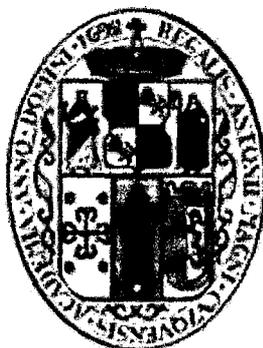


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

Facultad de Ingeniería Química e Ingeniería Metalúrgica

Carrera Profesional de Ingeniería Metalúrgica



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HORNO SOLAR PROTOTIPO PARA
SECADO DE MADERA
(Investigación Tecnológica)**

Tesis presentada por:

Bach. CESAR CALLATA UMPIRE.

Para optar al Título Profesional de:

INGENIERO METALÚRGICO

Asesor:

M.Sc. HONORATO SÁNCHEZ QUISPE

TESIS FINANCIADA POR LA UNSAAC

**CUSCO – PERÚ
2014**

DEDICATORIA

Dios da una oportunidad: **la vida**, mientras la tengamos todo es posible con fe forjando el bien durante nuestra existencia.

A mis padres, hermanos y entorno familiar, porque creyeron en la esperanza a pesar de todo para conseguir un logro más en mi vida

A Juana quien restableció mi ser con la bendición de mis retoños: Jeshua y Arelys.

El ingeniero crea lo que no existe, mientras el científico descubre lo que ya existe

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a todos los docentes de la facultad de Ingeniería Metalúrgica y de otras especialidades de la UNSAAC, quienes durante los años de aprendizaje y formación académica me transmitieron sus sabias enseñanzas, con paciencia y rectitud, rescatando los valores, principios y actitud propias de la Docencia Universitaria los cuales aplicaré en el transcurrir de mi vida profesional, volcándolo en mi labor de ingeniero, y que la bendición de Dios ilumine y guie mi existencia para ser una persona de bien en favor de la sociedad.

Así mismo, un agradecimiento personal al docente asesor M.Sc. Honorato Sánchez Quispe y a todas las personas que me brindaron con especial comprensión, exigencia y motivación, aquellos conocimientos de sus experiencias para lograr una de las metas durante mi formación profesional, en dedicar y aportar investigaciones para el desarrollo de la región del Cusco.

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA METALÚRGICA

SEÑORES DOCENTES MIEMBROS DEL JURADO

De conformidad con el Reglamento de Grados y Títulos vigentes en la Facultad de Ingeniería Química e Ingeniería Metalúrgica, pongo a vuestra consideración el presente trabajo de investigación para optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, intitulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE HORNO SOLAR PROTOTIPO PARA
SECADO DE MADERA”**

(Investigación Tecnológica)

Que tiene por propósito utilizar los procesos de transferencia de calor y masa, así como los principios básicos de termodinámica, cinética de secado y mecánica de fluidos, en el diseño de un horno de secado térmico para madera aguano utilizando como fuente la energía solar. Esta investigación, considera la aplicación de la Ingeniería Metalúrgica en el diseño de la cámara y la estructura del horno secador.

CESAR CALLATA UMPIRE

PRESENTACION	iv
CONTENIDO	v-ix
LISTA DE FIGURAS	x-xi
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE SIMBOLOS	xv-xvi
RESUMEN	xviii
ABSTRAC	xix
INTRODUCCION	xx

CAPITULO I: METODOLOGIA DEL ESTUDIO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
2.	FORMULACION DEL PROBLEMA	21
3.	OBJETIVOS	22
	3.1. OBJETIVO GENERAL	22
	3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	22
4.	JUSTIFICACION	22
5.	ANTECEDENTES	23
6.	HIPOTESIS GENERAL	24
7.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	26
9.	METODOLOGIA DE INVESTIGACION	27
10.	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE INFORMACION	27
11.	PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS	28
12.	MATRIZ DE CONSISTENCIA	29

CAPITULO II: MARCO CONCEPTUAL

2.1.	HORNOS SOLARES	30
2.1.1.	DEFINICION	30
2.1.2.	TIPOS DE HORNO SOLAR	31
2.1.3.	COLECTOR Y SU CLASIFICACION	32
2.1.4.	VENTILACION FOZADA Y SU DISPOSICION	34
2.1.5.	HORNOS INDUSTRIALES	35
2.1.6.	ETAPAS DE SECADO	36
2.1.7.	FUNCIONAMIENTO DEL HORNO SOLAR	37
2.1.8.	EFICIENCIA Y FORMULACION	37
2.2.	ENERGIA SOLAR	45
2.2.1.	DATOS DEL CLIMA	46
2.2.2.	FUNDAMENTOS DE LA ENERGIA SOLAR	47
2.2.3.	CARACTERISTICAS DE LA ENERGIA SOLAR	49
2.2.4.	TIPOS DE ENERGIA SOLAR	50
2.2.5.	EL CALOR	51
2.2.6.	TRANSFERENCIA DE CALOR	52
2.2.7.	TERMODINAMICA	53
2.2.8.	TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA	58
2.3.	MADERA	70
2.3.1.	ESTRUCTURA DE LA MADERA	71
2.3.2.	CARACTERISTICAS DE LA ESPECIE	73
2.3.3.	CARACTERISTICAS DE LA MADERA	75
2.3.4.	PROPIEDADES FISICAS	75

2.3.5. PROPIEDADES MECANICAS	75
2.3.6. DURABILIDAD NATURAL	76
2.3.7. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL AGUANO	76
2.3.8. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS	76
2.4. DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA	77
2.4.1. HUMEDAD EN LA MADERA	77
2.4.2. DETERMINACION DE LA HUMEDAD	78
2.4.3. PROCEDIMIENTO PARA LA HUMEDAD REQUERIDA	79
2.5. CINETICA DEL SECADO	79
2.5.1. FISICA DE LOS FACTORES DEL SECADO	82
2.5.2. PRINCIPIOS DEL SECADO	86
2.5.3. SECADO SOLAR AL AIRE LIBRE	88
2.5.4. DEFECTOS DEL SECADO	89

CAPITULO III: MATERIALES Y METODOS DE SECADO

3.1. MATERIALES EN EL DISEÑO	95
3.2. AISLANTES DEL HORNO	98
3.2.1. CARACTERISTICAS GENERALES	98
3.2.2. CLASIFICACION DE LOS AISLANTES	99
3.3. SECADO EN HORNO SOLAR	99
3.4. SECADO NATURAL	100

CAPITULO IV: DISEÑO DEL HORNO SOLAR

4.1.	DETALLES DEL HORNO SOLAR	101
4.1.1.	CAPACIDAD	102
4.1.2.	CONSUMO DE ENERGIA	102
4.1.3.	PERDIDAS DE ENERGIA	103
4.1.4.	PERMISIVIDAD DEL CALOR	103
4.1.5.	FLUJO DE AIRE	103
4.1.6.	CALOR REQUERIDO DE SECADO	105
4.2.	DISEÑO Y CONSTRUCCION	105
4.2.1.	DIMENSION DEL HORNO SOLAR	107
4.2.2.	FUNDAMENTO TECNOLOGICO	108
4.2.3.	ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL PROTOTIPO	108
4.2.4.	DESCRIPCIONES DE LA MUESTRA	109
4.2.5.	ESPECIFICACIONES GEOGRAFICAS Y METEREOLÓGICAS	110
4.2.6.	DIMENSION DE LA CAMARA DE SECADO	111
4.2.7.	CALCULO DE LA CAMARA INTERIOR	113
4.2.8.	LA MADERA Y SU APILADO	115
4.2.9.	CALCULO DEL VOLUMEN DE LA MADERA	117
4.2.10.	VOLUMEN DEL AIRE EN EL HORNO	118
4.2.11.	ORIENTACION Y ANGULO DEL COLECTOR SOLAR	118
4.3.	PROCESO DE SECADO	120
4.4.	ENSAYOS	127
4.5.	BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA	128

4.5.1. BALANCE DE MASA	128
4.5.2. BALANCE TERMICO	129

CAPITULO V: PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1. PRESENTACION DE RESULTADOS	139
5.2. EL PRODUCTO SECADO	139
5.3. DISCUSION DE RESULTADOS	139
CONCLUSIONES	142
RECOMENDACIONES	143
BIBLIOGRAFIA	144
ANEXOS	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1:	Etapas de secado en la madera.	34
Figura 2-2:	Diseño ideal del horno solar para secado de madera.	36
Figura 2-3:	Proceso de uso y aplicación de la energía solar.	45
Figura2-4:	Proceso del calor.	48
Figura 2-5:	Flujo de calor.	49
Figura 2-6:	Transmisión del calor.	55
Figura 2-7:	Componentes internos de un árbol.	68
Figura 2-8:	Anisotropía de la madera.	70
Figura 2-9:	Madera aguano.	71
Figura 2-10:	Curva teórica de velocidad de secado en la madera.	78
Figura 2-11:	Curva experimental de velocidad de secado (madera aguano)	79
Figura 2-12:	Funciones de la velocidad del aire.	83
Figura 2-13:	Curva teórica de secado.	84
Figura 2-14:	Contracciones anormales en la madera.	87
Figura 2-15:	Dirección del grano en ejes longitudinal, radial y tangencial	88
Figura 2-16:	Configuración de tensión en distintas direcciones	88
Figura 2-17:	Grietas en el extremo de la madera.	88
Figura 2-18:	Abarquillado de la madera.	90
Figura 2-19:	Arqueadura de la madera.	91

Figura 2-20:	Encorvadura de la madera.	91
Figura 2-21:	Torcedura de la madera.	91
Figura 4-1:	Esquema del horno prototipo.	103
Figura 4-2:	Imagen del horno solar prototipo.	103
Figura 4-3:	Dimensiones de la muestra a ensayar.	107
Figura 4-4:	Cámara de secado del horno prototipo (vista frontal).	108
Figura 4-5:	Lados de la cámara de secado (prisma recto).	109
Figura 4-6:	Diseño central de la cámara de secado (ortopedro).	110
Figura 4-7:	Distribución y proceso de secado en el horno.	113
Figura 4-8:	Variación de la temperatura (1)	118
Figura 4-9:	Variación de la temperatura (2)	119
Figura 4-10:	Variación de la temperatura (3)	119
Figura 4-11:	Variación de la temperatura (4)	120
Figura 4-12:	Variación de la temperatura (5)	120
Figura 4-13:	Variación de la temperatura (6)	121
Figura 4-14:	Variación de la temperatura (7)	122
Figura 4-15:	Variación de la temperatura (8)	122
Figura 4-16:	Variación de la temperatura (9)	123
Figura 4-17:	Horno prototipo con dispositivos instalados.	124
Figura 3-5:	Esquema del horno prototipo.	111
Figura 3-6:	Imagen del horno solar prototipo.	112
Figura 4-1:	Horno prototipo con dispositivos instalados.	116

Figura 4-18:	Diagrama del balance de materia en el horno solar.	126
Figura 5-1:	Datos del proceso térmico en el horno solar	140
Figura 5-2:	Apilado en caballete y triangulo de la madera	141
Figura 5-3:	La transición de secado en la madera	141
Figura 5-4:	Diagrama de flujo del proceso de secado solar	143

LISTA DE TABLAS

Tabla 7-1:	Operacionalización de variables	23
Tabla 12-1:	Matriz de consistencia	26
Tabla 2-1:	Comparación de absorptividad con la emisividad	63
Tabla 2-2:	Absortancia y emisividad de superficies.	64
Tabla 2-3:	Coefficiente de emisividad de cuerpos reales.	66
Tabla 3-1:	Materiales de construcción y dispositivos del horno solar.	94
Tabla 4-1:	Dimensiones específicas del horno	104
Tabla 4-2:	Elementos constituyentes del horno prototipo	105
Tabla 4-3:	Datos de las muestras de madera	106
Tabla 4-4:	Datos físicos de la muestra a ensayar	107
Tabla 4-5:	Datos físicos y climáticos (Región Cusco)	107
Tabla 4-6:	Mediciones de temperatura en el horno solar (1)	118
Tabla 4-7:	Mediciones de temperatura en el horno solar (2)	119
Tabla 4-8:	Mediciones de temperatura en el horno solar (3)	119
Tabla 4-9:	Mediciones de temperatura en el horno solar (4)	120
Tabla 4-10:	Mediciones de temperatura en el horno solar (5)	120
Tabla 4-11:	Mediciones de temperatura en el horno solar (6)	121
Tabla 4-12:	Mediciones de temperatura en el horno solar (7)	121
Tabla 4-13:	Mediciones de temperatura en el horno solar (8)	122

Tabla 4-14:	Mediciones de temperatura en el horno solar (9)	123
Tabla 4-15:	Temperaturas del colector	123
Tabla 4-16:	Resumen de resultados experimentales	123
Tabla 4-17:	Propiedades físicas de la muestra a ensayar.	124
Tabla 4-18:	Balance de masa para el agua	125
Tabla 4-19:	Balance de masa para el aire	125
Tabla 5-1:	Resumen de resultados experimentales (pág. 128)	139
Tabla 5-2:	Variación de la temperatura en función del tiempo	140
Tabla 5-3:	Datos del proceso térmico en el horno solar	142

LISTA DE SÍMBOLOS

V_s	Volumen de un separador
C_p	Calor específico de la madera
h_{fg}	Calor latente del agua
q_1	Calor sensible para calentar la madera aguano
q_2	Calor necesario para evaporar el agua contenida en la madera
A_p	Altura de la pila
A_e	Área de evaporación
A_{et}	Área efectiva de evaporación
A_l	Área de los listones de la fila
A_t	Ancho de la tabla
CT_t	Cantidad total de tablas en el horno
H_v	Entalpia del vapor de agua
L_{CF}	Longitud de la cara frontal
NT_{CF}	Numero de tablas en la cara frontal
NT_{CL}	Número de tablas en la cara lateral
NT_s	Número total de separadores
P_h	Peso de la madera en estado húmedo
P_s	Peso de la madera en estado anhidro o seco
Q_c	Calor por conducción
Q_{rad}	Transferencia de calor por radiación

- Q_u** Calor útil
- T_a** Temperatura ambiente
- T_e** Temperatura de ebullición
- V_p** Volumen de madera real a secarse
- V_{TS}** Volumen total del separador
- V_{pr}** Volumen del prisma recto
- V_t** Volumen de una tabla
- V_t** Volumen de una probeta
- X_f** Humedad final de la madera
- X_i** Humedad inicial de la madera
- e_s** Espesor del separador
- e_t** Espesor de la tabla
- h_p** Altura de la pila
- m_p** Peso de la pila de madera
- t_s** Tiempo de secado
- ΔT** Diferencia de temperatura
- AE** Razón de agua a evaporar
- CH** Contenido de humedad
- CHR** Contenido de humedad relativa
- D** Densidad de la madera
- E** Emisividad
- H_a** Entalpía del agua

- HR** Humedad relativa
- M** Cantidad de aire que debe pasar por el secador
- m** Masa de agua evaporada durante el proceso de secado
- mp** Masa de la madera húmeda
- η Eficiencia térmica
- Q_a** Calor dentro del secador suministrado por radiación solar
- Q_c** Calor requerido para evaporar el agua de la madera
- Q_m** Calor necesario para evaporar la AE
- U** Cantidad de calor total
- Y** Humedad específica del aire
- X** Humedad
- e** Espesor de probeta.
- k** Conductividad térmica del material
- σ Constante de Stefan-Boltzmann

RESUMEN

El horno solar prototipo para secado de madera aguano se ha diseñado considerando las características climáticas del Cusco, aunque existe poco conocimiento de su aplicación en la carpintería e industria maderera el cual se invierte con su aprendizaje. Siendo una alternativa de secado al aire libre y hornos convencionales, se inicia la investigación tecnológica con la revisión bibliográfica, consistente en avances de investigaciones y proyectos desarrollados teórica y experimentalmente, por lo tanto, se estudia los fundamentos, principios así como leyes físicas, fisicoquímicas y procesos relacionados con el diseño; se muestra el diseño y eficacia; efectuándose cálculos teóricos para la madera aguano; por su mayor demanda en la ebanistería, la que se valida con el procedimiento cuantitativo, observando y analizando sus variables y parámetros para el proceso del tratamiento térmico o secado. Para ello se considerara el clima de la zona, la geometría del horno, la inclinación y orientación del horno y los materiales sugeridos por el diseño, cuyos cálculos y resultados se confrontaran con el secado al aire libre; entonces, la madera sometida al tratamiento presentará características dimensionales y estructurales superiores a la efectuada al aire libre, las que serán apreciadas por los interesados para su uso en diversas aplicaciones. Por consiguiente, el diseño del horno prototipo demuestra la efectividad de secamiento para tablas de madera, obteniéndose listones con una estabilidad dimensional y estructural, minimizando daños físicos mecánicos durante el tratamiento de secado en el horno solar, por lo tanto esta propuesta de diseñar dicho horno mejorará el secado siendo más rápido y eficiente.

ABSTRACT

The prototype solar oven for drying wood aguano is designed considering the climatic characteristics of the Cusco, although there is little knowledge of its application in the carpentry and timber industry which is invested with their learning. Being an alternative drying in the open air and conventional ovens, starts the technological research with a review of the literature, consisting of advances in research and theoretical projects developed and experimentally, therefore, we studied the foundations, principles as well as physical laws, physicochemical and processes related to the design; shows the design and effectiveness; newer theoretical calculations for the wood aguano; for your greater demand in the joinery, which is valid with the quantitative procedure, observing and analyzing their variables and parameters for the process of thermal treatment or drying. For this purpose shall be deemed to be the climate of the area, the geometry of the oven, the tilt and orientation of the oven and the materials suggested by the design, whose calculations and results will be discussed with the drying in the open air; then, the wood will be subjected to the treatment dimensional characteristics and superior structural to the one carried out in the open air, which will be appreciated by the interested parties for their use in various applications. Therefore, the design of the oven prototype demonstrates the effectiveness of drying for planks of wood, obtaining slats with a dimensional stability and structural, minimizing physical damage during the mechanical treatment of drying in the solar oven, therefore this proposal for design that will improve the drying oven being faster and more efficient.

INTRODUCCION

Los hornos solares en sus diversas aplicaciones como el secado; ha desarrollado cambios sucesivos en su diseño mas no así en su esencia, además está la madera material tradicional utilizado para distintos usos por ejemplo en la carpintería tomando como referencia ello, surgió el proyecto de diseñar y construir un horno solar prototipo para el secado de madera aguano, el cual presenta una modificación en su forma de captación solar, complementando su funcionamiento con ventiladores alimentados por celdas fotovoltaicas, siendo la tesis una investigación tecnológica con fines aplicativos el cual presenta un diseño practico y manipulable en su construcción sin mucha complejidad en su uso para el secado de la madera aguano optimizando su rapidez y eficiencia, como mencionamos se estudió científica y tecnológicamente su proceso de secado desarrollando un sistema de flujo térmico adecuado durante su operatividad en la desecación de la madera aguano, mejorando en la velocidad de secado con una eficacia apropiada en el proceso; el mismo fue consolidado con información consistente que fue validado con los ensayos experimentales en laboratorio, durante el tiempo necesario obteniendo resultados satisfactorios que respaldaron esta investigación; el cual escalando su estudio se aplicara a un nivel industrial para el beneficio de la ciudad del Cusco.

CAPITULO I: METODOLOGIA DEL ESTUDIO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento económico y la producción de objetos en madera tales como artículos para el hogar, la construcción, etc., es cada vez más creciente en la Región de Cusco, a esto se suma la exigencia del mercado tanto en calidad y duración, pero si su tratamiento de secado no cumple tal exigencia entonces se suscitan problemas por este material, y surge la necesidad de solucionar dicho problema mediante el secado forzado con un horno solar que signifique: optimización, eficacia, economía y simplicidad en su aplicación para el secado de la madera en nuestra región.

El uso de los hornos solares en otras zonas fuera de nuestro país está optimizando el proceso de secado de la madera, por cuanto las diferencias que presenta la madera verde con la seca difiere mucho en propiedades y costos que se desconocen al adquirir un producto elaborado de este material, el cual genera carencia de madera seca en ciertas temporadas del año, lo que conlleva al alza de la misma, entonces la alternativa es la de ofrecer este diseño de horno para su aplicabilidad en el secado durante todo el año, que será explicada detalladamente más adelante.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La investigación se desarrolló mediante una secuencia de procesos y procedimientos para responder la interrogante:

¿EL HORNO SOLAR PROTOTIPO DISEÑADO PARA EL SECADO DE MADERA AGUANO OPTIMIZARA DE MANERA RAPIDA Y EFICIENTE EL PROCESO DE SECADO?

3. OBJETIVOS

3.1.OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un horno solar prototipo para el secado eficiente de la madera aguano en la región del Cusco.

3.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar los hornos solares para diseñar el horno prototipo solar de secado térmico para madera aguano.
- Desarrollar el sistema apropiado de flujo térmico durante el proceso de irradiación solar.
- Determinar y demostrar la funcionabilidad del horno solar prototipo.

4. JUSTIFICACIÓN

La investigación tecnológica actual aún no masifica el uso de los hornos solares para el secado de madera, porque existe escaso conocimiento en este campo, a esto se suma que en la mayoría de los talleres, aserraderos y pequeñas industrias madereras se desconoce las bondades del secado como un proceso fundamental e importante en cualquier desarrollo de un producto estable con las características y propiedades apropiadas. Al ser la madera un material de amplio uso con diversos propósitos, sobre todo en la carpintería, esta no se encuentra sujeta a las normas existentes por ignorancia, generando una incomodidad al comprador por este material tradicional.

Por consiguiente, la aplicación de un horno solar para el secado de madera generará un proceso de mayor intercambio comercial considerando sus características técnicas y económicas, promoviendo a la capacitación del

fabricante en beneficio del usuario, además de no perjudicar el medio ambiente ya que siendo un diseño ecológico será un aporte tecnológico. Por métodos naturales demora conseguir contenidos correspondientes a la humedad de equilibrio del lugar. Entonces, resulta poco conveniente o apenas un pre-secado para muchas industrias que manufacturan productos de madera que requieren un contenido de humedad (CH) más bajo.

5. ANTECEDENTES

El secado solar de maderas se ha desarrollado en los últimos 54 años iniciándose estudios simultáneamente en India (Rehman y Chawala, 1961) y en Estados Unidos (Johnson, 1961) en la década del 60.

Posteriormente, debido a la mejora en la eficiencia de los nuevos modelos de secadero, su uso se extendió a regiones de mayor latitud y condiciones climáticas no tan favorables para el secado solar por ejemplo los estudios de Jovanovski 1995 en Chubut. Desde entonces ha habido numerosos avances en la tecnología y se han hecho diferentes ensayos con este tipo de secaderos.

Con la finalidad de transferir a las PYMES (Pequeñas y medianas empresas), la incorporación de la tecnología de secado solar, ingenieros en tecnología de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (28 grados Lat. Sur)-Argentina realizaron un trabajo de diseño, cálculo, y construcción de una cámara de secado para maderas aserradas basadas en este tipo de energía. Debido al bajo costo se logra una mejora en la competitividad del producto secado con energía solar, agregándose también que desde el punto de vista ecológico, este método de secado constituye una respuesta a problemas de contaminación ambiental. (Taboada et al, 1996).

Se efectuó un investigación orientada a dar una solución tanto al mejoramiento técnico del proceso de secado y a la reducción de tiempos y costos que se dan en el secado al aire libre realizada con el objeto de demostrar que el secado de maderas en un secador solar da mejores resultados tanto el tiempo de secado, costos de secado y eficiencia del secador. Para esto se construyó un secador solar convencional para madera de laurel y junto a él una pila de madera de las mismas dimensiones con el fin de comparar los dos tipos de secado. Se tomaron mediciones tanto de temperatura; humedad relativa y contenido de humedad por aproximadamente 3 meses para el secador solar y 5 meses para el secado al aire libre, teniendo como resultados un contenido de humedad en las probetas de aproximadamente 15% en ambos casos, pero con la diferencia de 53 días de secado entre ambos, demostrando que se requiere de menor tiempo para secar madera en un secadero solar. (Tesis: Diseño y Construcción de un Secador para Maderas con Energía Solar. Luna Estrella Carlos y Cruz Vallejo Cristhian. Ecuador. 2003)

Los estudios recientes se desarrollaron con la aplicación de los principios fisicoquímicos, termodinámicos y de transferencia de calor para el trabajo de investigación de diseño y evaluación de un secador solar para el secado del ajo cuyos conocimientos teóricos se complementaron con la práctica de la misma (Tesis: Diseño, Construcción y Evaluación de un Secador Solar. Hatakeda Venero, Katherine Cusco. Perú 2006).

6. HIPÓTESIS GENERAL

El horno solar prototipo diseñado y construido para el secado de madera aguano, optimiza de manera rápida y eficiente el proceso de secado.

6.1. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El horno prototipo mejora el secado de la madera aguano.

- El sistema de flujo térmico realizado en el horno prototipo es apropiado para el secado.
- El diseño del horno prototipo es funcional, durante su operatividad.

A continuación se muestra el resumen de la operacionalización de las variables con las características propias de una tabla descrita precisamente para su clara comprensión en proporción a las variables del proceso de secado en nuestra investigación tecnológica.

Tabla 7-1: OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Dependiente:			
Humedad de la madera	Humedad contenida en la madera bajo tres formas: (agua libre, agua de saturación y agua de constitución).	Respectivamente en las cavidades celulares, paredes y constituyendo químicamente la pared celular.	Porcentaje del contenido de humedad de la madera:%CH
Independientes:			
Humedad relativa	Relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que pueda hallarse en ese volumen de aire.	Humedad contenida en el medio ambiente.	Porcentaje del contenido de humedad relativa: %CHR
Tiempo	Momento transcurrido de un proceso, etapa, situación, actividad, etc.	Desde el inicio hasta el final del proceso de secado.	Horas
Temperatura	Parámetro que mide el estado térmico de un cuerpo durante un determinado momento.	Cuantificación térmica dentro y fuera del horno prototipo.	Grados Celsius

Fuente: Autor

8. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Durante el proceso de investigación tecnológica, que responderá una dificultad técnica, la encaminaremos para demostrar la validez del procedimiento propuesto; aplicando el conocimiento científico para mostrar su eficacia en el proceso de secado. Entonces la metodología a utilizar considerando dos características importantes como son: la condición de estudio del fenómeno o hecho y la posibilidad de control y manipulación de las variables, serán:

- El **método experimental** donde estableceremos intencionadamente la condición, previo un plan para investigar las probables relaciones de causa efecto, exponiendo en un grupo experimental a la acción de la variable experimental, cuyos resultados contrastaremos con un grupo de comparación (secado natural).
- El **método bibliográfico-documental** donde se recopilara y sistematizara la información de fuentes contenidas en libros, tesis, artículos proyectos e investigaciones, etc., el cual lo sistematizaremos para luego interpretarlos.

9. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica de recolección de información, consistente en el acopio de la información, es directo y observacional a través de fichas estructuradas para luego serán analizadas y encausadas para su posterior procesamiento.

En la **instrumentación de la recolección**, los materiales utilizados son las:

- Guías de observación.
- Fichas estructuradas.

10. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis y tratamiento de la información para el estudio de investigación se consideró las siguientes herramientas y cuadros estadísticos como son:

- Formulas
- Tablas de Frecuencia.
- Gráficos.

Tabla 11-1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGIA
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿EL HORNO SOLAR PROTOTIPO DISEÑADO PARA EL SECADO DE MADERA AGUANO OPTIMIZARA DE MANERA RAPIDA Y EFICIENTE EL PROCESO DE SECADO?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Diseñar y construir un horno solar prototipo para el secado eficiente de la madera aguano en la región del Cusco.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Estudiar los hornos solares para diseñar el horno prototipo solar de secado térmico para madera aguano. ▪ Desarrollar el sistema de flujo térmico apropiado durante el proceso de irradiación solar. ▪ Determinar y demostrar la funcionalidad del horno solar prototipo. 	<p>HIPOTESIS GENERAL</p> <p>El horno solar prototipo diseñado y construido para el secado de madera aguano, optimiza de manera rápida y eficiente el proceso de secado.</p> <p>HIPOTESIS ESPECIFICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El horno prototipo diseñado mejora el secado de la madera aguano. ▪ El sistema de flujo térmico realizado en el horno prototipo es apropiado para el secado. ▪ El diseño del horno prototipo es funcional, durante su operatividad. 	<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Humedad de la madera. <p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Humedad relativa ▪ Tiempo ▪ Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ %CH ▪ %CHR ▪ Horas ▪ °C 	<p>Durante el proceso de investigación tecnológica, que responderá una dificultad técnica, la encaminaremos para demostrar la validez del procedimiento propuesto; aplicando el conocimiento científico para mostrar su eficacia en el proceso de secado. Entonces la metodología a utilizar considerando dos características importantes como son: la condición de estudio del fenómeno o hecho y la posibilidad de control y manipulación de las variables, serán:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El método experimental donde organizaremos deliberadamente la condición, previo un plan para investigar las relaciones de causa efecto, exponiendo en un grupo experimental a la acción de la variable experimental, cuyos resultados contrastaremos con una comparación (secado natural). ▪ Con el método bibliográfico-documental recopilaremos y sistematizaremos la información de fuentes contenidas en libros, tesis, artículos, proyectos e investigaciones, etc. ▪ Con el método evolutivo, investigaremos las secuencias del desarrollo de los resultados en la parte experimental.

Fuente: Autor

CAPTULO II: MARCO CONCEPTUAL

2.1. HORNOS SOLARES

2.1.1. DEFINICION

De efecto invernadero, se fundamenta en la captura de la radiación solar en un recinto orientado al sol y aislado térmicamente. El calor del sol es captado a través de una superficie transparente que produce el efecto invernadero en el interior.

Los hornos solares son de diferentes tipos, pero su importancia descansa en el tipo de colector quien absorbe la energía térmica solar para luego irradiarla en el interior del horno; dicho calor no se puede cambiar debido al flujo variable de calor en el proceso de secado, esto sujeto al clima impredecible, además esta los costos adicionales de los ventiladores que funcionan con energía solar. Finalmente durante el proceso de secado de la madera ocurren ciertos cambios que se debe tener en cuenta ya que esta depende del clima en el momento del secado.

Al igual que otros hornos convencionales también los hornos solares son cámaras que contienen en su interior un colector de calor el cual lo incide sobre el entorno en el cual se encuentra apilado la madera durante el cual ocurre una serie de flujo y reflujo de aire frío el que ingresa por aberturas calentándose para fluir por el interior del horno a medida que va extrayendo la humedad de la madera apilada. En ella se encuentra dos áreas importantes una la

parte superior donde se calienta el aire por el colector y la otra en la parte inferior donde se apila la madera a ser secado.

El principio básico de un horno solar es sencillo y de bajo costo ya que los materiales que se emplean en su construcción son de bajo costo su funcionamiento es el siguiente: se hace la captación del calor a través de un material transparente sobre el colector quien absorbe la energía térmica para luego irradiarla en el interior y calentando el aire frío que ingresa al interior el que fluye evaporando el agua contenida en la madera apilada en la parte interior del horno el cual se acomoda de forma ordenada y de una manera que el aire caliente extraiga la humedad que contiene, hasta que se llega al porcentaje deseado, una vez terminado se deja enfriar naturalmente para luego retirar las maderas.

2.1.2. TIPOS DE HORNO SOLAR

Los hornos solares se pueden clasificar en:

1. **Tipo invernadero**, todas las paredes y techo cubierto de material transparente y colectores solares dentro de la estructura. Estos a su vez se dividen en tres tipos:
 - Convección simple sin ventiladores y ventilación simple.
 - Secaderos con ventiladores (ventilación simple)
 - Secaderos con ventiladores (ventilación controlada) a través de la humedad o humedad y temperatura.

2. **Tipo semi-invernadero cubierta**, y alguna de sus paredes construidas con material transparente mientras que el resto de las paredes y el piso están contruidos con material aislante

para reducir la pérdida de energía. A su vez se dividen en dos tipos:

- Un solo colector solar integrado al horno de secado.
- Con uno o más colectores solares tipo caja contiguos al horno de secado.

3. **Horno solar con colector externo**, conectado al recinto de secado por medio de ductos aislados.

4. **Horno solar con deshumidificador** para reducir la humedad del aire que circula dentro del recinto de secado.

2.1.3. COLECTOR Y SU CLASIFICACION

Un colector solar es un intercambiador de energía, que transforma la energía radiante del sol en calor. El sistema más conocido de aprovechamiento de la energía solar es el colector o captador solar, que absorbe la radiación del Sol y transmite la energía absorbida a un fluido portador (principalmente agua, aunque también se puede utilizar aire o una mezcla de agua con otros líquidos). El colector, además de absorber la radiación solar, emite radiación térmica y pierde energía por conducción y convección. Los colectores solares comerciables actualmente tienen un elevado grado de absorción (minimizando la reflexión y la transmisión) y un bajo nivel de pérdidas caloríficas.

El colector o captador solar absorbe la energía solar para luego transmitirla a un medio fluido el cual lo transporta la energía térmica calentando el medio donde se aplicara su objetivo. Si el colector está unido a un depósito de almacenamiento, entonces el fluido irá

transportando el calor hacia el depósito, donde la temperatura del fluido irá aumentando

Se han diseñado distintas y avanzadas versiones de colectores solares térmicos con el objetivo de incrementar la cantidad de energía absorbida y disminuir las pérdidas. Los más comunes son los colectores planos, que utilizan como fluido el agua. La mayoría de colectores solares planos son colectores con vidrio, aunque también los hay sin él. En la actualidad también se comercializan colectores solares tubulares de vacío, con los que se consiguen temperaturas más elevadas. Existen otro tipo de colectores que utilizan aire como fluido.

El principio de funcionamiento del colector solar se basa en la trampa de calor que una superficie acristalada produce (conocido como efecto invernadero). La radiación incidente del Sol de onda corta, atraviesa el cristal y es absorbida por una superficie que se calienta. Ésta, a su vez, emite radiación térmica (de onda larga), pero esta radiación es atrapada por el cristal, que impide su paso

Los sistemas fototérmicos convierten la radiación solar en calor y lo transfieren a un fluido de trabajo. El calor se usa entonces para calentar edificios, agua, mover turbinas para generar electricidad, secar granos o destruir desechos peligrosos. Por el tipo de trabajo los colectores térmicos solares se dividen en tres categorías:

- **Colectores de baja temperatura.** Proveen calor útil a temperaturas menores de 65 °C mediante absorbedores metálicos o no metálicos para aplicaciones tales como calentamiento de piscinas, calentamiento doméstico de agua para baño y, en general, para todas aquellas actividades

industriales en las que el calor de proceso no es mayor de 60 °C, por ejemplo el secado de granos, secado de madera la pasteurización, el lavado textil, etc.

- **Colectores de temperatura media.** Son los dispositivos que concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100 y 300 °C. En esta categoría se tiene a los concentradores estacionarios y a los canales parabólicos, todos ellos efectúan la concentración mediante espejos dirigidos hacia un receptor de menor tamaño. Tienen el inconveniente de trabajar solamente con la componente directa de la radiación solar por lo que su utilización queda restringida a zonas de alta insolación.
- **Colectores de alta temperatura.** Existen en tres tipos diferentes: los colectores de plato parabólico, la nueva generación de canal parabólico y los sistemas de torre central. Operan a temperaturas superiores a los 500 °C y se usan para generar electricidad y transmitirla a la red eléctrica; en algunos países estos sistemas son operados por productores independientes y se instalan en regiones donde las posibilidades de días nublados son remotas.

2.1.4. VENTILACION FORZADA Y SU DISPOSICION

En una cámara con ventilación forzada, los ventiladores se pueden ubicar a los lados de la carga o sobre un cielo falso, el que se ubica aproximadamente en la parte más alta de la pila de madera.

- **Con ventiladores en eje longitudinal**

En este modelo los ventiladores, se disponen a intervalos regulares en un eje conductor que atraviesa la cámara de secado en forma longitudinal.

- **Con ventiladores en ejes transversales**

En este tipo de hornos los ventiladores van montados en ejes cortos alineados y no es necesario desviar el aire.

2.1.5. HORNOS INDUSTRIALES.

Se clasifican en dos tipos que se describen a continuación:

- **Hornos continuos (progresivos):** Este tipo de hornos se usan en procesos continuos de grandes volúmenes de producción. Consisten en un largo túnel por el que circulan los paquetes de madera y se caracterizan porque entra por un extremo del horno en estado verde y es sacudida hasta salir por el otro extremo del horno, con el contenido de humedad final requerido. A medida que la madera avanza por el túnel, el clima dentro del horno es controlado para proporcionar una atmósfera progresivamente más caliente y con menor humedad, de acuerdo con el programa de secado.
- **Hornos de compartimentos:** Este tipo de hornos es el más usado. Consiste en una capa hermética en la que se introduce la carga de madera encastillada de forma descrita para el secado en horno. Al contrario de los hornos continuos la madera permanece inmóvil. Las condiciones ambientales son homogéneas en la totalidad de la cámara, son cambiadas y

reguladas según el programa establecido para el procedimiento a medida que avanza el proceso.

2.1.6. ETAPAS DE SECADO

El proceso térmico se da en etapas de secado, las cuales son explicadas claramente para comprender lo que ocurre durante el proceso de secado en la madera, dentro de la cámara del horno prototipo. y que se muestra en la figura 2-1.

Primera etapa: Aquí se aporta inicialmente el aire caliente con la temperatura adecuada para homogenizar la carga en el horno.

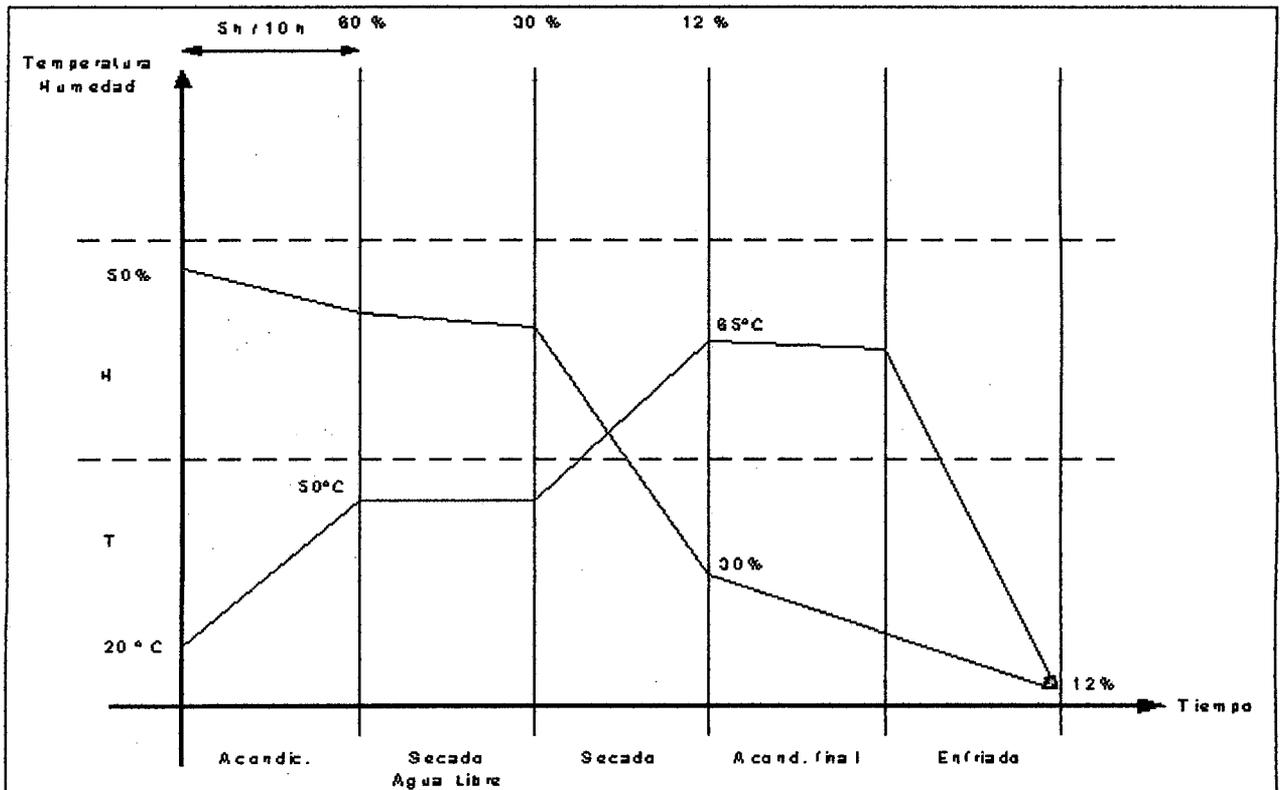
Segunda etapa: Se va elevando la temperatura hasta que se evapora el agua libre. (21 % a 32% del contenido de humedad: CH).

Tercera etapa: Con el incremento de la temperatura y con ayuda de los ventiladores, el secado se lleva hasta eliminar el agua de saturación (12% a 18% del CH).

Cuarta etapa: En ésta etapa, lo que se busca es que la madera, entre en equilibrio con el ambiente en el que esté rodeado, por consiguiente se deja de proporcionar calor al horno.

Quinta etapa: Antes de que la madera salga al ambiente hay que esperar que se equilibre con el ambiente, si no puede sufrir defectos en la madera.

Figura 2-1: Etapas de secado en la madera



Fuente: Manual del Grupo Andino para el secado de maderas

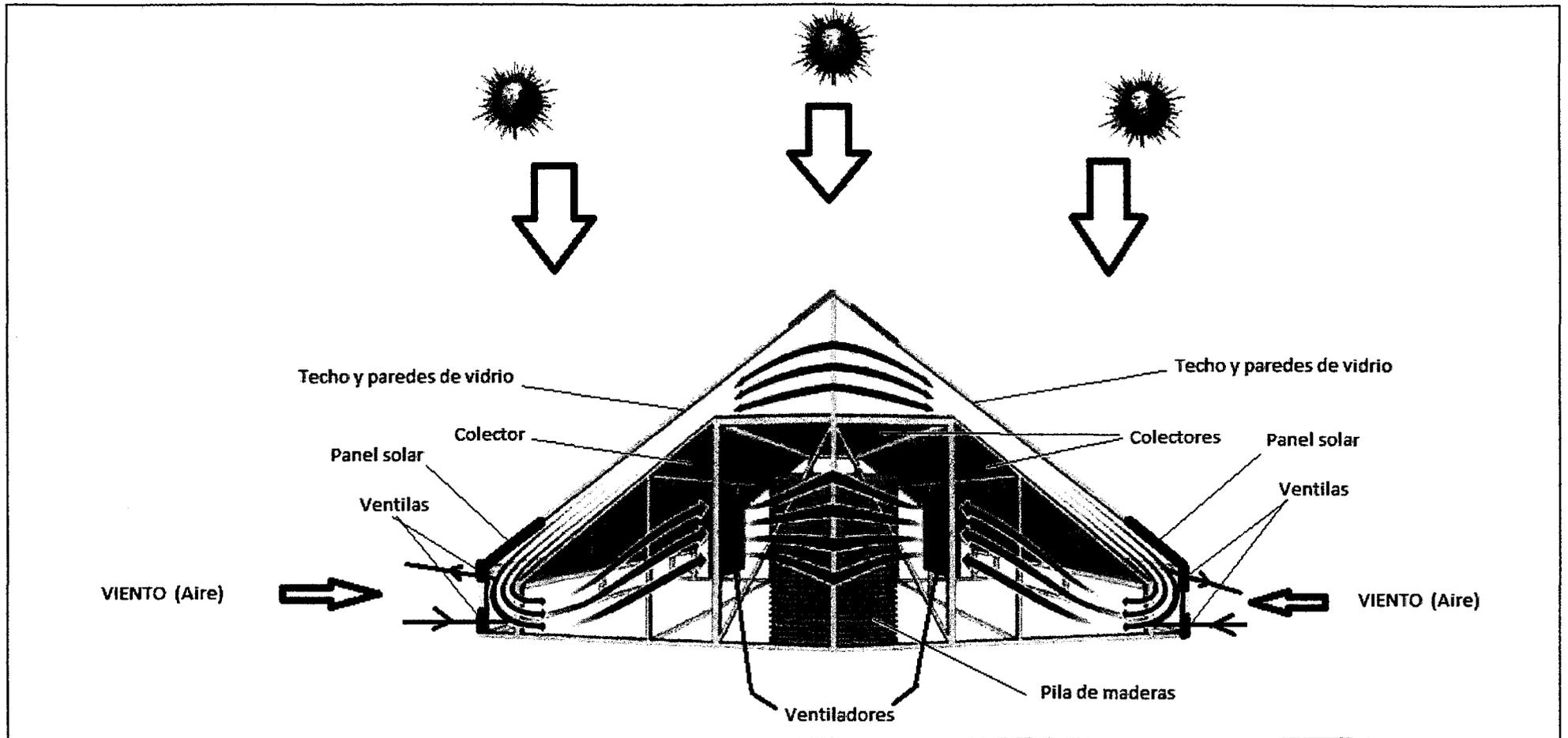
2.1.7. FUNCIONAMIENTO DEL HORNO SOLAR

Una cuidadosa construcción, basada en un diseño que permita captar en la mejor forma la energía térmica derivada de la radiación solar hará que el funcionamiento sea eficaz. Por lo tanto, la orientación del techo y del colector deberá ser tal, que el ángulo de incidencia de los rayos solares sea el menor posible para evitar su reflexión y aumentar el índice de refracción. Esta orientación depende de la latitud sin embargo se debe procurar que el ángulo de incidencia no varíe más de 4 °C en las diferentes épocas del año.

En su funcionamiento, los rayos solares deben atravesar el techo transparente y llegar al colector en donde la energía de radiación se transforma en energía térmica.

El aire al ingresar del exterior se calienta al pasar a través del colector y procede a secar la madera al circular dentro del secador. El aire húmedo es expulsado a través de las ventanillas o recirculado para calentarlo nuevamente al paso por el colector. Generalmente, hacia el mediodía se logran las temperaturas más altas, mientras que al amanecer llega a sus límites más bajos. Por lo tanto las ventanillas (si tuvieran puertas) permanecen cerradas durante la noche y se abren en el día según las exigencias del secado.

Figura 2-2: Diseño ideal del horno solar para secado de madera.



Fuente: Autor

2.1.8. EFICIENCIA Y FORMULACIÓN

Su eficiencia de estos hornos está en función de la capacidad de transformar la radiación solar en calor y la capacidad de aprovechar ese calor para calentar el aire y evaporar el agua de la madera.

Considerando estas nociones fundamentales, las pérdidas de calor son importantes y estas pérdidas se producen en el mismo techo transparente, por el ángulo de incidencia de los rayos solares y la energía que éste absorbe, en las paredes por radiación, conducción y convección, aunque éstas se reducen con materiales de bajo porcentaje de transmisión. Otras pérdidas de importancia se producen en las compuertas, por la energía requerida para colectar el aire fresco y la que se pierde con el aire húmedo.

Desde otro punto de vista la eficiencia de los secadores solares depende en gran medida del clima del sitio. Para secar madera en forma eficaz y sin daños excesivos se requiere no solamente una temperatura elevada, sino que es indispensable un debido control del clima dentro del secadero solar. Las dimensiones, partes y la madera están relacionadas, como también efectuadas el procesamiento de datos en función de la formulación¹ obtenida de tres bibliografías y son las siguientes:

¹Carlos Luna Estrella y Cristhian Cruz Vallejo, Tesis: Diseño y Construcción de un Secador para maderas con Energía Solar. Universidad Tecnológica Equinoccial Quito Ecuador. 2003.

Transferencia de Calor y Masa. Yunus a. Cengel. Tercera edición. 2007. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México.

Katherine Hatakeda Venero, Tesis: Diseño, Construcción y Evaluación de un Secador de Ajo. Tesis Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. (2006).

ÁREA EFECTIVA DE EVAPORACIÓN

Referida a la mayor superficie de la madera en contacto con el aire:

$$A_e = \frac{2V_t}{e} [\text{m}^2] \quad (2-1)$$

Donde:

A_e = Área de evaporación

V_t = Volumen de una probeta

e = Espesor de la probeta

Con este valor se puede calcular el área efectiva de evaporación, reemplazando en la ecuación:

$$A_{et} = (A_e - A_l) [\text{m}^2] \quad (2-2)$$

Donde:

A_{et} = Área efectiva de evaporación

A_e = Área de evaporación

A_l = Área de los listones de la fila"

PROCESAMIENTO DE LA RAZÓN DE AGUA EVAPORADA

Primero se saca el peso total de la madera a partir de:

$$m = D \cdot V_p [\text{kg}] \quad (2-3)$$

Donde:

m = Peso de la pila de madera

D = Densidad de la madera

V_p = Volumen de madera real a secarse

$$\text{Después: } V_p = A_{et} \cdot h_p \quad [\text{m}^3] \quad (2-4)$$

Donde:

h_p = Altura de la pila

A partir del valor de m se obtiene la razón de agua evaporada:

$$AE = m(X_i - X_f) \left[\frac{\text{kg}}{\text{carga}} \right] \quad (2-5)$$

Donde:

AE = Razón de agua a evaporar

X_f = Humedad final de la madera

X_i = Humedad inicial de la madera

CALOR SENSIBLE PARA CALENTAR LA MADERA AGUANO

$$q_1 = m_p * C_p * \Delta T \quad (2-6)$$

Donde:

m_p = Masa de la madera humeda

C_p = Calor especifico de la madera

ΔT = Diferencia de temperatura entre el medio ambiente y el interior de la cámara de secado.

CALOR NECESARIO PARA EVAPORAR EL AGUA CONTENIDA EN LA MADERA

$$q_2 = m * h_{fg} \quad (2-7)$$

Donde:

m =Masa de agua evaporada durante el proceso de secado

h_{fg} =Calor latente del agua a 30.04°C = 579.6 kcal/h

CALOR ÚTIL

Entonces el calor útil será:

$$Q_u = q_1 + q_2 \quad (2-8)$$

EFICIENCIA TÉRMICA EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA DE SECADO:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{rad}} * 100 \quad (2-9)$$

Donde:

Q_u = Calor útil

Q_{rad} = transferencia de calor por radiación

CANTIDAD DE AIRE QUE DEBE PASAR POR EL SECADOR

Relación de razón de agua a evaporar con la humedad específica del aire, esta es una constante que se saca de la carta psicrométrica en base a la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.

$$M = \frac{A_{em}}{Y} \left[\frac{\text{Kg aire seco}}{h} \right] \quad (2-10)$$

Donde:

M = Cantidad de aire que debe pasar por el secador

$$Y = \text{Constante} = \frac{0.016 \text{ Kg agua /h}}{\text{Kg aire seco}}$$

El A_{em} se calcula así:

$$A_{em} = \frac{AE}{t_s} \quad (2-11)$$

CALOR REQUERIDO PARA EVAPORAR EL AGUA DE LA MADERA

$$Q_c = H_v - H_a \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right] \quad (2-12)$$

Donde:

Q_c = Calor necesario para evaporar el agua

H_v = Entalpia de vapor de agua

H_a =Entalpia del agua

Estas dos entalpias se determinan en base a la temperatura ambiente del agua y de ebullición:

T_a =Temperatura ambiente es 23.10°C con lo que
 H_a =20.03 Kcal/Kg

T_e =Temperatura de ebullición es 87.9°C con lo que
 H_v =633.20 Kcal/Kg

CALOR REQUERIDO PARA EVAPORAR LAS AE EN LA MADERA:

$$Q_m = Q_c \cdot AE \text{ [Kcal]} \quad (2-13)$$

Q_m = Calor requerido para evaporar la razón de agua a evaporar (AE del agua contenida en la madera).

2.2. ENERGÍA SOLAR

Energía² radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del

²Transferencia de calor y masa. Yunus A. Cengel. Tercera edición.2007Mcgraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México

Sol, se llama constante solar, su valor medio es $1,37 \times 10^6 \text{ erg/s/cm}^2$, o 2 cal/min/cm^2 . Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0,2% en un periodo de 30 años. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera. La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

En su forma de radiación solar es emitida por el sol, propagándose en distintas direcciones por medio de ondas electromagnéticas que incide sobre la atmosfera terrestre sucediendo distintos fenómenos (rayos incidentes: radiación directa, radiación difusa, radiación global y la radiación reflejada); la que incide sobre la superficie terrestre es la radiación difusa o directa. Esta cantidad de radiación se expresa en términos de irradiación, energía que se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie, cuyas unidades son el J/m^2 , cal/cm^2 , Kw/m^2 .

2.2.1. DATOS DEL CLIMA

Estos datos³ serán determinantes en los cálculos del diseño del horno solar, que a continuación se indican:

- **ALTITUD:** La altitud es de 3,380 metros sobre el nivel del mar.
- **LATITUD:** Es de $13^\circ 30' 45''$. Nuestra latitud indica que deberíamos tener tiempos tropicales o ecuatoriales, pero no es así. Cusco es fresco debido a su altitud.

³ www.senamhi.gob.pe

- **LONGITUD:** Es de 71° 58' 33" .Estamos 5 horas después del tiempo Greenwich.
- **TEMPERATURA:** Existen dos temporadas muy marcadas: temporada seca, de abril a agosto, con intenso frío en las mañanas y en las noches (tiempo de heladas); temporada de lluvias, de noviembre a marzo. La temperatura media anual máxima es 19,6°C (67.3°F) y la mínima 4,2°C (39,6°F).
- **HUMEDAD RELATIVA:** La humedad relativa promedio es de 28%
- **PRESIÓN ATMOSFERICA:** Es de 103.00 mbar

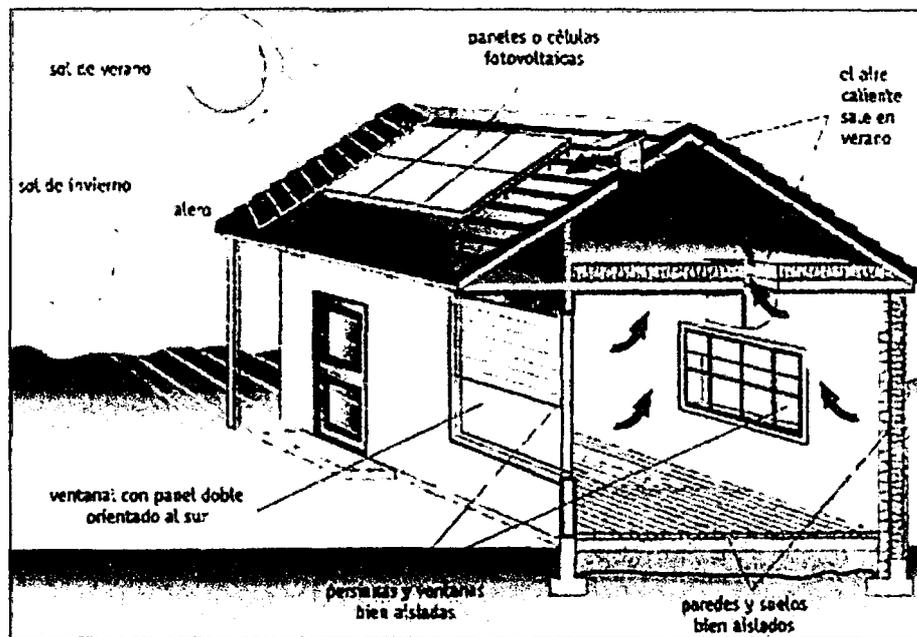
2.2.2. FUNDAMENTOS DE LA ENERGIA SOLAR

Es la energía obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La radiación solar que llega a la tierra se capta mediante colectores o captadores; con diferentes tecnologías la aprovechan para diversos usos; ya que puede ser transformada esta energía -las llamadas energías alternativas- en la actualidad su investigación y aplicación está en auge debido al cambio climático, la crisis de los combustibles fósiles, la contaminación ambiental y factores económicos (costo del dispositivo fotovoltaico y otros). Su uso en la actualidad generalmente es para calentar, secar objetos y alimentos respectivamente; en la forma de energía térmica y como electricidad a través de paneles fotovoltaicos respectivamente; el cual se puede observar en la fig.2-3.

Emite radiación en forma continua a razón de $E_{sol} = 3.8 \times 10^{26} W$. Menos de una mil millonésima parte de esta energía (alrededor de

$1.7 \times 10^{17} \text{W}$) choca contra la Tierra, lo cual es suficiente para mantenerla caliente y sostener la vida a través del proceso de fotosíntesis, esta pequeña cantidad energía que se irradia desde el sol hasta el espacio llega a la tierra. Aun así esta cantidad de energía es suficiente, porque llegando a la tierra en un sólo día sería suficiente para abastecer a nuestro planeta por un año y medio, esto si la aprovecháramos eficientemente.

Figura 2-3: Proceso de uso y aplicación de la energía solar



Fuente: www.tecnun.es.

Alrededor del 15 % de la energía del sol que llega a la tierra se refleja de regreso al espacio. Un 30% se utiliza para evaporar agua, que al elevarse a la atmósfera produce lluvia. La energía solar también la absorben las plantas y los océanos. El resto de la energía solar es la que tenemos disponible para cubrir nuestras necesidades energéticas (luz, electricidad, calor, etc.).

Los seres humanos se benefician de la energía solar por épocas desde el siglo VII a.C., las personas utilizaban lupas magnificadoras para concentrar la luz del sol en rayos tan calientes que podían encender llamas en la madera. Hace más de 100 años, en Francia, un científico utilizó el calor del sol para producir vapor y echar a andar un motor de vapor. A principios del siglo pasado, gran cantidad de científicos e ingenieros comenzó a investigar diferentes maneras para aprovechar la energía solar. Un desarrollo importante fue un calentador solar para agua inventado por Charles Greeley Abbott, un astrofísico norteamericano, en 1936.

Cualquier persona que quiera aprovechar la energía solar debe ser capaz de responder a la pregunta de qué cantidad de energía llega al lugar donde prevé realizar la captación, cada hora, cada mes, cada año o en promedio (horario, mensual, anual). Para ello es necesario comprender el movimiento relativo de la Tierra y el Sol. La Tierra gira alrededor del Sol describiendo una órbita elíptica. Al mismo tiempo, gira sobre ella misma alrededor de un eje, tardando un día en hacer este giro.

2.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA SOLAR

Ya se usa la energía solar en los combustibles fósiles que son restos de vida vegetal con fotosíntesis con la luz del sol; las plantas hidroeléctricas dependen de que el sol evapore el agua que desciende después en forma de lluvia, y la energía eólica depende de las corrientes de convección que produce el sol al calentar la atmósfera. Los sistemas de calefacción solar activa, se puede emplear como calefacción de recintos, o sea, para mantener calientes los interiores de las construcciones, y también para calentar agua. La llamada calefacción solar pasiva la dan accesorios arquitectónicos para emplear bien la energía solar, ejemplo orientar

las ventanas hacia el sur para captar los rayos solares durante el invierno, pero evitar que entren los rayos solares durante el verano.

El principio básico común a todos los sistemas solares térmicos es simple; la radiación solar es captada y el calor se transfiere a un medio portador de calor, generalmente un fluido –agua o aire–.El medio calentado se puede usar directamente-Ej., las piscinas–, o indirectamente, mediante un intercambiador de calor que transfiere el calor a su destino en la última etapa –Ej., la calefacción de un ambiente.

2.2.4. TIPOS DE ENERGÍA SOLAR

- **Proceso directo:** Sus aplicaciones de la energía solar es directamente como luz solar, ejemplo para la iluminación de recintos. En este sentido, cualquier ventana es un colector solar; también el secado de ropa y algunos productos en procesos de producción con tecnología simplificada.
- **Energía térmica:** Denominado así la energía solar cuyo aprovechamiento se logra por calentamiento de algún medio, ejemplo la climatización de viviendas, calefacción, refracción, secado, etc., son aplicaciones térmicas.
- **Transformación fotovoltaica:** En este caso la energía solar es aprovechada por medio de celdas fotoeléctricas, transformando la luz en un potencial eléctrico, sin pasar por una consecuencia térmica.

2.2.5. EL CALOR

El **calor**⁴, forma de energía que se transfiere entre diferentes cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas, en termodinámica generalmente el término calor significa simplemente transferencia de energía hasta que ambos cuerpos se encuentren en equilibrio térmico (ejemplo: una bebida fría dejada en una habitación se entibia). Cabe resaltar que los cuerpos no tienen calor, sino energía térmica, que a continuación mostramos:

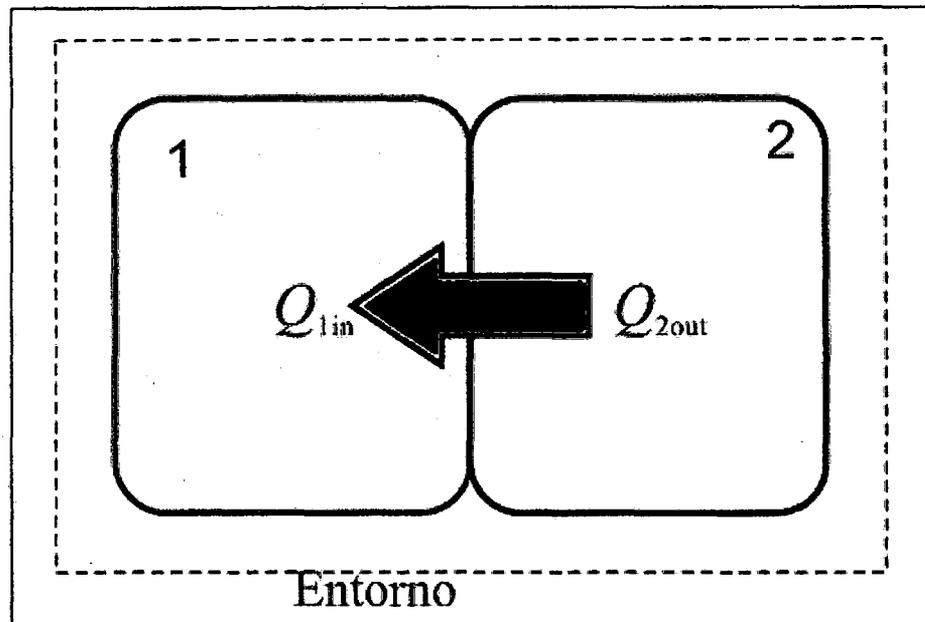
Figura 2-4: Proceso del Calor



Fuente: <http://enroquedeciencia.blogspot.com>

⁴<http://es.wikipedia.org>

Figura 2-5: Flujo del calor



Fuente: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Calor_y_calorimetria

2.2.6. TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor puede ser transmitido de tres formas distintas, que a continuación se describe:

- **Conducción térmica:** Es el proceso que se produce por contacto térmico entre dos o más cuerpos, debido al contacto directo entre las partículas individuales de los cuerpos que están a diferentes temperaturas, resultando que las partículas lleguen al equilibrio térmico. Ej.: cuchara metálica en la taza de té.

- **Convección térmica:** Sólo se produce en fluidos (líquidos o gases), ya que implica movimiento de volúmenes de fluido de regiones que están a una temperatura, a regiones que están a otra temperatura. El transporte de calor está inseparablemente ligado al movimiento del propio medio, Ej.: los calefactores dentro de la casa.

- **Radiación térmica:** Es el proceso por el cual se transmite a través de ondas electromagnéticas. Implica doble transformación de la energía para llegar al cuerpo al que se va a propagar: primero de energía térmica a radiante y luego viceversa. Ej.: La energía solar.

Esta energía calorífica se transmite desde las zonas de alta temperatura a las de baja temperatura, en un proceso que va acompañado de un cambio de entropía hasta que se alcanza, si es posible, el estado de equilibrio térmico caracterizado por una distribución uniforme de temperaturas. Denominamos calor a la transferencia de energía que tiene lugar sin un movimiento ordenado del sistema, en contraposición a la transferencia de energía que tiene lugar con un movimiento ordenado durante la realización de un trabajo mecánico.

2.2.7. TERMODINÁMICA

La termodinámica se interesa en la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso, sin indicar cuánto tiempo transcurrirá. Un estudio termodinámico sencillamente nos dice cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico, con el fin de cumplir con el principio de

conservación de la energía. En la experiencia nos enfocamos más en la velocidad de la transferencia de calor que en la cantidad transferida. La termodinámica trata de los estados en equilibrio y de los cambios que ocurren entre un estado de equilibrio y otro. Por otra parte, la transferencia de calor se ocupa de los sistemas en los que se presenta desequilibrio térmico y, por tanto, existe una condición de no equilibrio. En consecuencia, el estudio de la transferencia de calor no puede basarse sólo en los principios de la termodinámica; sin embargo, existen leyes de la termodinámica que constituyen la base científica de la transferencia de calor.

La primera ley de la termodinámica establece que la velocidad de transferencia de energía hacia un sistema es igual a la velocidad de incremento de la energía de dicho sistema. Su segunda ley, establece que el calor se transfiere en dirección de la temperatura decreciente. El requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura. No existe la más mínima posibilidad de que se dé transferencia neta de calor entre dos medios que están a la misma temperatura, esta diferencia de temperaturas constituye la condición básica necesaria para que se dé transferencia de calor.

Anteriormente mencionamos que el análisis termodinámico no se ocupa de la velocidad de la transferencia de calor en cierta dirección pero, ahora, podemos decir que este parámetro depende de la magnitud del gradiente de temperatura (o diferencia de temperatura por unidad de longitud, o la razón o relación de cambio de la temperatura en esa dirección). A mayor gradiente de temperatura, mayor es la velocidad de transferencia de calor.

▪ ÁREAS DE APLICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Es común encontrar la transmisión de calor en los sistemas de ingeniería y otros aspectos de la vida; y no es necesario ir muy lejos para ver algunas de sus áreas de aplicación. Es más, uno de los ejemplos más sencillos lo encontramos dentro del cuerpo humano, éste permanece emitiendo calor en forma constante hacia sus alrededores y la comunidad humana está íntimamente influenciada por la velocidad de esta emisión de calor. Tratamos de controlar la velocidad de esta transferencia de calor al ajustar nuestra ropa a las condiciones ambientales. Muchos aparatos domésticos se han diseñado, en su totalidad o en parte, aplicando los principios de la transferencia de calor. Algunos ejemplos incluyen la estufa eléctrica o de gas, el sistema de calefacción o de acondicionamiento del aire. La transferencia de calor desempeña un papel importante en el diseño de muchos otros aparatos, como los radiadores de automóviles, los colectores solares, diversos componentes de las plantas generadoras de energía e, incluso, las naves espaciales.

▪ TEMPERATURA

La **temperatura**⁵ es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. La fuerza impulsora para la transferencia de calor es la diferencia de temperatura. Como contraste, la fuerza impulsora para la transferencia de masa es la diferencia de concentración. Puede verse la temperatura como una medida de la “concentración de calor” y, de este modo, una región a alta temperatura es aquella que tiene una alta concentración de calor. Así el calor como la masa se

⁵ <http://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura>

transfiere de las regiones más concentradas hacia las menos concentradas. Si no hay diferencia de temperatura entre dos regiones, entonces no existe transferencia de calor. De modo semejante, si no existe diferencia entre las concentraciones de una especie en regiones diferentes de un medio, no habrá transferencia de masa.

▪ GENERACIÓN DE CALOR

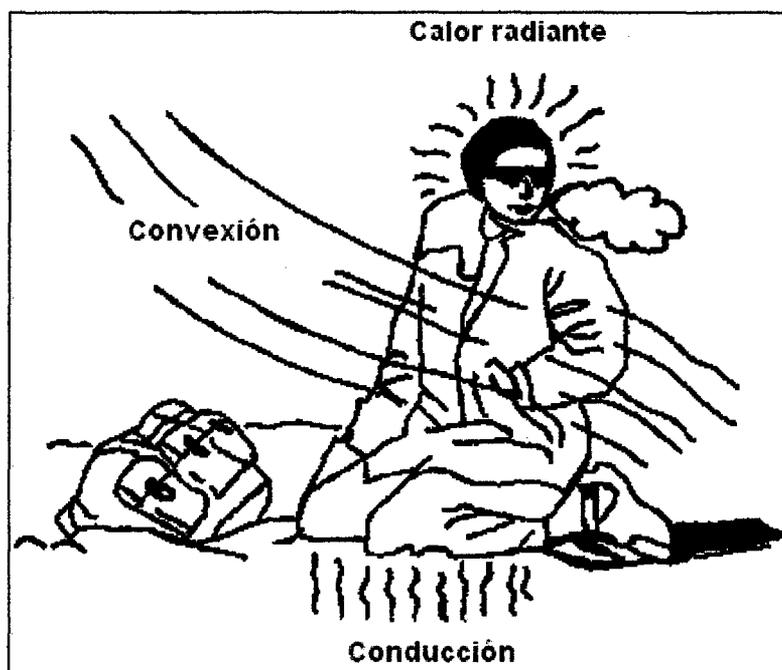
La generación de calor se refiere a la conversión de alguna forma de energía, como la eléctrica, la química o la nuclear, en energía térmica sensible en el medio. La generación de calor se desarrolla en toda la extensión del medio y se exhibe como una elevación de la temperatura. De manera análoga, en algunos problemas de transferencia de masa intervienen reacciones químicas que ocurren dentro del medio y dan como resultado la generación de una especie en toda su extensión. Por lo tanto, la generación de especies es un fenómeno volumétrico y la razón de generación puede variar de punto a punto en el medio. Esas reacciones que ocurren dentro del medio se llaman **reacciones homogéneas** y son análogas a la generación interna de calor.

En contraste, algunas reacciones químicas dan como producto la generación de una especie en la superficie, como resultado de que ocurren en la superficie debido al contacto entre el medio y los alrededores. Éste es un fenómeno superficial y como tal, necesita tratarse como una condición de frontera. En los estudios de transferencia de masa, esas reacciones se conocen como **reacciones heterogéneas** y son análogas al flujo especificado de calor en la superficie.

▪ TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA INGENIERÍA

Los problemas de capacidad nominal se ocupan de la determinación de la velocidad de transferencia de calor para un sistema existente con una diferencia específica de temperatura. Los problemas de dimensionamiento se ocupan de la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una velocidad determinada para una diferencia específica de la temperatura. Un proceso o un equipo de transferencia de calor pueden ser analizados de forma experimental o de forma analítica. El procedimiento experimental tiene la ventaja de tratar con el sistema físico real y, gracias a ello, la cantidad deseada se determina mediante medición, dentro de los límites del error experimental. El procedimiento analítico tiene la ventaja de que es rápido y barato, pero los resultados obtenidos dependen de la exactitud de las hipótesis e idealizaciones establecidas en el análisis. Siempre que existe un gradiente de temperatura en un sistema (contacto de dos sistemas a diferentes temperaturas) se transfieren energía, por tanto el flujo de calor es el resultado de la falta de equilibrio en las temperaturas. El proceso del transporte de energía se conoce como transferencia de calor e involucran la transferencia y conversión de energía, y son: conducción, convección y radiación, la que se ilustra en la fig. 2-6.

Figura 2-6: Transmisión del calor



Fuente: www.academiatesto.com.ar

2.2.8. TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

La teoría de corta duración del calórico, referente al calor, es el origen de la mayor parte de la terminología de la transferencia de calor usada en la actualidad y sirvió bien para sus fines hasta que se reemplazó por la teoría cinética. En esencia, la masa es energía, ya que masa y energía pueden convertirse una en la otra según la fórmula de Einstein $E = mc^2$, en donde c es la velocidad de la luz. Por lo tanto, la masa y el calor pueden mirarse como dos formas diferentes de energía y explotar ventajosamente esto, sin irse por el límite. Se recordará que el calor se transfiere por conducción, convección y radiación⁶. Sin embargo, la masa se transfiere sólo por conducción (llamada difusión) y convección, y no existe algo llamado "radiación de masa".

⁶ Transferencia de calor y masa. Yunus A. Cengel. Tercera edición. 2007 McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México

A. CONDUCCIÓN

Es el proceso mediante el cual fluye el calor desde una región de temperatura alta a una de temperatura baja a través de un medio sólido, líquido o gaseoso o entre medios diferentes en contacto físico. Aquí la energía se transmite por comunicación molecular directa en desplazamiento apreciable a las moléculas.

La razón de conducción del calor en una dirección x es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx en esa dirección y se expresa por la **ley de Fourier de la conducción del calor** como:

$$Q_{\text{cond}} = -k * A * \left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right) [w] \quad (2-14)$$

Donde:

A = Área de la pared

k = Conductividad térmica del material

ΔT = Diferencia de temperatura: $T_2 - T_1$

Δx = Espesor de la pared (vidrio)

De modo semejante, la razón de difusión de masa m_{dif} de una especie química A en un medio en reposo, en la dirección x , es proporcional a la gradiente de concentración dC_A/dx en esa dirección y se expresa mediante la **ley de Fick de la difusión**:

$$J = -D \frac{dc}{dx}; \quad J = \frac{m_{\text{dif}}}{A}$$
$$\Rightarrow m_{\text{dif}} = -D_{AB} * A \frac{dC_A}{dx} \quad (2-15)$$

Donde:

D_{AB} = Coeficiente de difusión (o difusividad de la masa) de la especie en la mezcla

C_A = Concentración de esa especie en la mezcla en ese lugar.

B. CONVECCIÓN

Se recordará que la convección de calor es el mecanismo de transferencia de calor en el que intervienen tanto la conducción de calor (difusión molecular), almacenamiento de energía como el movimiento de la masa de fluido. Esta forma de transporte tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre la superficie sólida y un flujo, sea líquido o gas. El movimiento del fluido mejora en forma considerable la transferencia de calor, al quitar el fluido calentado cercano a la superficie y reemplazarlo por el más frío que se encuentra más alejado. En el caso límite de que no hay ningún movimiento de la masa de fluido, la convección se reduce a conducción. De modo semejante, la **convección de masa** (o transferencia de masa por convección) es el mecanismo de transferencia de masa entre una superficie y un fluido en movimiento en el que intervienen tanto la difusión de masa como el movimiento de la masa de fluido. El movimiento del fluido mejora también en forma considerable la transferencia de masa, al quitar el fluido con alta concentración cercano a la superficie y reemplazarlo por el de concentración más baja que se encuentra más alejado.

En la convección de masa, se define una capa límite de concentración de manera análoga a la capa límite térmica y se determinan nuevos parámetros adimensionales, que son las contrapartes de los números de Prandtl y de Nusselt.

La razón de la convección de calor para el flujo externo se expresó en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) [w] \quad (2-16)$$

Donde:

Q_{conv} = Flujo de calor por convección

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección

A_s = Área de transferencia superficial

T_s = Temperatura de la superficie

T_{∞} = Temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

$T_s - T_{\infty}$ = Diferencia de temperatura de uno a otro lado de la capa límite térmica.

De modo semejante, la razón de la convección de masa puede expresarse como:

$$m_{\text{conv}} = h_{\text{masa}} \cdot A_s (C_s - C_{\infty}) \quad (2-17)$$

Donde:

h_{masa} = Coeficiente de transferencia de masa

A_s = Área superficial

$C_s - C_{\infty}$ = Diferencia apropiada de concentración de uno a otro lado de la capa límite de concentración.

▪ CONVECCIÓN DE MASA

Hasta ahora, se ha considerado la difusión de masa, la cual es la transferencia de masa debida a un gradiente de concentración. A continuación se considerará la convección de masa (o transferencia de masa por convección), la cual es la transferencia de masa entre una superficie y un fluido en movimiento, debido tanto a la difusión de masa como al movimiento de toda la masa de fluido.

Se mencionó con anterioridad que el movimiento del fluido mejora de manera considerable la transferencia de calor, al quitar el fluido calentado que está cerca de la superficie y reemplazarlo por el fluido más frío que se encuentra más alejado. De modo semejante, el movimiento del fluido mejora de manera considerable la transferencia de masa, al quitar el fluido con alta concentración que está cerca de la superficie y reemplazarlo por el fluido con concentración más baja que está más alejado. En el caso límite de que no se tenga movimiento de la masa de fluido, la convección de masa se reduce a la difusión de la misma, precisamente como la convección se reduce a conducción. La analogía entre la convección de calor y la de masa se cumple tanto para convección forzada como para la natural, para el flujo laminar como para el turbulento, así como para los flujos interno y externo.

Como la convección de calor, la de masa también es compleja debido a las complicaciones asociadas con el flujo de fluidos, como la configuración geométrica de la superficie, el régimen, la velocidad de flujo y la variación de las propiedades del fluido y de la composición. Por lo tanto, hay que apoyarse en relaciones experimentales para determinar la transferencia de masa. También, la convección de masa suele analizarse en términos de masa, en lugar de una base molar.

C. RADIACIÓN

La radiación es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo con alta temperatura a uno con baja temperatura, cuando estos están separados por un espacio que incluso puede ser el vacío. El término radiación se aplica a todas las clases de fenómenos de ondas electromagnéticas. La energía transmitida recibe el nombre de calor radiante.

La energía calorífica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura T , y que se propaga a la velocidad de la luz (porque es luz de distintas longitudes de onda) y puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura.

La radiación térmica otra forma de energía electromagnética parecida a las ondas de luz, rayos x, rayos gamma, etc. cuya diferencia es su longitud de onda, a través de ella se realiza el fenómeno de transferencia de calor entre dos estados con diferentes temperaturas. Basándose en la segunda ley de la termodinámica o ley de Stefan-Boltzmann se estableció que una fuente de calor emite energía radiante y viene dada por:

$$Q_{\text{emitida}} = \varepsilon * \sigma * A_s * T_s^4 [\text{w}] \quad (2-18)$$

Donde:

T = Temperatura termodinámica superficial

ε = Emisividad

A_s = Área de una superficie

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K}^4$

Cuando una superficie de emisividad ε y área superficial, A_s a una temperatura termodinámica T_s , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura termodinámica T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por:

$$Q_{rad} = \varepsilon * \sigma * A_s * [(T_s^4 - T_{alred}^4)] \quad (2-19)$$

Donde:

Q_{rad} = transferencia de calor por radiación

ε = Emisividad

T_s^4 = Temperatura termodinámica

T_{alred}^4 = Temperatura termodinámica alrededor

A_s = Área superficial

Para calcular las pérdidas de calor que se producen al ingresar el calor a la cámara de secado a través de las paredes de vidrio se debe partir de la ecuación general de transporte de calor, la cual es:

$$Q = U * A * \Delta T \quad [\text{Kcal/h}] \quad (2-20)$$

Donde:

U = Coeficiente de transferencia de calor total

A = Área transversal al flujo de calor

ΔT = Gradiente de temperatura responsable del transporte

D. ABSORTIVIDAD

La fracción de irradiación absorbida por la superficie se llama absorptividad α , propiedad de un material que determina la cantidad de radiación incidente que puede absorber. Por otro lado, representa en sí la fracción de radiación incidente que es absorbida por un material, con valores que van de 0.0 a 1.0 o de 0% a 100%; también denominada absorción superficial, depende fundamentalmente del color y el acabado de los materiales.

E. CUERPO NEGRO

Se define como un emisor y absorbedor perfecto de la radiación. A una temperatura y una longitud de onda específica, ninguna superficie puede emitir más energía que un cuerpo negro. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda ni la radiación. Asimismo, emite energía de radiación de manera uniforme en todas direcciones, por unidad de área normal a la dirección de emisión, también emite luz y constituye un sistema físico idealizado para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. El nombre cuerpo negro fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

Los objetos reales nunca se comportan como cuerpos negros ideales. En su lugar, la radiación emitida a una frecuencia dada es una fracción de la emisión ideal. La emisividad de un material especifica cuál es la fracción de radiación de cuerpo negro que es capaz de emitir el cuerpo real. La emisividad varía con la longitud de onda y dirección de la radiación emitida, la temperatura de la superficie, acabado de la superficie (pulida, oxidada, limpia, sucia, nueva, intemperizada, etc.) y ángulo de emisión.

Tabla 2-1: Comparación de absorptividad con la emisividad

Comparación de la absorptividad solar α_s de algunas superficies con su emisividad ϵ a la temperatura ambiente		
Superficie	α_s	ϵ
Aluminio pulido	0.09	0.03
Aluminio anodizado	0.14	0.84
Hoja de aluminio	0.15	0.05
Cobre pulido	0.18	0.03
Cobre deslustrado	0.65	0.75
Acero inoxidable pulido	0.37	0.60
Acero inoxidable opaco	0.50	0.21
Oxido negro de níquel	0.92	0.08
Cromo negro	0.87	0.09
Concreto	0.60	0.88
Mármol blanco	0.46	0.95
Ladrillo rojo	0.63	0.93
Asfalto	0.90	0.90
Pintura negra	0.97	0.97
Pintura blanca	0.14	0.93
Nieve	0.28	0.97
Piel humana (caucásica)	0.62	0.97

Fuente: Transferencia de calor y masa. Yunus A. Cengel. Tercera edición. 2007. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México.

En algunos casos resulta conveniente suponer que existe un valor de emisividad constante para todas las longitudes de onda, siempre menor que 1 (que es la emisividad de un cuerpo negro). Esta aproximación se denomina aproximación de cuerpo gris. Kirchhoff indica que en equilibrio termodinámico, la emisividad es igual a la absorptividad, de manera que este objeto, que no es capaz

de absorber toda la radiación incidente, también emite menos energía que un cuerpo negro ideal.

Tabla 2-2: Absortancia y emisividad de superficies

Absortancia y emisividad de superficies (materiales)		
Material (superficie)	Absortancia	Emisividad
Hoja de aluminio brillante	0.05-0.10	0.05-0.10
Lámina de aluminio con pátina de oxidación	0.30-0.50	0.20-0.50
Pintura de aluminio	0.40-0.55	0.40-0.55
Hierro galvanizado con patina normal	0.30-0.50	0.20-0.40
Encalado reciente	0.12	0.90
Madera	0.40	0.90
Ladrillo, teja, piedra	0.70	0.90
Concreto aparente	0.45-0.60	0.90
Pintura de aceite blanca	0.20	0.90
Pintura verde o gris, clara	0.40	0.90
Pintura verde o gris, oscura	0.70	0.90
Pintura negra, asfalto	0.85	0.90

Fuentes: M. Evans (1980) y B. Givoni (1976)

F. EMISIVIDAD

Emisividad de una superficie representa la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. La

emisividad de una superficie se denota por ϵ , varía entre 0 y 1, La emisividad es una medida de cuán cerca se aproxima una superficie a un cuerpo negro, para el cual $\epsilon = 1$. y para una superficie real no es constante, más bien, varía con la temperatura de la superficie, así como con la longitud de onda y la dirección de la radiación emitida. Todo cuerpo por encima del cero absoluto emite radiación. Es una propiedad de los materiales que informa sobre la capacidad o eficiencia de este para emitir radiación comparada con el cuerpo negro. El coeficiente de emisividad (ϵ), es un número adimensional que relaciona la habilidad de un objeto real para irradiar energía térmica, con la habilidad de irradiar si éste fuera un cuerpo negro:

$$\epsilon = \frac{R_s \text{ (radiación emitida por una superficie)}}{R_{cn} \text{ (radiación emitida si fuera un cuerpo negro)}} \quad (2-21)$$

Un cuerpo negro, por consiguiente, tiene un coeficiente $\epsilon = 1$, mientras que en un objeto real, ϵ siempre se mantiene menor a 1.

Tabla2-3: Coeficiente de emisividad de cuerpos reales

Coeficientes de emisividad para diferentes objetos reales		
Metales	T(°C)	ϵ
Aluminio	170	0.05
Acero	-70...700	0.06...0.25
Cobre	300...700	0.015...0.025
Cobre oxidado	130	0.73
No metales	T(°C)	ϵ
Madera	70	0.91
Hielo	-10	0.92
Agua	10...50	0.91
Papel	95	0.90

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Emisividad>

G. CUERPO GRIS

Para un análisis sencillo con respecto a la radiación es común suponer que las superficies de un recinto son opacas, difusas o grises, es decir las superficies no son transparentes, son emisoras y reflectoras difusas y sus propiedades relativas a la radiación son independientes de la longitud de onda $\epsilon \neq \epsilon(\lambda)$. Asimismo, cada superficie del recinto es isotérmica y tanto la radiación entrante como la saliente son uniformes sobre cada superficie.

La emisividad de una superficie depende de factores como su temperatura, el acabado, el ángulo de emisión y la longitud de onda de la radiación. Una suposición usada comúnmente en ingeniería, asume que la emisividad espectral de la superficie y la absorptividad no dependen de la longitud de onda, siendo, por lo tanto, ambos constantes. Esta regla se conoce como la "suposición del cuerpo gris". Aunque es común para examinar la "emisividad de un material" (tal como la emisividad de la plata altamente pulida), la emisividad de un material depende por lo general de su espesor. Las emisividades citadas para los materiales son para muestras de espesor infinito, por lo tanto, para muestras delgadas del material tienen un coeficiente de emisividad menor, ejemplo de cuerpo gris es la pizarra.

Cuando se habla de cuerpos no negros, la desviación del comportamiento de un cuerpo negro está determinada por la estructura geométrica y la composición química, y sigue la ley de Kirchhoff para la radiación térmica, que establece que la emisividad es igual a absorptividad (para un objeto en equilibrio térmico). Así un cuerpo que no absorbe toda la radiación, no emite toda la radiación respecto a un cuerpo negro.

H. FLUJO CALORÍFICO

La razón de transferencia del calor por unidad de área perpendicular a la dirección de esa transferencia se llama **flujo de calor**; el flujo de calor puede variar con el tiempo así como con la posición sobre una superficie (Btu / h. ft²) Durante el flujo de calor la transferencia de calor sucederá de un cuerpo caliente a otro frío hasta que ambos cuerpos se encuentren en equilibrio térmico, vale decir, a la misma temperatura.

2.3. MADERA

Considerado como un material compuesto natural complejo reforzado con fibras formado de largas celdas poliméricas tubulares, alineadas unidireccionalmente en una matriz polimérica, formada por cuatro constituyentes principales: **fibras de celulosa**, formando el 40 al 50% (la celulosa es un polímero termoplástico natural) de la madera; la **hemicelulosa** es otro polímero componente con un 25 al 35% aprox. del árbol, la **lignina** aglutinante orgánico que une los constituyentes poliméricos antes mencionados, las **impurezas orgánicas** extraíbles representando hasta un 10 %.⁷ A continuación mostramos y detallamos las partes internas que consta el tronco del árbol, de la fig. 2-7:

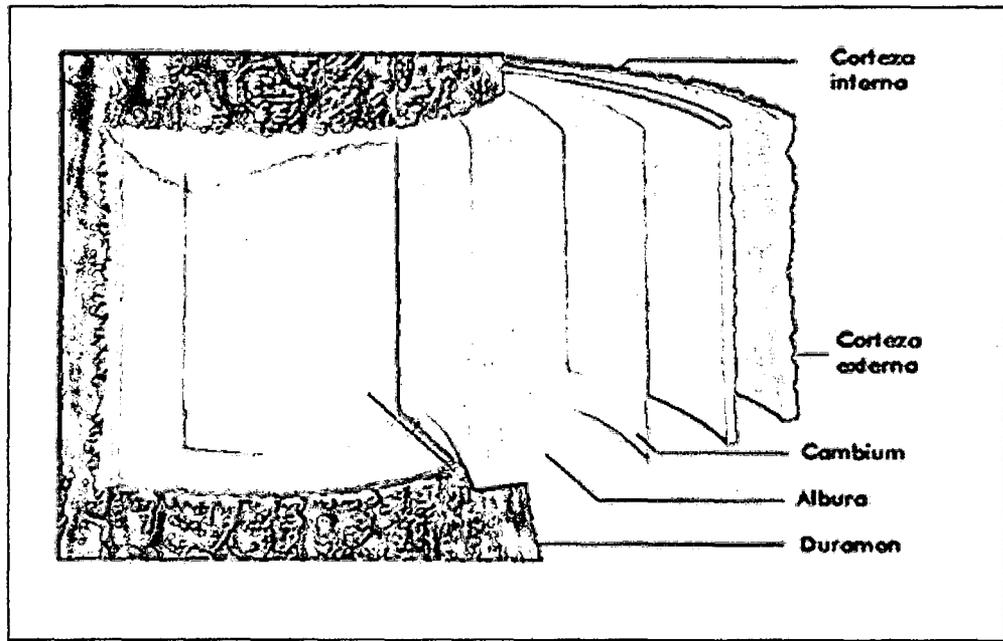
2.3.1. ESTRUCTURA DE LA MADERA

La **corteza externa**, constituida por células muertas, protegiéndolo del frío, el calor y la invasión de hongos e insectos renovándose constantemente, impide que pase el agua de lluvia, y evita que cuando incide el sol, se produzca una evaporación demasiado fuerte; **corteza interna** o **líber** es el conducto de

⁷Askeland Donald R. 2001 "Ciencia e Ingeniería de los Materiales" Editorial Thomson Pág. 561

abastecimiento del alimento a las distintas partes del árbol. Vive un tiempo corto, para convertirse en corcho y ser corteza externa.

Figura 2-7: Componentes internos de un árbol



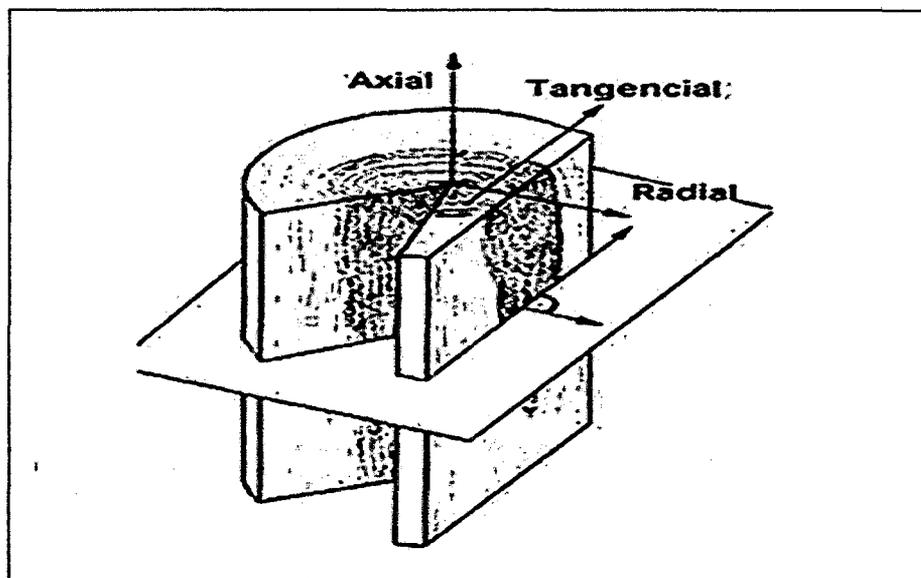
Fuente: www.quimicathai.wordpress.com/2010/

- El **cambium**, parte del tronco donde realmente se produce el crecimiento, por las hormonas que llegan junto con los alimentos de las hojas o agujas, descendiendo por el líber, produciendo cada año corteza y madera nuevas. El xilema o **madera** es la capa más interna cuya función es la de sostén del propio árbol (albura, duramen).
- La **albura** (madera joven); es el “acueducto” que abastece a la parte de la copa del árbol. Al tiempo que se forman nuevos anillos de **albura**, las células interiores pierden fuerza y vida y se transforman en duramen.

- **Duramen** o corazón, es la parte central y sustentadora del árbol; no está viva, tampoco se descompone, sino que conserva su fuerza sustentadora mientras viven las capas exteriores. Constituido por un sistema de fibras de celulosa huecas similares a las agujas, y unidas por la lignina, producto similar a una cola química.

La madera, material anisotrópico, por sus diferencias en la orientación de sus celdas y granos, según sea el plano o dirección que consideremos, respecto a la dirección longitudinal de sus fibras y anillos de crecimiento, el comportamiento físico mecánico del material, presenta resultados dispares y diferenciados. De este procedimiento estructural tan desigual, se estableció los siguientes ejes, que se muestran en la fig. 2-8.

Figura 2-8: Anisotropía de la madera.



Fuente: Manual La Construcción de Viviendas en Madera

- Eje tangencial, tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje longitudinal de la madera.

- Eje radial, perpendicular a los anillos de crecimiento y al eje longitudinal.
- Eje axial o longitudinal, paralelo a la dirección de las fibras y al eje longitudinal del tronco, constituyendo una perpendicular respecto al plano formado por los ejes tangencial y radial.

2.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

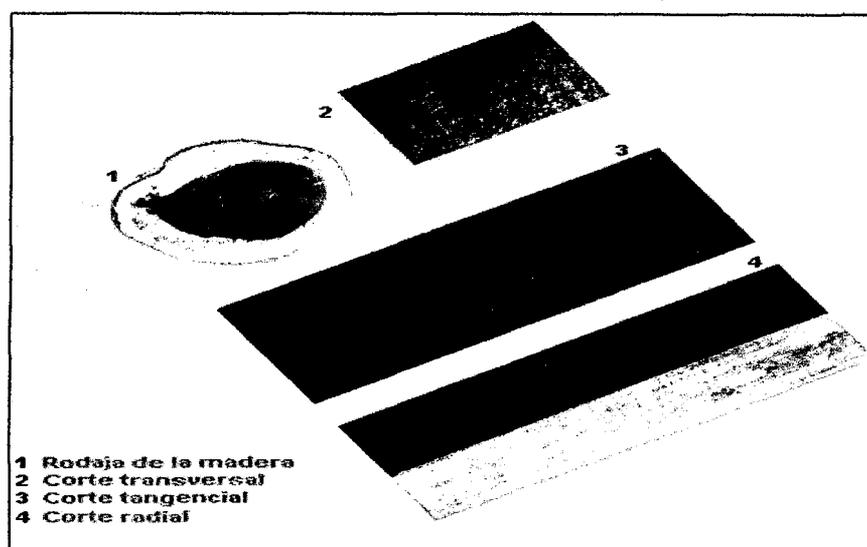
El aguano masha,⁸ especie mayormente utilizada en la carpintería de la región del Cusco, mostrada en la figura 2-9, es descrito a continuación:

- Nombre científico: *Machaerium inundatum* (C. Martius ex Bentham) Ducke.
- Familia: Fabaceae Papilionoideae.
- Sinonimia: *Drepanocarpus inundatus* C. Martius ex Bentham
- Nombres Comunes Perú: Aguano masha, coricaspi.
- Nombre Comercial Internacional: Aguano masha.
- **Distribución Geográfica:** En base a literatura y reportes de herbario, la especie se encuentra en los departamentos de Cusco, Junín, Madre de Dios, Loreto y Ucayali, entre 0 y 500 msnm. La especie existe en cantidades bajas en la Amazonía norte y en cantidades altas en la Amazonía sur del Perú.
- **Árbol:** altura. 30 m y 120 cm de diámetro; tronco cilíndrico; aletones poco o medianamente desarrollados, gruesos. La corteza superficial de color pardo cenizo y grietas longitudinales; su corteza muerta se desprende en pedazos largos adheridos por algún tiempo en la

⁸ www.congreso.gob.pe/comisiones/1999/ciencia/cd/inia

superficie del tronco, por encima de los aletones; corteza muerta leñosa corchosa de 1.5 cm de espesor. Corteza viva de 0.5 cm de espesor, exuda gotitas de resina rojo-negruczas.

Figura 2-9: Madera aguano



Fuente:<http://www.inforhuay.com/paginas/inforhuay/especies/fictec/aguanomasha.php>

2.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

- **Color:** Marrón
- **Olor:** No distintivo.
- **Lustre o brillo:** Moderado o medio.
- **Grano:** Entrecruzado.
- **Textura:** Fina.
- **Veteado o figura:** Poco definido; arcos superpuestos ligeramente entrecruzados diferenciados y en bandas angostas, paralelas, satinadas.

2.3.4. PROPIEDADES FISICAS

- **Densidad básica:** 0.73 g/cm³.
- **Contracción tangencial:** 4.90 %.

- Contracción radial: 2.71 %
- Contracción volumétrica: 7.47 %.
- Relación tangencial/radial (T/R): 1.80.

2.3.5. PROPIEDADES MECÁNICAS

- Módulo de elasticidad en flexión: 139,000 kg/cm².
- Módulo de rotura en flexión: 1,102.00 kg/cm².
- Compresión paralela: 574.00 kg/cm².
- Compresión perpendicular: 127.00 kg/cm².
- Corte paralelo a las fibras: 135.00 kg/cm².
- Dureza en los lados: 1,052.00 kg/cm².
- Tenacidad (resistencia al choque): 5.90 kg-m.

Las características, propiedades físicas, mecánicas, durabilidad, especificaciones y propiedades fisicoquímicas se obtuvieron de: www.congreso.gob.pe/comisiones/1999/ciencia/cd/inia.

2.3.6. DURABILIDAD NATURAL

La madera es fácil de aserrar, presenta buena trabajabilidad, con tendencia al repelo, permite acabados buenos. Presenta buen comportamiento al secado artificial, sin riesgos importantes. Tiene durabilidad natural media. Para fines prácticos, la durabilidad puede considerarse como la resistencia que opone la madera a la pudrición.

2.3.7. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL AGUANO

El Aguano masha es una madera pesada, presenta contracciones lineales medias y contracción volumétrica estable. La

resistencia mecánica se sitúa en el límite de la categoría media con la categoría alta. La madera, es moderadamente difícil de aserrar por su alta resistencia mecánica. Muestra trabajabilidad y acabado apropiado para la producción de parquet para exportación. Al proceso de secado la madera es estable con bajo riesgo de alabeo. La albura es susceptible al ataque biológico, las piezas con albura requieren ser preservadas; el duramen es resistente y por ello las piezas enteramente de duramen no requieren de preservación. La madera se utiliza para carpintería de interiores, cajonería, puertas, muebles, juguetes, maquetas; es adecuada para fabricación de pulpa de papel, en pisos, durmientes, estructuras de casas, artesanía y en la fabricación de parquet para exportación.

2.3.8. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

La albura es susceptible al ataque biológico en madera seca, las piezas con albura requieren ser preservadas; el duramen es resistente y por ello las piezas enteramente de duramen no requieren de preservación; presenta impregnabilidad mediana es resistente a los ácidos débiles, es un buen aislante térmico y eléctrico y tiene un coeficiente elevado peso/resistencia.

2.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA

La madera material **higroscópico**; que capta o cede humedad en su medio, proceso que depende de la temperatura y humedad relativa del ambiente; comportamiento que establece e induce cambios dimensionales y deformación en la madera.

2.4.1. HUMEDAD EN LA MADERA

Cuando el árbol está recién cortado, su madera contiene gran cantidad de agua, variando el contenido según la época del año, la región de procedencia y la especie forestal. El agua contenida en la madera se encuentra bajo diferentes formas (agua libre, agua de saturación o higroscópica y agua de constitución)⁹

- El **agua libre** se halla ocupando las cavidades celulares o lumen de los elementos vasculares (madera en condición de verde). La cantidad de agua está limitada por su volumen de poros. Al empezar el secado, se va perdiendo fácilmente por evaporación, ya que es retenida por fuerzas capilares muy débiles, hasta el instante que ya no contiene más agua de ese tipo. Este punto se denomina "Punto de Saturación de las fibras" (PSF). En esta condición, sus paredes están completamente saturadas pero sus cavidades están vacías, entonces la madera no experimenta cambios dimensionales, ni alteraciones en sus propiedades mecánicas. Así, el PSF es muy importante desde el punto de vista físico-mecánico y de algunas propiedades eléctricas de la madera.
- El **agua de saturación o higroscópica** es la que se encuentra en las paredes celulares, es evaporada por difusión, y la pérdida de humedad ocurre con más 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 está entre 12 y 18% de contenido de humedad, dependiendo del lugar donde se realiza el secado; solamente la madera secada al aire libre puede alcanzar estos valores de humedad de equilibrio. Para obtener contenidos de humedad

⁹Profesora Amarilis Burgos Franco Guía de secado ETSUFOR.

menores, debe acudir al secado artificial que eliminara el resto de agua higroscópica.

- El **agua de constitución** Se encuentra como constituyente de la célula. No puede ser eliminada sin alterar la constitución química de la pared celular (combustión). Su separación implica la destrucción parcial de la madera.

2.4.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

La determinación del contenido de humedad en la madera se hace considerando sólo los valores de agua libre y de saturación. Es decir, que en la práctica, la madera se considera totalmente seca cuando al secarla en estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ alcanza peso constante.

2.4.3. PROCEDIMIENTO PARA LA HUMEDAD REQUERIDA

El contenido de humedad¹⁰ (CH) se define como el peso de la cantidad de agua presente en una pieza de madera, expresado en función del peso de esa pieza en condición seca al horno o anhidra. Su valor numérico se expresa en porcentaje y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{CH} = \left[\frac{(P_h - P_s)}{P_s} \right] \cdot 100\% \quad (2-22)$$

¹⁰www.inforhuay.com/paginas/inforhuay/especies/fictec/aguanomasha.php

Donde:

CH = Contenido de humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro.

P_h = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial.

P_s = Peso de la madera en estado anhidro o seco; peso final o constante.

2.5. CINÉTICA DEL SECADO

La cinética del secado de madera, es la representación de la evolución de las condiciones ambientales y de la madera en el transcurso del secado.¹¹ En particular la evolución temporal de la humedad de la madera o de la velocidad del secado respecto del tiempo o la humedad de la madera, son las cinéticas del secado más reconocidas. Teóricamente la velocidad del secado ϕ de la madera puede ser representada por tres fases de secado:

Fase I; se observa al inicio del secado un contenido de humedad (CH) elevado, con velocidad de secado constante $\phi=2\%/h$, dependiente de las condiciones del ambiente (T , v , HR); donde la temperatura del aire T incrementa la velocidad de evaporación del agua superficial de la madera, además de estimular el flujo interno de humedad de la madera. El desplazamiento del aire o sea la velocidad v retira humedad superficial remplazándolo nuevamente por aire con mayor capacidad de secado de la superficie. Ahora la humedad relativa HR nos dice como está el grado de saturación del aire, estableciendo la mayor o menor capacidad secante del entorno. En esta etapa predominan fenómenos de transferencia de calor y evaporación superficial, es decir, la evaporación ocurre en la superficie de

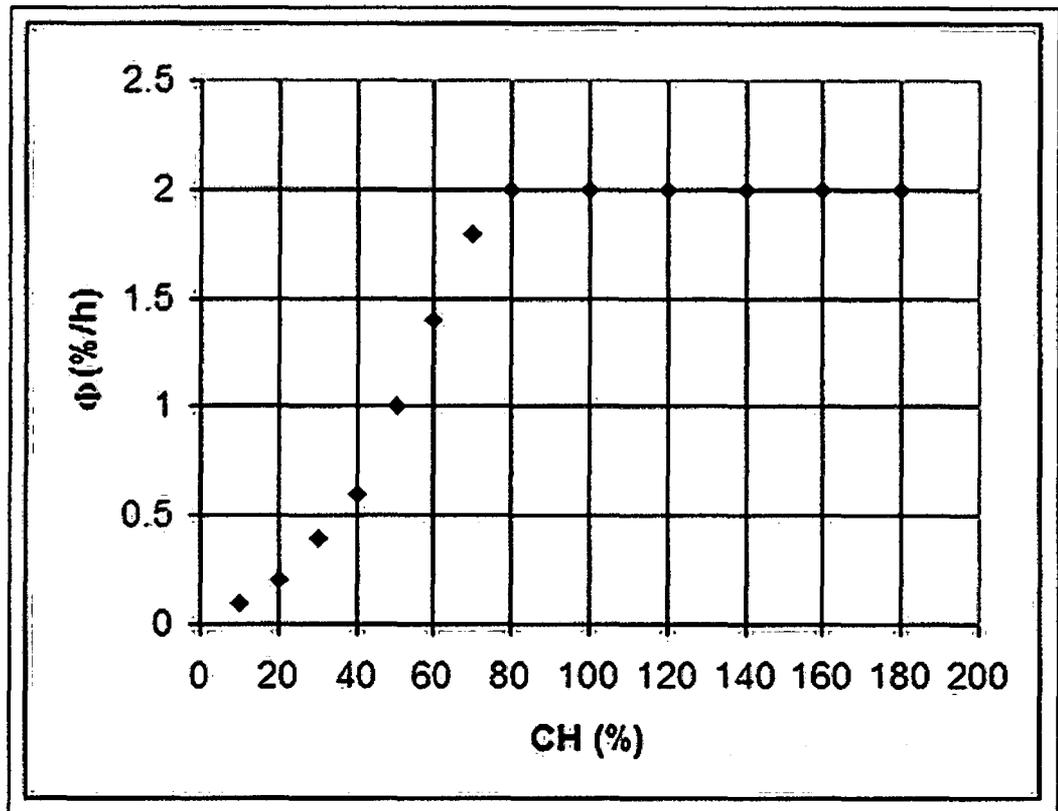
¹¹ www.redalyc.org/articulo.

la madera y todo el calor aportado se utiliza para evaporar el agua. La temperatura y la presión de vapor en la superficie corresponden a la T_H y a la presión de saturación respectivamente.

La Fase II, corresponde a la etapa de secado con velocidad de secado decreciente. Este periodo puede durar un tiempo mayor que el de la etapa anterior, aunque la cantidad de agua removida es menor. Con algunas zonas secas en la superficie de la madera, la presión de vapor se hace inferior a la de saturación y la temperatura aumenta, alejándose de la temperatura de bulbo húmedo, a la cual tendió en la primera etapa. La velocidad de secado por unidad de superficie total, disminuye en forma lineal, hasta que la superficie de la madera se seca completamente, producto de que la velocidad de evaporación superficial, supera la velocidad de transporte de humedad desde el interior; aquí se tiene la presencia de dos zonas, una superficial en el dominio higroscópico, donde la migración de humedad está regida por la difusión de vapor y agua líquida y una zona interior donde el agua libre migra por capilaridad.

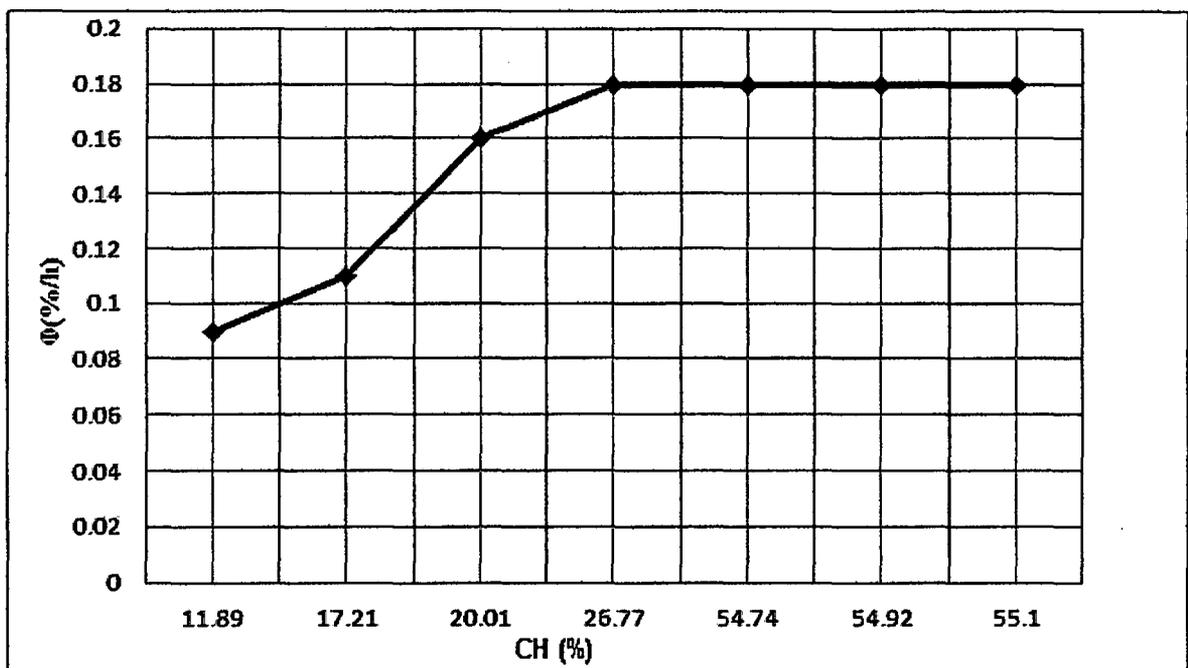
Fase III; cuando toda la madera queda bajo el rango higroscópico, nace teóricamente la tercera etapa de secado decreciente. En esta última etapa el secado es gobernado por el movimiento difusional (movimiento combinado de agua ligada y de vapor de agua desde el interior hacia la superficie)

Figura 2-10: Curva teórica de velocidad de secado en la madera



Fuente: www.redalyc.org/articulo

Figura 2-11: Curva experimental de velocidad de secado (madera aguano).



Fuente. Autor.

En la cinética de secado se observa que la curva experimental se aproxima a la curva teórica, lo que indica que nuestra velocidad de secado respecto al contenido de humedad tiene resultados cercanos a los cálculos determinantes de la curva teórica en la Fig. 2-11 durante el proceso de secado en el horno prototipo, cuyas condiciones lo dan las variables independientes y dependientes

2.5.1. FÍSICA DE LOS FACTORES DEL SECADO

En el proceso de secado en horno solar o directamente expuesto al sol, el agua es removida de la superficie de la madera por evaporación. La velocidad de evaporación es controlada por la temperatura, la humedad relativa del aire y la velocidad del aire que pasa a través de la pila de secado.

▪ TEMPERATURA

Es necesaria la aplicación de energía calorífica para poder evaporar el agua de la madera, y estos requerimientos van en aumento a medida que progresa el secado, con el fin de liberar el agua de las grandes fuerzas higroscópicas con las cuales es retenida en la madera. La velocidad de evaporación depende a su vez de la gran cantidad de energía suministrada por unidad de tiempo y de la capacidad del medio (aire) para trasladar la humedad liberada por la madera. El suministro de calor en el secador es necesario para:

- 1) El calentamiento de la madera.
- 2) Evaporación de la humedad.
- 3) Calentar el aire frío que entra al secador.

A 80 °C la velocidad del movimiento del agua al interior de la madera es aproximadamente cinco veces mayor que a 25°C, la temperatura tiene un rol muy importante durante el proceso de secado.

Durante el secado al aire, cuando la madera está expuesta a la radiación directa del sol, la temperatura superficial de las piezas de madera puede ser muy superior a la temperatura del aire en circulación, generando condiciones de secado muy severas, ocasionando defectos en la madera como torceduras, grietas, rajaduras en los extremos, etc.

Muy importante es tener en cuenta que la temperatura, juntamente con la humedad relativa, son los elementos que determinan el clima dentro de un horno secador así como el equilibrio del contenido de humedad de la madera. Por tanto se puede decir que: **“El aumento de temperatura eleva el movimiento del agua interior de la madera”**

▪ **HUMEDAD RELATIVA**

La humedad del aire, factor importante para el control del contenido de humedad de la madera, particularmente en aquellos casos donde es necesario controlar la evaporación en la superficie de la misma. Así, la humedad relativa afecta el **gradiente de humedad** y la contracción de la madera, por lo tanto tiene una relación directa con los esfuerzos al interior de la pieza que pueden conducir a la aparición de defectos como torceduras y rajaduras.

La humedad relativa se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire y la mayor cantidad posible de vapor de agua que pueda hallarse en ese volumen de aire a la misma temperatura. De acuerdo a esta definición, la humedad relativa del aire será del 100% si la presión parcial del vapor de agua en la atmósfera es igual a la presión del vapor saturado, situación que se presenta cuando el aire está saturado con vapor de agua y será del 0% si el aire está completamente seco.

La humedad relativa del aire y consecuentemente la humedad de la madera están fuertemente influenciadas por la temperatura. El aire caliente necesita una cantidad mayor de agua para saturarse que el aire frío y por lo tanto puede absorber mayor cantidad de agua de la madera.

- **VELOCIDAD DEL AIRE**

El aire dentro de la cámara puede circular por gravedad (flujo natural) o por medio de ventiladores que producen una corriente forzada, con el objeto de aumentar la velocidad del aire y con ello acelerar el secado de la madera. La velocidad del aire dentro de la pila de madera tiene como funciones principales:

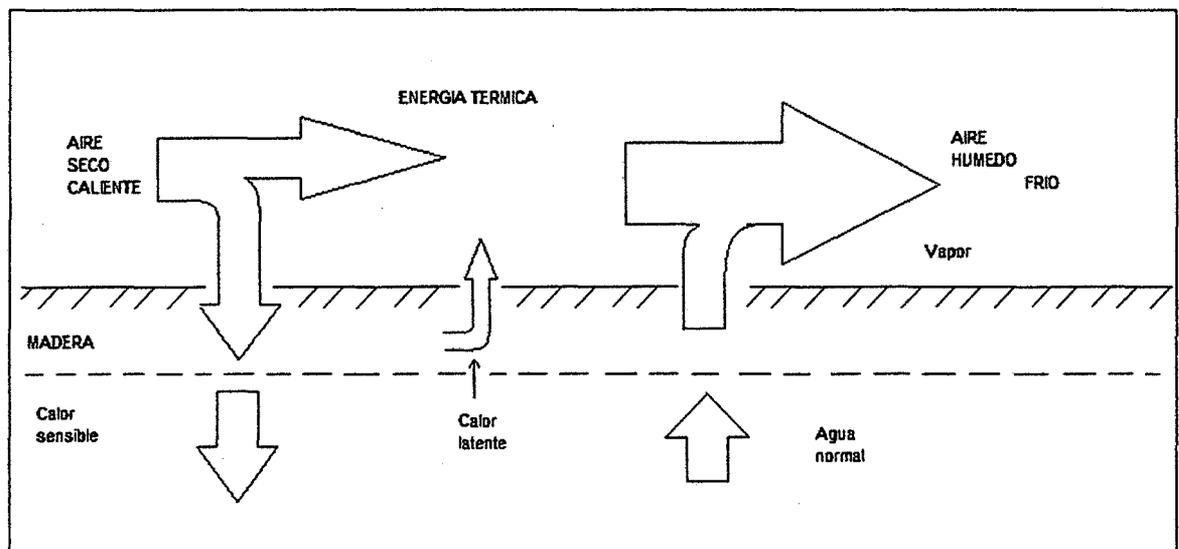
- i. **Transmitir la energía** requerida para calentar el agua contenida en la madera facilitando así su evaporación y
- ii. **Transportar la humedad** saliente de la madera.

Durante el proceso de secado la **capa límite** que existe entre la madera y el aire juega un papel importante en el secado de la

madera, porque al decrecer esta capa, más rápida será eliminada la humedad de la superficie de la madera, esta se ve en la figura 2-12.

La madera se secará de una manera adecuada, solamente con suficiente corriente de aire a través de los espacios entre los listones separadores y sobre la superficie de la misma madera. La energía térmica presente en el aire caliente, es transferida a la madera. Parte de esta energía penetra en la madera bajo la forma de calor sensible que aumenta la temperatura. El resto de la energía es utilizada para transformar agua normal en vapor de agua y este calor latente es entonces, transportado a través de las moléculas de agua evaporadas.

Figura 2-12: Funciones de la velocidad del aire.



Fuente: Autor. **Referencia:** <http://www.banrepcultural.org/>

La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad del secado. Una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una corriente laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite entre la madera y el aire. A mayor velocidad del aire mayor será

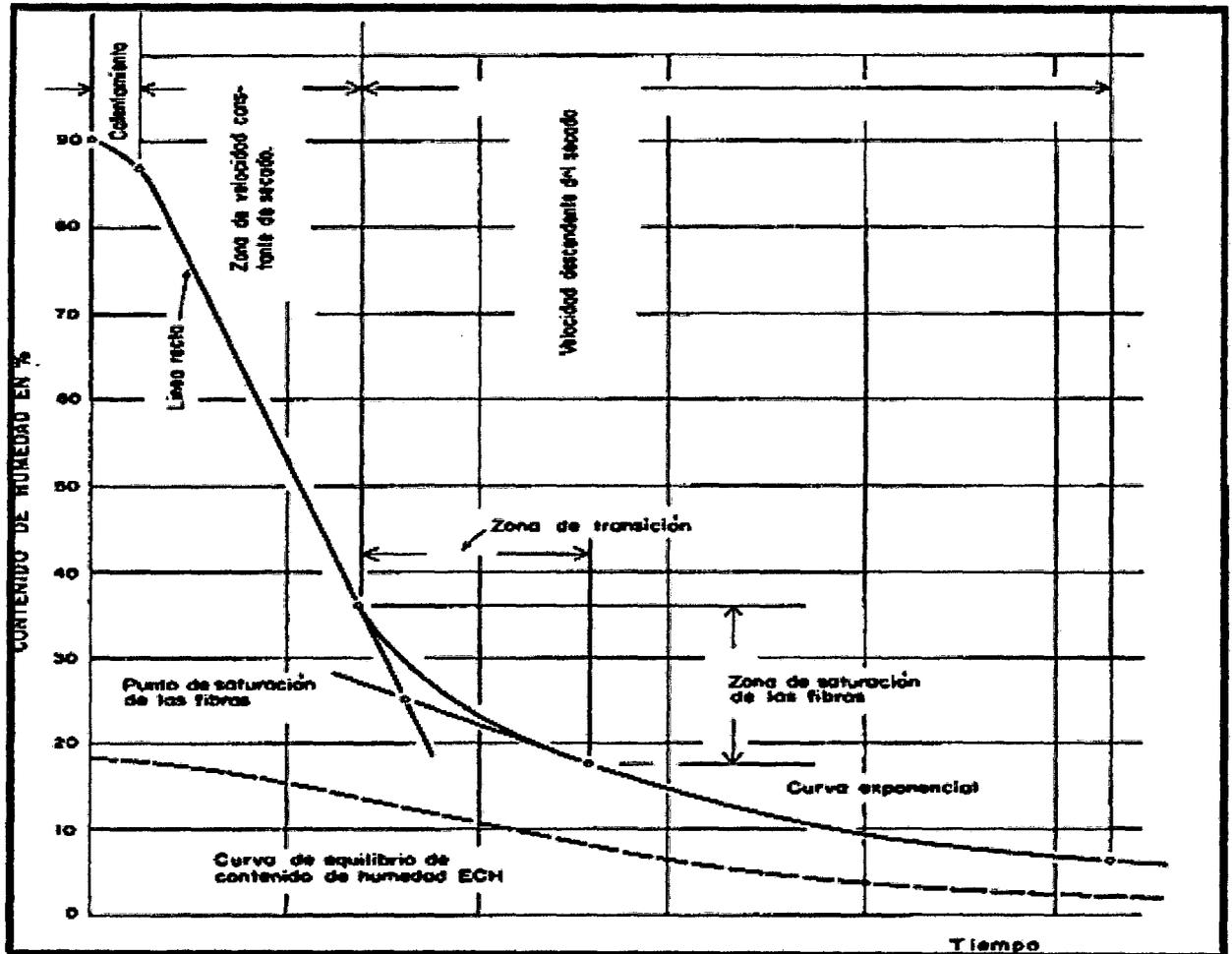
la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado uniforme, siendo indispensable una circulación fuerte y regular. Experimentalmente se ha demostrado que se obtienen condiciones óptimas de secado cuando el aire circula en una pila a una velocidad de 2 m/s.

2.5.2. PRINCIPIOS DEL SECADO

Los principios que regulan el proceso de secado de la madera son de naturaleza diferente, depende del contenido de humedad, si está por encima o por debajo del punto de saturación de las fibras. Por encima de este punto, la velocidad del secado, bajo condiciones estables de temperatura y humedad relativa del aire, permanece constante y el movimiento del agua libre líquida es originado por fuerzas capilares.

Cuando el secado ya ha avanzado a contenidos de humedad por debajo del punto de saturación, la permeabilidad de la estructura microscópica y sub-microscópica de la madera entra a jugar un papel importante en el proceso de remoción del agua higroscópico, el agua retenida en la madera por fuerzas de naturaleza molecular y/o eléctrica se mueve por difusión a través de las paredes celulares, debido al gradiente de humedad que se crea entre las paredes de las células vecinas. Finalmente la curva tiende hacia un valor límite que no es otro que la humedad de equilibrio de la madera correspondiente a las condiciones climáticas establecidas, a continuación dicha explicación se muestra en la figura siguiente:

Figura 2-13: Curva teórica de secado



Fuente: Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. (1985)

Este sistema de secado ha sido el más ampliamente utilizado. Sin embargo, por estar sujeto a los cambios climáticos, no es posible ejercer control sobre su desarrollo. La duración depende de las características de las especies de madera, de las condiciones climáticas, de la forma de apilado y de la disposición y ubicación del patio de secado, pero en cualquier caso el proceso es relativamente lento.

2.5.3. SECADO SOLAR AL AIRE LIBRE

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

El secado al aire libre se realiza de hecho inmediatamente después del aserrado, este sistema es el más antiguo y sencillo; con él pueden conseguirse relativamente buenos resultados, este procedimiento tiene el inconveniente de exigir mucho tiempo; grande espacio y no conseguir destruir las larvas de los insectos, ni dejar a la madera con las garantías suficientes para que después habite en locales con calefacción elevada.

Este sistema de secado ha sido el más ampliamente utilizado. Sin embargo, por estar sujeto a los cambios climáticos, no es posible ejercer control sobre su desarrollo. La duración depende de las características de las especies de madera, de las condiciones climáticas, de la forma de apilado y de la disposición y ubicación del patio de secado, pero en cualquier caso el proceso es relativamente lento.

2.5.4. DEFECTOS DEL SECADO

A. CONTRACCIÓN ANORMAL DE LA MADERA

Un tipo de contracción anormal es el colapso de células, muy común en maderas como el eucalipto y el roble, este colapso celular es el resultado de la aplicación de un horario de secado muy severo

(gradiente de secado alto) en madera muy húmeda que tiene todas sus cavidades llenas de agua libre y donde faltan las burbujas que regularmente se encuentran en las células¹², las que se muestran en la Fig. 2-14.

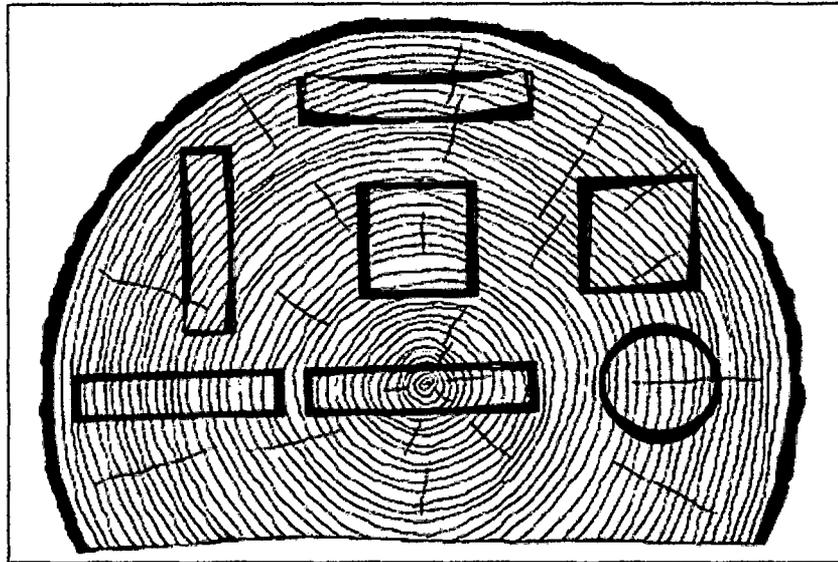
Se inicia a un contenido de humedad por encima del punto de saturación de las fibras, a pesar que a un existen en las cavidades celulares de la madera grandes cantidades de agua libre. Las grietas internas formadas como consecuencia de un estado avanzado del colapso pueden reconocerse exteriormente por una severa contracción o por una deformación irregular de la madera en su sección transversal. El colapso puede evitarse secando lentamente la madera a temperaturas normales.

B. GRIETAS SUPERFICIALES Y EN EXTREMOS

Las grietas en la superficie y en los extremos de las piezas de madera aserrada se presentan con mayor frecuencia en las primeras etapas del secado, cuando se aplica un gradiente de secado alto, es decir, cuando la diferencia psicrométrica es muy grande. La causa de la formación de estas grietas es el secado rápido de la superficie de la madera y de las capas adyacentes y la consiguiente contracción de esta zona. Esta contracción no se puede desarrollar en toda la pieza debido a que la madera húmeda de las zonas internas lo impide. Como consecuencia de este fenómeno se forman tensiones superficiales en la dirección perpendicular al grano, las que se muestran en la Fig. 2-16 que pueden ser tan grandes que excedan la resistencia de la madera en esta dirección, formándose las grietas mostradas en la Fig. 2-14.

¹² <http://html.rincondelvago.com/secado-de-la-madera.html>

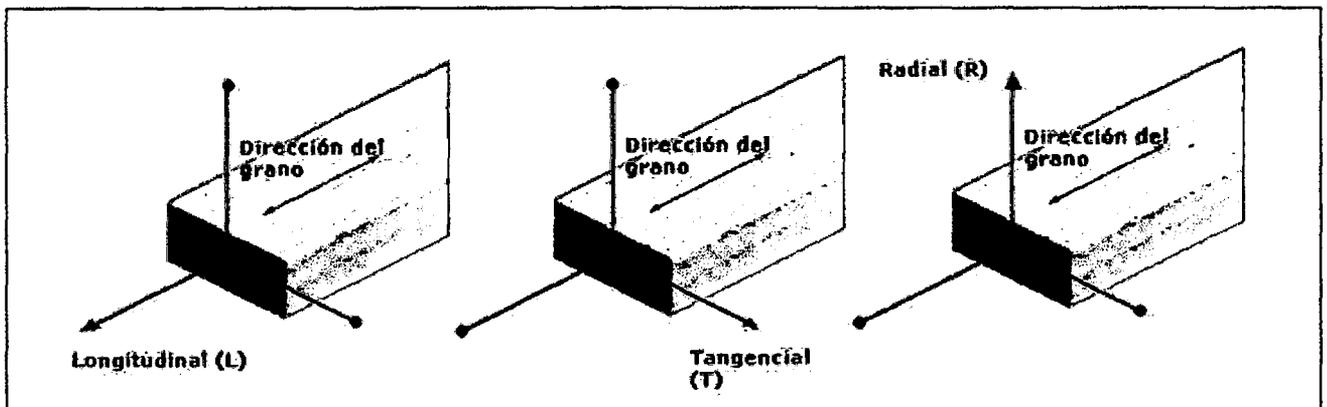
Figura 2-14: Contracciones anormales en la madera.



Fuente: <http://html.rincondelvago.com/secado-de-la-madera.html>

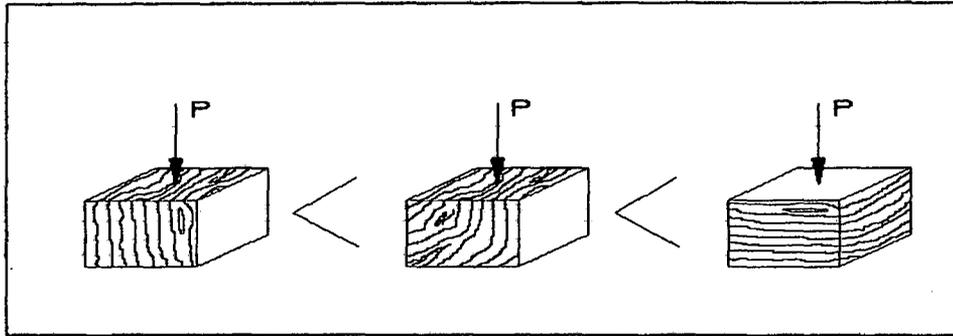
Al ser sometida la madera a tensiones en distintas direcciones, donde el esfuerzo de flexión, origina uno de tracción y otro de compresión separados por una zona neutra, por lo cual la resistencia a flexión será máxima cuando la fuerza actuante sea perpendicular al hilo y mínima cuando ambos sean paralelos, el cual se observa respectivamente en la figura 2-15.

Figura 2-15: Dirección del grano en ejes longitudinal, radial y tangencial



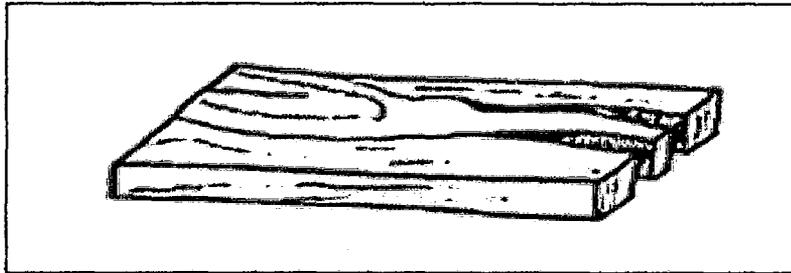
Fuente: Manual de la construcción de viviendas en madera

Figura 2-16: Configuración de tensión en distintas direcciones



Fuente: http://download.rincondelvago.com/madera_10

Figura 2-17: Grietas en el extremo de la madera.



Fuente: <http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/11/defectos-de-la-maderapresentados.html>

Algunas de las medidas sugeridas son las siguientes:

- i. Evitar la radiación directa del sol sobre la madera recién cortada
- ii. Impedir la acción de corrientes secas y fuertes sobre los extremos de la madera húmeda.

C. GRIETAS INTERNAS

Un severo endurecimiento superficial puede traer como consecuencia la formación de grietas internas. Esto ocurre cuando los esfuerzos de tensión perpendicular al grano y de cizalladura son

superiores a la resistencia de la madera. La madera que presenta este defecto prácticamente no tiene uso.

En maderas sensibles se producen cavidades en forma de panal, que son visibles cuando la pieza es reaserrada pueden atribuirse a un control incorrecto del proceso de secado y pueden evitarse por medio de la selección de un programa de secado adecuado. Como son consecuencia del endurecimiento superficial, éste debe detectarse a tiempo y eliminarse para evitar de este modo su aparición.

D. ALABEO

El alabeo o combado de piezas de madera durante el secado se debe a sus propiedades de contracción. Hasta cierto punto, puesto que se debe a una propiedad natural, no puede catalogarse estrictamente como un defecto. Sin embargo, debe ser el propósito de cada operación de secado mantener estas deformaciones dentro de ciertos límites.

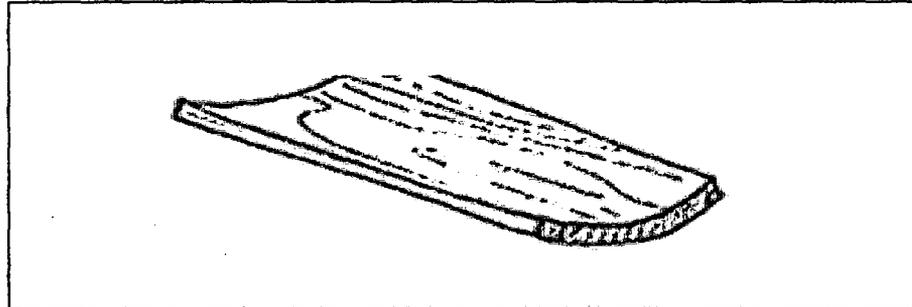
El alabeo se define como la deformación que experimenta una pieza de madera por la curvatura de sus ejes longitudinal, transversal o de ambos. Según la deformación que presente la pieza, se consideran los siguientes tipos de alabeo:

- **Abarquillado**

Es el alabeo de las piezas cuando las aristas o bordes longitudinales no se encuentran al mismo nivel que la zona central. Se reconoce cuando al colocar la pieza de madera sobre una superficie plana, apoyará la parte central de la cara quedando

levantados los bordes, presentando un aspecto cóncavo o de barquillo.

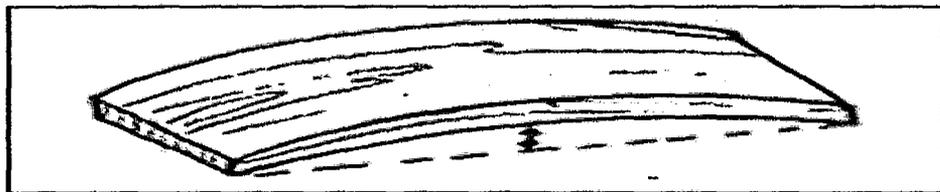
Figura 2-18: Abarquillado de la madera



Fuente: <http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/11/defectos-de-la-maderapresentados.html>

- **Arqueadura**, es el alabeo o curvatura a lo largo de la cara de la pieza. Se reconoce cuando al colocar la pieza sobre una superficie plana, se observa una luz o separación entre la cara de la pieza de madera y la superficie de apoyo.

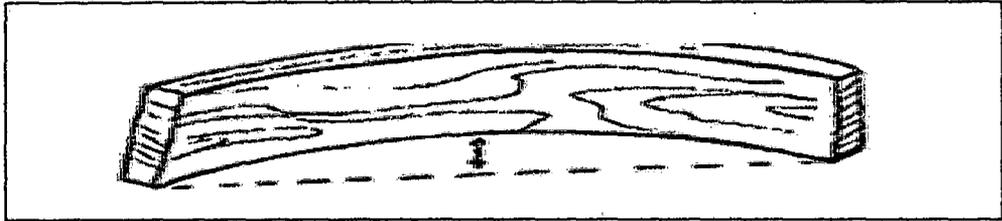
Figura 2-19: Arqueadura de la madera



Fuente: <http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/11/defectos-de-la-maderapresentados.html>

- **Encorvadura**, es el alabeo o curvatura a lo largo del canto de la pieza. Se reconoce cuando al colocar la pieza de canto sobre una superficie plana, se observa una luz o separación entre el canto de la pieza de madera y la superficie de apoyo

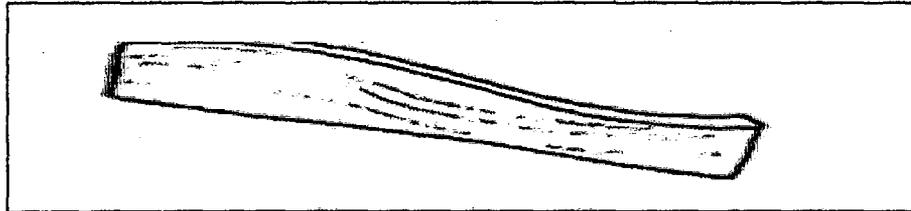
Figura 2-20: Encorvadura de la madera



Fuente: <http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/11/defectos-de-la-maderapresentados.html>

- **Torcedura**, es el alabeo que se presenta cuando las esquinas de una pieza de madera no se encuentran en el mismo plano. Se reconoce cuando al colocar la pieza sobre una superficie plana, se observa el levantamiento de una o más aristas en diferentes direcciones.

Figura 2-21: Torcedura de la madera



Fuente: <http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/11/defectos-de-la-maderapresentados.html>

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS DE SECADO

3.1. MATERIALES EN EL DISEÑO

El tipo de material transparente para el techo, o cubierta vitrificada, puede también afectar la cantidad de energía calorífica obtenida por del sol. El material usado en la cubierta debe transmitir los rayos del sol al colector, y no reflejarlos. También deberá ser resistente a la degradación ocasionada por los rayos ultravioletas. Muchos materiales pueden usarse para la cubierta, incluyendo vidrio, filme de plástico, y paneles de fibra de vidrio

El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos, de alta longitud de onda. Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wien, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, 2.878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos. La energía radiante del Sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero.

En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de ondas mayores,

correspondientes al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neta hacia su interior.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. **En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos**, entonces el horno puede ser construido con bloques de concreto, ladrillo u otros materiales.

Desde siempre, el hombre ha tenido constancia de los efectos del calor: dilatación, fusión, ebullición, y también las acciones inversas del frío: retracción, solidificación, licuefacción, no habiendo conocido las leyes hasta una época reciente. Desde entonces, también ha tratado de aprovechar en un máximo, ya sea el calor o el frío dependiendo de su conveniencia. Entonces ha ideado diferentes técnicas para el aislamiento de éstos, que no permiten en un gran porcentaje el intercambio de temperatura entre dos ambientes.

El objetivo de un aislamiento térmico es impedir en alguna medida la transferencia de calor desde o hacia el cuerpo aislado, aprovechan en general el hecho de que el aire es un excelente aislante. Por esta razón, la gran mayoría de los materiales usados como aislantes son porosos, manteniendo el aire atrapado en su interior.

El aire encerrado en los poros queda casi quieto en los materiales con poros cerrados (como Poliuretano y Poliestireno expandido) o con muy poca movilidad en aislantes con poros abiertos (por ej.: Lana Mineral y Lana de

vidrio). Por esta razón el coeficiente de conductividad térmica será en general, tanto más pequeño como sea su masa por unidad de volumen.

Sin embargo, existe una masa por unidad de volumen determinada para cada material de aislamiento térmico poroso, que por debajo de ella aumentará nuevamente la conductividad térmica. Esto se debe a que los poros son lo suficientemente grandes para permitir en su interior, una transferencia de calor por convección natural.

Tabla 3-1: Materiales de construcción y dispositivos del horno solar

MATERIALES	CANTIDAD
Listones pequeños de madera corriente	36
Calamina plana pequeña	1
Vidrio corriente (piezas)	22
Celdas fotovoltaicas pequeñas	2
Triplay pequeño	1
Envase pequeño de pintura negro mate	1
Ventiladores pequeños	4
Baterías recargables (6 voltios)	2
Pirómetro pequeño	2
Higrómetro	1
Cronometro	1
Balanza de precisión digital	1

Fuente: Autor

El horno es simple de construir y utiliza un colector solar pasivo, además de cuatro paredes y piso con aislamiento térmico, para nuestro caso se utiliza el vidrio simple. La cubierta del techo es de vidrio transparente, apto para invernaderos, así como también policarbonato plano o polietileno, ambos transparentes.

3.2. AISLANTES DEL HORNO

Bajo el nombre de materiales aislantes se agrupan productos que cumplen muchas funciones. Está caracterizado por un coeficiente de conductividad igual a 1 debiendo ser lo más bajo posible.

3.2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

El papel esencial de un material aislante, ciertamente, es cumplir su función, siendo un aislante térmico deberá ofrecer una buena resistencia a la transmisión del calor. Independientemente de sus propiedades específicas, a los aislantes se le pide cualidades complementarias. Las principales de estas cualidades son:

- Precio en relación con el servicio que presta.
- Flexibilidad o rigidez según la estructura portante.
- Ausencia de propiedades corrosivas para los materiales con los que el aislante está en contacto.
- Estabilidad física y química: ausencia de dilatación excesiva al calor, resistencia a diversos agentes de destrucción: humedad u oxidación.
- Buena resistencia mecánica.
- Estética si el producto queda visto.
- Incombustibilidad, por lo menos ausencia de inflamabilidad.

Cada clase de aislante, a menudo, se presta con un gran número de variedades o también de masas específicas. Con frecuencia, resulta difícil la elección entre los diferentes aislantes.

3.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AISLANTES

Los aislantes pueden clasificarse de muchas formas:

- Según su estructura: granular, fibrosa, alveolar, etc.
- Según su origen: vegetal, mineral, etc.
- Según su resistencia en las diferentes zonas de temperatura.

3.3. SECADO EN HORNO SOLAR

Los hornos de secado calentados con energía solar son una alternativa económica a los hornos convencionales (calentados con petróleo, electricidad, vapor, etc.) y al secado natural, especialmente para operaciones pequeñas, como aficionados o artesanos, en nuestro contexto para la carpintería y comerciantes de madera. Los secadores solares de madera tienen gran potencial en países en desarrollo, especialmente en localidades con poco acceso a fuentes de energía convencionales.

El secador de madera solar descrito en el presente trabajo de investigación consideró en el diseño investigado las referencias de investigaciones y desarrollo del horno solar para madera del continente americano y europeo. Existen hornos convencionales construidos para secar hasta 4,7 m³ (2.000 pies tablares) de madera. El prototipo descrito tiene una capacidad de **6498 cm³** y permite secar en las condiciones ambientales propias de la región del Cusco.

A pesar de que existen varios tipos de hornos solares para secar madera, el horno descrito en la presente investigación fue diseñado para tener eficiencia y rapidez en el secado y, facilidad en su operación durante el proceso de secado. Secar madera puede ser un proceso complejo; acelerar el secado sin tener pérdida de calidad muchas veces requiere un profundo conocimiento y experiencia. Este no es el caso del diseño aquí descrito, para

el cual no se requieren profundos conocimientos ni amplia experiencia, y tampoco un control muy estricto del proceso.

3.4. SECADO NATURAL

El secado natural es un proceso natural de secado directo que tiene como fin el uso de los medios existentes en el ambiente como la exposición directa a la radiación solar, con ventilación del aire circundante en una zona abierta, donde la madera a secar se coloca de varias formas siendo la vertical la más usada, generalmente donde no se puede evitar los defectos dimensionales durante el secado, aun tomando ciertas precauciones, además está el tiempo de secado que tarda varios meses; esta es la desventaja frente al horno solar. Por ejemplo una madera comercial traídas de barracas la humedad promedio es de 70 %, luego de un par de semanas tiene un 40% y después de dos meses se encuentra con 20% a 15% de humedad, el recomendado e ideal es llegar a una humedad de 12% para una buena trabajabilidad y no tenga deformaciones dimensionales ni estructurales. Se determinó el tiempo de secado promedio de las probetas de 19x19x3 cm de madera aguano, secadas al aire libre tuvieron en promedio un tiempo de 1983 horas

CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL HORNO SOLAR

En el presente capítulo se detallan las características tecnológicas del diseño de la cámara, definiendo los cálculos y selección en la ingeniería del secador.

4.1. DETALLES DEL HORNO SOLAR

El secador construido para secar madera aprovechando la energía solar, tiene las siguientes dimensiones y características: largo 840 mm, ancho 260 mm, altura mayor 320 mm, y dos alturas menores de 240 mm; lo que supone una caída o desnivel del techo de $13^{\circ}30'45''$ grados, que permite un fácil deslizamiento y salida del agua de lluvia.

La estructura con la que están construidas las paredes, es de pequeños listones de madera. El recubrimiento del techo es de vidrio transparente de 3mm de espesor por donde atravesará la energía solar, así mismo a los extremos del techo que tiene doble inclinación se encuentra colocados dos paneles solares pequeños de 6 voltios, los cuales captarán la energía solar para convertirla en energía eléctrica que se almacenaran en las dos baterías pequeñas dotando de energía a los ventiladores; las paredes, y puerta son de vidrio transparente de 3 mm y completando la estructura, el piso esta hecho de triplay de 3 mm de grosor.

Ahora a 33 mm de distancia, debajo del techo, se encuentra colocada una plancha plana de calamina, cuya función principal es la de acumular calor y energía provenientes del Sol, especialmente en horas de mayor intensidad solar. La parte superior de la calamina está pintada con pintura de color negro mate; el tamaño de la calamina es de 260 mm de ancho por

670 mm de largo, y no cubre totalmente el espacio del techo, sino que tiene una separación de 85 mm hacia las paredes laterales del interior de la cámara.

La cámara dispone de cuatro ventilas ubicadas en la pared norte de la cámara; las que se encuentra en la parte inferior a 10 mm de la base, por donde se elimina el aire caliente y húmedo. El tamaño de las ventilas es 10 mm y están sin portezuelas para una mejor salida y entrada del aire, conforme avanza el proceso de secado.

La puerta se encuentra ubicada en el costado oeste de la cámara, por lo que la madera fue colocada siguiendo la orientación este-oeste, a sea en sentido transversal al flujo del aire (norte-sur).

4.1.1. CAPACIDAD

Para la realización de este estudio, el secador solar tiene una capacidad de 64.98 metros cúbicos de madera, esta capacidad está dada en función de los parámetros requeridos de interés: diseño de la cámara de secado, ángulo de inclinación del techo, eficiencia y cinética de secado.

4.1.2. CONSUMO DE ENERGÍA

El inteligente concepto de energía alternativa, secado y de ventilación hará que el consumo sea extremadamente reducido, porque con la conversión de la energía solar en energía eléctrica, habrá cero usos de combustibles convencionales, consumiendo con eficiencia la energía térmica.

4.1.3. PERDIDAS DE ENERGÍA

Las pérdidas de energía generalmente se producen en las zonas de la puerta, la abertura de las ventilas, así como también en el techo y las paredes; las que se recomienda diseñarlas con aislamientos adecuados, de tal forma que no haya fuga de energía térmica en lo posible considerando para esto la selección técnica y económica adecuada de materiales en su diseño del horno solar.

4.1.4. PERMISIVIDAD DEL CALOR

Lo que está tibio o caliente despiden olas de calor, o irradian calor a su alrededor. Estas olas de calor se irradian de los objetos calientes a través del aire o el espacio. La mayor parte del calor radiante que despiden del colector caliente dentro de un horno solar se irradia a las maderas en el entorno a través del flujo de aire caliente. Aunque los vidrios transparentes atrapan la mayoría del calor radiante, un poco escapa directamente a través del vidrio. El cristal atrapa el calor radiante mejor que la mayoría de los plásticos

4.1.5. FLUJO DE AIRE

Como los rayos solares ingresan a través del techo entonces la misma se acumula en el colector, esta energía de radiación se convierte en energía térmica, entrando en contacto con el aire quien entra del exterior se calienta al pasar a través del colector y seca la madera al circular dentro del secador, en promedio la ventilación forzada del aire es de 2.5 mph y 2.1 mph para los ventiladores mediano y pequeño respectivamente. El aire húmedo es expulsado a través de las compuertas o recirculado para calentarlo nuevamente al paso por el colector.

A. CONSIDERACIONES EN EL USO DE VENTILADORES

- **Importancia del flujo de aire**

El flujo de aire en la cámara de horno es muy importante. La velocidad del aire a través de la madera afecta al tiempo y la calidad del secado.

Se debe estar seguro que la velocidad del aire en el horno, será la adecuada para las especies y el grosor de la madera que se usa, así como las características del horno. Generalmente, la madera más húmeda requiere mayor velocidad de aire a través de la pila.

- **Mayor número de ventiladores**

Instalando la cantidad adecuada de ventiladores en zonas estratégicas dotaremos de una mayor cantidad de aire creándose un flujo turbulento el cual evitará dejar zonas muertas sin flujo de aire indispensable para el transporte y extracción de humedad de la madera durante el proceso de secado, que es el caso de aplicación para el diseño de esta investigación.

- **Invertir el sentido de los ventiladores**

Los ventiladores por lo general invierten el sentido de giro del motor, invirtiendo el sentido de circulación del aire por la madera, en hornos más grandes. Esto previene un secado disparejo, forzando el aire a entrar en la pila primero desde un lado y luego desde el opuesto. Esto también corrige la existencia de zonas muertas, sin aire, en la(s) pila(s) como resultado del modo que se cargue la madera. Generalmente, si la madera es apilada a más de 3,5 metros (12 pies) en el sentido del flujo de aire debería tener inversión de ventiladores. Si la pila de madera es

menos que 12 pies, el cambio de dirección del flujo de aire no tendrá ningún efecto significativo en el secado.

4.1.6. CALOR REQUERIDO DE SECADO

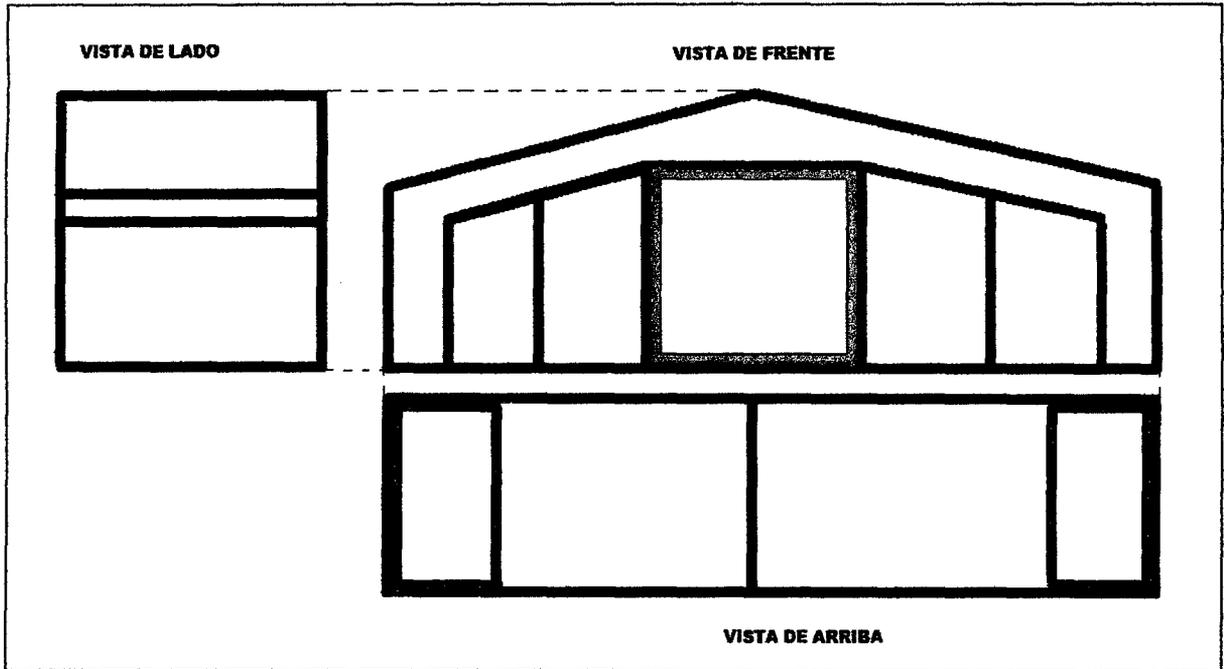
Los secadores solares dependen en gran medida del clima del sitio. En climas regulares con alta intensidad de brillo solar, la temperatura media dentro del secadero puede fácilmente exceder la temperatura media del ambiente hasta en 30°C. Para secar madera en forma eficaz y sin daños excesivos se requiere no solamente una temperatura elevada, sino que es indispensable un debido control del clima dentro del secadero solar.

4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCION

En la investigación para diseñar el horno solar se partió de acopiar información verídica de datos precisos y confiables que sustenten el propósito de esta investigación tecnológica, como son los parámetros sobre el clima, referencias de estudios y construcciones de dichos hornos, ubicación geográfica y características de la madera. Se manifiesta que el diseño es una modificación mejorada para la eficiencia y optimización del secado de la madera en condiciones de poca radiación solar durante la época de lluvias, entonces la construcción del prototipo pretende demostrar su eficiencia durante este periodo climático optimizándose en el diseño de la misma, para su aplicación en el secado.

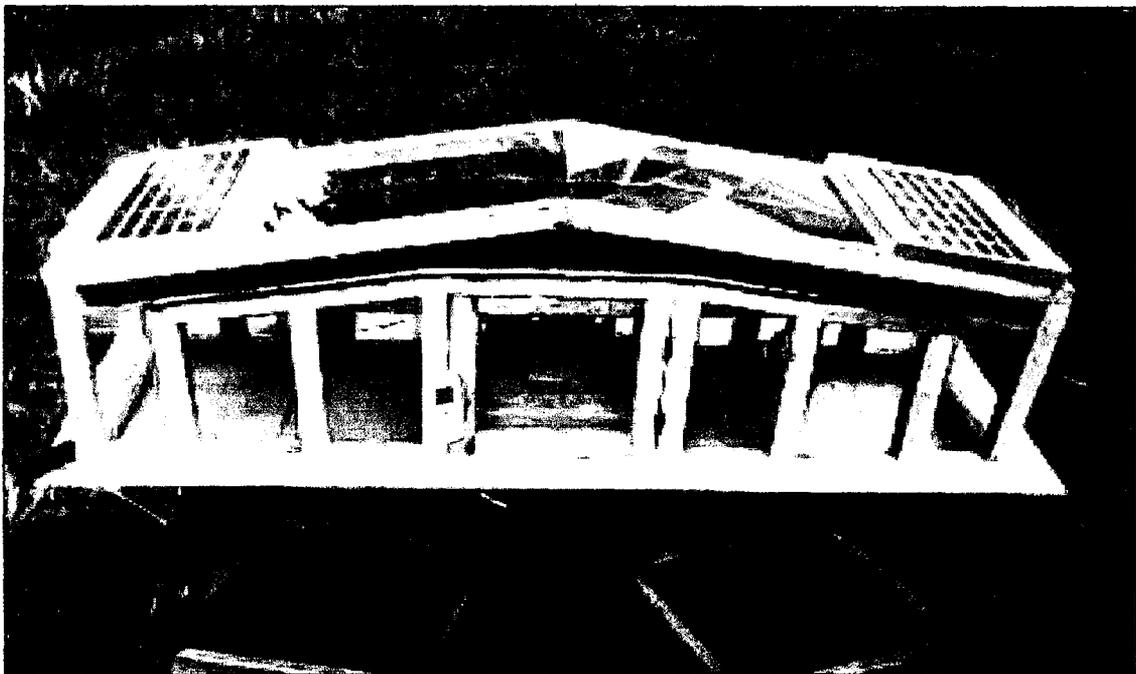
En la figura se muestra la estructura dimensionada en tres enfoques el cual se contrasta con la imagen real del horno construido, donde se puede observar detalles de los materiales componentes de su estructura y la geometría de la misma.

Figura 4-1: Esquema del horno prototipo



Fuente: Autor

Figura 4-2: Imagen del horno solar prototipo.



Fuente: Autor

Con estas consideraciones en la siguiente tabla se muestran los valores requeridos para el diseño y construcción del prototipo con las especificaciones y detallados para conocimiento durante el proceso de investigación.

4.2.1. DIMENSION DEL HORNO SOLAR

El horno solar prototipo, tiene dimensiones a escala de hornos solares industriales los cuales se adaptaron para su uso en los ensayos de muestras durante el proceso de secado realizados en laboratorio, que a continuación se mencionan.

Tabla 4-1: Dimensiones específicas del horno.

DIMENSIÓN GENERAL	CÁMARA DE SECADO	COLECTOR SOLAR	ANGULO Y ORIENTACIÓN (Techo y colector)	CELDA FOTOVOLTAICAS
Largo:820mm	Largo:430 mm	Largo:670 mm	13° 30' 45"	Largo: 260 mm
Ancho:260mm	Ancho:260mm	Ancho:260mm	Norte	Ancho: 150 mm
Altura mayor: 320 mm	Altura mayor: 240 mm			Largo: 260 mm
Altura menor *240 mm	Altura menor: 220 mm			Ancho: 150 mm
Altura menor : **240 mm	Altura menor: 220 mm			
Base del horno: 400x900 mm	Volumen: 11372.4 cm ³			
Volumen: 26514.8 cm ³				

Fuente: Autor

4.2.2. FUNDAMENTO TECNOLÓGICO

Para la construcción, el diseño se sustentó en diseños construidos existente de hornos o estufas solares para el secado de madera en distintas zonas de nuestro continente y otros lugares, la mayoría de diseños tienen una sola inclinación, el propuesto tiene doble inclinación para optimizar al máximo la captación de la radiación solar en el colector solar durante todo el día, con mejoras en la ventilación (mayor cantidad de ventiladores) que generen un flujo turbulento para la extracción rápida de la humedad interior durante el secado de la madera y ventilas con mayor abertura de entrada y salida del aire del ambiente.

4.2.3. ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL PROTOTIPO

Se consideró el uso de materiales básicos por su bajo costo y simplicidad en su elaboración, adaptando el efecto invernadero al secado y optando la alternativa ecológica de evitar su consumo de combustibles contaminantes (petróleo, gas, carbón, etc.), porque los ventiladores se alimentan con electricidad obtenidos de las celdas fotovoltaicas

Tabla 4-2: Elementos constituyentes del horno prototipo

MATERIAL	CANTIDAD
Pequeños listones de madera corriente	36
Calamina plana pequeña	01
Vidrio corriente (piezas)	22
Celdas fotovoltaicas pequeñas	02
Base de triplay pequeño	01
Envase pequeño de pintura negro mate	01
Ventiladores pequeños	04
Baterías recargables (6 voltios)	02

Fuente: Autor

4.2.4. DESCRIPCIONES DE LA MUESTRA

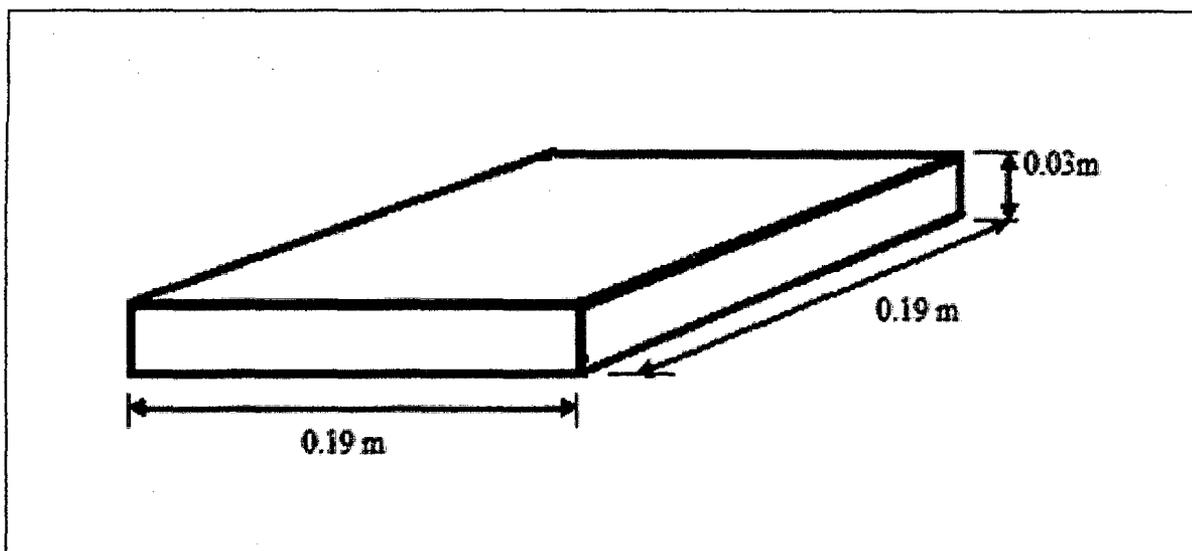
Las muestras a ensayar cumplen ciertas exigencias como el corte cuidadoso, estructura adecuada y la manipulación apropiada, porque durante el secado en el horno puede sufrir deformaciones estructurales influyendo en el diseño del horno solar posteriormente. En la siguiente tabla y figura 4-3 se muestran las especificaciones de las muestras:

Tabla 4-3: Datos de las muestras de madera.

MUESTRA	ESPECIE	HUMEDAD %	DIMENSION cm³	MASA gr	DENSIDAD gr/cm³
A	Aguano	14.90	3x19x19	688.40	0.64
B	Aguano	55.10	3x19x19	837.90	0.77
C	Aguano	17.80	3x19x19	703.90	0.65
D	Aguano	14.30	3x19x19	632.00	0.58
E	Aguano	38.50	3x19x19	792.10	0.73
F	Aguano	14.30	3x19x19	632.00	0.58

Fuente: Autor.

Figura 4-3: Dimensiones de la muestra a ensayar.



Fuente: Autor.

Tabla 4-4: Datos físicos de la muestra a ensayar

ESPECIE	HUMEDAD INICIAL	HUMEDAD FINAL	DIMENSION Espesor: ancho: largo	MASA gr	DENSIDAD gr/cm ³
Machaerium inundatum	%	%	cm		
Aguano	55.10	11.89	0.3x19x19	837.90	0.77

Fuente: Autor

4.2.5. ESPECIFICACIONES GEOGRÁFICAS Y METEREOLÓGICAS

Tabla 4-5: Datos físicos y climáticos (Región Cusco)

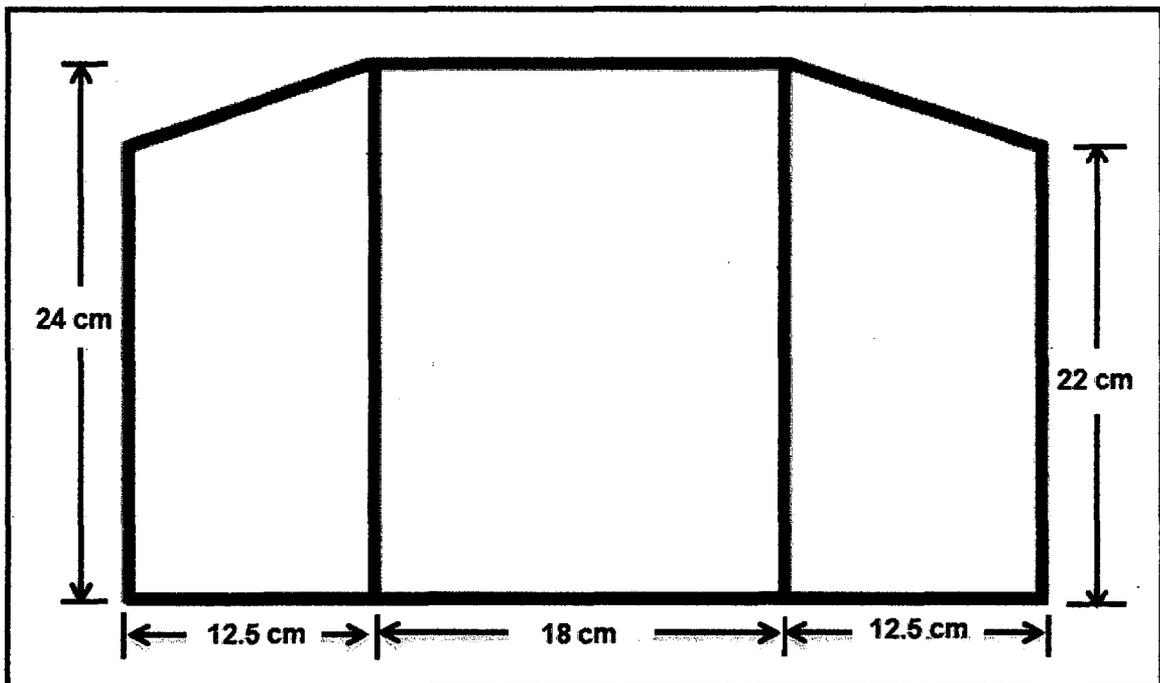
CARACTERÍSTICAS DE LA UBICACIÓN					DATOS METEREOLÓGICOS		
Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud msnm	P _{atm.} mbar	Velocidad aire Km/h	Radiación solar KW h/ m ²	T _{ambiente} °C	HR %
13° 30' 45"	71°58'33"	3399	103.00	7.58	5.17	19.60	28

Fuente: <http://www.senamhi.gob.pe>

4.2.6. DIMENSIÓN DE LA CÁMARA DE SECADO

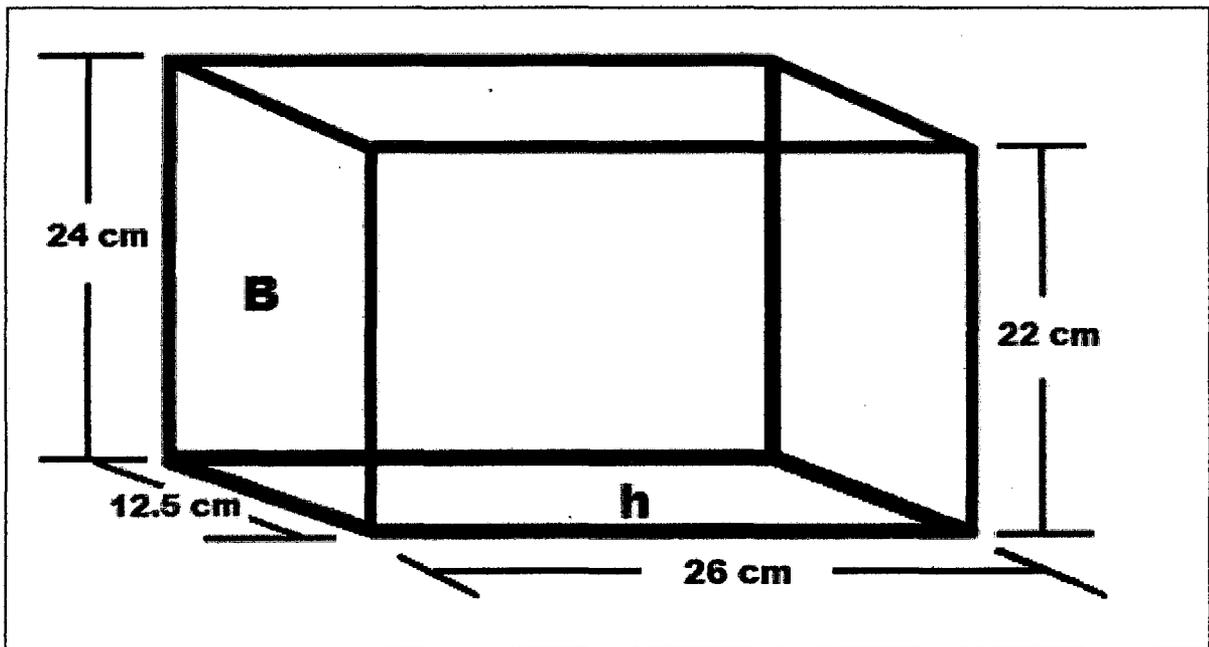
Las dimensiones se especificaran en función de los detalles del interés que se requerirán, en este caso para el horno prototipo se ajustaron a las medidas de la muestra (madera aguano) en la geometría (prisma recto y un ortoedro) de la cámara diseñada, de la figura siguiente:

Figura 4-4: Cámara de secado del horno prototipo (vista frontal)



Fuente: Autor

Figura 4-5: Lados de la cámara de secado (prisma recto).



Fuente: Autor

- EL VOLUMEN DEL PRISMA RECTO SERÁ:

$$V_{pr} = B * h \quad (4-1)$$

Donde:

B = Área de la base

h = Altura

$$B = \frac{(22.3+24.3)\text{cm}}{2} * 12.5 \text{ cm}$$

$$B = 291.2 \text{ cm}^2$$

Entonces, calculamos el volumen del prisma recto:

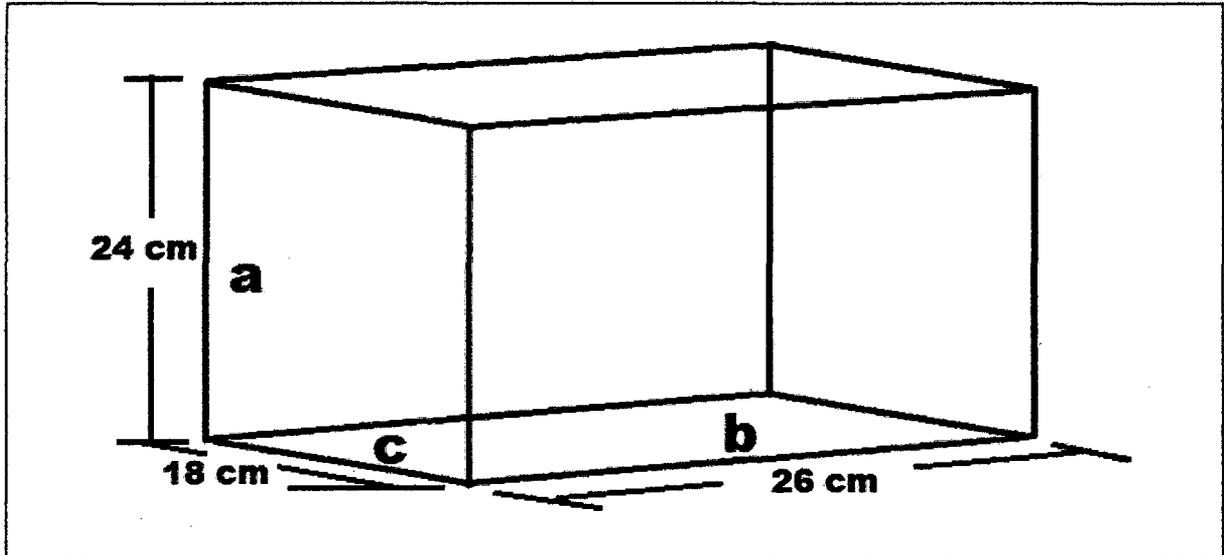
$$V_{pr} = (291.2 \text{ cm}^2)(26 \text{ cm})$$

$$V_{pr} = 7571.2 \text{ cm}^3; \text{ como son dos lados:}$$

$$V_{pr} = 2(7571.2 \text{ cm}^3)$$

$$V_{pr} = 15142.4 \text{ cm}^3$$

Figura 4-6: Diseño central de la cámara de secado (Ortoedro)



Fuente: Autor

- **AHORA OBTENEMOS EL VOLUMEN DEL ORTOEDRO**

$$V_{\text{ortoedro}} = a * b * c \quad (4-2)$$

$$V_{\text{ortoedro}} = [(24.3)(26)(18)]\text{cm}^3$$

$$V_{\text{ortoedro}} = 11372.4\text{cm}^3$$

- **POR LO TANTO EL VOLUMEN EXTERIOR SERÁ:**

$$V_{\text{exterior}} = V_{pr} + V_{\text{ortoedro}} \quad (4-3)$$

$$V_{\text{exterior}} = (15142.4 + 11372.4)\text{cm}^3$$

$$V_{\text{exterior}} = 26514.8 \text{ cm}^3$$

4.2.7. CÁLCULO DE LA CÁMARA INTERIOR

Se diseña la cámara interior del horno prototipo para su construcción; calculando el espesor de los aislantes ubicados de la

siguiente forma: las paredes son de vidrio de 3mm de espesor y el piso de triplay con 3mm de grosor; el techo interior viene a ser el colector, elemento principal de irradiación térmica a la cámara de interior para el secado; y no será considerado en los cálculos, se considera el espesor del vidrio y el triplay; con dimensiones de 0.3 cm respectivamente.

- **CALCULAMOS EL VOLUMEN DEL PRISMA RECTO; CON SU ESPESOR:**

$$B = \left[\frac{(22 + 24)\text{cm}}{2} \right] * 12.5\text{cm}$$

$$B = 287.5\text{cm}^2$$

$$V'_{\text{pr}} = (287.5 \text{ cm}^2)(25.4 \text{ cm})$$

$$V'_{\text{pr}} = 7302.5 \text{ cm}^3; \text{ son dos lados:}$$

$$V'_{\text{pr}} = 2(7302.5\text{cm}^3) = 14605 \text{ cm}^3$$

- **CALCULO DEL ORTOEDRO CON EL ESPESOR**

$$V'_{\text{ortoedro}} = a \cdot b \cdot c$$

$$V'_{\text{ortoedro}} = [(24)(25.4)(18)]\text{cm}^3$$

$$V'_{\text{ortoedro}} = 10972.8\text{cm}^3$$

- **POR LO TANTO EL VOLUMEN INTERIOR ES:**

$$V'_{\text{interior}} = V'_{\text{pr}} + V'_{\text{ortoedro}}$$

$$V'_{\text{interior}} = (14605 + 10972.8) \text{ cm}^3$$

$$V'_{\text{interior}} = 25577.8 \text{ cm}^3; \text{ este es el volumen interior.}$$

Por otra parte se sabe que la fórmula del volumen interior; es la suma de los volúmenes de la madera, el aire, los separadores, etc.¹³

$$V_{\text{int}} = V_{\text{MADERA}} + V_{\text{AIRE}} + V_{\text{SEPARADOR}} \dots \text{etc} \quad (4-4)$$

Entonces, para determinar el volumen de la madera consideremos las dimensiones de esta y del apilamiento dentro de la cámara.

En el espacio que se observa en la figura 3-4, se acondicionara la madera en el medio formando una pila, considerando para ello las siguientes dimensiones: Largo: 20 cm; ancho: 20 cm; altura: 24 cm. La altura toma en cuenta los espacios dejados en la base con el piso y la parte superior con el techo.

4.2.8. LA MADERA Y SU APILADO

Para determinar la cantidad de madera que pueda tener la cara frontal en la pila se calcula en la ecuación 4-5.

$$NT_{\text{CF}} = \frac{L_{\text{CF}}}{A_t} \quad (4-5)$$

Donde:

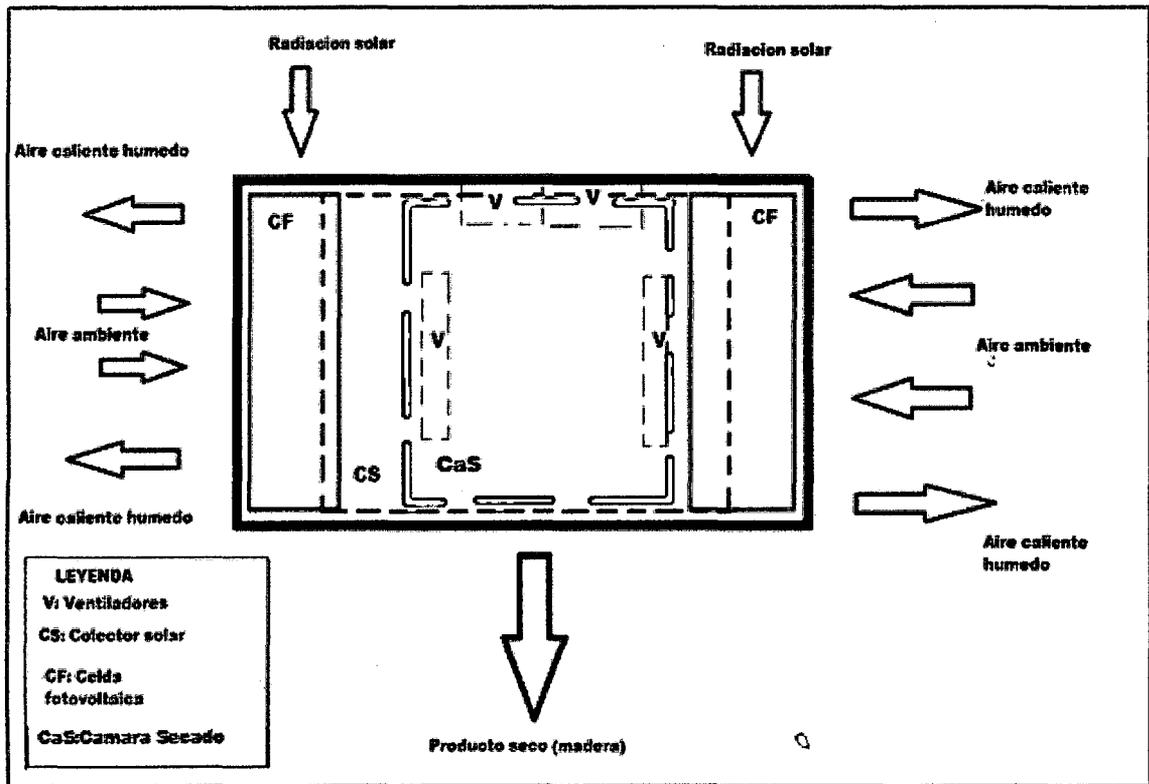
NT_{CF} =Numero de tablas en la cara frontal.

L_{CF} =Longitud de la cara frontal.

A_t =Ancho de la tabla.

¹³ Izaías Pozos Suárez, Tesis: Diseño Térmico para un Horno Solar de Secado de Madera. Universidad Veracruzana. México. (2010)

Figura 4-7: Distribución y proceso de secado en el horno.



Fuente: Autor

$$N_{CF} = \frac{20 \text{ cm}}{20 \text{ cm}}$$

$$N_{CF} = 1 \text{ tabla}$$

Ahora calculamos la cantidad de tablas en una cara lateral, de una pila:

$$NT_{CL} = \frac{A_p}{(e_t + e_s)} \quad (4-6)$$

Donde:

NT_{CL} = Número de tablas en la cara lateral.

A_p =Altura de la pila.

e_t =Espesor de la tabla.

e_s =Espesor del separador.

$$NT_{CL} = \frac{24 \text{ cm}}{(3\text{cm}+1\text{cm})}$$

$$NT_{CL} = 6 \text{ tablas}$$

Por tanto en la cámara del secador se tendrá 6 tablas pequeñas (muestras) de águano. Con estos datos obtenidos se procederá a calcular el volumen de la madera.

4.2.9. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA MADERA

$$V_{MADERA} = CT_t \cdot V_t \quad (4-7)$$

Donde:

CT_t =Cantidad total de tablas en el horno.

V_t =Volumen de una tabla.

$$V_{MADERA} = (6)(1083\text{cm}^3)$$

$$V_{MADERA} = 6498 \text{ cm}^3$$

▪ AHORA SE OBTIENE EL VOLUMEN DE UN SEPARADOR

$$V_s = (\text{Largo})(\text{Ancho})(\text{Espesor}) \quad (4-8)$$

$$V_s = (20\text{cm})(1\text{cm})(1\text{cm}) = 20\text{cm}^3$$

- **EL VOLUMEN TOTAL DE LOS SEPARADORES SERÁ:**

$$V_{TS} = NT_S \cdot V_S \quad (4-9)$$

Donde:

NT_S =Número total de separadores

V_S =Volumen de un separador

$$V_{TS} = (12)(20\text{cm}^3) = \mathbf{240 \text{ cm}^3}$$

4.9.10. VOLUMEN DEL AIRE EN EL HORNO

El volumen del aire viene a ser igual al volumen interior menos la suma de los volúmenes de la madera y los separadores.

$$V_{\text{int}} = V_{\text{MADERA}} + V_{\text{AIRE}} + V_{\text{SEPARADOR}}$$

$$V_{\text{AIRE}} = V_{\text{int}} - (V_{\text{MADERA}} + V_{\text{SEPARADOR}}) \quad (4-10)$$

$$V_{\text{AIRE}} = 25577.8 \text{ cm}^3 - (6498 \text{ cm}^3 + 240 \text{ cm}^3)$$

$$V_{\text{AIRE}} = 18839.8 \text{ cm}^3$$

Con estos cálculos obtenidos la capacidad del horno es de 6498 cm³ de madera aguano, 240 cm³ de separadores y 18839.8 cm³ de aire.

4.2.11. ORIENTACIÓN Y ÁNGULO DEL COLECTOR SOLAR

Para el diseño del presente horno solar se debe considerar que siendo una superficie plana tiene que tener una orientación en dirección este-oeste con su eje longitudinal y la inclinación

dependerá de la época del año y la latitud del lugar donde se instalará el horno solar. Entonces la instalación óptima del colector solar se determinara en función del ángulo de declinación mensual del Sol y de la latitud

Para la latitud del lugar se supone que los valores para el hemisferio norte sean positivos y para el hemisferio sur negativo como se muestra. Se puntualiza al ángulo de declinación del Sol como el ángulo entre la dirección de la Tierra-Sol y el plano del ecuador del planeta Tierra. También se precisa como aquella distancia cenital del sol al medio día sobre el ecuador.

Por consiguiente las ecuaciones utilizadas para el cálculo del **ángulo de inclinación** del colector solar plano son:

$$\text{Hemisferio Norte: } \alpha = \phi - \sigma \quad (4-11)$$

$$\text{Hemisferio Sur: } \alpha = \delta - \phi \quad (4-12)$$

Donde:

α =Ángulo de inclinación del colector solar plano

ϕ =Latitud de la zona de instalación

δ =Ángulo de declinación medio mensual del Sol

Considerando que el colector solar sea utilizado todo el año entonces el ángulo de declinación medio mensual no será considerado, entonces:

$$\delta = 0$$

Ahora determinando el ángulo de inclinación del colector solar usaremos el valor de la latitud de la ciudad de Cusco y la ecuación porque está ubicada en el Hemisferio Sur.

$$\phi = 13^{\circ}30'45'' \text{ (Latitud de Cusco)}$$

$$\alpha = \delta - \phi = 0 - (-13^{\circ}30'45'') = 13^{\circ}30'45'' \text{ (ec. 4-12; pág. 119)}$$

Entonces el colector solar se colocara de acuerdo al ángulo de inclinación que es:

$$13^{\circ}30'45''$$

Como está dada por la latitud del lugar en donde se instalara el horno solar la orientación de la cara del colector solar en el hemisferio sur es hacia el norte u orientada al sur si está en el hemisferio norte. Para nuestro prototipo consideraremos su orientación hacia el norte.

4.3. PROCESO DE SECADO

Para el proceso de secado el horno prototipo es colocado sobre pequeñas sillas en una zona adecuada en el jardín en frente de uno de los laboratorios de Ingeniería Química en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco; esto para un mayor control del proceso y manipulación de los dispositivos y otros accesorios.

La orientación hacia el norte del secador hace que el colector absorba inmediatamente la radiación solar el cual ira maximizándose con el transcurso del tiempo, siendo al mediodía el periodo óptimo de acumulación térmica en el colector.

El proceso de secado se inicia en horas de la mañana aproximadamente de 9.00 a 10.00 a.m., colocando una muestra de madera aguano en el interior de la cámara de secado, cerrándola inmediatamente, luego se instalan los pirómetros como se ve en la fig. 4-17, así mismo se conecta a las celdas fotovoltaicas las baterías para alimentar con energía a los ventiladores que expulsaran el aire caliente húmedo

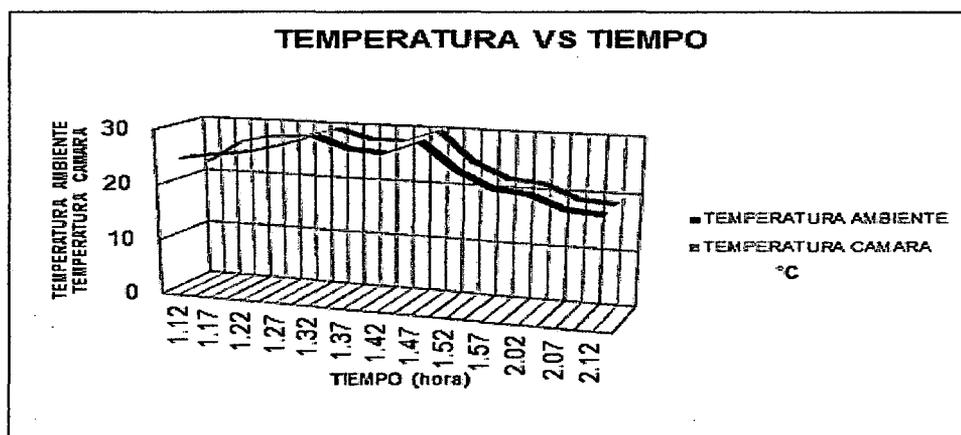
Con la probeta de madera colocada en el interior de la cámara, se procede al secado durante tres horas diarias por seis días, observándose el proceso de secamiento, registrando cada información de los parámetros: **Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Aire, Tiempo** y otras propiedades físicas (color y volumen de la madera) durante el proceso de secado, las pruebas de ensayo de la probeta de aguano para validar el diseño

Tabla 4-6: Mediciones de temperatura en el horno solar (1)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)
19/12/2012	1:12 a 2:12	24.87	25.14

Fuente: Autor

Figura 4-8: Variación de la temperatura (1)



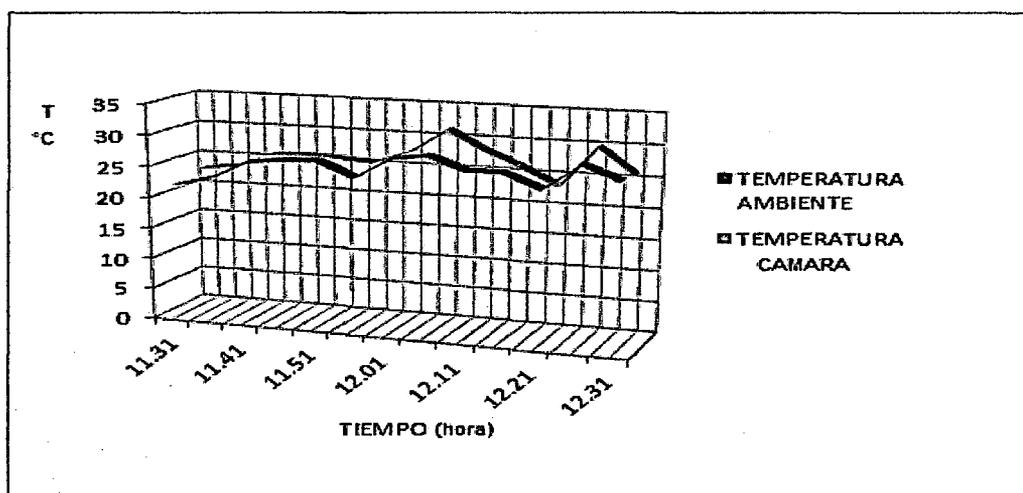
Fuente: Autor

Tabla 4-7: Mediciones de temperatura en el horno solar (2)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)
20/12/12	11:31 a 12:31	26.05	26.43

Fuente: Autor

Figura 4-9: Variación de la temperatura (2)



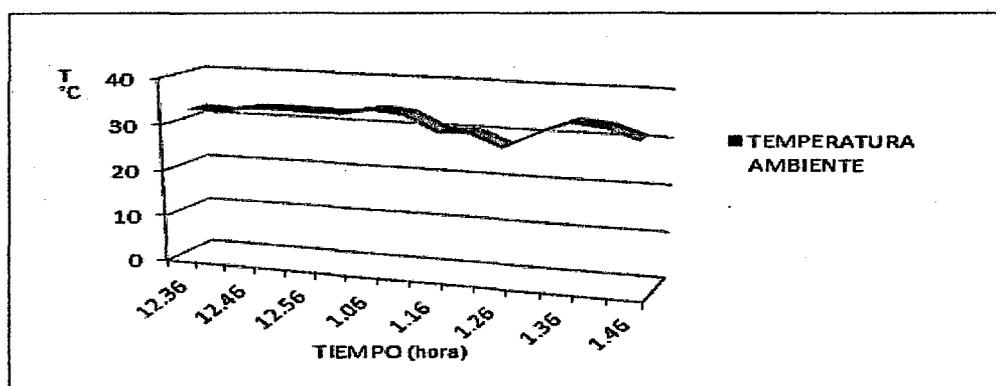
Fuente: Autor

Tabla 4-8: Mediciones de temperatura en el horno solar (3)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)
20/12/12	12:36 a 13:36	30.0	32.43

Fuente: Autor

Figura 4-10: Variación de la temperatura (3)



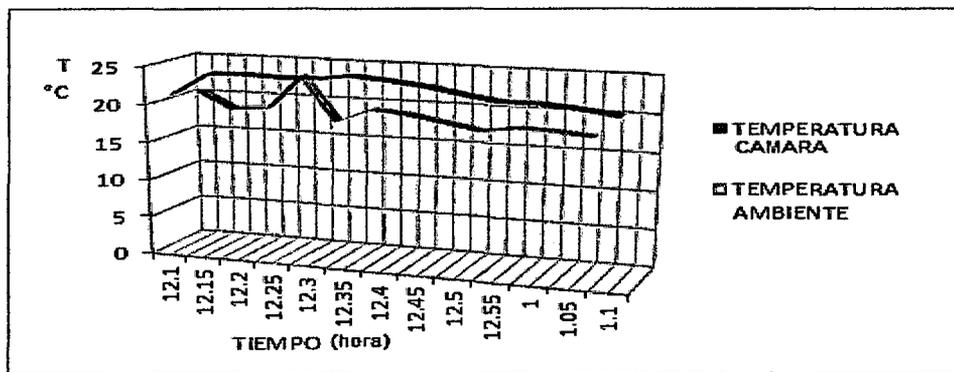
Fuente: Autor.

Tabla 4-9: Mediciones de temperatura en el horno solar (4)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)
22/12/12	12:10 a 13:10	18.63	23.10

Fuente: Autor

Figura 4-11: Variación de la temperatura (4)



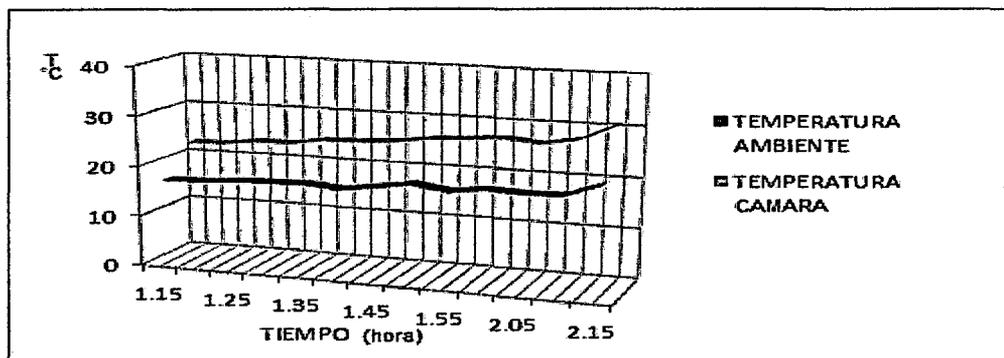
Fuente: Autor.

Tabla 4-10: Mediciones de temperatura en el horno solar (5)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)
22/12/12	13:15 a 14:15	18.49	25.63

Fuente: Autor

Figura 4-12: Variación de la temperatura (5)



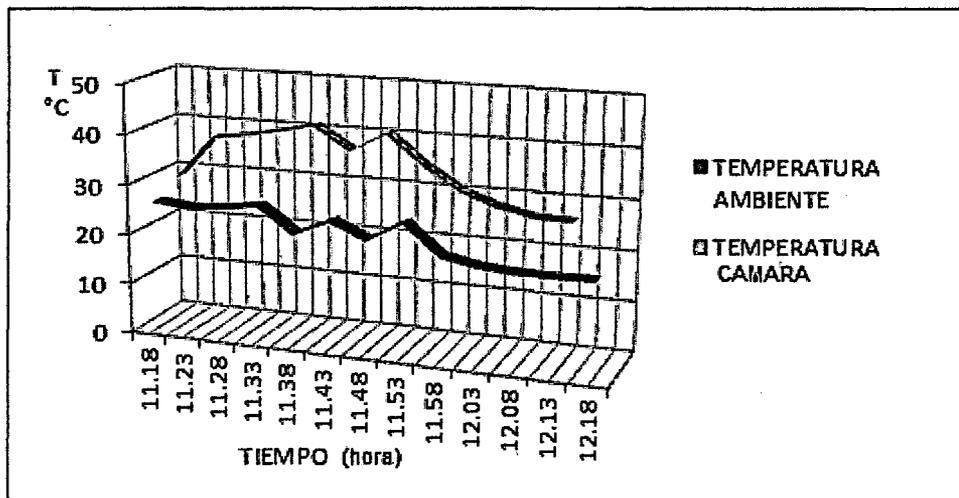
Fuente: Autor.

Tabla 4-11: Mediciones de temperatura en el horno solar (6)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)
24/12/12	11:18 a 12:18	22.79	34.47

Fuente: Autor

Figura 4-13: Variación de la temperatura (6)



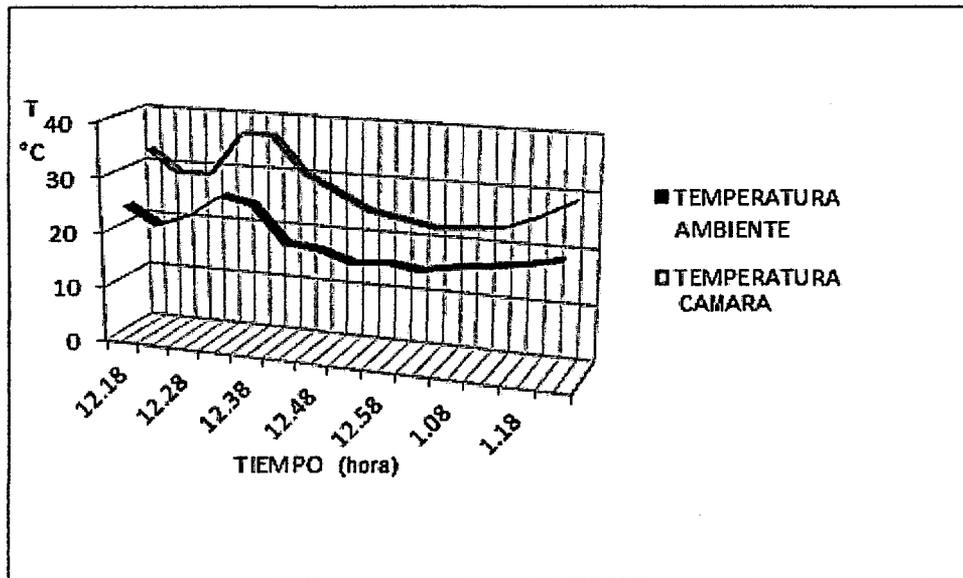
Fuente: Autor.

Tabla 4-12: Mediciones de temperatura en el horno solar (7)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)	PESO(W) gr.	ΔW gr	H %
28/12/12	12:18 a 1:18	21.12	28.30	801.7	3.4	42
				798.3		
				796.2		

Fuente: Autor

Figura 4-14: Variación de la temperatura (7)



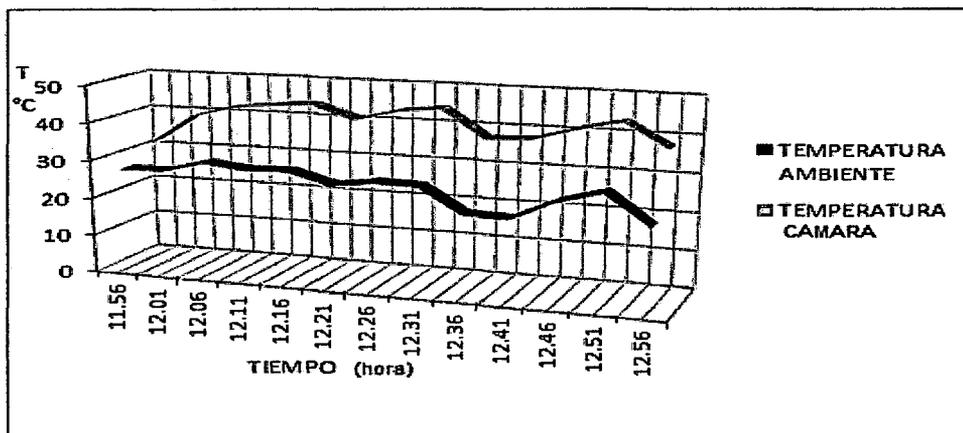
Fuente: Autor.

Tabla 4-13: Mediciones de temperatura en el horno solar (8)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)	PESO (gr)
03/01/2013	11:56 a 12:56	26.48	40.59	765.4-760.6

Fuente: Autor.

Figura 4-15: Variación de la temperatura (8)



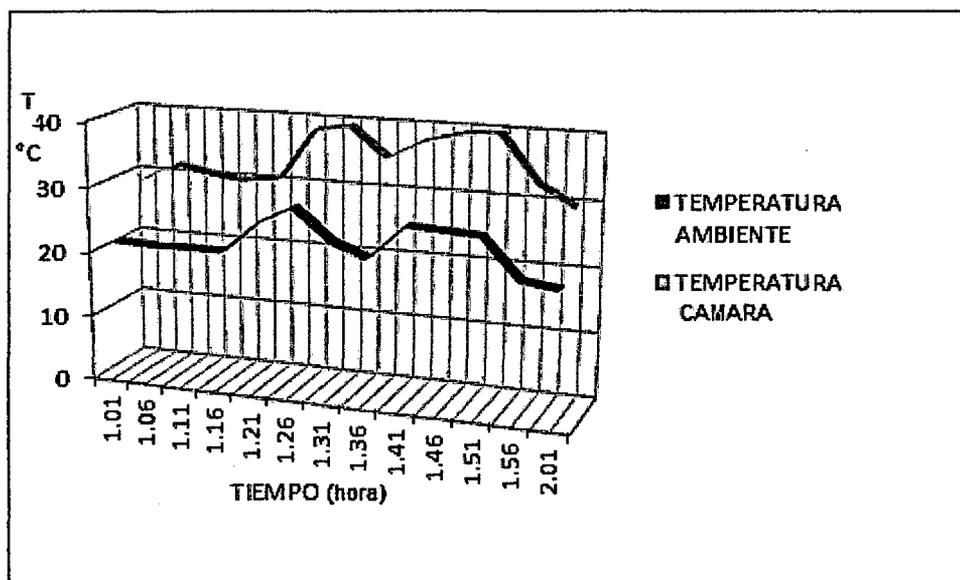
Fuente: Autor.

Tabla 4-14: Mediciones de temperatura en el horno solar (9)

FECHA	TIEMPO (t)*	T° ambiente(°C)	T° camara(°C)	PESO (gr.)
03/01/2013	1:01 a 2:01	23.52	34.29	760.6-757.6

Fuente: Autor

Figura 4-16: Variación de la temperatura (9)



Fuente: Autor.

Tabla 4-15: Temperaturas del colector.

Fecha	Tiempo	T° colector(°C) (lado derecho)	T° colector(°C) (medio)	T° colector(°C) (lado izquierdo)
19/12/2012	11:18	27.0	34.0	30.0
26/12/2012	11:22	30.0	29.5	36.1
03/01/2013	11:56	29.5	42.1	28.8

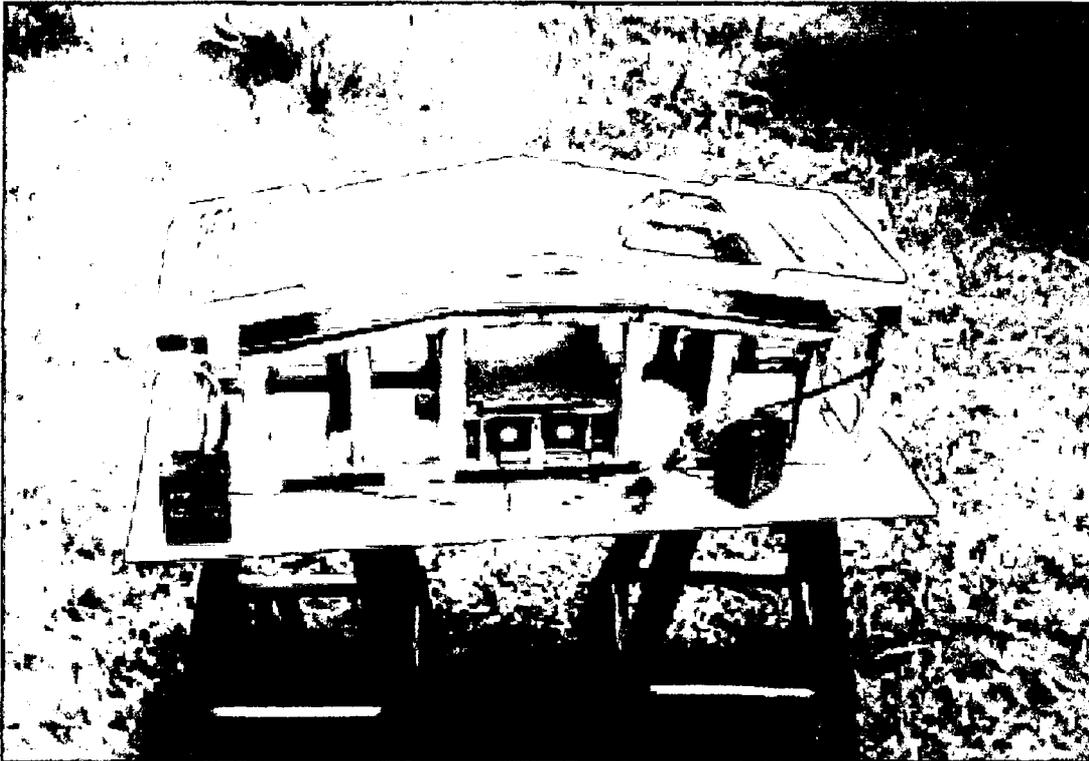
Fuente: Autor

Tabla 4-16: Resumen de resultados experimentales

Temperatura ambiental	Temperatura horno	Humedad Inicial	Humedad final	Tiempo (horas)	Masa Inicial	Masa Final
23.10 °C	30.04°C	55.1 %	11.9 %	139	837.9 gr	748.8 gr.

Fuente: Autor

Figura 4-17: Horno prototipo con dispositivos instalados.



Fuente: Autor

4.4. ENSAYOS

Para el ensayo se procederá a someter al secado la probeta "B" la que muestra sus propiedades en la siguiente tabla:

Tabla 4-17: Propiedades físicas de la muestra a ensayar

MUESTRA	ESPECIE	HUMEDAD %	PESO (gr.)	DENSIDAD (g/cm³)	VOLUMEN (cm³)
B	Aguano	55.10	837.90	0.77	1083.00

Fuente: Autor

4.5. BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

4.5.1. BALANCE DE MASA

El balance de materia en el proceso de secado se efectúa con la finalidad de saber la cantidad de aire necesario para secar la madera aguano y la cantidad de agua eliminada en el secado.

Base de cálculo = 0.8379 Kg.

Contenido de humedad inicial = 55.10%

Contenido de humedad final = 11.9%

Tabla 4-18: Balance de masa para el agua.

Entrada	Salida
Madera húmeda: 0.8379 Kg	Madera seca = 0.43858 Kg
Agua: $0.8379 * 0.551 = 0.46168$ kg	Agua: $(0.46168 * 0.119)/0.881 = 0.06236$ kg
Solido seco: $0.8379 - 0.46168 = 0.37622$ kg	Solido seco = 0.37622 Kg

Fuente: Autor

Cantidad de agua evaporada: $0.46168 - 0.06236 = 0.39932$ Kg

Tabla 4-19: Balance de masa para el aire

Entrada	Salida
Aire del ambiente: 18.8398 Kg	Aire humedo = 18.8398 Kg de aire del ambiente + 0.39932 Kg de agua evaporada = 19.23912 Kg

Fuente: Autor

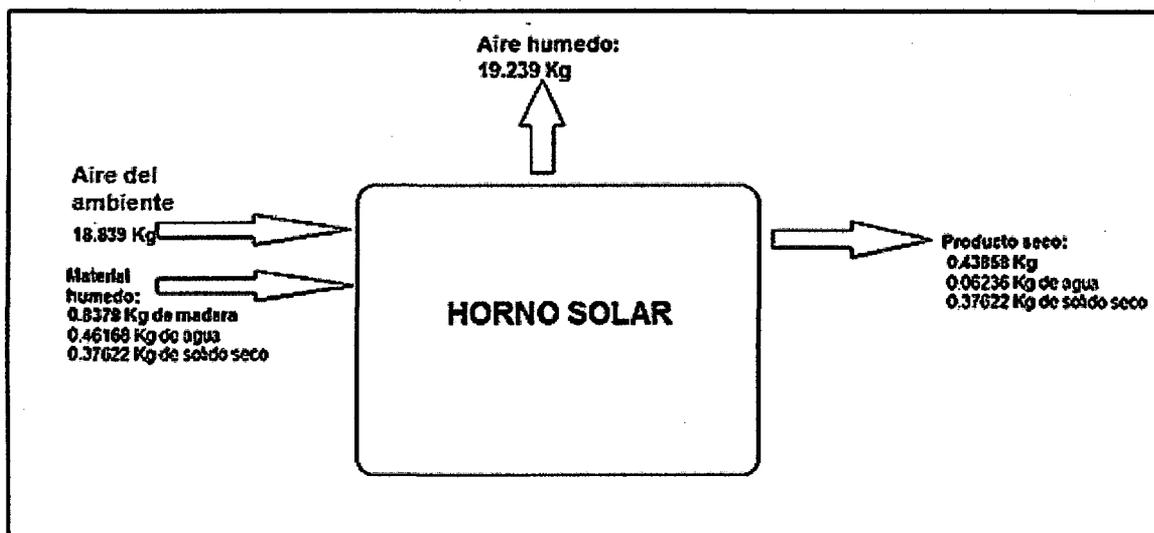
$$V_{\text{int}} = V_{\text{MADERA}} + V_{\text{AIRE}} + V_{\text{SEPARADOR}} \dots \text{etc} \quad (4-4)$$

$$V_{\text{AIRE}} = V_{\text{int}} - (V_{\text{MADERA}} + V_{\text{SEPARADOR}}) \quad (4-10)$$

$$V_{\text{AIRE}} = 25577.8 \text{ cm}^3 - (6498 \text{ cm}^3 + 240 \text{ cm}^3)$$

$$V_{\text{AIRE}} = 18839.8 \text{ cm}^3$$

Figura 4-18: Diagrama del balance de materia en el horno solar



Fuente: Autor

4.5.2. BALANCE TERMICO

A. Cantidad de calor que pasa por la pared de vidrio

Se parte de la ecuación (2-14; pág. 56). Base de cálculo = 0.8379 Kg. (probeta de madera aguano)

$$Q_{\text{cond}} = -k * A * \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) [w]$$

Donde:

k = Conductividad térmica del vidrio

A = Área de la plancha de vidrio superior

ΔT = Diferencia de temperatura: $T_2 - T_1$

Δx = Espesor de la pared (vidrio)

Por consiguiente:

$k = 0.67 \text{ Kcal/hm } ^\circ\text{C}^{14}$

$A = 0.1352 \text{ m}^2$

$\Delta T = T_2 - T_1 = (30.04 - 23.10) ^\circ\text{C} = 6.94 ^\circ\text{C}$ (datos de la tabla 4-6 a la 4-14: temperatura promedio)

$\Delta x = 0.003 \text{ m}$

Entonces:

$$Q_{\text{cond}} = \left(\frac{0.67 \text{ kcal}}{\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right) 0.1352 \text{ m}^2 \left(\frac{6.94 ^\circ\text{C}}{0.003 \text{ m}} \right)$$

$$Q_{\text{cond}} = 209.76 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

B. Cantidad de energía que se suministra a la placa colectora de energía solar

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A_s * [(T_s^4 - T_{\text{alred}}^4)] \quad (2-19; \text{pág. 61})$$

¹⁴ Fuente: Transferencia de calor y masa. Yunus A. Cengel. Tercera edición. 2007. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México.

Donde:

ε = Emisividad de la placa colectora = 0.90

T_s^4 = Temperatura termodinámica placa del colector 305.05°K

T_{alred}^4 = Temperatura termodinámica alrededor = 296.25°K

A_s = Área superficial de la placa colectora = 0.1742m²

σ = Constante de Stefan-Boltzmann = $5.6704 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$

Entonces:

$$Q = 0.90 * 5.6704 \times 10^{-8} \frac{\text{watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} 0.1742 \text{m}^2 * [(305.05^\circ\text{K})^4 - (296.25^\circ\text{K})^4]$$

$$Q = 8.50 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

C. Pérdidas de calor en las paredes del secador:

Para calcular las pérdidas de calor que se producen en las paredes del secador se debe partir de la ecuación (2-20; pág. 61):

$$Q = U * A * \Delta T$$

Donde:

U = Coeficiente de transferencia de calor total

A = Área transversal al flujo de calor

ΔT = Gradiente de temperatura responsable del transporte

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (30.04 - 23.10)^\circ\text{C} = 6.94^\circ\text{C}$$

U = Coeficiente de transferencia de calor total, como son paredes expuestas al ambiente la pérdida de calor es por convección natural por lo que: $U = h$ (siendo h el coeficiente de convección, debe tomarse en cuenta que el varía de acuerdo a la pared); es así que para:

$$\text{Paredes horizontales hacia arriba: } h_a = 2.1 \cdot \Delta T^{0.25} = 3.41 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\text{Paredes horizontales hacia abajo: } h_b = 1.1 \cdot \Delta T^{0.25} = 1.78 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Paredes verticales con largo > 0.40m:

$$h_c = 1.5 \cdot \Delta T^{0.25} = 2.43 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Las paredes del secador están divididas en 5 partes:

$$A_1 = \text{Pared superior} = 0.2184 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \text{Pared inferior} = 0.2132 \text{ m}^2$$

$$A_3 = \text{Pared frontal} = 0.2296 \text{ m}^2$$

$$A_4 = \text{Pared trasera} = 0.2296 \text{ m}^2$$

$$A_5 = \text{Pared lateral} = 0.0624 \text{ m}^2 \text{ (aquí son dos paredes)}$$

Donde:

$$Q_1 = h_a \cdot A_1 \cdot \Delta T = 3.41 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.2184 \text{ m}^2 \cdot 6.94^\circ\text{C} = 5.17 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_2 = h_b \cdot A_2 \cdot \Delta T = 1.78 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.2132 \text{ m}^2 \cdot 6.94^\circ\text{C} = 2.63 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_3 = h_c \cdot A_3 \cdot \Delta T = 2.43 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.2296 \text{m}^2 \cdot 6.94^\circ\text{C} = 3.87 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_4 = h_c \cdot A_4 \cdot \Delta T = 2.43 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.2296 \text{m}^2 \cdot 6.94^\circ\text{C} = 3.87 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_5 = h_c \cdot A_5 \cdot \Delta T = 2.43 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.0624 \text{m}^2 \cdot 6.94^\circ\text{C} = 1.05 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Como son dos paredes, entonces: $Q_5 = 2.10 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 17.64 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

D. Eficiencia del secador

Este cálculo se desarrollara en la siguiente forma:

- Área de evaporación, ecuación (2-1; pág. 38):

$$A_e = \frac{2V_t}{e}$$

$$A_e = \frac{2(0.001083 \text{m}^3)}{0.03 \text{m}}$$

$$A_e = 0.0722 \text{m}^2$$

- Área efectiva de evaporación, ecuación (2-2; pág. 38):

$$A_{et} = (A_e - A_l)$$

$$A_{et} = (0.0722 \text{m}^2 - 0.0361 \text{m}^2)$$

$$A_{et} = 0.0361 \text{m}^2$$

- Peso total (apilado) de la madera, ecuación (2-3; pág. 39):

$$m = D * V_p$$

Para calcular m, necesitamos el valor del volumen de madera real a secarse, ecuación (2-4; pág. 39):

$$V_p = A_{et} * h_p$$

$$V_p = 0.0361m^2 * 0.23m$$

$$V_p = 0.008303m^3$$

Al reemplazar V_p en m:

$$m = 770 \frac{Kg}{m^3} * 0.008303m^3$$

$$m = 6.39 Kg$$

- Razón de agua a evaporar, de la ecuación (2-5; pág. 39):

$$AE = m * (X_i - X_f)$$

$$AE = 6.39 Kg * (0.551 - 0.12)$$

$$AE = 2.75 \frac{Kg}{carga}$$

- Calor sensible para calentar la madera aguano

Base de cálculo: 0.8379 Kg de una probeta de madera aguano.

$$q_1 = m_p * C_p * \Delta T \quad (2-6; pág. 39)$$

Donde:

m_p = Masa de la madera humeda

C_p = Calor especifico de la madera

ΔT =Diferencia de temperatura entre el medio ambiente y el interior de la cámara de secado.

$$q_1 = 0.8379 \frac{\text{Kg}}{\text{carga}} * \frac{1 \text{ carga}}{139 \text{ horas}} * 0.33 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg. } ^\circ\text{C}} * 6.94^\circ\text{C}$$

$$q_1 = 0.014 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

- Calor necesario para evaporar el agua contenida en la madera

$$q_2 = m * h_{fg} \quad (2-7; \text{pág. 40})$$

Donde:

m =Masa de agua evaporada durante el proceso de secado

h_{fg} =Calor latente del agua a 30.04°C

$$q_2 = 0.39932 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{carga}} * \frac{1 \text{ carga}}{139 \text{ horas}} * \frac{579.6 \text{ Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$q_2 = 1.66 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Entonces el calor útil será:

$$Q_u = q_1 + q_2 \quad (2-8; \text{pág. 40})$$

$$Q_u = 0.014 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 1.66 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_u = 1.67 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

- Eficiencia térmica en el interior de la cámara de secado:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} * 100 \quad (2-9; \text{pág. 40})$$

$$\eta = \frac{1.67 \text{ Kcal/h}}{8.50 \text{ Kcal/h}} * 100$$

$$\eta = 19.69\%$$

Por lo tanto la eficiencia térmica del horno solar prototipo es de 19.69%

- E. Cálculo de la cantidad de aire que debe pasar por el secador, ecuación (2-19; pág. 41):**

$$M = \frac{AE_m}{Y} \left[\frac{\text{Kg aire seco}}{h} \right]$$

M = Cantidad de aire que debe pasar por el secador

$$Y = \text{Constante} = \frac{\frac{0.016 \text{ Kg agua}}{h}}{\text{Kg aire seco}}$$

$$\text{Pero: } AE_m = \frac{AE}{t_s} \quad (2-11; \text{pág. 41})$$

$$AE_m = \frac{2.75 \text{ Kg}}{139 \text{ horas}} = 0.02 \frac{\text{Kg}}{h}$$

Por consiguiente:

$$M = \frac{\frac{0.02 \text{ Kg}}{h}}{\frac{0.016 \text{ Kg agua}}{h}} \frac{h}{\text{Kg aire seco}}$$

$$M = 1.25 \frac{\text{Kg aire seco}}{h}$$

F. Cálculo del calor requerido para evaporar el agua de la madera:

$$Q_c = H_v - H_a \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right] \quad (2-12; \text{pág. 41})$$

Q_c = Calor necesario para evaporar el agua

H_v = Entalpía del vapor de agua

H_a = Entalpía del agua

Las dos entalpías se establecen por las temperaturas del agua al ambiente y de ebullición.

T_a = Temperatura ambiente es 23.10 °C, ∴ $H_a = 20.03 \text{ Kcal/Kg}$

T_e = Temperatura de ebullición es 87.9°C, ∴ $H_v = 633.20 \text{ Kcal/Kg}$

Ahora reemplazamos en:

$$Q_c = (633.20 - 20.03) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

$$Q_c = 613.17 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

G. Cálculo del calor requerido para evaporar las AE de agua que tiene la madera:

$$Q_m = Q_c \cdot AE \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{carga}} \right] \quad (2-13; \text{pág. 42})$$

$$Q_m = 613.17 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} * 2.75 \frac{\text{Kg}}{\text{carga}}; \Rightarrow Q_m = 1688.72 \frac{\text{Kcal}}{\text{carga}}$$

CAPÍTULO V:

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. PRESENTACIÓN

Los resultados obtenidos en los cálculos del diseño para los parámetros de eficiencia y la cámara de secado son función de medidas físicas y fisicoquímicas, al igual que los ensayos obtenidos en el proceso de secado; dados en función del clima presente.

5.2. EL PRODUCTO OBTENIDO

Se refiere a la madera aguano que durante el tiempo de secado en el proceso las muestras en las condiciones ambientales, desde su humedad inicial desciende hasta un final de 12 % aproximadamente; estabilizándose con las condiciones antes mencionadas, observando que el tiempo de secado en el horno prototipo es menor y elevado en calidad al no sufrir alteraciones dimensionales ni estructurales. Asimismo se muestra en las figuras 5-2 y 5-3 los tipos de apilamiento para el secado al aire libre y la transición del secado de la madera respectivamente.

Tabla 5-1: Resumen de resultados experimentales (pág. 128)

Temperatura ambiental	Temperatura horno	Humedad Inicial	Humedad final	Tiempo (horas)	Masa Inicial	Masa Final
23.10 °C	30.04°C	55.1 %	11.9 %	139	837.9 gr	748.8 gr.

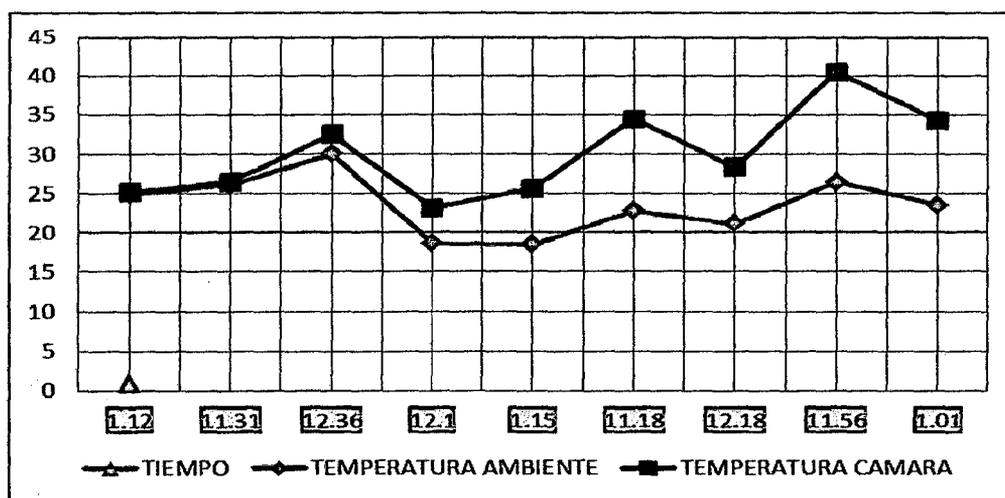
Fuente: Autor

Tabla 5-2: VARIACION DE LA TEMPERATURA EN FUNCION DEL TIEMPO

Fecha	Tiempo (t)*	T° ambiente (°C)	T° camara (°C)
19/12/2012	1:12 a 2:12	24.87	25.14
20/12/12	11:31 a 12:31	26.05	26.43
20/12/12	12:36 A 13:36	30.0	32.43
22/12/12	12:10 A 13:10	18.63	23.10
22/12/12	13:15 A 14:15	18.49	25.63
24/12/12	11:18 A 12:18	22.79	34.47
28/12/12	12:18 A 1:18	21.12	28.30
03/01/2013	11:56 A 12:56	26.48	40.59
03/01/2013	1:01 A 2:01	23.52	34.29

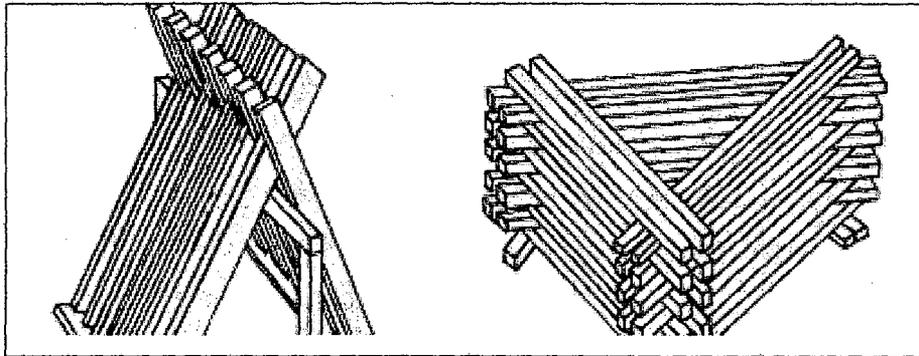
Fuente: Autor

Fig. 5-1: Variación de la temperatura



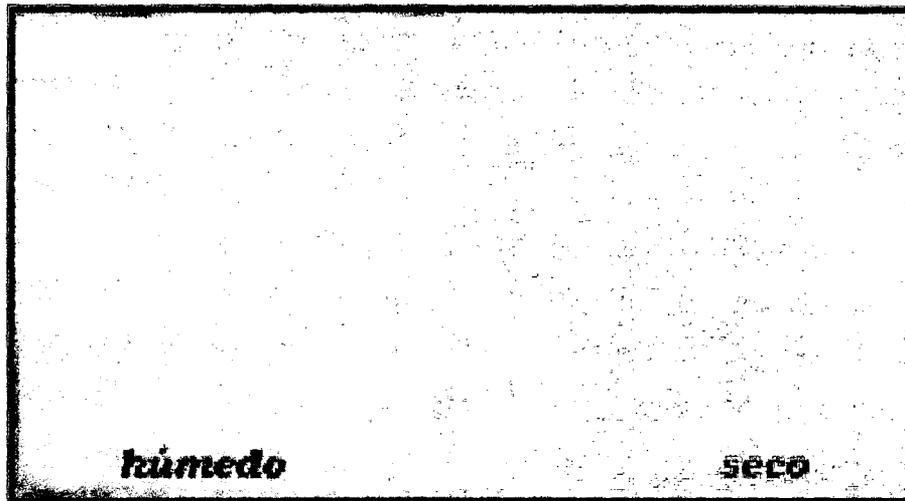
Fuente: Autor

Fig. 5-2: Apilado en caballete y triangulo de la madera



Fuente: www.wikipedia.org.com

Fig. 5-3: La transición de secado en la madera



Fuente: Autor

5.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante el desarrollo de la presente tesis se indica que las pruebas realizadas en el secadero prototipo, dan mejores resultados en relación al tiempo transcurrido durante el proceso de secado, el cual se fundamenta en los siguientes puntos:

- El secado en función del tiempo de las muestras de aguano en el horno solar, es significativamente menor en relación al tiempo que demoró en secarse el mismo material al aire libre. La

diferencia de tiempo en el descenso de contenido de humedad hasta llegar cercano al 12 % fue de 6 días aproximadamente.

- Mediante el cálculo de flujos de calor, pérdidas de calor y la eficiencia del secador podemos mostrarlo a continuación los resultados experimentales, si esta eficiencia comparamos con la de secado al aire libre que es 0% (debido que es imposible controlar las condiciones climáticas al aire libre), demostramos claramente que secar la madera en un horno solar es técnicamente mejor que secar madera al natural.

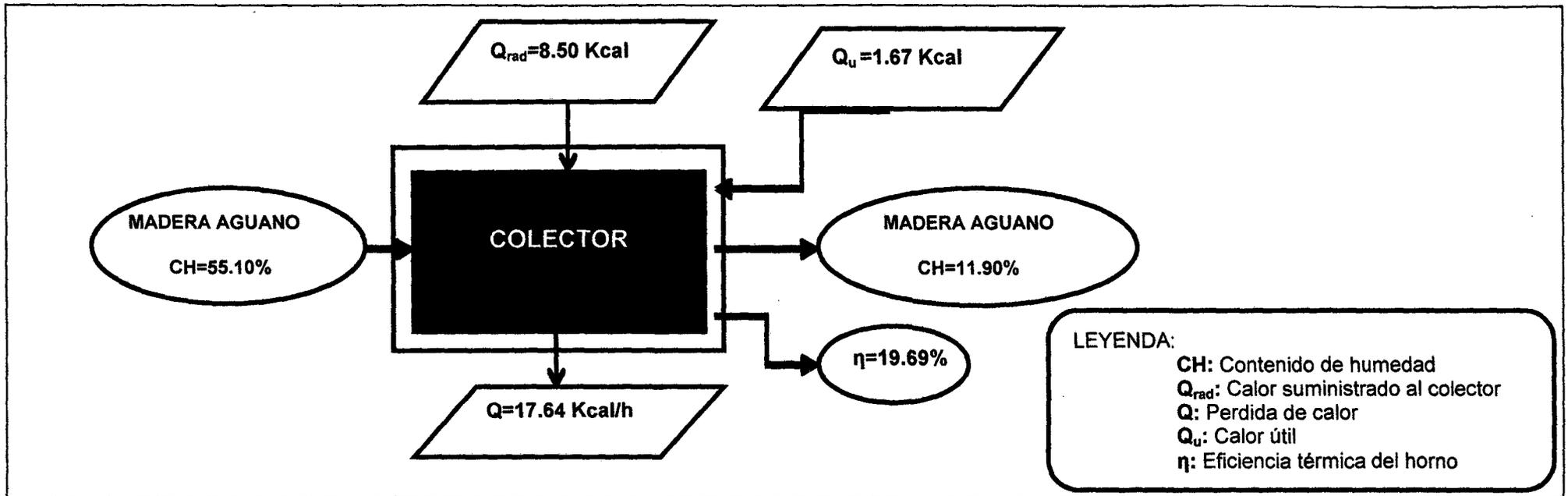
Tabla 5-3: Datos del proceso térmico en el horno solar

Calor suministrado al colector Q_{rad}	Perdidas de calor Q	Calor útil Q_u	Eficiencia térmica η
8.50 Kcal	17.64 Kcal/h	1.67 Kcal	19.69 %

Fuente: Autor.

A continuación se muestra en la figura el proceso de secado que ocurre en el interior del horno prototipo de secado para la madera aguano.

Figura 5-4: Diagrama de flujo del proceso de secado solar



Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

1. Los experimentos preliminares del secado de la madera en el horno prototipo construido muestra una eficiencia del 19.69%, para probetas de madera de 19x19x3 cm de madera aguano proveniente de la región de Madre de Dios.
2. Experimentalmente en el horno prototipo se determinó el tiempo de secado promedio de la probeta B de 19x19x3 cm de madera aguano, que es de 139 horas; en cambio probetas similares secadas al aire libre tuvieron en promedio un tiempo de secado de 1983 horas
3. Se obtuvo probetas de madera secas de aguano sin defectos físicos de tipo dimensional y estructural al finalizar el proceso de secado en el horno prototipo.
4. En la cinética de secado se observa que la curva teórica se aproxima a la curva experimental, lo que indica que nuestra velocidad de secado respecto al contenido de humedad tiene valores determinantes al secado en el horno prototipo.

RECOMENDACIONES

1. Para optimizar el funcionamiento del horno de secado según el tipo de madera, se deberá recurrir al diseño experimental para lograr parámetros óptimos de secado de la madera.
2. Para que el secado industrial sea competitivo y rentable debe mejorarse en el diseño escalando el horno prototipo, considerando materiales mejorados de construcción con resistencia adecuada y sistema de ventilación dinámica.
3. Para el control de calidad del secado de madera aguano, el horno industrial a escalar debe incluir un sistema automático digital para el control de procesos y garantizar un secado rápido y uniforme.
4. Para construir hornos solares de uso industrial debe cumplir los estándares de secado artificial de maderas aserradas, en el contexto de esta norma técnica peruana son aplicables los términos y definiciones establecidas en la Norma NTP 251.130

BIBLIOGRAFÍA

- Askeland Donald R. "Ciencia e Ingeniería de los Materiales". International Thomson Editores Spain Paraninfo, S.A. México. 2001
- Briand Bond, Omar Espinoza y Philip Araman. Diseño y Operación de un Secador Solar de Madera para Países Tropicales. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2011).
- Corporación Chilena de la Madera. Manual: La Construcción de Viviendas en Madera. Chile. (2000).
- Gómez Quemé David Estuardo, "Diseño de un Horno Secador de Madera". Trabajo de Graduación Universidad de San Carlos de Guatemala. (2008).
- Grupo Andino: Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas. (1985).
- Hatakeda Venero Katherine, Tesis: Diseño, Construcción y Evaluación de un Secador de Ajo. Tesis Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. (2006).
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Baptista Lucio, Pilar. Metodología de la Investigación. Tercera edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México. D. F. (2003)
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Estufa Solar de Secado de la Madera Proyecto Desarrollo Tecnológico para la Optimización de los Procesos de Secado de Madera de Encino en el Estado de Oaxaca del Fondo Sectorial CONACYT-CONAFOR-.México. (2008).
- Luna Estrella Carlos y Cruz Vallejo Cristhian, Tesis: Diseño y Construcción de un Secador para maderas con Energía Solar. Universidad Tecnológica Equinoccial Quito Ecuador. 2003.
- M. Evans y B. Givoni. Absortancia y emisividad de superficies (materiales). Estados Unidos. (1980) y (1976).

- Mejía Mejía, Elías. Metodología de la Investigación Científica. primera edición. Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Educación. Lima Perú (2005).
- Miravete, A., Larrodé, E. Materiales Compuestos. Tomos I y II. A. Miravete, Zaragoza España (2000).
- Pozos Suárez Izaías, Tesis: Diseño Térmico para un Horno Solar de Secado de Madera. Universidad Veracruzana. México. (2010).
- Sánchez Carlessi Hugo y Reyes Meza Carlos Metodología y Diseños en la Investigación Científica. Segunda edición Editorial Mantaro. Lima (1998).
- Shackelford, James F. Introducción A La Ciencia De Materiales para Ingenieros Pearson Educación, S.A., Madrid, (2005)
- Smith, Van Ness, Abbott. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. Quinta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México. D. F. (1997)
- Smith, William. F. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Mc Graw-Hill/Interamericana de España S.A.U. (1998)
- Yunus A. Cengel. Transferencia de Calor y Masa. Tercera edición Mc Graw-Hill/Interamericana Editores, S.A. De C.V. México (2007).

PAGINAS WEB:

- <http://html.rincondelvago.com/secado-de-la-madera.html> (23/06/2014)
- www.quimicasthai.wordpress.com/2010 (06/01/2014)
- www.redalyc.org/articulo (30/05/2014)
- www.senamhi.gob.pe (12/12/2013)
- www.wikipedia.org.com (01/07/2014)
- <http://dger.minem.gob.pe/atlassolar> (19/11/2013)
- <http://www.tutiempo.net/clima/Cuzco> (23/05/2013)

ANEXOS

Cuadro 01: Promedio anual de energía solar diaria

Ciudad Capital de Departamento	Energía Solar Diaria Promedio Anual KW h/ m ²
Tumbes	5.67
Piura	5.54
Chiclayo	5.50
Trujillo	5.13
Huaraz	5.29
Lima	5.13
Ica	5.50
Arequipa	6.08
Moquegua	6.04
Tacna	5.83
Puno	5.21
Cusco	5.17
Abancay	5.13
Ayacucho	5.17
Huancavelica	5.33
Huancayo	5.33
Cerro de Pasco	5.46
Huánuco	4.83
Cajamarca	5.25
Chachapoyas	4.67
Moyobamba	4.67
Iquitos	4.42
Pucallpa	4.63
Puerto Maldonado	4.79

Fuente :“Atlas de Energía Solar del Perú” publicación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en convenio con la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas (DEP-MEM) en 2003.

Cuadro 02: Resistencia térmica de algunos materiales de aislamiento y construcción.

Material aislante	Espesor pulgadas-mm	Valor RSI* m² · C°/W
Fibra de vidrio	1-25	0.55
Poliestireno expandido	1-25	0.65
Viruta de madera	1-25	0.42
Espacio de aire	1-25	0.18
Madera de pino	1,75-90	0.78
Concreto **	4-100	0.13
Bloque de concreto	4-100	0.12
	12-300	0.22
Ladrillo común	4-100	0,07 *

Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

*La resistencia de un material al flujo de calor. El valor de RSI se incrementa en directa proporción al espesor del material aislante ** Densidad= 1,760 kg/m³ (110 lb/ft³)

Cuadro 03: Datos meteorológicos del año 2012

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	12.1°C	366
Temperatura máxima media anual:	20.8°C	366
Temperatura mínima media anual:	5.6°C	366
Humedad media anual:	52.70%	366
Precipitación total acumulada anual:	-	-
Visibilidad media anual:	11 Km	366
Velocidad del viento media anual:	6.8 km/h	366

Fuente: <http://www.tutiempo.net/clima/Cuzco>

Cuadro 04: Datos meteorológicos del año 2013

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	12.0°C	365
Temperatura máxima media anual:	20.6°C	365
Temperatura mínima media anual:	5.6°C	365
Humedad media anual:	55%	365
Precipitación total acumulada anual:	-	-
Visibilidad media anual:	10.5 Km	365
Velocidad del viento media anual:	6.8 km/h	361

Fuente: <http://www.tutiempo.net/clima/Cuzco>

IMAGENES DEL HORNO SOLAR PROTOTIPO

