (25).

$$Q_{CM} = \frac{3178.63 [Kg] * 0.57 \left[\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C} \right] * 32.41 [^{\circ}C]}{12600 [s]}$$

$$= 4.60 \frac{Kcal}{s} * \frac{3600 s}{1 h} * \frac{1 kW}{860 \frac{Kcal}{h}}$$

$$Q_{CM} = 19.26 KW$$

Calor necesario para el calentamiento del aire al interior del Sistema

Para calcular el calor requerido, utilizamos la siguiente ecuación.

$$Q_{CAR} = \frac{m_{Aire} * Cp_{Aire} * \Delta T}{t_{Calentamiento}} \quad (27)$$

Dónde:

m_{Aire} = masa de aire [kg]

Cp_{Aire} = calor específico del aire [kJ/kg°C]

ΔT = temperatura entre el ambiente y la de inicio de secado [°C]

$t_{Calentamiento}$ = tiempo de calentamiento [s]

Para calentar el aire al interior del Sistema Híbrido–Horno de secado, primeramente, debemos calcular la masa de aire que existe al interior del sistema mediante la siguiente ecuación.

$$\rho_{Aire} = \frac{m_{Aire}}{v_{Aire}} \quad (28)$$

$$m_{Aire} = \rho_{Aire} * v_{Aire} \quad (29)$$

Dónde:

m_{Aire} = Masa de aire [kg]

ρ_{Aire} = Densidad del aire del lugar a presión atmosférica [kg/m³]

v_{Aire} = Volumen de aire, esto es la resta de la cámara menos el volumen de la madera [m³]

Para calcular la ρ_{Aire} , recurrimos a la ecuación de gases mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{Aire} = \frac{P}{RT} \quad (30)$$

Dónde:

P = Presión atmosférica en la ciudad de El Alto [N/m²]

T = Temperatura al inicio del calentamiento [°K]

R= Ctte universal $\left[\frac{N m}{kg \text{ } ^\circ K} \right]$

Para la ecuación anterior, tenemos los siguientes datos: La presión atmosférica de la ciudad de El Alto es igual a 0.6172 atm = 62537.79 (N/m²). La temperatura al inicio del calentamiento es igual a 7.59 [°C] = 280.59 [°K]. Finalmente el valor de la constante universal es igual a 287 $\left[\frac{N m}{kg \text{ } ^\circ K} \right]$.

Reemplazando los datos, obtenemos el siguiente resultado.

$$\rho_{Aire} = \frac{62537.79 \left[\frac{N}{m^2} \right]}{287 \left[\frac{N m}{kg \text{ } ^\circ K} \right] * 280.59 [^\circ K]} = 0.78 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Para calcular el volumen del aire al interior del sistema, debemos tomar en cuenta el volumen al interior del horno, volumen de la madera, así como el volumen de los separadores. Teniendo en cuenta estos aspectos podemos obtener dicho resultado mediante la siguiente ecuación.

$$V_{Aire} = V_{Interior \text{ del Horno}} - (V_{Madera} + V_{Separador}) \quad (31)$$

De la ecuación anterior, primeramente, obtenemos el volumen al interior del horno, tomando en cuenta el Alto, Ancho y Longitud del horno.

$$V_{Interior \text{ del Horno}} = Alto * Ancho * Longitud \quad (32)$$

$$V_{Interior \text{ Horno}} = (3.50 [m] * 2.34 [m] * 5.90[m]) + (4.82 [m] * 0.45 [m] * 0.80[m])$$

$$V_{Interior \text{ Horno}} = 48.32 [m^3] + 1.74 [m^3] = 50.06 [m^3]$$

Para calcular el volumen de los separadores debemos tener en cuenta el Alto, Ancho y Longitud de los separadores, además del número de separadores existente al interior del sistema.

$$V_{Separador} = (Alto_{Separador} * Ancho_{Separador} * Longitud_{Separador}) * N_{Separadores} \quad (33)$$

$$V_{Separador} = (0.025 [m] * 0.025 [m] * 1.68[m]) * 96$$

$$V_{Separador} = 0.10 [m^3]$$

Con los resultados de $V_{Interior Horno}$, $V_{Separador}$ además del volumen de la madera que tenemos como dato en anteriores cálculos, reemplazamos en la ecuación (31) para obtener el volumen del aire.

$$V_{Aire} = 50.06 [m^3] - (8.62 [m^3] + 0.10 [m^3])$$

$$V_{Aire} = 41.34 [m^3]$$

Teniendo los datos de ρ_{Aire} y v_{Aire} , reemplazamos los resultados en la ecuación (29).

$$m_{Aire} = 0.78 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 41.34 [m^3] = 32.24 [kg]$$

Finalmente, para obtener el calor necesario para calentar el aire al interior del Sistema Híbrido – Horno de secado, reemplazamos el resultado anterior en la ecuación (27).

$$Q_{CAR} = \frac{32.24 [kg] * 1.005 \left[\frac{kJ}{kg^{\circ}C} \right] * 32.41 [^{\circ}C]}{12600 [s]} = 0.08 [kW]$$

Para obtener la potencia del quemador o el calor requerido en la etapa de calentamiento, reemplazamos los resultados obtenidos de Q_{CA} , Q_{CM} , Q_{CAR} en la ecuación (21).

$$Q_{Etapa\ de\ Calentamiento} = 1.25 * (19.26 [kW] + 20.50 [kW] + 0.08 [kW])$$

$$Q_{Etapa\ de\ Calentamiento} = 1.25 * (39.84 [kW])$$

$$Q_{Etapa\ de\ Calentamiento} = 49.80 [kW]$$

El resultado de la potencia del quemador o calor requerido en la etapa de calentamiento es igual a 49.80 [kW]. Para un rendimiento del 80 % del quemador, obtenemos Pabs.

$$\eta = \frac{P_{u(n)}}{P_{Abs}} \quad (34)$$

Donde:

η = Rendimiento del quemador [%].

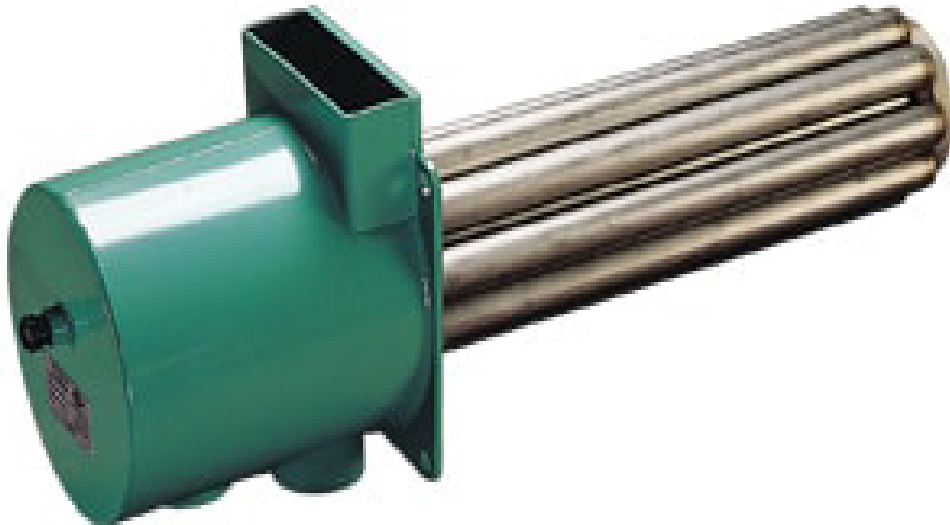
$P_{u(n)}$ = Potencia útil en condiciones de uso [kW].

P_{Abs} = Potencia absoluta del quemador [kW].

$$P_{Abs} = \frac{49.80}{0.80} = 62.25 [kW]$$

En función al resultado y a la disponibilidad del equipo en cuanto a la potencia, elegimos un quemador tubo de 65 [kW].

Figura 39: Quemador Eclipse Bayonet – Eclipse



Fuente: Fotografía de un equipo quemador de la empresa Eclipse, 2019

4.5.2. INSTALACIÓN DE GAS NATURAL

- Consideraciones Preliminares.

La distribución de GAS NATURAL para la instalación de tipo comercial, será a una presión de 140 mbar.

- Cumplimiento de V.A.S.A.

Tabla 16: Cumplimiento V.A.S.A. para la instalación de Gas Natural

V.A.S.A.	Aparato	Volumen de Ambiente
Volumen Mínimo del Ambiente	Quemador	No considerado (por estar instalado en un lugar que está en contacto permanente con un patio de ventilación sin cubierta).
Alimentación de Aire		No requiere (por estar instalado en un lugar que está en contacto permanente con un patio de ventilación sin cubierta).
Evacuación de productos de combustión		Conducto de Tiro Natural (Ø = 125 mm)
Aireación Rápida		No considerado (por estar instalado en un lugar que está en contacto permanente con un patio de ventilación sin cubierta).

Fuente: Elaboración según especificaciones del Reglamento de Diseño, Construcción, Operación de Redes de Gas Natural e Instalaciones Internas (Anexo V).

- **Determinación del Regulador y Medidor.**

Se determinará el medidor de uso comercial a una presión P = 140 mBar.

De acuerdo a los cálculos realizados en el acápite anterior, el caudal nominal Q se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Q_s = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P.C.S.} \tag{35}$$

Donde:

Q_s = Caudal de simultaneidad del Gas Natural [m^3/h].

P_1 = Potencia absorbida del aparato de mayor consumo [kW].

P_2 = Potencia absorbida del segundo aparato de mayor consumo [kW].

P_n = Potencia absorbida del resto de aparatos [kW].

$P.C.S.$ = Poder Calorífico Superior del Gas Natural en Bolivia [$kW-h/m^3$].

$$Q \left[\frac{m^3}{h} \right] = \frac{65.00}{10.80} \qquad Q = 6.01 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

De acuerdo al caudal determinado, corresponde y se adopta un Medidor **G – 6** con un caudal máximo de 10 [m^3/h] y se adopta un Regulador **B10** con un caudal máximo de 10 [m^3/h].

- Determinación de diámetro de tuberías de la instalación comercial.

Para determinar los diámetros de los conductos de tuberías de gas, se utilizó la fórmula cuadrática de Renouard, para cálculos en media y alta presión.

Cálculo en Media y Alta Presión ($P > 50$ mBar):

$$P_1^2 - P_2^2 = 48.6 * d * Leq * \frac{Q^{1.82}}{D^{4.82}} \qquad (36)$$

Donde:

$P_1^2 - P_2^2$ = Caída cuadrática de presión en (Bar)²

d = Densidad relativa corregida del gas natural igual a 0,62

$Leq.$ = Longitud equivalente ($Leq = 1,2 * Lreal$) (m)

Q = Caudal de gas que circula por el tramo (m^3/h)

D = Diámetro nominal estándar de la tubería (mm)

La fórmula de velocidad de circulación del fluido es:

$$V = \frac{354 * Q \left(\frac{m^3}{h} \right)}{D^2(mm) * Pprom(Bar)} < 15 \text{ m/s} \qquad (37)$$

Donde:

v = Velocidad de circulación del gas natural (m/s)

Q = Caudal de gas que circula por el tramo (m^3/h)

D = Diámetro nominal estándar de la tubería (mm)

$Pprom$ = Presión de cálculo (Bar)

Y la presión de cálculo se verifica con:

$$P_{prom} = \frac{2}{3} \frac{(P_1)^3 - (P_2)^3}{(P_1)^2 - (P_2)^2} \quad (\text{Presiones Absolutas}) \quad (38)$$

Donde $P_{1(Abs)} = P_{(man)} + P_{(atm)}$ (39)

$$P_{2(Abs)} = \sqrt{P_{1(Abs)}^2 + \Delta P^2} \quad (40)$$

$$P_{2(man)} = P_{2(Abs)} - P_{(atm)} \quad (41)$$

Caída de Presión: $\Delta P = P_{1(man)} - P_{2(man)}$ (42)

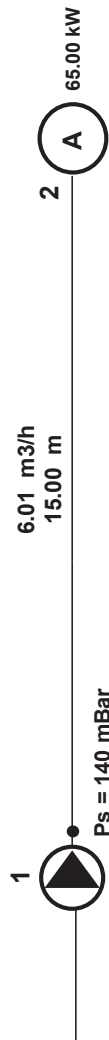
$$\frac{Q}{D} < 150 \quad (43)$$

Presión atmosférica (n) = 1,0130 bar

Los cálculos de los diámetros de los conductos de tuberías de gas, se presentan a continuación.

CALCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

DIAGRAMA DE CARGAS



TRAMO	Longitud real (m)	Long. Equiv (m)	Caudal m3/h	Diam. Tub (mm)	Diam Comercial pulg.	P1 (man) bar	P1 (abs.) bar	p1^2 - p2^2 bar^2	p2 abs. bar	p2 man bar	P prom bar	Velocidad m/seg	Caída de P mbar	Relación Q/D
Patm							1.0130							

- **Material de la tubería.**

Las tuberías son de acero galvanizado (A.G.), según especificaciones: ASTM A-120, ASTM A-53, NAG 250, NAG 251; cumpliendo con las especificaciones del Reglamento de Diseño, Construcción, Operación de Redes de Gas Natural e Instalaciones Internas.

- **Accesorios.**

Los accesorios para la tubería de acero galvanizado como Tees, Codos, Acoples (Cuplas), Codos Reductores y Bujes Reductores deben cumplir las especificaciones de la norma ASTM A-234; cumpliendo con las especificaciones del Reglamento de Diseño, Construcción, Operación de Redes de Gas Natural e Instalaciones Internas.

- **Ensambladura.**

La ensambladura de A.G. según especificaciones del Reglamento de Diseño, Construcción, Operación de Redes de Gas Natural e Instalaciones Internas.

- Soldadura fuerte con material de aporte Latón (Bronce). – Tubería vista, empotrada y/o enterrada.

4.5.3. **COSTO DEL SISTEMA HÍBRIDO – HORNO DE SECADO DE MADERA.**

Para la implementación del Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera Tropical en la ciudad de El Alto, es muy importante realizar estimaciones económicas de los costes en cuanto a la inversión que se pretende realizar para la implementación del sistema.

A continuación, se presentan los costos implicados en el Sistema Híbrido – Hornos de Secado de Madera Tropical en la ciudad de El Alto.

4.5.4. MATERIAL

Tabla 17: Costo del material a utilizar en el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO [Bs]	CANTIDAD	COSTO TOTAL DE ITEM [Bs]
Vidrio de 4 mm de espesor	Láminas de (3.30 m x 2.14 m)	360,00	2	720,00
Lamina de hierro para el colector solar	Láminas de (1.20 m x 3 m x 0.004 m)	796,00	4	3.184,00
Madera para estructura principal	Piezas (4" x 4" x 3.60 m)	450,00	18	8.100,00
Madera para estructura	Piezas (4" x 2" x 3.60 m)	270,00	7	1.890,00
Madera para estructura	Piezas (4" x 2" x 6.50 m)	500,00	2	1.000,00
Madera para estructura de vidrio	Piezas (4" x 2" x 4.30 m)	340,00	8	2.720,00
Madera para estructura de vidrio	Piezas (4" x 2" x 1.76 m)	115,00	21	2.415,00
Plancha de acero galvanizado # 28 para forro externo	Lámina (1m x 3.60 m)	104,40	17	1.774,80
Plancha de acero galvanizado # 28 para forro interno	Lámina (1m x 3.60 m)	104,40	17	1.774,80
Fibra de vidrio	Rollos (0.61 x 15.24 m x 0.05 m)	300,00	12	3.600,00
Escuadras de sujeción	Unidades	3,50	84	294,00

Tabla 17 (Continuación): Costo del material a utilizar en el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO [Bs]	CANTIDAD	COSTO TOTAL DE ITEM [Bs]
Tornillos	Bolsa de 100 unidades	18,40	1	18,40
Clavos	Bolsa de 50 unidades	12,50	9	112,50
Tablero de Control	Unidad	150,00	1	150,00
Alquiler de compactadora	Horas de Trabajo	204,45	2	408,90
Cemento	Kilogramos	0,92	350	322,00
Arena	Metros cúbicos	110,00	0,50	55,00
Grava	Metros cúbicos	95,00	0,86	81,70
Agua	Litros	0,50	180	90,00
Madera de construcción	Pie cuadrado	3,50	43	150,50
Alambre de amarre	Kilogramos	10,00	2	20,00
Fierro corrugado	Kilogramos	6,50	19,56	127,14
Instalación de tuberías de Gas Natural	Instalación	4.600,00	1	4.600,00
		TOTAL [Bs]		33.608.74

Fuente: Elaboración en función al plan de trabajo presentado para el proyecto: "Investigación de sistemas híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto"

4.5.5. MANO DE OBRA

Tabla 18: Costo de Mano de Obra para el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera

DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL DE ÍTEM [Bs]
Loza de concreto	1.016,00
Construcción de la cámara	7.000,00
Montaje del sistema Híbrido – Horno de secado	2.500,00
TOTAL [Bs]	10.516,00

Fuente: Elaboración en función al plan de trabajo presentado para el proyecto: “Investigación de sistemas híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

4.5.6. EQUIPOS

Tabla 19: Costo de los equipos a utilizar en el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO [Bs]	CANTI-DAD	COSTO TOTAL DE ÍTEM [Bs]
Ventiladores	Unidad	6.000,00	1	6.000,00
Termómetro de bulbo seco	Unidad	40,00	1	40,00
Termómetro de bulbo húmedo	Unidad	40,00	1	40,00
Quemador tubo (Gas Natural)	Unidad	8.400,00	1	8.400,00
Medidor de Gas (G -6)	Unidad	1.060,00	1	1.060,00
Regulador de Gas (B-10)	Unidad	1.100,00	1	1.100,00
		TOTAL [Bs]		16.640,00

Fuente: Elaboración en función al plan de trabajo presentado para el proyecto: “Investigación de sistemas híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

4.5.7. COSTO TOTAL DEL SISTEMA HÍBRIDO – HORNO DE SECADO DE MADERA

Tabla 20: Costo total para implementar el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera

DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL DE ÍTEM [Bs]
COSTO DE MATERIAL	33.608,74
COSTO DE MANO DE OBRA	10.516,00
COSTO DE EQUIPOS	16.640,00
COSTO TOTAL [Bs]	60.764,74

Fuente: Elaboración en función al plan de trabajo presentado para el proyecto: “Investigación de sistemas híbridos – Hornos de secado de madera tropical en la ciudad de El Alto”

5. CONCLUSIONES

Una vez finalizada la investigación se puede concluir lo siguiente:

- Se realizó reuniones, entrevistas, charlas con autoridades de la “Asociación de carpinteros 19 de marzo”. También se realizó encuestas a diferentes productores de manufacturas en madera, encuestas presentadas en el Anexo I, de las encuestas realizadas se obtuvo la siguiente información:
 - ✓ La “Asociación de carpinteros 19 de marzo” tiene como afiliados alrededor de 500 productores.
 - ✓ En cuanto al material, las especies maderables utilizadas para la elaboración de sus productos son: Roble (24 %), Cedro (23 %), Palo María (17 %), Bibosi (9 %), Yesquero (4 %), Ocho (4 %), Toco Blanco (84 %), entre otros. Los resultados se presentan en el Anexo II.
 - ✓ Los productos elaborados principalmente son muebles para interiores (roperos, juegos de dormitorio, juegos de comedor, juegos de living, escritorios, peinadores, mesas, etc.). Para la elaboración de los diferentes productos, los carpinteros generalmente compran la madera (Materia Prima) cada 15 días alrededor de 3000 pies tablares.
 - ✓ El método más empleado para secar la madera es el secado natural o al aire libre, empleando pocas veces los hornos artificiales debido al costo que implica. Empleando el secado de madera natural o al aire libre y

de acuerdo a información obtenida, el problema que se presenta con mayor frecuencia, es la deformación de la misma.

- ✓ Alrededor del 69 % de los encuestados desconocen la técnica de secado de madera mediante la utilización de hornos solares y/o Sistemas híbridos. Por lo que, es una buena opción la implementación de dicho sistema como alternativa para mejorar el proceso de secado de la materia prima.
- ✓ En las entrevistas y charlas con diferentes carpinteros, se dio a conocer las necesidades que tienen para mejorar su producción y ventas, entre las cuales están: Uso de maquinaria y nueva tecnología, mejoramiento de técnicas de secado de madera, Apoyo y capacitación en cuanto diseños de muebles, métodos de trabajos y marketing entre otros.
- En el ámbito internacional en países como Estados Unidos, España, Republicas dominicana entre otros, la implementación de hornos de secado solar híbridos se efectúa más con fines investigativos que con fines comerciales. Dentro de la investigación realizada, en el Estado Plurinacional de Bolivia existen sistemas de secado de madera que funcionan exclusivamente con energía solar para el calentamiento del aire de secado. ECOENERGÍA FALK S.R.L. es una empresa que ofrece servicios en soluciones energéticas eficientes y ecológicas que contribuyan a mejorar la productividad de algunos sectores, de acuerdo a entrevista realizada, esta empresa implementó sistemas de secado de madera mediante secadores solares en el departamento de Santa Cruz con buenos resultados tanto en épocas de verano, así como en invierno.
- La ciudad de El Alto, caracterizada por su altitud a nivel del mar (4000 msnm) y por un clima seco y de baja humedad (lo que genera una menor dispersión de la radiación solar), es una de las ciudades que recibe mayor radiación solar dentro del territorio nacional. Los niveles radiación solar llegan a valores de 5.7 y 6.3 kW h/m²-día, esta característica hace que la energía solar recibida sea utilizada como una fuente de energía potencial renovable.
- Para el diseño del Sistema Híbrido – Horno de Secado de Madera, y de acuerdo a bibliografías consultadas, se optó por la combinación de materiales alternativos al presentado en un inicio, los cuales cumplan requisitos de aislamiento térmico, permeabilidad, resistentes al fuego, durabilidad y que económicamente no sean muy caros: De acuerdo a lo se eligió materiales como la madera, lana de vidrio y planchas de acero galvanizado, entre otros.
- Se realizó los cálculos necesarios para diseñar un horno de secado solar híbrido con una capacidad de 3653 [pie tablar], el cual responda a las necesidades de los pequeños productores madereros de la ciudad de El Alto. El control del

Sistema híbrido (combinación de energía solar, energía eléctrica y energía proveniente del gas natural) – Horno de secado de madera será manual mediante el control de la humedad de la madera y la lectura de los termómetros de bulbo seco y húmedo para estimar la humedad del aire, asumiendo que la temperatura de secado de la madera oscile entre los 40 °C.

- La construcción del Sistema Híbrido – Horno de secado de madera tendrá una inversión de Bs. 60.764,74.-, siendo factible su implantación por los beneficios que se logrará; principalmente en el ahorro en cuanto al tiempo de secado de la madera. La implementación de este sistema reduciría hasta en un 68 % el tiempo de secado de la madera con respecto al proceso de secado mediante la exposición de la madera a la acción directa del sol y del aire. De igual manera, el costo de secado de la madera será mucho menor debido a que se utilizará principalmente la energía solar y en segundo plano un quemador que funciona con la utilización de gas natural.
- Una alternativa para la implementación de otro tipo de energías (renovables/ no renovables) compatible con el Sistema Híbrido – Hornos de Secado de madera, es la utilización de la energía proveniente del Gas Natural. Cuando existan días nublados, lluviosos donde la humedad al exterior del horno sea alta, o simplemente para acelerar el proceso de secado de la madera; el Sistema Híbrido – Horno de secado de madera funcionará con Gas Natural, la implementación de este tipo de energía comprende una inversión en su instalación, pero el costo de operación será mucho menor debido a que el precio del Gas Natural es de 6.13 \$/MPC de Gas Natural.

6. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones realizadas son las siguientes:

- ✓ En base a todo lo expuesto anteriormente, se recomienda la construcción e implementación del Sistema Híbrido –Horno de secado de madera empleando los materiales de construcción descritos y establecidos en el diseño del Sistema Híbrido del presente proyecto, aprovechando las energías eficientes y ecológicas dentro de nuestro sistema.
- ✓ En todo el proceso de secado, en sus 3 etapas; se recomienda almacenar la madera en lugares donde la madera no pueda absorber ni ceder humedad, garantizando de esta manera un secado en buenas condiciones, además de garantizar el producto final.
- ✓ Llevar un control de las actividades de implementación del sistema de seguridad industrial y salud ocupacional, para el funcionamiento del Sistema Híbrido - Horno de secado de madera y establecer las mejoras empresariales en cuanto a su implementación.
- ✓ Evaluar y controlar el desempeño del sistema, conforme a las determinaciones establecidas, en base al control del cumplimiento de acciones preventivas en cuanto al mantenimiento del sistema, equipos y accesorios debido a que los mismos operan en un ambiente húmedo y/o corrosivo.
- ✓ Para un mejor control del proceso de secado, se podría implementar métodos/ técnicas de automatización como una mejora dentro del Sistema Híbrido - Horno de secado de Madera.
- ✓ Se sugiere realizar otro estudio de investigación de un sistema de secado de madera tipo domo, analizando, verificando y comparando datos como: aprovechamiento del calor del sol, tiempo de secado, eficiencia del secado y costo de construcción con respecto al presente proyecto de investigación.
- ✓ Hormigón celular, hacer énfasis con este material por su bajo costo y capacidad de aislamiento, costo.
- ✓ El presente documento de investigación, es una propuesta realizada que podría servir para elaborar un manual de la implementación de energías eficientes y ecológicas para el secado de la madera y así difundir los resultados en cuanto a la información obtenida.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Hernández Sampieri, R.; Fernández, C.; Baptista, P. (2003) – “Metodología de la Investigación”. (Tercera edición). McGrawHill. México.

Brown, Nelson C.; Bethell James S. (1965) - “La Industria Maderera”. Centro Regional de ayuda Técnica (AID). México.

Incropera F. (1999) - “Fundamentos de transferencia de calor”.

Benítez, R.; Calderón, A. (1993) - “Secador solar para madera”. Tegucigalpa.

Rivero, J. (2003) – “Propiedades físico-mecánicas de la madera”. CIS Madera Costa Rica.

Cuevas, E. (2005) - “Secado de la madera”. (Primera Edición). Chile.

Viscarra, S. (1998) – “Guía práctica para el secado de madera en hornos”. Bolivia.

Orús Asso, F. (1977) - “Materiales de Construcción”. (Séptima Edición). España

Nutsch, W. (2005) - “Tecnología de la madera y el mueble”. España

Goldsack, L.; Ordoñez, A. – “Control de las características térmicas de los materiales”. Chile.

Junac. (1982) – “Manual de diseño y normas para ensayos de madera”. (Tercera Edición). Perú.

Falk Econergía (2017) – “Secadores Solares”. ECOENERGÍA FALK S.R.L. Bolivia.

Bolfor. (1998) – Proyecto de manejo forestal sostenible “Bolivia forestal”. Bolivia.

Gómez, D. (2008) - “Diseño de un Horno Secador de Madera”. Trabajo de Graduación Universidad de San Carlos. Guatemala.

Salas G., C. (2008) – “Diseño y Construcción de un secador solar para madera”. (Ed. Tecnológico de Costa Rica, Ed.) Kurú.

Bond, B.; Espinoza, O.; Araman, P. (2011). “Diseño y operación de un secador solar de madera para países tropicales” Informe Técnico. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

ANEXO I
FORMATO DE ENCUESTA

ENCUESTA

La Universidad Pública de El Alto por medio de la carrera de Ingeniería en Producción Empresarial tiene para su ejecución el proyecto de investigación titulado: "Investigación de Sistemas Híbridos - Hornos de secado de maderas tropicales en la ciudad de El Alto". El siguiente cuestionario se realiza con el fin de conocer proceso de fabricación de los productos que Usted realiza, desde el tipo de madera que utiliza, el proceso de secado de madera, hasta el producto final que elabora.

Por favor llene el siguiente cuestionario de la forma más seria y sincera posible. Los datos y contenido de la encuesta, así como los resultados obtenidos serán tratados con la máxima responsabilidad.

De acuerdo a las preguntas, marque con una X en los cuadros la alternativa que usted considere correcta.

1. ¿Qué tipo de madera utiliza para la fabricación de sus productos?

- Pocho Almendrillo Verdolago Mapajo Palo María
 Sujo Jorori Urupi Bibosi Yesquero
 Roble Mara Cedro Pino Soto
 Otro (especificar)

2. ¿Maderas de que espesor utiliza para la fabricación de sus productos?

- 3/4 " 1 " 1.2 " 1.5 " 2 "
 Otro (especificar)

3. ¿Cuáles son los productos que ofrece su empresa?

- Objetos, muebles y puertas para exteriores Puertas y ventanas para interiores Artesanías
 Objetos, muebles y puertas para interiores Puertas y ventanas para exteriores Pisos de madera
 Cajas para empaque de maquinaria Otro (especificar)

4. ¿Con que regularidad compra la madera para la fabricación de sus productos?

- Cada semana Cada 15 días 1 vez al mes Cada 3 meses
 Otro (especificar)

5. ¿Generalmente, qué cantidad de madera compra por cada recepción de materia prima?

(Especificar la cantidad en m³, Toneladas y/o Pie maderero)

6. ¿Cómo realiza el secado de la madera?

- Secado artificial (cámaras convencionales e industriales) Secado natural o al aire libre

(Si su respuesta es Secado al aire libre continúe con la pregunta 7)

7. ¿Qué tipo de sistema de secado de madera utiliza para secar la madera?

- Aire caliente a baja temperatura Aire caliente a media temperatura Aire caliente a alta temperatura

Bomba de calor Otros (especificar)

(Continúe con la pregunta 8)

8. ¿Qué controles ejercen durante o después de las operaciones de secado?

9. ¿Qué problemas se presentan con mayor frecuencia en la madera después de las operaciones de secado?

Deformaciones Torceduras Rajaduras Grietas Agrietamientos
 Disminución de las dimensiones de la madera No se alcanzan los contenidos de humedad previsto
 Colapso de la madera Otros (especificar)

10. ¿Considera que el método de secado utilizado en su empresa cumple con sus requerimientos para la elaboración de sus productos?

Si
 No (especificar el porqué)

11. ¿Podría mejorarse el método empleado para el secado de madera?

Si (De qué manera...)
 No

12. ¿Sabe usted, qué es un sistema de secado de madera mediante la utilización de hornos solares?

Si (Describa lo que conoce de este sistema)
 No

13. ¿Conoce alguna institución, empresa y/o carpintería que utilice un sistema de secado de madera mediante hornos solares?

Si (Indique cual)
 No

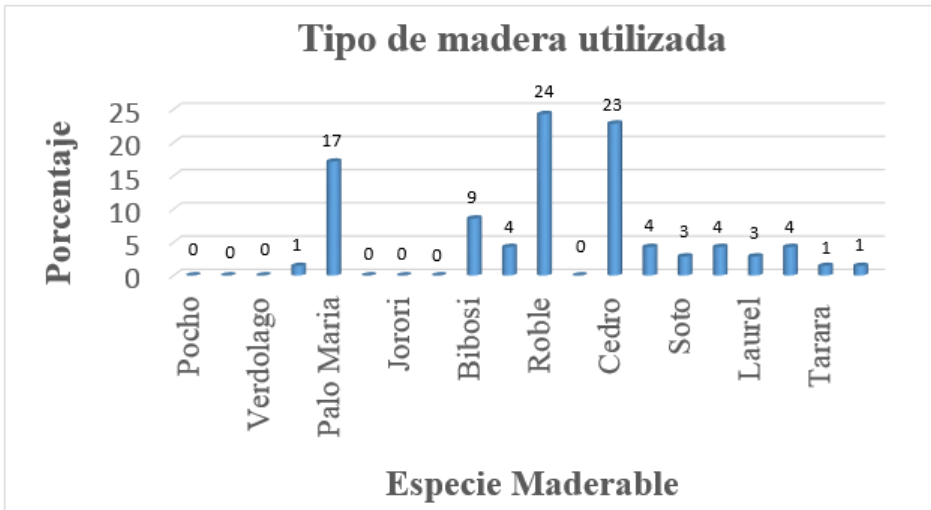
GRACIAS POR SU COLABORACIÓN !!

ANEXO II

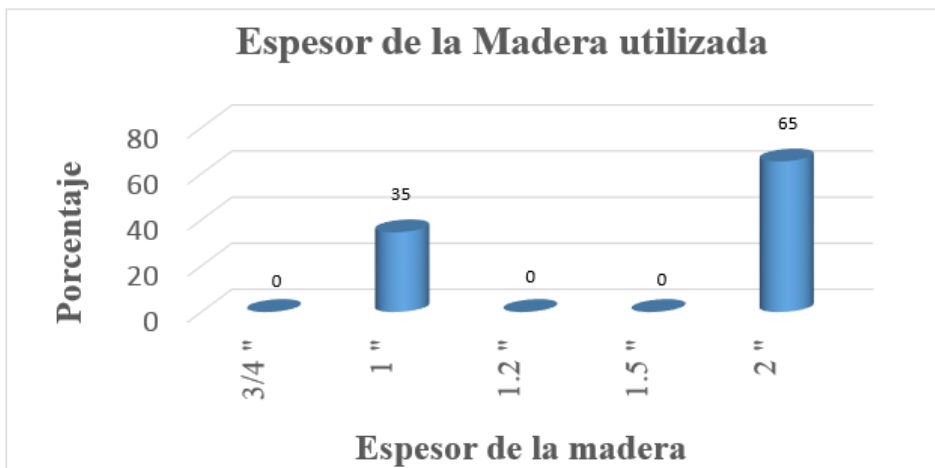
RESULTADOS DE ENCUESTAS

RESULTADOS PORCENTUALES DE LA ENCUESTA APLICADA

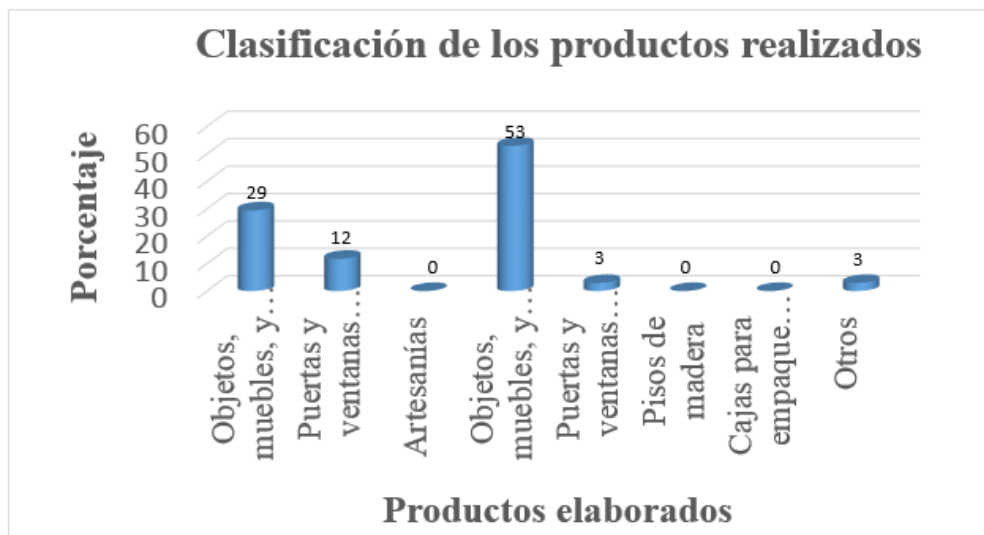
1. Qué tipo de madera utiliza para la fabricación de sus productos?



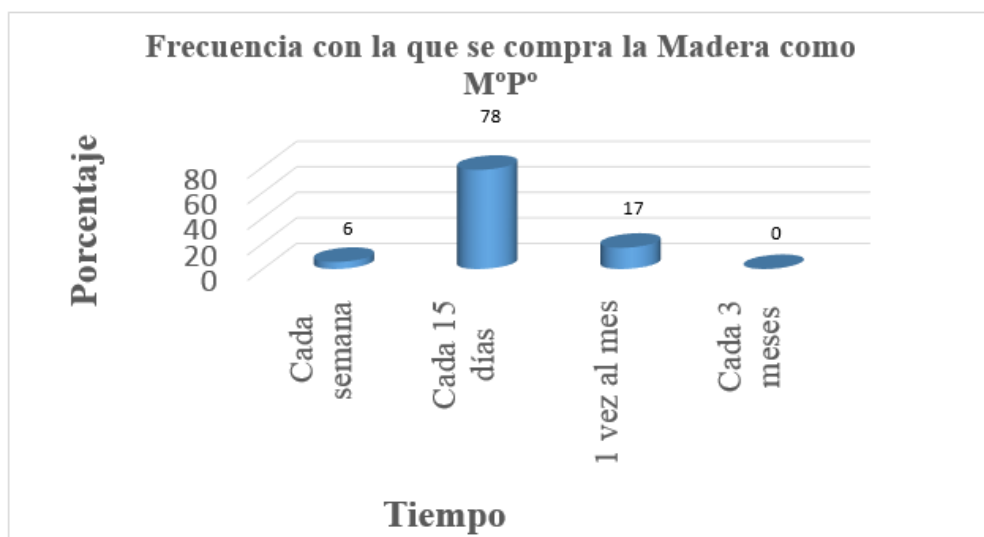
2. Maderas de que espesor utiliza para la fabricación de sus productos?

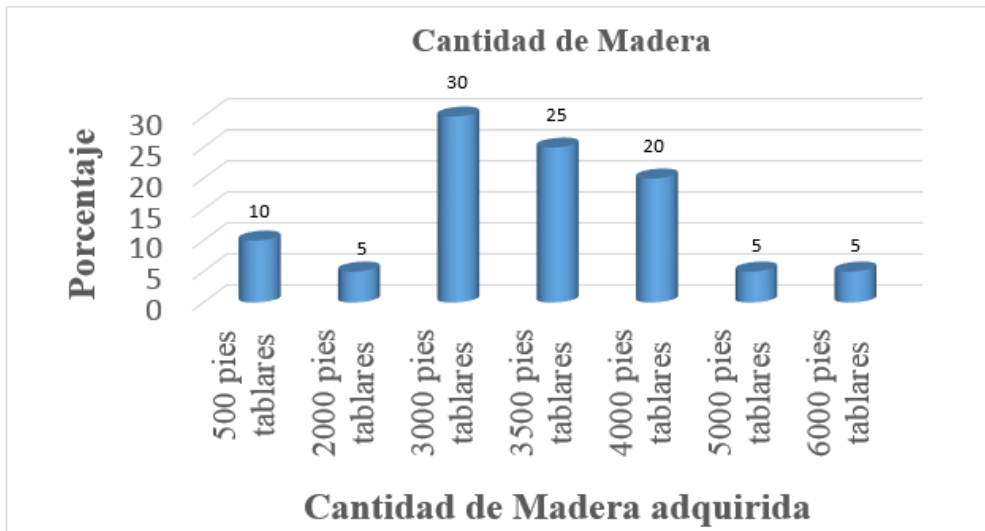
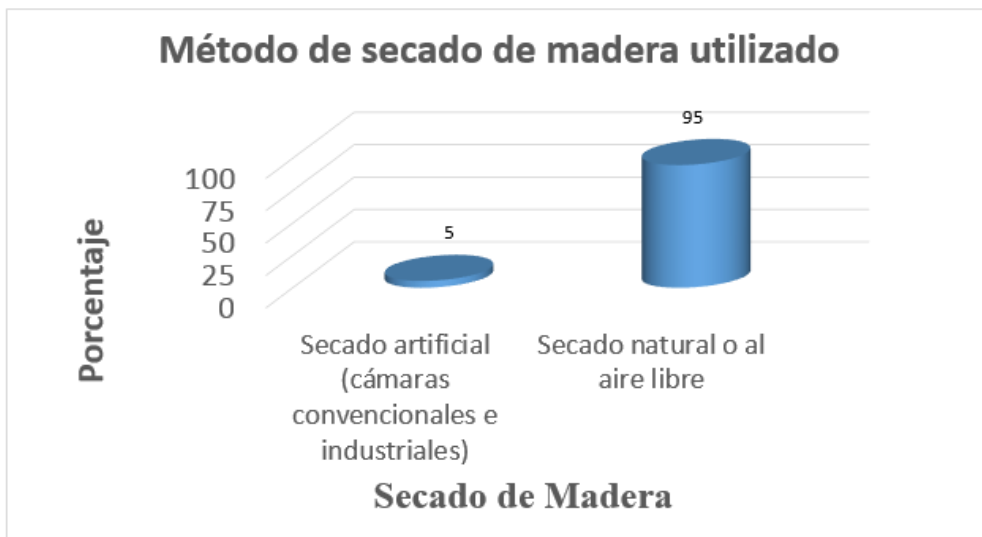


3. Cuáles son los productos que ofrece su empresa?

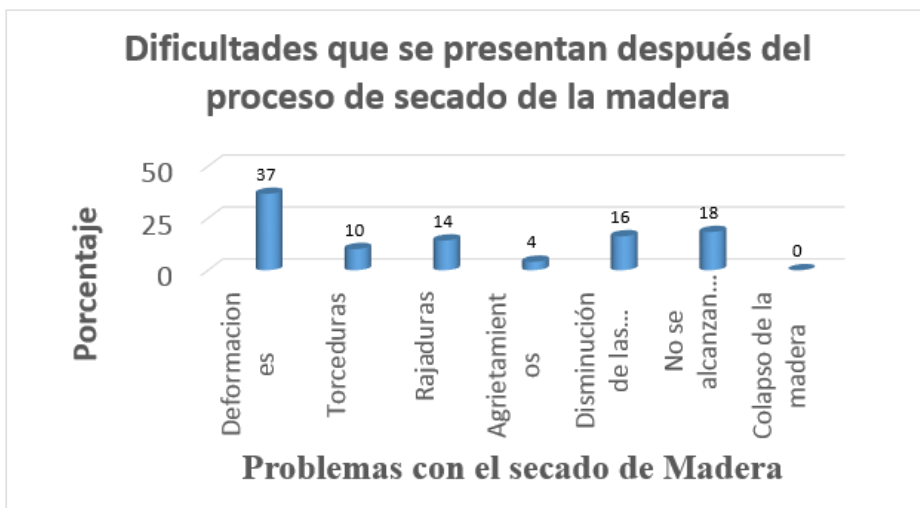


4. Con que regularidad compra la madera para la fabricación de sus productos?

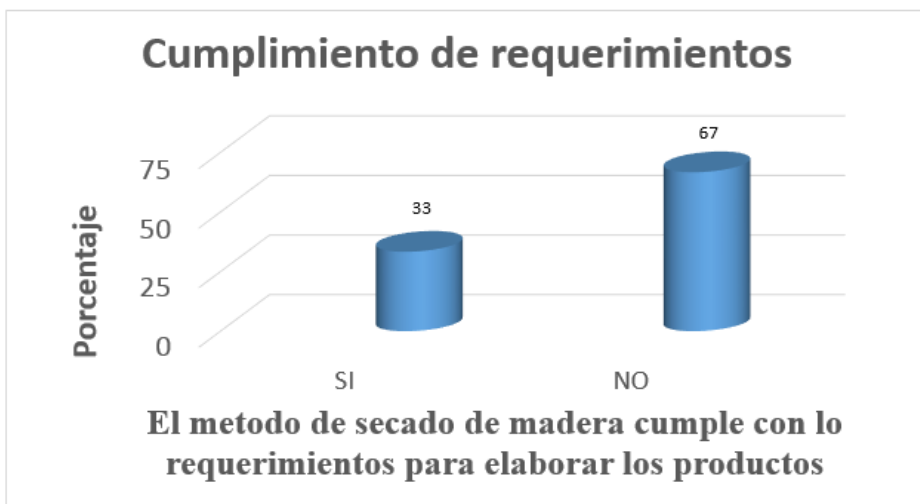


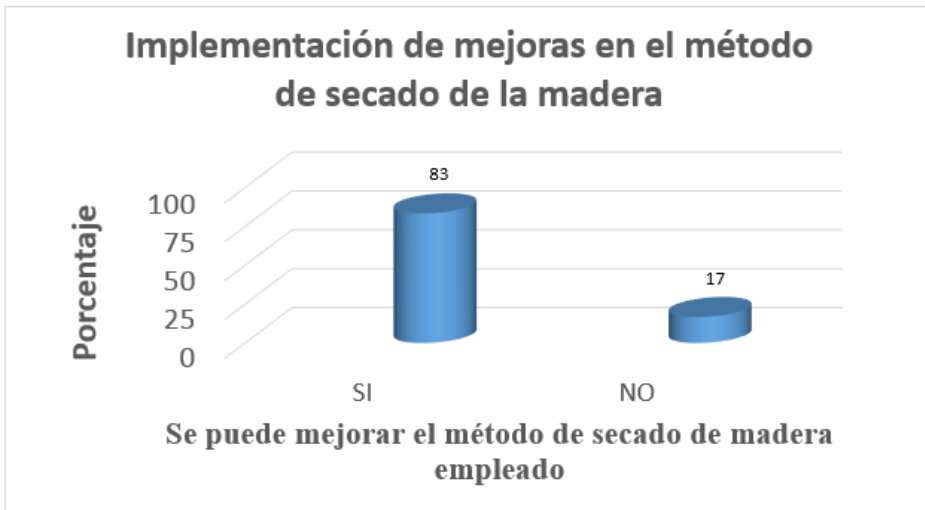
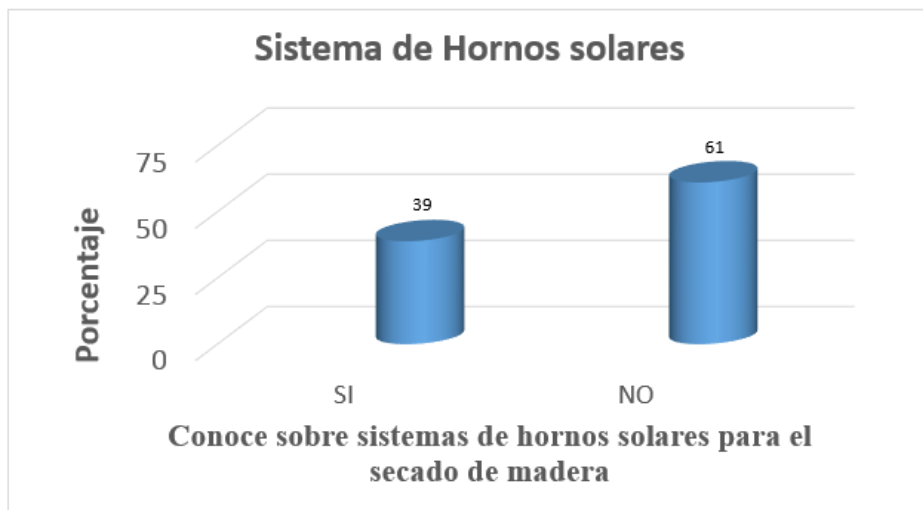
5. Generalmente que cantidad de madera compra por cada recepción de Materia Prima?**6. Como realiza el secado de la madera?**

9. Que problemas se presentan con mayor frecuencia en la madera después de las operaciones de secado?

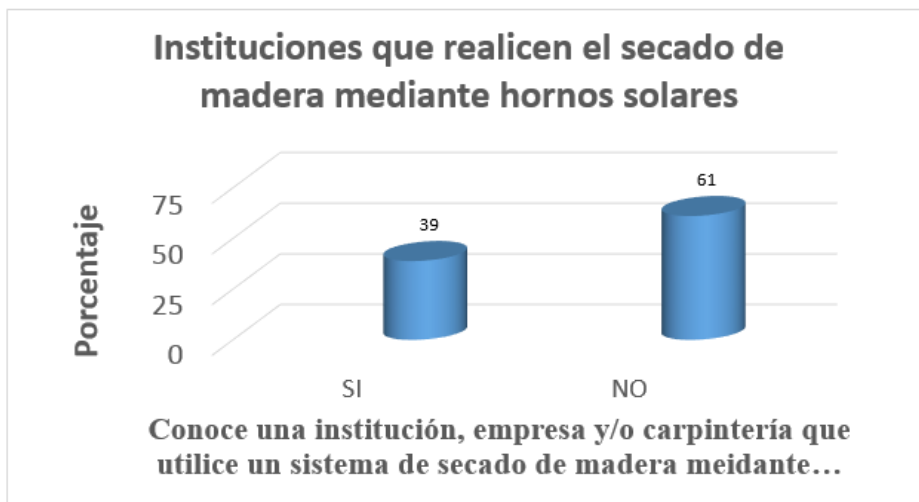


10. Considera que el método de secado utilizado en su empresa cumple con sus requerimientos para la elaboración de sus productos?



11. Podría mejorarse el método empleado para el secado de madera?**12. ¿Sabe usted, que es un sistema de secado de madera mediante la utilización de hornos solares?**

13. Conoce alguna institución, empresa y/o carpintería que utilice un sistema de secado de madera mediante hornos solares?



ANEXO III
PRODUCTOS ELABORADOS POR
LOS CARPINTEROS

**PRODUCTOS ELABORADOS POR AFILIADOS DE LA ASOCIACIÓN DE
CARPINTEROS “19 DE MARZO”**

°Venta de muebles comercializados en galerías ubicadas en las calles Arzabe y Pascoe, Zona 16 de Julio.



MUEBLES PARA INTERIOR/EXTERIOR - JUEGO DE LIVING



MUEBLES PARA INTERIOR/EXTERIOR - JUEGO DE COMEDOR



MUEBLES PARA INTERIOR – MESAS, VELADORES, CÓMODAS



MUEBLES PARA INTERIOR – JUEGOS DE DORMITORIO



MUEBLES PARA INTERIOR – PUERTAS, ROPEROS, LIBREROS

ANEXO IV
COTIZACIÓN DE PRUEBAS DE
LABORATORIO, CONTRATO DE
ALQUILER DE EQUIPOS



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE FÍSICA – INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS

Casilla N°8635 Teléfono (591-2) 2792622 email: fisica@fiums.a.edu.bo

Web: www.fiums.a.edu.bo

Cota Cota, Calle 27 s/n – Campus Universitario La Paz – Bolivia

Estudios en Física Aplicada

Teléfono 72575553 Achumani Meseta N° 152 calle 4 La Paz – Bolivia



UMSA



La Paz, 16 de octubre de 2019

Nota N° 49 LMC-IIF/2019

Señor

Henry F. Aramayo Navarro

Presente.-

**Ref.: Cotización de servicios:
Determinación de la transmitancia térmica
y de la permeabilidad al agua**

De mi consideración:

Mediante esta nota, me permito presentarle la cotización para la realización de los ensayos diseñados para determinar el coeficiente de transmisión térmica de bloques de hormigón y la permeabilidad al agua de los mismos.

Sobre elementos a ensayar:

Recibida su solicitud de servicio de ensayo para la determinación del coeficiente de transmisión térmica y la permeabilidad al agua de bloques de hormigón, se maneja el siguiente detalle sobre los elementos a ser ensayados:

Elementos	Cantidad	Transmisión térmica	Permeabilidad al agua
Bloques de hormigón	6	3	3
TOTAL	6	3	3

Sobre el ensayo a realizarse:

De acuerdo a los requerimientos sobre los elementos a ensayar, consideramos pertinente el ensayo de flujo estacionario de calor en base a la norma ASTM D-C177 - 97, que incluye réplicas de cada elemento a ser ensayado. Este ensayo no destructivo permite determinar, entre otras propiedades, el coeficiente de transmisión térmica de cada muestra.

Para determinar la permeabilidad de los bloques al agua se realizarán estudios similares, adecuados a la geometría de las muestras.



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
 FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
 CARRERA DE FÍSICA – INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS

Casilla N°8635 Teléfono (591-2) 2792622 email: fisica@fiumsa.edu.bo

Web: www.fiumsa.edu.bo

Cota Cota, Calle 27 s/n – Campus Universitario La Paz – Bolivia

Estudios en Física Aplicada

Teléfono 7257553 Achumani Meseta N° 152 calle 4 La Paz – Bolivia



Los ensayos se realizarán en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Físicas de la UMSA, con equipos especiales, dedicados a este tipo de ensayos, para realizarse en los bloques, con superficies uniformes y libres de recubrimiento. El personal en obra se conforma por 2 técnicos especializados, quienes trabajarán en el laboratorio. El contratista deberá proporcionar las muestras para los ensayos, 6 bloques en total que se recibirán en las instalaciones del IIF.

Sobre el presupuesto:

De acuerdo al detalle de los elementos a ensayar, resumimos este trabajo en:

Determinación del coeficiente de transmisión térmica	Bs. 6 200
Determinación de la permeabilidad al agua	Bs. 6 200
Total:	Bs. 12 400

Sobre la modalidad de pago:

Para cubrir el costo por el servicio se realizarán **dos pagos, el primero a la firma de contrato por Bs.- 6 200.-; y el segundo contra entrega del informe por Bs.- 6 200** La factura correspondiente por el servicio será emitida por "Es Fisic". El pago podrá realizarse: en efectivo, ó en cheque a nombre de Suseth Inge Miranda Calvet, representante legal de "Es Fisic".

Se destaca que el servicio tiene el aval del **Laboratorio de Materia Condensada del IIF - UMSA** que es el laboratorio donde se realizará el análisis de los datos provenientes de los ensayos descritos, además de mantener los patrones de calibración para las pruebas. El cliente tendrá un plazo de cinco días hábiles para realizar observaciones al informe final, que deban ser subsanadas por el personal técnico del IIF.

Sin otro particular, me despido a tiempo de saludarle,
 Atentamente

Dr. Eduardo R. Palenque Vidaurre
LABORATORIO DE MATERIA CONDENSADA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FISICAS
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

CONTRATO DE ALQUILER DE EQUIPO (HIGRÓMETRO)

- i. Conste por el presente documento el Contrato que celebran por una parte la empresa HEMMEN, con NIT N° 4277296016 que tiene como Representante Legal a la Ing. Helen Carolina Mediola Barrios con C.I. 4277296 L.P., quien para efectos del presente contrato se denominará el “Contratista” por una parte y por otra:
- ii. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO con C.I. 4335909 L.P., con domicilio ubicado en la Zona 16 de Febrero, Calle 31-C N° 3134, quien en adelante se denominará “Contratante” en los siguientes términos y condiciones:

Hemos acordado celebrar el presente contrato de servicio de alquiler de un equipo (HIGRÓMETRO) para la medición de humedad en la madera, regido por las cláusulas que se presentan a continuación.

OBJETO DEL CONTRATO

CLÁUSULA PRIMERA: El contratista deberá prestar los servicios de alquiler de un equipo (HIGRÓMETRO) para la medición de humedad en la madera, el cual servirá para realizar las respectivas mediciones que contempla el proyecto: “Investigación de Sistemas Híbridos – Hornos de Secado de maderas Tropicales en la ciudad de El Alto”.

Para el cumplimiento de la presente cláusula, el pago del servicio de alquiler será con los recursos IDH destinados al proyecto de investigación, monto acordado por ambas partes.

CLÁUSULA SEGUNDA.- El “CONTRATISTA” desarrolla actividades referidas al ámbito de consultoría en trabajos de Seguridad Industrial - Salud Ocupacional y Medio Ambiente, además de Alquiler de equipos de Medición que conllevan los trabajos referidos.

CLÁUSULA TERCERA.- El “CONTRATISTA”, no podrá ceder parcial o totalmente su posición contractual, teniendo responsabilidad total sobre la ejecución y cumplimiento del mismo, salvo disposición expresa del contratante.

CLÁUSULA CUARTA.- El “CONTRATISTA” es responsable de la prestación del servicio de alquiler durante el plazo convenido entre ambas partes (3 días a partir del 21 de octubre de 2019).

FORMA DE PAGO

CLÁUSULA QUINTA.- El pago se efectuará antes de la prestación del servicio de alquiler del equipo, equipo que estará de acuerdo a la conformidad del “CONTRATANTE”.

Una vez entregado el equipo al “CONTRATANTE”, el mismo será responsable del cuidado y resguardo del equipo y en caso de que existan daños al equipo debe realizar el pago de los daños ocasionados.

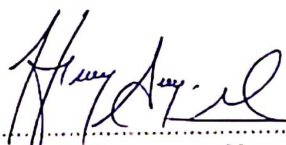
RESOLUCIÓN DEL CONTRATO

CLÁUSULA SEXTA.- Son causales de resolución del contrato, el retraso injustificado en la prestación del servicio del alquiler del equipo, también se podrá resolver el contrato por mutuo acuerdo por causas no atribuibles a estas o por caso fortuito o fuerza mayor.

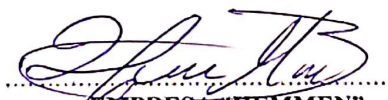
CONDICIONES

CLÁUSULA SÉPTIMA.- El “CONTRATISTA” y “CONTRATANTE” declaran bajo juramento que se comprometen a cumplir las obligaciones señaladas en el presente contrato.

En señal de conformidad las partes suscriben el presente Contrato en tres (2) ejemplares del mismo tenor y efecto legal, en la ciudad de LA Paz – Bolivia a los 21 días del mes de octubre de 2019.

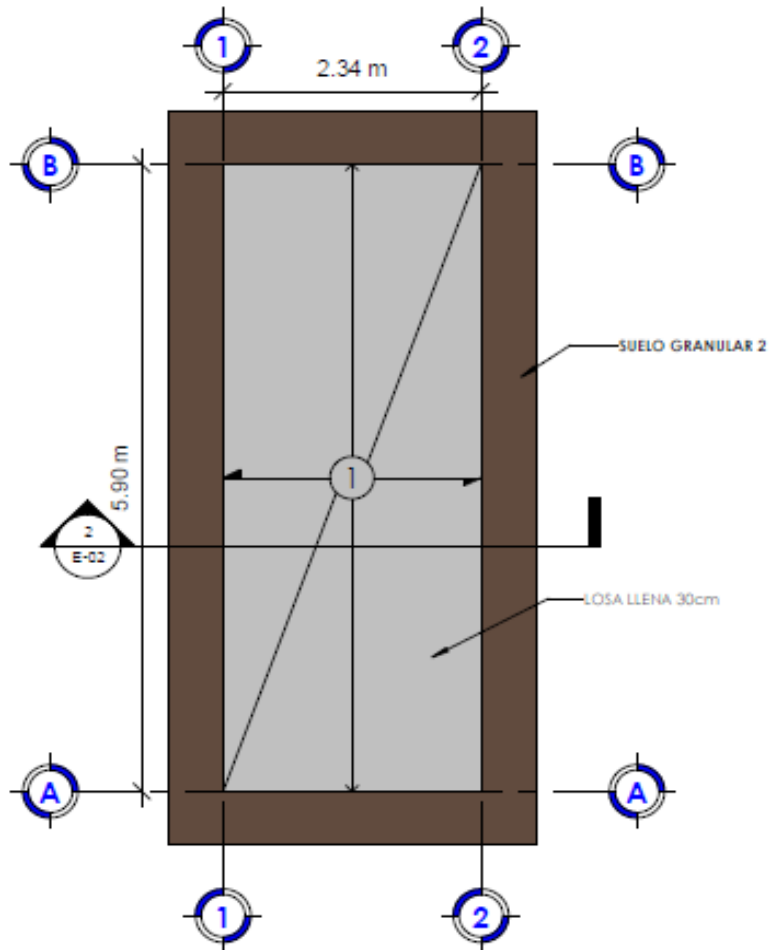


Henry Favio Aramayo Navarro
C.I. 4335909 L.P.
Contratante

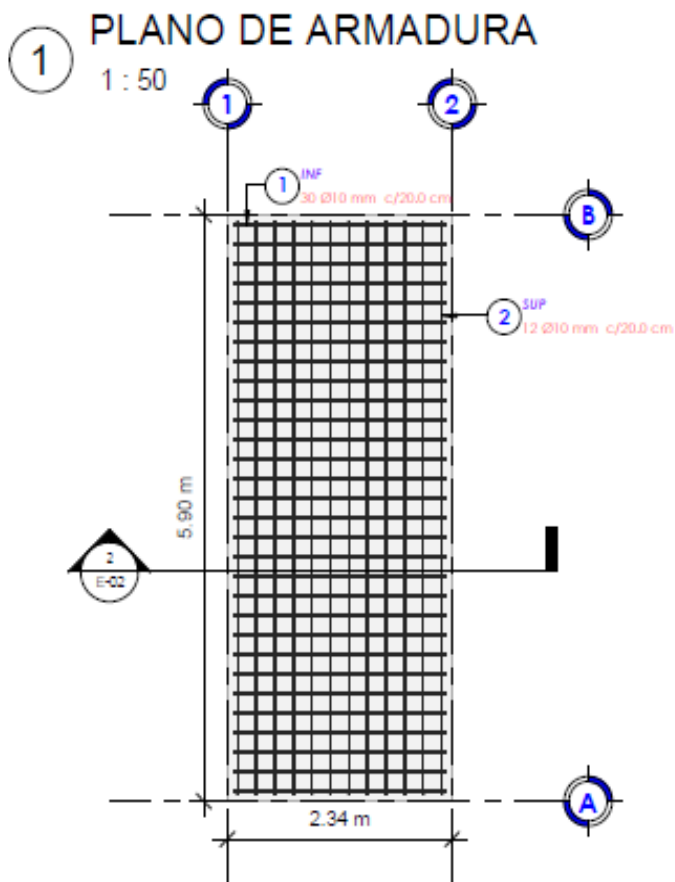


EMPRESA “HEMMEN”
Helen Carolina Mendiola Barrios
C.I. 4277296 L.P.
Contratista

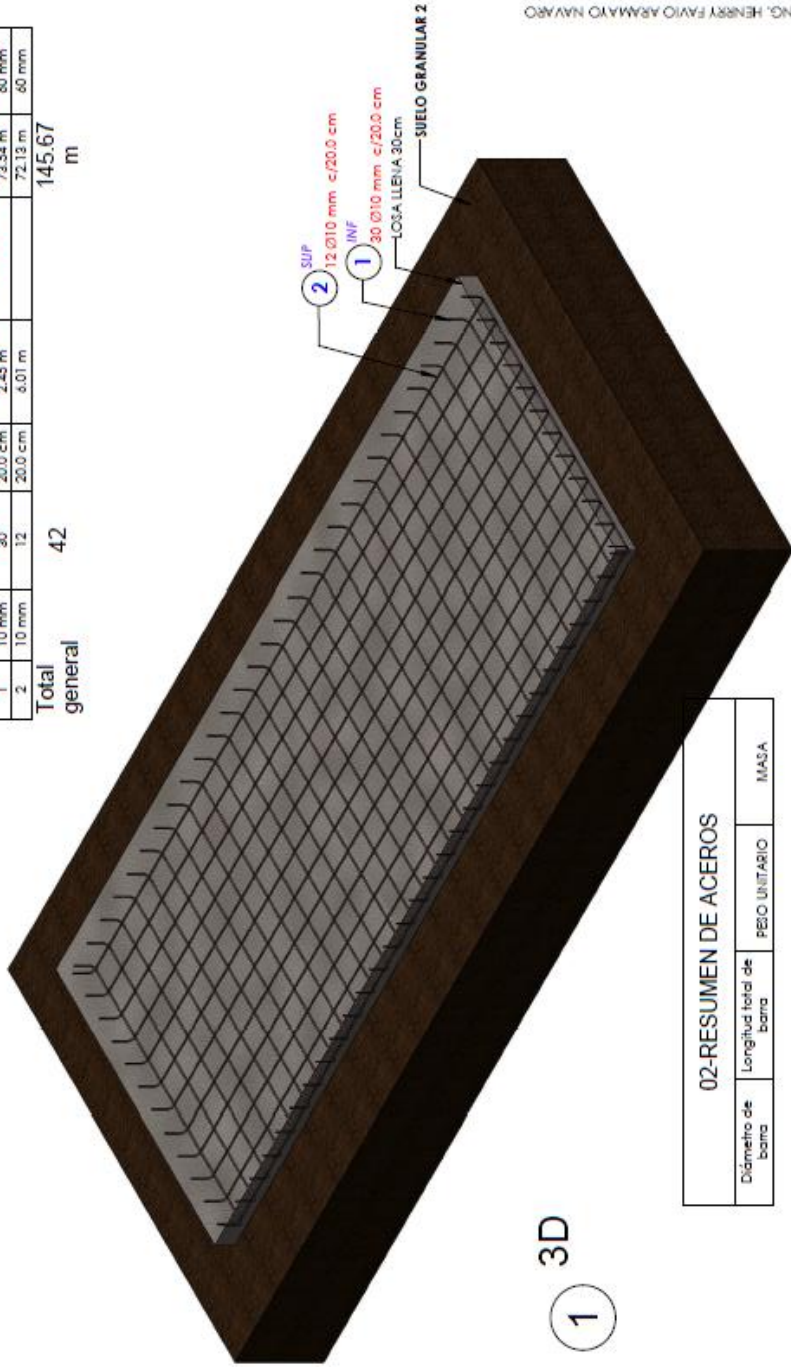
ANEXO V
PLANOS DE DISEÑO DE SISTEMA
HIBRIDO – HORNO DE SECADO
DE MADERA



1 VISTA EN PLANTA
1 : 50



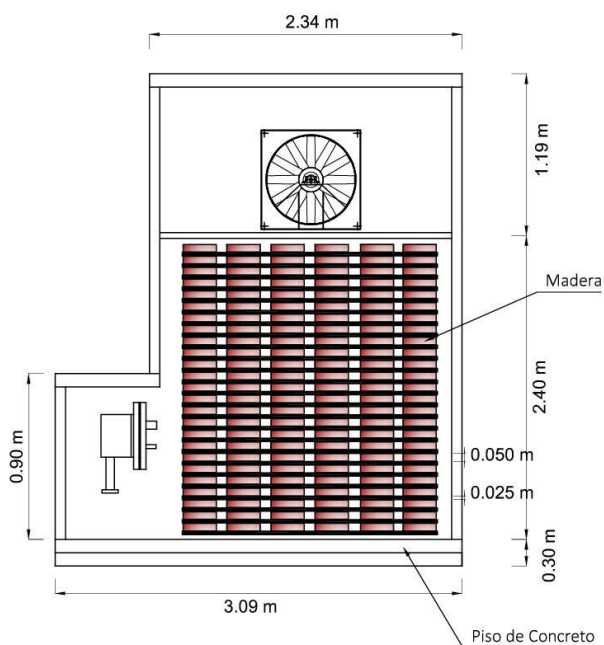
01-NOMENCLATURA DE ACEROS						
N°	Ø	C cent	Esp	Long barra	Esquema	Long Total
1	10 mm	30	20.0 cm	2.45 m		72.54 m
2	10 mm	12	20.0 cm	6.01 m		72.13 m
Total general						145.67 m



1 3D

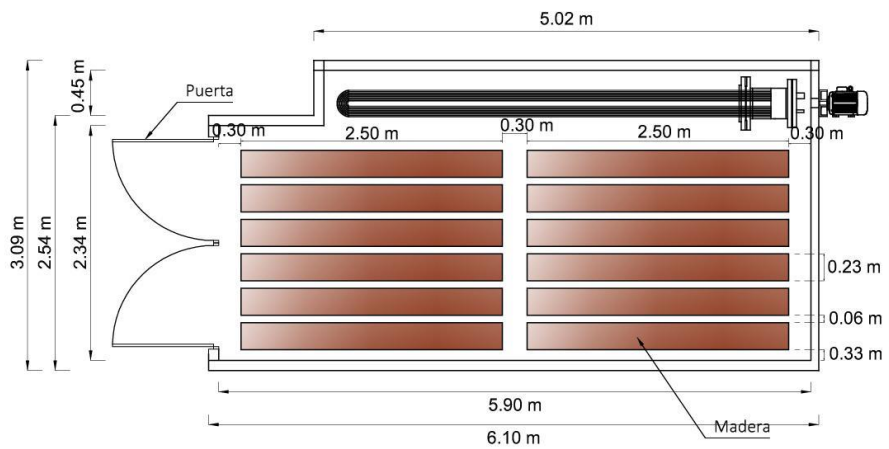
02-RESUMEN DE ACEROS			
Diámetro de barra	Longitud total de barra	PEO UNITARIO	MASA
10 mm	145.67 m	0.55 kg/m	80.99 kg
Total general: 2		145.67 m	80.99 kg

SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA



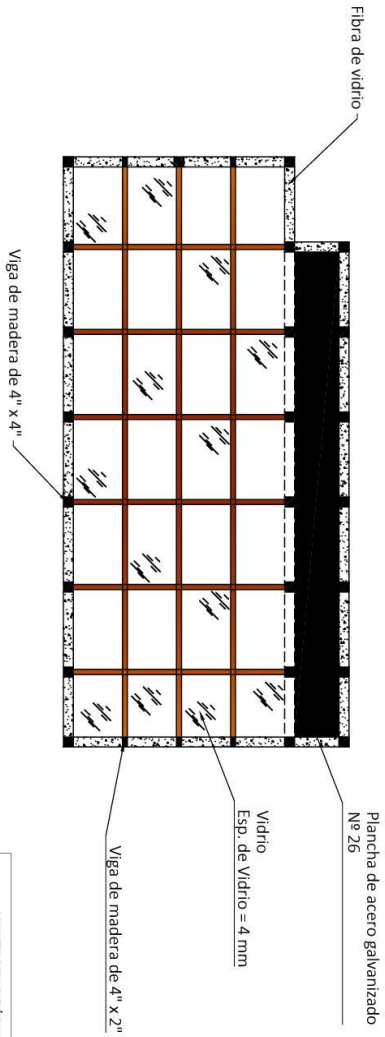
UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO		
INSTITUTO DE INVESTIGACION Y POSGRADO DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL		
PROYECTO: INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNOS DE SECADO DE MADERA TROPICAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO		
PLANO DE DETALLE FRONTAL DEL SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA		
Plano: 1/8	Escala: 1:25	Fecha: ENERO - 2020
Proyecto: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Dibujo: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Revisó:		
Aprobó:		

SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA



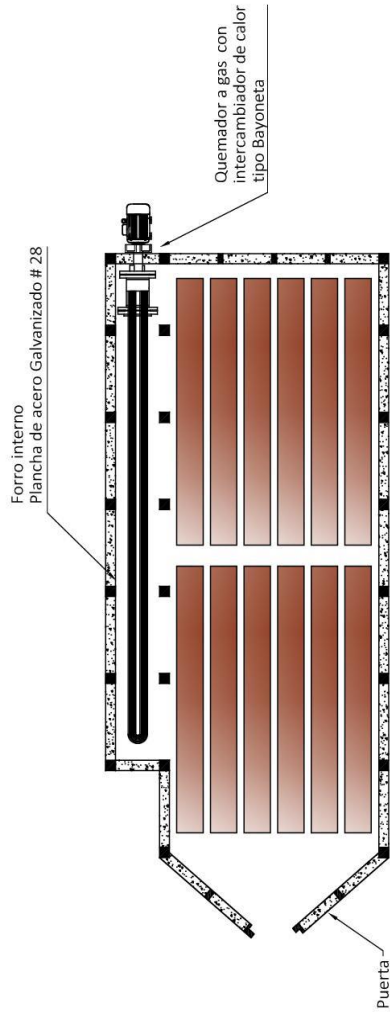
UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO		
INSTITUTO DE INVESTIGACION Y POSGRADO DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL		
PROYECTO: INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNOS DE SECADO DE MADERA TROPICAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO		
PLANO DE DETALLE SUPERIOR DEL SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA		
Plano: 2 / 8	Escala: 1 : 50	Fecha: ENERO - 2020
Proyecto: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Dibujo: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Revisó:		
Aprobó:		

SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO			
INSTITUTO DE INVESTIGACION Y POSGRADO DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL			
PROYECTO: INVESTIGACION DE SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNO DE SECADO DE MADERA TROPICAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO			
PLANO DE DETALLE DE LA VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA			
Pánc:	3 / 8	Escala:	1 : 50
Fecha:	ENERO - 2020		
Proyecto:	ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Dibujo:	ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Revisor:			
Aprobó:			

SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL

PROYECTO: INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNOS DE SECADO DE MADERA TROPICAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO
PLANO DE DETALLE DE LA VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA

Plano: 4/8 Escala: 1:50 Fecha: ENERO - 2020

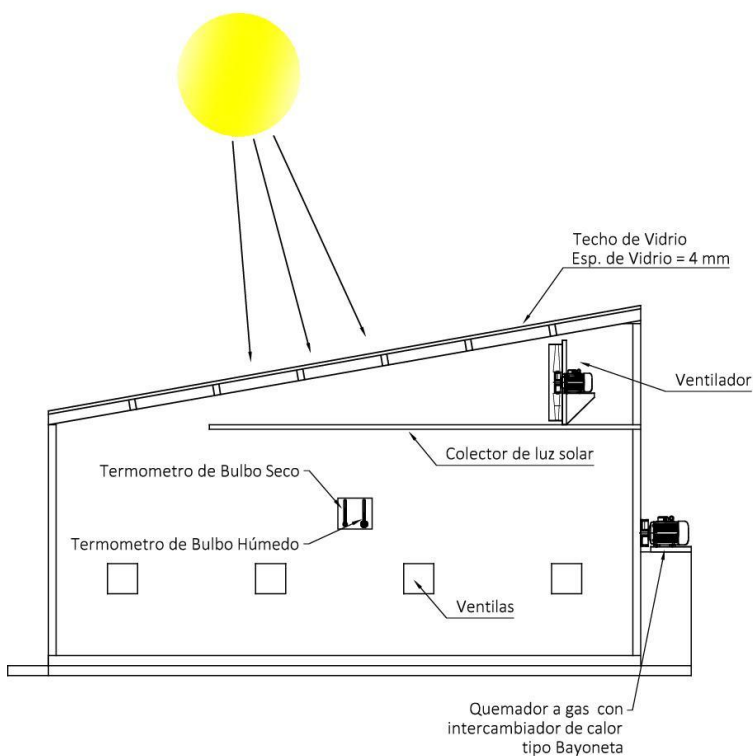
Proyecto: ING. HENRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO

Dibujó: ING. HENRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO

Revisó:

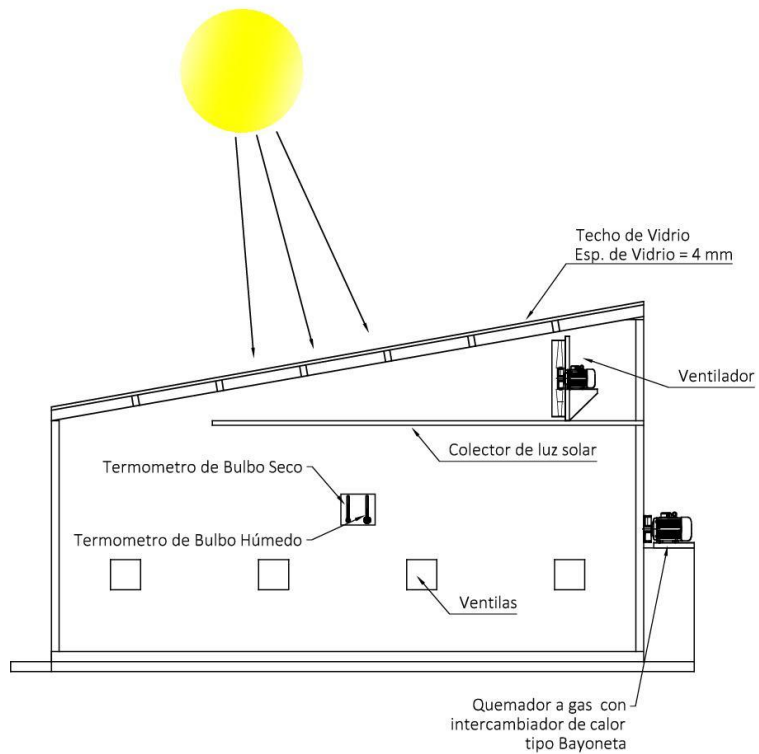
Aprobó:

SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO		
INSTITUTO DE INVESTIGACION Y POSGRADO DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL		
PROYECTO: INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNO DE SECADO DE MADERA TROPICAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO		
PLANO DE DETALLE LATERAL IZQUIERDO DEL SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA		
Plano: 5 / 8	Escala: 1 : 50	Fecha: ENERO - 2020
Proyecto: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Dibujo: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO		
Reviso:		
Aprobo:		

SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN EMPRESARIAL

PROYECTO: INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS - HORNO
DE SECADO DE MADERA TROPICAL EN LA CIUDAD DE EL ALTO

PLANO DE DETALLE LATERAL IZQUIERDO DEL
SISTEMA HÍBRIDO - HORNO DE SECADO DE MADERA

Plano: 5 / 8

Escala: 1 : 50

Fecha: ENERO - 2020

Proyecto: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO

Dibujo: ING. HENRRY FAVIO ARAMAYO NAVARRO

Reviso:

Aprobo:

