

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR PROTOTIPO DE PLACAS PLANAS PARA PRUEBAS EN LABORATORIO.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:

Carvallo V., Daniel A.

Meza M., María Carolina.

Para optar al Título de:
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR PROTOTIPO DE PLACAS PLANAS PARA PRUEBAS EN LABORATORIO.

Tutor académico: Prof. Manuel Martínez.

Co-tutor: Prof. Johane Bracamonte.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

por los Bachilleres:

Carvallo V., Daniel A.

Meza M., María Carolina.

Para optar al Título de:

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013



ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

María Carolina Meza y Daniel Carvalho

Titulado

“Diseño de un Secador Solar Prototipo de Placas Planas para Pruebas en Laboratorio”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, a los trece días del mes de marzo del año dos mil trece.

Prof. Pedro Cadenas
Jurado



Prof. Manuel Martínez
Tutor

Prof. Julio Segura
Jurado



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO

Caracas, 13 de marzo de 2013.

Prof. Gerardo Ramírez
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería-UCV
Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

Daniel A. Carvalho V., C.I. 18.837.504

y

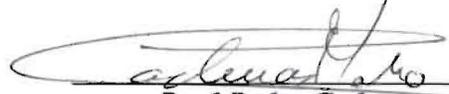
María Carolina Meza M., C.I. 18.884.867

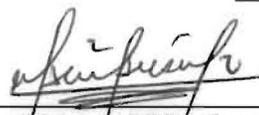
MENCIÓN HONORIFICA

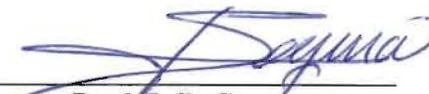
Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado, titulado

“Diseño de un Secador Solar Prototipo de Placas Planas para Pruebas en Laboratorio”

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted.


Prof. Pedro Cadenas
Jurado


Prof. Manuel Martínez
Tutor


Prof. Julio Segura
Jurado

A mi abuelo Gino Milani
Ingeniero de corazón
Hasta sus últimos días de vida.
A mi familia y todos
Los que me apoyaron.

María Carolina Meza Milani

A mi madre, padre y abuelo
Este Trabajo Especial de Grado es por ustedes
De ustedes y para ustedes.

Daniel A. Carvallo V.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a las cuales quiero agradecerles su apoyo, amistad, compañía, ánimo y mucho más, algunos ya no están físicamente en este mundo pero siguen en mi recuerdo y mi corazón. Sin importar si alguna vez puedan o no leer esto, muchas gracias a todos.

En primer lugar agradezco a Dios y a mi toda familia que durante la carrera siempre estaban ahí para apoyarme y brindar su enorme ayuda. En especial a mi mamá, mi papá, mi tía Nadia, tío Agustín, abuela Anita, mis hermanos Guillermo, Andrés y mis primas Mariana y Vanessa.

Al profesor Bracamonte que nos ayudó enormemente en este trabajo, al profesor Manuel Martínez que estuvo ahí siempre que lo necesitamos, el profesor Cadenas y profesor Sánchez que en la etapa de diseño nos brindaron toda su ayuda, de igual forma los profesores Baritto, Segura, Barragán por su ayuda y al profesor Gómez por su apoyo en diferentes momentos en mi carrera.

Al FONACIT por su ayuda en el financiamiento del proyecto y a mis compañeros en este trabajo: Daniel, Allan, Mariana, Gabriel, Antonio y Francisco que durante estos meses siempre conté con su valiosa ayuda.

Por último y no con menos importancia gracias a todos mis amigos, por su amistad, apoyo y ayuda en los momentos de crisis en mi tesis, a mi Juanchi lindo, Isa, Luisa, Elaine, Neyda, Alejandro, Rafa (chino), Rossi, Antonio, Ernesto, Víctor y a todos los que no haya nombrado pero sé que están pendientes de mí, mil gracias.

María Carolina Meza Milani

AGRADECIMIENTOS

Ante todo a Dios por guiarnos y darnos fuerzas para la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Para realizar un proyecto de esta índole es necesaria la colaboración de personas e instituciones que posean los conocimientos y calidad humana imprescindible para el desarrollo del mismo. Por esta razón quiero agradecer a las siguientes personas:

- Prof. Johanne Bracamonte por siempre ayudarnos y prestar constante apoyo para cumplir con todas las exigencias que requería el proyecto.
- Prof. Pedro Cadenas por asesorarnos con los cálculos estructurales que requería el diseño.
- Prof. Ramón Sánchez quien con su valioso tiempo nos ayudó a evaluar los posibles diseños del deshidratador.
- Prof. Miguel Baritto por asesorarnos en los cálculos energéticos que requería el deshidratador solar.

Por ultimo a todas aquellas personas que de un modo u otro prestaron su colaboración para que se pudiera llevar a cabo este trabajo de investigación.

Daniel A. Carvallo V.

Carvalho V. Daniel A. y Meza M. María C.

DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR PROTOTIPO DE PLACAS PLANAS PARA PRUEBAS EN LABORATORIO.

Tutor académico: Prof. Manuel Martínez. Tesis. Caracas, U.C.V.

Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013, 205p

Palabras clave: DESHIDRATADOR, COLECTOR, THEOBROMA CACAO L, ENERGÍA SOLAR, BANCO DE PRUEBA.

El presente trabajo tiene por objeto diseñar un prototipo de deshidratador solar de cacao (*Theobroma cacao L.*) para pruebas en laboratorio que permita la variación de parámetros de diseño. Para lograr esto se llevó a cabo una investigación bibliográfica donde se estudiaron detalladamente los distintos tipos de deshidratadores y una investigación de campo para determinar los principales problemas que tienen los productores de cacao al secar su producto. Se emplearon matrices de decisión para evaluar distintos diseños propuestos y materiales de construcción. El banco de prueba se constituye por una cámara de secado con capacidad de 50Kg de cacao, un colector solar de placas planas que podrá variar sus longitud de 1,5m hasta 3m, cambiar la separación de placas desde 5cm hasta 10cm y seguir el recorrido solar desde las 10am solar hasta las 4pm solar, conectado a un ventilador centrifugo para simular flujos desde 0,0826 Kg/s hasta 0,00826 Kg/s y lámparas de haluro metálico que proporcionaran la radiación necesaria para el estudio del desempeño del deshidratador solar, simulando distintas regiones procesadoras de cacao en Venezuela.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
INDICE DE TABLAS	xv
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	3
1.1 MOTIVACIÓN.....	3
1.2 PLANTAMIENTO DE PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II	7
2.1 MARCO TEÓRICO	7
2.2 EL CACAO: CARACTERÍSTICAS Y PROCESAMIENTO	7
2.2.1 Características principales de la planta.....	7
2.2.2 Características del grano de cacao	10
2.2.3 Beneficio del cacao.....	11
2.3 CONCEPTOS BÁSICOS	12
2.4 SECADO	14
2.4.1 Proceso básico de secado.....	14
2.4.2 tasa del secado durante el proceso	16
2.4.3 Factores que intervienen en el proceso de secado	21
2.4.4 Tipos de contacto fluido – solido.....	23

2.4.5 Formas de operación de secado	26
2.5 TIPOS DE DESHIDRATADORES SOLARES	26
2.5.1 Deshidratadores solares directos.....	27
2.5.2 Deshidratadores solares indirecto	29
2.6 COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANAS.....	33
2.6.1 Descripción general de un colector solar plano	34
2.6.2 Tipos de colectores solares planos.....	35
2.7 SECADORES POR CONVECCION.....	37
2.7.1 Secadores de bandejas	37
2.7.2 Secadores de túnel	38
2.7.3 Secadores de cinta transportadora	39
2.7.4 Secadores rotatorios.....	40
2.7.5 Secadores de lecho fluidizado	40
2.7.6 Secador tipo transportador por vibración	42
2.7.7 Secador en Spray o atomizador	43
2.7.8 Secador Turbo de bandejas.....	44
2.7.9 Secadores por conducción	45
2.8 PSICROMETRIA.....	48
2.9 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA Y CONSERVACION DE LA MASA	50
2.10 IRRADIACIÓN SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA	54
2.10.1 Radiación horaria sobre una superficie inclinada.....	55
CAPITULO III	58
3.1 Técnicas e instumrntos de recopilación de datos.....	58

3.1.1 Encuesta.....	58
3.2 Técnicas y procesos de análisis de datos	59
3.2.1 Tormenta de ideas.....	59
3.2.2 Matriz de decisiones	60
CAPITULO IV.....	61
CAMARA DE SECADO	61
4.1 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO	61
4.2 LIMITACIONES DE LA CÁMARA DE SECADO	62
4.3 SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO	63
4.4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA.....	82
4.4.1 Materiales a utilizar	82
4.4.2 Descripción y Calculos de dimesionamiento para la camara de secado	83
CAPITULO V	98
COLECTOR SOLAR.....	98
5.1 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO PARA EL COLECTOR SOLAR	98
5.2 LIMITACIONES PARA EL COLECTOR SOLAR	99
5.3 SELECCION DE MATERIALES Y DISEÑO	99
5.4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA.....	111
5.4.1 Materiales a Utilizar	111
5.4.2 Descripción y Calculos de dimensionamiento para el colector solar	112
CAPITULO VI.....	123

INSTRUMENTACION	123
6.1 INSTRUMENTACIÓN EN EL COLECTOR SOLAR	123
6.1.1 Norma ANSI/ASHRAE 93-2003 Métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico de colectores solares.	123
6.2 INSTRUMENTACIÓN EN LA CÁMARA DE SECADO	127
6.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS	127
CAPITULO VII.....	130
7.1 SIMULACION DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES	130
7.2 SIMULACION DE LA CIRCULACION DEL AIRE	132
DENTRO DEL COLECTOR	132
7.3 SIMULACION DE LA IRRADIACION SOLAR EN EL COLECTOR	134
7.4 SOPORTE MÓVIL PARA EL DESHIDRATADOR SOLAR.....	139
CAPITULO VIII	144
8.1 Estimacion de costos en materiales de construcción para la Cámara de Secado.....	144
8.2 Estimación de costos en materiales de construcción para el Colector Solar	145
Estimación de costos para instrumentación en el Deshidratados solar.....	146
8.3 Estimación de costos para los elementos externos	147
CAPITULO IX.....	149
RESULTADOS	149
CONCLUSIONES.....	152
RECOMENDACIONES.....	153
BIBLIOGRAFIA.....	156

ANEXO 1;Error! Marcador no definido.
ANEXO 2;Error! Marcador no definido.
ANEXO 3;Error! Marcador no definido.
ANEXO 4;Error! Marcador no definido.
ANEXO 5;Error! Marcador no definido.
ANEXO 6;Error! Marcador no definido.

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 “Humedad vs. Tiempo” Fuente: Bermúdez y Maiz (2004).....	16
Figura 2. 2 “Velocidad de Secado vs. Tiempo” Fuente: Bermúdez y Maiz (2004)	17
Figura 2. 3 “Velocidad de secado vs. Humedad”. Fuente: Bermúdez y Maiz (2004)	17
Figura 2. 4 “Contacto flujo paralelo”	24
Figura 2. 5 “Contacto flujo perpendicular”	24
Figura 2. 6 “Circulación directa”	25
Figura 2. 7 “Contacto flujo en contracorriente”	25
Figura 2. 8 “Flujo transversal del gas”	26
Figura 2. 9 “Método tradicional de secado al sol”	28
Figura 2. 10 “Deshidratador solar directo por convección natural”	29
Figura 2. 11 “Deshidratador solar directos por convección forzada”	29
Figura 2. 12 “Secador solar indirecto de bandejas por convección natural”...	31
Figura 2. 13 “Deshidratadores solares semi-artificiales”	32
Figura 2. 14 “Deshidratadores solares asistidos”	33
Figura 2. 15 “Secador de bandejas”	38
Figura 2. 16 “Secador de túnel”	39
Figura 2. 17 “Secador de cinta transportadora”	40
Figura 2. 18 “Secador rotatorio”	40
Figura 2. 19 “Secador de lecho fluidizado”	41
Figura 2. 20 “Secador tipo transportador por vibración”	43
Figura 2. 21 “Secador tipo spray o atomizador”. Fuente: spray process	43
Figura 2. 22 “Secador turbo de bandejas”	45
Figura 2. 23 “secador de bandejas a vacío”. Fuente: Direct industry	46
Figura 2. 24 “Secador de tornillo sinfín”	47
Figura 2. 25 “secadores de rodillo”. Fuente: Gebr.Pfeiffer.....	47
Figura 2. 26 “Proceso general de secado en carta psicrometrica”	49

Figura 2. 27 “Volumen de control del área de secado”	51
Figura 2. 28 “Volumen de control en colector de placas planas”	53
Figura 2. 29 “Irradiación solar para un colector”	55
Figura 4. 1 “Latas de aluminio”	63
Figura 4. 2 “Piezas en acero comercial”	64
Figura 4. 3 “Equipos en acero inoxidable”	65
Figura 4. 4 “Ductos de acero galvanizado”	66
Figura 4. 5 “Lamina de corcho”	68
Figura 4. 6 “Material espuma de poliestireno”	69
Figura 4. 7 “Material lana de vidrio”	70
Figura 4. 8 “Láminas de espuma de poliuretano”	71
Figura 4. 9 “Dispositivo rastrillos rectos”	73
Figura 4. 10 “Dispositivo cepillos giratorios”	74
Figura 4. 11 “Dispositivo de vibraciones”	75
Figura 4. 12 “Cilindros giratorios”	76
Figura 4. 13 “Paletas giratorias”	76
Figura 4. 14 “Techo inclinado”	79
Figura 4. 15 “Techo a dos agua”	80
Figura 4. 16 “Techo con chimenea”	80
Figura 4. 17 “Techo semicircular”	81
Figura 4. 18 “Techo de cámara de secado”	84
Figura 4. 19 “Cepillo desarmable”	85
Figura 4. 20 “Carga distribuida en la bandeja”	87
Figura 4. 21 “Reacciones en apoyos de bandeja”	87
Figura 4. 22 “diagrama momento flector – bandeja”	87
Figura 4. 23 “Diagrama de fuerzas en el apoyo”.	89
Figura 4. 24 “Columna con ambos extremos empotrados”	90
Figura 4. 25 “Ensanchamiento gradual. Difusor de apertura lineal”	92
Figura 4. 26 “Análisis de resistencia a lo largo de la cámara de secado.”	94

Figura 4. 27 “Vista isométrica de la cámara de secado”	96
Figura 5. 1 “Botellas de vidrio”	100
Figura 5. 2 “Acrílico”	101
Figura 5. 3 “Película de poliéster”	101
Figura 5. 4 . “Módulos conectados”	104
Figura 5. 5 “Módulos con correderas”	104
Figura 5. 6 “Apoyos fijos”	106
Figura 5. 7 “Apoyos móviles”	107
Figura 5. 8 “Apoyos en el eje longitudinal”	109
Figura 5. 9 “Apoyos en los vértices”	109
Figura 5. 10 “Vista isométrica general del colector solar”	112
Figura 5. 11 “Vista frontal de la lámina de acrílico en el colector”	117
Figura 5. 12 “Vista frontal modulo interno”	119
Figura 5. 13 “Vista frontal modulo externo”	120
Figura 5. 14 “Vista frontal del colector con ambos módulos”	120
Figura 5. 15 “Vista frontal de la placa con carga distribuida”	121
Figura 5. 16 “Vista lateral de viga i con carga distribuida”	122
Figura 6. 1 “Configuración de prueba cuando el fluido de trabajo es aire” ..	125
Figura 6. 2 “Manómetro diferencial tipo U”	126
Figura 6. 3 “Esquema de instrumentación sobre deshidratador”	128
Figura 7. 1 “Esquema para pared de laboratorio”	131
Figura 7. 2 “Vista frontal de la lámpara de haluro metálico”	134
Figura 7. 3 “Vista lateral de la lámpara de haluro metálico”	135
Figura 7. 4 “Vista lateral del colector con 4 lámparas”	136
Figura 7. 5 “Vista frontal de colector con 2 lámpara”	137
Figura 7. 6 “Vista de perfil del colector para distribución de lámparas”	137

Figura 7. 7 “Soporte de lámparas”	138
Figura 7. 8 “Deshidratador solar con soportes móviles a máxima longitud”	140
Figura 7. 9 “Deshidratador solar con soportes móviles a mínima longitud”	141
Figura 7. 10 “Diagrama de fuerzas en vista lateral del soporte”	142
Figura 9. 1 “Deshidratador solar en laboratorio”	151

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 “Especies de <i>theobroma cacao l</i> ”	9
Tabla 4. 1 “Criterios de selección material para estructura en cámara de secado”	66
Tabla 4. 2 “Matriz material de construcción”	67
Tabla 4. 3 “Criterios de selección para material aislante”	71
Tabla 4. 4 “Matriz material aislante”	72
Tabla 4. 5 “Criterios de selección para dispositivo de movimiento del cacao”	77
Tabla 4. 6 “Matriz, dispositivo para movimiento del cacao”	78
Tabla 4. 7 “Criterios de selección de dispositivo para salida del aire”	81
Tabla 4. 8 “matriz dispositivo para salida del aire”	82
Tabla 4. 9 “Dimensionamiento de bandejas”	85
Tabla 4. 10 “Coeficientes de perdida λ vs α ”	93
Tabla 5. 1 “Criterios de selección para material de la placa transparente” ...	102
Tabla 5. 2 “Matriz material de placa transparente”	103
Tabla 5. 3 “Criterios de selección para configuración longitudinal de colector”	104
Tabla 5. 4 “Matriz configuración longitudinal”	105
Tabla 5. 5 “Criterios de selección para arreglos de separación entre placas”	107
Tabla 5. 6 “Matriz arreglo de separación entre placas”	108
Tabla 5. 7 “Criterios de selección para configuración de ángulos en colector”	110
Tabla 5. 8 “Matriz configuración de ángulos”	111
Tabla 5. 9 “Relaciones dimensionales del colector solar”	113
Tabla 5. 10 “Temperaturas en el colector solar en configuración deseada” .	114
Tabla 5. 11 “Temperaturas en el colector solar en configuración extrema” .	114

Tabla 6. 1 “Características de omega HX94ACW”	127
Tabla 6. 2 “Instrumentación para deshidratador solar”	129

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

LETRAS GRIEGAS

- α : Absortividad de la placa superior [%], coeficiente de dilatación [$^{\circ}C^{-1}$].
 β : Ángulo de inclinación de la superficie[$^{\circ}$].
 h : Coeficiente convectivo [W/mK].
 δ : Ángulo de declinación de la tierra [$^{\circ}$].
 ϕ : Latitud del sitio [$^{\circ}$].
 Φ : Humedad relativa[%].
 ω : Ángulo horario solar [$^{\circ}$].
 φ : Humedad relativa [%].
 ρ : Densidad [Kg/m^3].
 σ : Esfuerzo flector [Pa].
 τ : Esfuerzo cortante [Pa], transmisividad solar de la placa transparente [%].
 μ : Viscosidad dinámica[$kg/m s$]
 π : Número pi.
 Δ : Variación.

ABREVIATURAS

- A : Área [m].
 C : Distancia desde baricentro a la carga considerada [m].
 d_{esf} : Diámetro esférico [m].
 D_h : Diámetro hidráulico [m].
 e : Espesor [m].
 E : Modulo de elasticidad [Pa].
 FS : Factor de seguridad.

g : Gravedad [m/s^2].
 h : Entalpia [J].
 I : Radiación solar [KW_h/m^2], Momento de área [m^4].
 K : Coeficiente de conductividad térmica [W/mK].
 L : Latitud terrestre [$^\circ$].
 l : Longitud [m].
 M : Momento [Nm].
 m : Masa [kg].
 m_s : Masa de material seco [kg].
 \dot{m}_a : Flujo másico del aire [kg/s].
 N_u : Numero de Nusselt.
 P : Presión [Pa].
 P_{cr} : Carga crítica [N].
 Pot : Potencia [W].
 Pr : Numero de Prandtl.
 P_{total} : Peso total [N].
 P_v : Presión de vapor [Pa].
 $P_{v,sat}$: Presión de vapor saturado [Pa].
 Q_{per} : Perdida de calor [W].
 \dot{Q} : Tasa de flujo de calor [W/s].
 q : Carga [N].
 q_t : Carga total [N].
 q_u : Carga unitaria [N].
 R : Reacciones en apoyos [N].
 R_c : Tasa de secado constante [W/s].
 R_k : Resistencia térmica [W/mK].
 Re : Numero de Reynolds.
 S_y : Esfuerzo a la fluencia [Pa].
 T : Temperatura [$^\circ C$].

T_a : Temperatura del aire [$^{\circ}C$].
 T_s : Temperatura de la superficie [$^{\circ}C$].
 u : Energía interna [J].
 v : Volumen [m^3].
 V : Velocidad [m/s].
 V_{mf} : Velocidad de fluidización [m/s].
 V_V : Velocidad del viento [m/s].
 w : Humedad absoluta.
 W : Potencia [W].
 y_{max} : Deflexión máxima [m].
 y_{per} : Deflexión permisible [m].

INTRODUCCIÓN

La deshidratación de los alimentos es una de las formas más antiguas para la conservación de los productos perecederos. El uso de radiación solar para reducir el contenido de agua de un producto, es el procedimiento menos costoso de conservación. Actualmente se utiliza para el secado de muchos productos, como uvas, ciruelas y otras frutas.

Venezuela posee por una de las mejores variedades de cacao en el mundo para la fabricación de chocolates, cultivados en distintos estados como Aragua, Carabobo, Miranda y Falcón. El proceso de secado de cacao en estas regiones por la mayoría de los pequeños y medianos productores consiste en colocar su producto en un patio de secado a la intemperie con el fin de exponer el cacao a la irradiación solar. Este proceso trae diversos inconvenientes además de no ser capaz de otorgar una calidad homogénea al cacao, tampoco de cuantificar, controlar, ni predecir matemáticamente la cantidad de tiempo que los productos deben ser expuestos a la intemperie para lograr obtener las condiciones óptimas de comercialización.

Mediante el uso de energía termosolar se puede incrementar la producción en el proceso de deshidratación del cacao y ayudar con el desarrollo agrícolas del país, para lograr esto se necesita establecer un equipo de secado que se adecue a distintas condiciones tanto ambientales como de producción.

El propósito general de este trabajo es proponer el diseño de un prototipo de deshidratador solar para cacao como banco de prueba para laboratorio que permita la variación de ciertos parámetros de diseño. De este modo se podrá evaluar bajo condiciones climatológicas simuladas en el laboratorio cual es la mejor configuración del deshidratador solar para cualquier región de Venezuela. Finalmente este diseño permitirá la construcción del prototipo en un futuro trabajo.

Perteneciendo a una línea de investigación del Departamento de Energética de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, este trabajo se encuentra enmarcado en un proyecto del Fondo Nacional para la Ciencia, Tecnología e Investigación (FONACIT) N° 2011000771 titulado “Modelado, diseño

y construcción de un colector solar para uso agrícola” que consta de tres partes: modelado, diseño y construcción de un deshidratador solar, siendo éste la segunda fase de ellas.

Para el desarrollo del trabajo se inicia con una investigación teórica donde se justificaran la variación de los parámetros de diseño que se desean modificar en el banco de prueba y se estudiaran detalladamente los distintos tipos de secadores y colectores solares. Posteriormente se presentas orientaciones metodológicas que se han de seguir al momento del diseño que se propone realizar, para así dividir por capítulos el diseño de la cámara de secado, colector solar, la selección de instrumentación, el ajuste de las condiciones externas del deshidratador como el acondicionamiento del laboratorio para la simulación de pruebas y el diseño de un dispositivo que permita la movilización del equipo para poner a prueba en condiciones climatológicas no simuladas. Finalmente presentar la estimación de costos de todos los implementos necesarios para la fabricación y acondicionamiento del banco de prueba. Presentando como resultados un resumen del diseño seleccionado y los planos para su fabricación.

CAPITULO I

1.1 MOTIVACIÓN

Los procesos de secado y deshidratación resultan bastante comunes en la producción agrícola, ya sea para la preservación de los productos durante el almacenamiento o porque constituyen parte del procesamiento al que deben someterse antes de su consumo, como es el caso del café y el cacao.

Los pequeños y medianos productores agrícolas venezolanos recurren, en su mayoría, a métodos tradicionales para el cultivo, almacenamiento y procesamiento de sus productos. Esto trae como consecuencia un efecto negativo en la calidad de los productos, salud y calidad de vida de las comunidades rurales.

En el caso de productos agrícolas que cosechan cacao, implementar tecnologías termosolares permitiría al productor diversificar su oferta, y le daría una mejor capacidad para asumir una sobreoferta del producto. En ciertas épocas del año la producción agroalimenticia aumenta de manera muy acelerada, esto trae como consecuencia que la oferta sea mayor que la demanda, y por lo tanto existen pérdidas económicas, sobre todo al momento de secado del grano de cacao ya que los métodos tradicionales no son capaces de manejar esas capacidades, por lo tanto parte de la cosecha se deteriora.

El uso de tecnologías termosolares en la producción agrícola constituye entonces una alternativa económica para los pequeños y medianos productores de mejorar sus capacidades productivas, si se les compara con los métodos tradicionales de deshidratación, permitiéndoles lograr un desarrollo sustentable al producir mínimos impactos ambientales.

Este trabajo especial de grado se enmarca dentro del Proyecto FONACIT N° 2011000771, que se desarrolla en la actualidad en la escuela de ingeniería mecánica cuyo objetivo es el desarrollo de deshidratadores termosolares adaptados a las condiciones meteorológicas nacionales de bajo costo y fácil operación para su uso por pequeños y medianos productores agrícolas.

1.2 PLANTAMIENTO DE PROBLEMA

Los pequeños y medianos productores agrícolas venezolanos recurren, en su mayoría, a métodos tradicionales para el cultivo, almacenamiento y procesamiento de sus productos. Esto trae como consecuencia un efecto negativo en la calidad del producto y calidad de vida de las comunidades rurales.

La utilización de la radiación solar para un secado tradicional presenta varias dificultades. Un problema básico es el carácter periódico de esta radiación, lo que ha llevado a pensar en la posibilidad de almacenar parte de la energía obtenida durante los períodos de insolación, por medio de dispositivos de acumulación del calor. Además, incluso en los períodos de radiación pueden producirse dificultades, la intensidad de la radiación incidente es función del tiempo, esto lleva a la necesidad de un adecuado control estratégico y de los medios necesarios para este control. Otro problema es el causado por la baja densidad energética de la radiación solar, que requiere grandes superficies de acumulación de energía.

La naturaleza de la radiación solar presenta problemas innatos que requieren medios para su solución tales como acumuladores de calor, fuente auxiliar de energía, equipos de control y gran superficie en colectores solares y en consecuencia los costes en inversiones son evidentemente mayores que en el secado al sol. Por lo tanto la energía solar puede ser utilizada económicamente para el secado sólo si su objetivo se puede coordinar con las características específicas de la radiación solar, así la situación geográfica que afecta al número de días de sol al año y a la intensidad de radiación incidente proporciona aumentos de energía en algunas zonas.

Uno de los procesos de producción en las distintas almendras es la deshidratación previa del grano, necesaria para la obtención de sub-productos como es el caso del cacao, café, arroz, cebada entre otros, y a su vez conservación de la materia prima evitando su deterioro producido por la proliferación de bacterias, hongos, insectos, plagas y otros.

Para deshidratar los productos de la manera tradicional son necesarias grandes extensiones de terreno lo que implica una mayor inversión en propiedad, gastos de

mantenimiento y empleados a contratar, también una extensión de dichas dimensiones podría ser utilizada en actividades más productivas.

Los lugares más comunes donde la cantidad de materia prima puede ser excesiva, haciendo que la oferta sea mayor que la demanda en una determinada época del año, suelen ser las comunidades rurales las cuales no siempre tiene acceso a equipos de secado más eficientes y frecuentemente se encuentran ubicadas en sectores donde la energía solar suele ser una fuente indispensable para el proceso de secado. Dichos lugares no siempre tiene la facilidad del suministro eléctrico continuo, ni abastecimiento de gas natural, por lo cual las energías renovables cobran gran valor en estos casos.

Se pretende conseguir la configuración de elementos más favorable, la cual sea accesible a los pequeños y medianos productores de cacao para realizar el secado de sus frutos de la forma más eficiente evitando que agentes externos contaminantes interfieran en la calidad de sus productos y mejorando el aprovechamiento espacial al momento del secado. Posteriormente convertir este equipo en un banco de pruebas con el cual sea posible modificar ciertas variables y de esta forma simular distintas condiciones a las cuales puede ser sometido el diseño en los distintos lugares del país que podría implementarse la solución elegida.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de éste proyecto es diseñar un prototipo de deshidratador de cacao (*Theobroma cacao*) con colector de placas planas para pruebas en laboratorio que permita la variación de parámetros de diseño.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar una investigación de campo para determinar las necesidades y características de procesos de secado de los productores agrícolas de cacao en los estados Vargas, Miranda, Aragua y/o Sucre.
2. Estudiar distintos diseños de colectores solares comúnmente utilizadas en estas aplicaciones.
3. Estudiar distintos diseños de cámaras de secado para productos agrícolas.
4. Seleccionar la instrumentación adecuada y su ubicación en el diseño que permitan estimar el desempeño del deshidratador.
5. Identificar los parámetros de diseño que influyen sobre el desempeño del deshidratador
6. A partir de la información recopilada, implementar una matriz de decisiones para la selección del diseño más adecuado según ciertos criterios a seleccionar.
7. Elaborar un diseño para el banco de prueba que se ajuste a las condiciones meteorológicas regionales, a las características de los productos agrícolas nacionales y adaptarse a los procesos productivos de los pequeños y medianos productores.
8. Estudiar distintos dispositivos que permitan la simulación de las condiciones ambientales dentro del laboratorio, similares a las regiones de estudio.
9. Dibujar planos y establecer los pasos a seguir para la construcción del equipo.
10. Realizar una estimación de costos de los materiales para la construcción.

CAPÍTULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se darán a conocer los fundamentos teóricos utilizados en esta investigación. Se hará una breve reseña de las características y procesamiento del cacao, luego se profundizará en el proceso de secado; también se presentarán y explicarán los siguientes aspectos: Velocidad del proceso de secado, factores que intervienen en el proceso, tipos de contacto fluido-sólido y formas de operación de secado. Para finalizar se hablará de algunos métodos de deshidratación como: método tradicional de secado, tipos de colectores solares, secado por convección y secado por conducción.

2.2 EL CACAO: CARACTERÍSTICAS Y PROCESAMIENTO

El cacao es una fruta muy sabrosa y nutritiva, de origen tropical proveniente de América, existiendo diferentes especies de cacao en Brasil, Colombia, México y Centroamérica. En Venezuela el cacao se cultiva en los climas cálidos y tierras franco-arcillosas ricas en materia orgánica. Suele cosecharse durante todo el año, pero su cosecha aumenta en los meses con mayor precipitación que van desde noviembre hasta abril.

El cacao Venezolano conserva buena fama por su alta calidad para la fabricación de chocolates, esta es otorgada al momento de procesamiento de los granos que se divide en dos etapas, fermentado y secado, realizándose cada una bajo ciertos parámetros que concederán esa calidad requerida.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA PLANTA

El árbol de cacao o cacaotero lleva como nombre científico "*Theobroma cacao L.*" en su clasificación taxonómica la planta pertenece al reino *plantae* de la

familia esterculiácea, especie del grupo malvales perteneciente al género *Theobroma*, el cual significa en griego “alimento de los dioses”. Se cultiva en selvas húmedas generalmente a alturas inferiores a los 1400 metros sobre el nivel del mar, es una planta que necesita para su desarrollo, un ambiente con alta humedad relativa, esto suele lograrse por una capa de boscosa que evita la incidencia directa del sol, ráfagas de viento y crea el ambiente adecuado para que la planta progrese.

Las semillas del *Theobroma* contienen; almidón, proteínas, materias grasa, entre otros nutrientes que aportan valor alimenticio. Existen alrededor de veinte distintos tipos de *Theobroma*, a pesar que el *Theobroma cacao L.*, sea la única especie cosechada para la comercialización destinada a la producción de chocolate y extracción de manteca de cacao para otros usos, algunas especies también conocidos son:

- *Theobroma bicolor.*
- *Theobroma gileri.*
- *Theobroma glaucum* (cacao de monte).
- *Theobroma grandifolium.*
- *Theobroma angustifolium.*
- *Theobroma cirmolinae.*
- *Theobroma simiarum.*
- *Theobroma subincanum.*

La mayoría de las semillas del *Theobroma* pueden ser utilizadas para la fabricación de chocolate, pero solo algunas producen los de mejor calidad, como es el caso del *Theobroma cacao L.* También suele ser consumida la pulpa de la semilla directa de la mazorca, la cual es azucarada y ligeramente acida con la que se preparan bebidas refrescantes y algunos dulces.

En Venezuela se cosechan distintos tipo de *Theobroma cacao L* mostrados en la tabla 1.1, se puede encontrar el cacao Criollo (*T. cacao cacao*) que a su vez se separa en tres subtipos; el criollo andino caracterizado por su alta calidad, este

también es conocido como cacao fino del cual Venezuela cuenta con la mayor biodiversidad de esta especie a nivel mundial. También se encuentra el cacao criollo de porcelana, muy similar en características al criollo andino pero algo disímil en forma física, cómo es posible observar en la tabla comparativa. El tercer tipo en este grupo es el cacao criollo pentágono, el cual produce semillas grandes y de muy buena calidad.

Otro grupo de *Theobroma cacao* L. cosechado en Venezuela son los cacaos trinitarios o deltanos (híbridos de *T. cacao cacao*) que conforman el 90% de la producción nacional ya que mayormente es cosechado en los estados Aragua, Miranda y Sucre. Se caracteriza por sabor y aroma pronunciados, por lo tanto producen chocolates muy aromáticos y con fuerte sabor a cacao.

Por último se tiene el cacao forastero (*T. cacao sphaerocarpum* x *T. cacao sphaerocarpum*) el tipo más común que representa casi el 80% de la producción mundial y es plantado mayormente en Brasil, Malasia, Indonesia y África Occidental. Se caracteriza por poseer granos con cascara dura y poco aromáticos.

Tabla 1. 1“Especies de *theobroma cacao* l”

Tipo de Cacao	Imagen de referencia
Criollo Andino	

Criollo Porcelana	
Criollo Pentagona	
Trinitario o Deltano	
Forastero	

2.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL GRANO DE CACAO

El grano de cacao está compuesto por sustancias alimenticias como proteínas, hidratos de carbono y grasas. También contiene hasta 70% agua, teobromina, almidón, celulosa y sales minerales. El color de los granos frescos puede variar con el tipo de cacao, siendo blanco para el cacao criollo hasta morado si se trata de la especie forastera.

Cada semilla de cacao en la mazorca está cubierta por un mucílago y la longitud del grano también llamado “almendra” puede variar de 15 a 30mm, el ancho de 8 a 20mm y el espesor de 5 a 15mm. Según estudios realizados por Villamizar y Hernández (s.f) el peso de un grano de cacao con un 35,9% de humedad es de 1,94 g, con un peso específico de 0,527 g/cm³ y volumen 3,70 cm³.

2.2.3 BENEFICIO DEL CACAO

El beneficio del cacao comprende las siguientes etapas:

- **Cosecha:** es la primera operación que se realiza donde se escogen las mazorcas en el punto óptimo de maduración, el cual es posible reconocer por el color externo del fruto. En caso contrario las almendras que provienen de mazorcas que no han completado el proceso de maduración no fermentan y las que están sobremaduras comienzan a germinar y generan una entrada para hongos e insectos.
- **Fermentación:** parte fundamental del beneficio ya que en este proceso el grano se modifica a través de reacciones físico-químicas que posteriormente otorgaran el olor y sabor a chocolate característico. En este proceso los granos se colocan en cajones fabricados en maderas dulces donde se fermentaran, luego de un cierto tiempo los granos pasan a otro cajón o simplemente se remueven con paletas con la finalidad de obtener un mismo grado de fermentación. Todo el proceso puede durar de 4 a 8 días dependiendo del tipo de cacao que se trate.
- **Secado:** en este proceso se elimina el exceso de humedad de las almendras y se complementa el desarrollo de su aroma. Inicialmente el grano suele contener entre 50 - 70% de humedad y se desea llevar hasta un 8% en base húmeda, evitando formación de hongos que puedan dañar el producto en el almacenamiento, menor porcentaje de humedad no es recomendable ya que la cascara se vuelve muy quebradiza. El secado de las almendras puede variar de 1 a 6 días

dependiendo el proceso de secado que se utilice. Es recomendable que la temperatura de secado no exceda los 50°C para no distorsionar la actividad enzimática, una temperatura óptima estaría en el rango de 40°C a 45°C.

A continuación se profundizara en el proceso de secado como en los factores que intervienen durante dicho proceso. Sin embargo primero se debe conocer el significado de los siguientes conceptos:

2.3 CONCEPTOS BÁSICOS

- Temperatura de bulbo seco: según Van Wylen (2007) es la temperatura del ambiente.
- Temperatura superficial: es la temperatura de la especie a secar, generalmente se mide por medio de un sensor infrarrojo.
- Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura de saturación adiabática para una mezcla de aire-vapor, como define Van Wylen (2007).
- Presión de vapor: La presión de vapor (P_v), es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo. Cuando el aire está totalmente saturado de vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado ($P_{v,sat}$).
- Humedad ligada o libre: Es la humedad en exceso que contiene un sólido sobre la humedad de equilibrio en unas condiciones dadas de temperatura y de humedad. Sólo la humedad libre puede ser evaporada, y lógicamente depende de la concentración del gas (A través de la humedad de equilibrio).
- Humedad de equilibrio: es el contenido de humedad en el cual la sustancia y el medio están en equilibrio, es decir la humedad en donde el material ni capta ni libera humedad al ambiente. Por ejemplo, si la humedad ambiente es menor

que este valor de equilibrio, el material se secará, si la humedad ambiente es mayor, se humedecerá.

- Material higroscópico: Es aquel tipo de material que puede contener humedad ligada.
- Humedad no ligada: En un material higroscópico, la humedad en exceso por encima de la humedad de equilibrio y que ejerce una presión de vapor igual a la del agua pura a la misma temperatura.
- Humedad relativa: se define como la relación entre la presión de vapor del aire y a la presión que tendría si estuviese saturado de humedad a la misma temperatura.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (2.1)$$

- Humedad absoluta: La relación de humedad “w” de una mezcla de vapor de agua y aire se define como el cociente de la masa del vapor de agua “m_w” entre la masa de aire seco “m_a”.

$$w = \frac{m_w}{m_a} \quad (2.2)$$

- Humedad crítica: Es el contenido de humedad promedio cuando la tasa de secado constante termina y comienza la tasa de secado decreciente.
- Entalpía de aire seco y vapor de agua: es la energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco, por encima de una temperatura de referencia.
- Volumen específico: El volumen específico del aire húmedo, se define como el volumen que ocupa la mezcla de aire seco y vapor de agua por unidad de masa de aire seco. La masa específica del aire húmedo no es igual al recíproco de su volumen específico.
- Masa específica del aire húmedo: es la relación entre la masa total de la mezcla y el volumen que ella ocupa.
- Numero de Nusselt: es un numero adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido transcurre comparada con la transferencia de calor si esta ocurriera solamente por conducción

- Numero de Reynolds: es la relación de las fuerzas de inercia a las viscosas, se calcula mediante la expresión:

$$R_e = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.3)$$

- Numero de Prandtl: es un numero adimensional proporcional al cociente entre la viscosidad y la difusividad térmica.

2.4 SECADO

El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones. Durante el secado se emplea calor con el objetivo de separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido para reducir el contenido de humedad hasta un valor aceptablemente bajo.

Por lo general el producto debe ser movido constantemente para conseguir la exposición de toda la superficie del alimento al área calefactora y de esta manera lograr un secado más homogéneo.

2.4.1 PROCESO BÁSICO DE SECADO

El proceso de secado de alimentos es un transporte simultáneo de materia y energía debido a que inicialmente la humedad se retira del producto por medio de su difusión, en fase líquida y/o vapor, a través de su estructura interior hacia el exterior.

La transmisión de calor ocurre en el interior del alimento y es función del gradiente de temperatura que existe entre su capa externa y a la superficie del agua en el interior del producto. Si se suministra al agua suficiente energía para su evaporación, el vapor producido se transportará desde la superficie de la capa húmeda en el interior del producto hacia la superficie de éste. Esto ocurre gracias al gradiente de presión que hay entre la superficie del agua en el interior y en el aire exterior al alimento.

Durante el secado se producen cuatro procesos de transporte de calor y de masa, los cuales son:

- La transmisión de calor desde el gas secante hasta la superficie del producto. Esta puede realizarse por conducción, convección o radiación.
- Transmisión de calor desde la superficie del producto hasta el interior del mismo. Sólo suceder por conducción, en régimen no estacionario debido a que las condiciones en cualquier punto varían con el tiempo.
- Transmisión de materia a través del sólido. Este proceso se puede producir por difusión o por capilaridad. Difusión debida a las diferencias de concentraciones y capilaridad, aprovechando los capilares existentes. La difusión tiene lugar en el secado de productos con humedades relativas del orden de 25% o inferiores, mientras que la capilaridad se presenta para niveles más altos de humedad relativa (65% o más), siempre y cuando en la estructura interna del producto existan capilares.
- Transferencia de vapor desde la superficie del producto hacia el seno del fluido secante. Los equipos de deshidratación utilizarán por tanto para la transferencia de energía, procesos basados en la convección, conducción o radiación desde la fuente de calor hasta el alimento. Los equipos más usuales emplean la convección como mecanismo de transferencia de calor y aire como transporte de esta energía, por lo tanto la transferencia de calor dependerá, en este caso, de la temperatura del aire, de su humedad, de su caudal, de la superficie expuesta del alimento y de la presión.

Se deben considerar los cuatro procesos de transporte mencionados, puesto que la velocidad de secado será proporcional al más lento de ellos. Por lo general los procesos limitantes serán los de transporte de materia y calor en el interior del alimento.

2.4.2 TASA DEL SECADO DURANTE EL PROCESO

Se define la tasa de secado como la pérdida de humedad del sólido húmedo por unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire a las condiciones de temperatura, presión, humedad y velocidad constantes en el tiempo. En las figuras 2.1, 2.2 y 2.3, se muestran las curvas típicas para condiciones de secado constantes de un sólido.

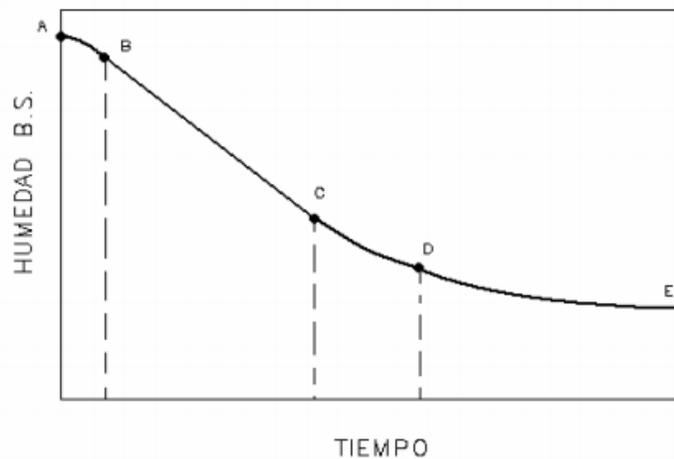


Figura 2. 1 “Humedad vs. Tiempo” Fuente: Bermúdez y Maiz (2004)

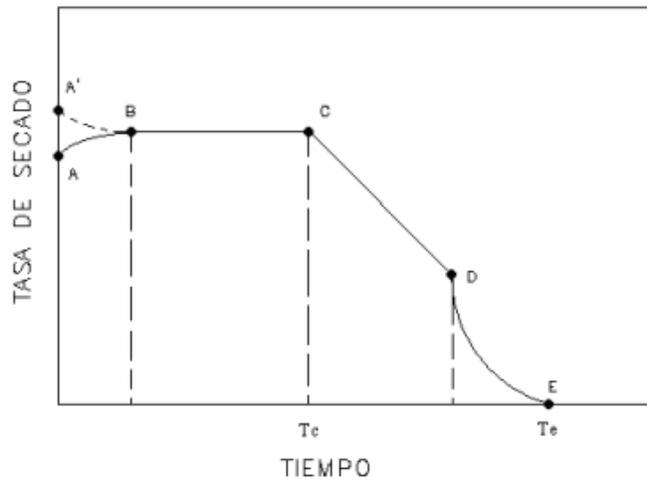


Figura 2. 2 “Velocidad de Secado vs. Tiempo” Fuente: Bermúdez y Maiz (2004)

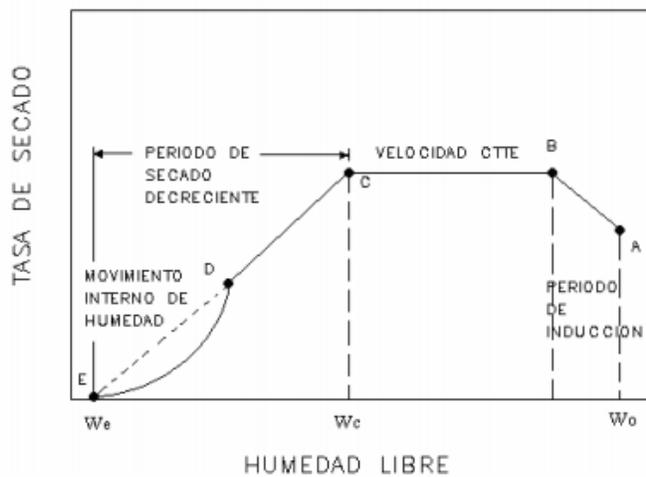


Figura 2. 3 “Velocidad de secado vs. Humedad”. Fuente: Bermúdez y Maiz (2004)

El punto A es el contenido inicial de humedad libre en un tiempo. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie del sólido alcanza su valor de equilibrio. El tramo AB es el período inicial de ajuste, suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado.

La curva de la figura 2.2 y 2.3 es recta en el tramo BC, esto quiere decir que la pendiente y la tasa son constantes durante este período y se le conoce como región

de tasa de secado constante. Durante este periodo la superficie del sólido está muy húmeda, trayendo como consecuencia una película de agua. Esta capa de agua, llamada humedad no ligada, está siempre sin combinar y actúa como si el sólido no estuviera presente. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el período de tasa constante proviene del interior del sólido. Este período continuará mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora.

En este período de tasa de secado constante, la tasa de secado constante R_c , se puede calcular mediante un balance de calor.

$$v = A * e = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (2.4)$$

Donde:

ρ_s : Densidad del sólido seco en Kg de material seco por m^3 de material húmedo

e : Profundidad de la sección transversal de material (si el secado ocurre por ambas caras, e será la mitad de la profundidad)

m_s : Masa de material seco

A : Área de la superficie en contacto con la corriente de aire

v : Volumen de material

Reordenando la ecuacion 2.4 queda:

$$\frac{A}{m_s} = \frac{1}{e * \rho_s} \quad (2.5)$$

Aplicando un balance de flujo de energia:

Calor latente de evaporacion = Calor transferido

$$-\left(\frac{dW}{dt}\right)_c * m_s * \Delta h_{fg} = h * A * (T_a - T_s) \quad (2.6)$$

Siendo $R_c = -\left(\frac{dW}{dt}\right)_c$ y despejando en:

$$R_c = \frac{h \cdot A \cdot (T_a - T_s)}{m_s \cdot \Delta h_{fg}} \quad (2.7)$$

$$h = \frac{Nu \cdot K}{D_h} \quad (2.8)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.9)$$

La temperatura de la superficie (T_s), es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire (T_{bh}), mientras dura el período de secado constante.

Aquí se evidencia que la tasa de secado es función del coeficiente convectivo entre el aire y el sólido. El coeficiente convectivo depende del número de Nusselt y se sabe que en convección forzada este parámetro adimensional es función del número de Reynolds y de Prandtl, por lo tanto se podrá variar el intercambio de calor entre el sólido y el fluido si se varían el diámetro hidráulico y la velocidad del fluido. Ya que el material en el colector tendrá un coeficiente conductivo constante.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (2.10)$$

Para: $Re > 2300$

El periodo de tiempo CD se conoce como primer periodo de caída de velocidad o periodo de secado de superficie insaturado. En el punto C, el agua de la superficie no se remplazará más para mantener la capa de agua, por lo tanto pequeñas manchas empiezan a parecer y la tasa del secado comienza a decaer. A esto se le llama contenido de humedad crítica. Cae la tasa de secado en el tramo CD, además el contenido y número de manchas del secado crece.

En el punto D conocido como segundo punto crítico, es el punto donde finaliza el periodo de tasa constante. Aquí, el agua de superficie del sólido está totalmente evaporada y la v tasa de secado dependerá de la difusión de humedad a la superficie del sólido. Por lo anterior, este punto depende de la porosidad y del tamaño de partícula del sólido que se está secando. Entre los puntos D y E la tasa de secado cae rápidamente y el periodo se denomina segundo periodo de disminución de velocidad.

En el punto E la tasa del secado es cero y comienza la humedad de equilibrio poniéndose el sólido en equilibrio con su ambiente externo.

La tasa de secado en el período descendiente, en el caso de un control por capilaridad viene dada por la ecuación:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_d = -K_1 * (W - W_c) \quad (2.11)$$

Donde K_1 es función de la tasa de secado constante:

$$K_1 = -\frac{\left(\frac{dW}{dt}\right)_c}{(W_c - W_e)} \quad (2.12)$$

Sustituyendo:

$$\left(\frac{dW}{dt}\right)_d = -\frac{R_c * (W - W_c)}{(W_c - W_e)} \quad (2.13)$$

Un proceso de secado es óptimo cuando el tiempo en el que se lleva a cabo es el mínimo, utilizando un mínimo de energía, lo cual está estrechamente relacionado con la eficiencia energética del secador empleado. Además que R_c está involucrado tanto en el periodo de secado constante como en el periodo de tasa descendiente, así que la tasa del secado es un importante parámetro el cual hay que considerar a lo largo del proceso de secado.

Por esta razón, la importancia del secado en alimentos representa una disminución en costos a la hora de transportarlos, además de que su manejo es más fácil ya que no es necesario invertir en procesos de refrigeración o añadir conservadores para mantenerlos en buen estado antes de consumirlos. Lo que puede dar lugar a un incremento en los ingresos a la hora de comercializar productos secos.

2.4.3 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO

El secado es un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa. El calor es necesario para evaporar la humedad, la cual es removida de la superficie del producto por medio de un agente secador externo. En este proceso existe una variedad de factores que influyen durante el secado, mostrados a continuación:

- Humedad del producto: se encuentra en la microestructura del sólido como una solución líquida, mientras más humedad haya requerirá más cantidad de energía o/y más tiempo para retirarla.
- Evaporación: en el proceso de evaporación existen dos variables principales, la temperatura y la presión. Si la presión disminuye más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el sólido es congelada. También ocurre la evaporación si la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica, esto es consecuencia del aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Si el sólido es sensible al calor, entonces puede ser disminuida la temperatura, bajando la presión, a este proceso se le llama evaporación al vacío.
- Tamaño de partícula del sólido: Si las características del sólido permiten obtener partículas uniformes, al variar el tamaño se puede observar que la velocidad de secado aumenta al disminuir el tamaño de la partícula. Si se trata de un sólido que no permite obtener tamaños uniformes, la influencia de la profundidad del lecho es similar a la anteriormente comentada. Al aumentar la altura del lecho disminuye la velocidad de secado.
- Transferencia de calor: se desarrolla un gradiente de temperatura dentro del sólido lo que produce una migración de humedad desde adentro del sólido hacia la superficie, mientras la evaporación ocurre en la superficie.

- Transferencia de masa: ocurre cuando el fluido, el cual contiene un menor porcentaje de humedad que el sólido, absorbe parte de la humedad del mismo.
- Radiación solar: la radiación solar se encarga de calentar el fluido dentro del colector, por lo tanto es indispensable que el colector se encuentre en una región donde la radiación solar sea la mayor posible.
- Temperatura del aire: conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, mismo que tiende a disminuir conforme se reduce el contenido de humedad.
- Humedad relativa del aire: generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa. Cuando el aire contiene su máxima capacidad, se dice que se trata de un aire completamente saturado y por lo tanto incapaz de absorber más humedad, por el contrario, un aire no saturado tienen la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación.
- Velocidad del aire: La velocidad del aire dentro del secador tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material. La capa límite que existe entre el material a secar y el aire juega un papel importante en el secado. Cuanto menor sea el espesor de esta capa límite, más rápida será la remoción de humedad. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad, una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite y el aire. Durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de

evaporación disminuye y el tiempo de secado aumente. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación del aire fuerte y regular. Las ventajas de velocidades altas de aire, disminuyen en cuanto mayor es el espesor del material, menor el contenido de humedad inicial y la temperatura de bulbo seco inicial. Se utilizan velocidades mayores a 3 m/s sólo en casos excepcionales (material muy húmedo), pero en general, la velocidad se considera entre de 1 m/s a 3 m/s. En algunos casos, es recomendable utilizar velocidades de secado altas al inicio del proceso de secado, pero a medida que disminuye la humedad se sugiere disminuir la velocidad. Lo anterior es posible si se cuenta con ventiladores de velocidad variable.

2.4.4 TIPOS DE CONTACTO FLUIDO – SOLIDO

En el área del secado pueden existir diversas formas en el que el fluido puede tener contacto con el producto, a continuación se presentaran estas distintas maneras:

- a) Flujo paralelo: el lecho de solido contenido en la bandeja permanece en condición estática, mientras que la dirección del flujo del aire es paralela a la superficie sólida como se destaca en la figura 2.4, en donde se produce una leve penetración del aire en los vacíos comprendidos entre los sólidos cercanos a la superficie. Este tipo de flujo presenta el inconveniente que el lecho del producto debe ser relativamente pequeño para que todo el alimento pueda ser deshidratado.

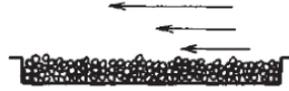


Figura 2. 4 “Contacto flujo paralelo”

- b) Flujo perpendicular: la dirección del flujo de aire es perpendicular donde el aire choca contra el lecho de sólidos (figura 2.5). La penetración del aire dentro de la superficie del material es mayor que en el flujo paralelo. Esta manera de flujo tiene la desventaja que la corriente de aire se no tiene manera de seguir circulando, ocasionando una alta presión sobre el producto. Para materiales sólidos dispuestos en planchas sobre bandejas o cintas y flujo perpendicular.

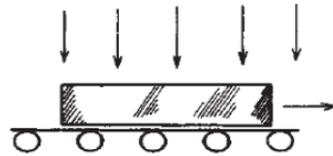


Figura 2. 5 “Contacto flujo perpendicular”

- c) Circulación directa: el flujo de aire se dirige directamente al producto, abriéndose paso a través de los intersticios de los sólidos como lo muestra la figura 2.6. Esto ocurre cuando los sólidos están en condición estática, móvil o fluidizada, permitiendo que el aire circule en torno a las partículas individuales de manera más o menos libre. La desventaja de este tipo de contacto es que habrá una mayor pérdida de presión en el aire debido a que debe pasar a través de las partículas. Además que hay que controlar la velocidad del aire.

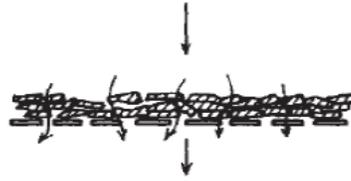


Figura 2. 6 “Circulación directa”

Para este tipo de contacto es importante resaltar que existe una velocidad de fluido máxima para que estas partículas no salgan dispersas fuera de la bandeja de donde se colocan para secarse, esta velocidad viene dada por la ecuación 2.14. También hay que tomar en cuenta que esta ecuación es para partículas relativamente grandes. Para más detalle sobre el origen de esta ecuación véase O. Levenspiel (2004).

$$V_{mf} = \left(\frac{d_{esf}(|\rho_s - \rho_g|g)}{24,5\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Para un: $Re_{mf} > 1000$

- d) Flujo en contracorriente: el aire y el producto se desplazan en la misma dirección como se establece en la figura 2.7, debido al arrastre por el flujo de gas sobre las partículas. Este flujo tiene como problema que hay que controlar con precisión la velocidad del aire debido a que un error pudiera ocasionar el arrastre del alimento.

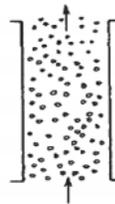


Figura 2. 7 “Contacto flujo en contracorriente”

- e) Flujo transversal del gas: la dirección del flujo de aire es opuesta a la que sigue el movimiento del producto (figura 2.8). El flujo transversal del gas presenta como inconveniente que se necesita controlar la velocidad con que el

aire choca las partículas. Además de no poder manejar grandes cantidades de producto.

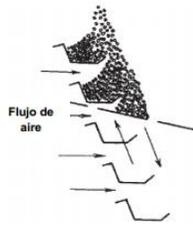


Figura 2. 8 “Flujo transversal del gas”

2.4.5 FORMAS DE OPERACIÓN DE SECADO

a) Secado en tandas

Todo el producto se coloca en la zona de secado y no se retira hasta que esté completamente seco. De manera lenta todo el producto dentro del secador va atravesando de un estado húmedo a un estado seco.

Esta forma de operación resulta apropiada en deshidratadores pequeños y medianos debido a que permite un diseño más sencillo del proceso de carga y movimiento del producto dentro del equipo.

b) 2. Secado continuo

El alimento se va cargando y descargando en tandas parciales, este período entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño, lo cual puede ocasionar que dentro del mismo secador se encuentra una parte de producto húmedo y otra casi seca. En algunos casos la carga y descarga parcial se realiza una vez por día, aunque también se puede llevar a cabo varias veces en el mismo día.

2.5 TIPOS DE DESHIDRATADORES SOLARES

Existen muchas formas y diversos equipos para deshidratar alimentos debido a los requerimientos específicos de cada producto. En la gran mayoría de los métodos que existen para secar el alimento siempre habrá contacto con un medio, que por lo general es aire, para poder retirar la mayor cantidad de humedad del material a secar.

A continuación se presentan las principales características de estos equipos de deshidratación y los diferentes tipos de deshidratadores utilizados.

2.5.1 DESHIDRATADORES SOLARES DIRECTOS

Los métodos directos de secados son aquellos en los cuales la fuente de energía logra por sí misma el secado.

Las características generales de los secadores directos son:

- El secado se efectúa por transferencia de calor por convección entre el sólido húmedo y el aire caliente, extrayendo el último al líquido vaporizado, así como también suministrando el calor necesario para la evaporación.
- El medio de calefacción es aire calentado por energía solar
- Los secadores directos deshidratarán más cantidad de producto si existe un aumento en la temperatura de entrada del aire de secado, a temperatura fija de salida.

Por lo tanto los deshidratadores directos se pueden dividir en tres grupos:

a) Método tradicional de Secado al sol

El secado al sol es comúnmente utilizado para el secado de cacao, granos, de frutas y algunas hortalizas.

Como se muestra en la figura 2.9, este método consiste en distribuir el producto en un lecho fino sobre una superficie plana. En este caso el cacao se mueve periódicamente durante el secado. La temperatura del producto durante el secado al sol en buenas condiciones ambientales oscila entre 30 y 45°C y el tiempo de secado

puede alcanzar 1 – 4 semanas dependiendo de la cantidad y tipo de producto que se esté secando.

El empleo de energía solar para secar los alimentos es el método más antiguo y comúnmente usado alrededor del mundo. Sin embargo, este método presenta ciertos inconvenientes para la producción a gran escala, entre estas se pueden citar los altos costos de mano de obra, la necesidad de grandes áreas, imposibilidades de control del proceso de secado, infestación por insectos, potencial degradación de los alimentos debida a reacciones bioquímicas y desarrollo de microorganismos, debido entre otras cosas a los largos periodos de secado. Entre las ventajas de la energía solar la más importante es que se trata de una energía renovable, no contaminante, abundante que no puede ser monopolizada y satisface los requerimientos globales para el desarrollo sostenible.

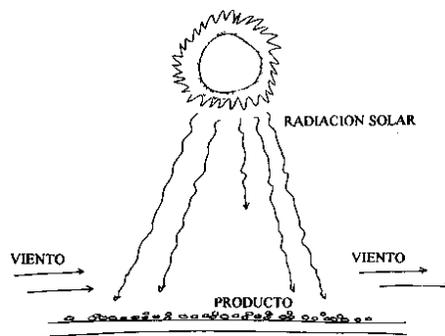


Figura 2. 9 “Método tradicional de secado al sol”

b) Deshidratadores solares directos por convección natural

Se observa en la figura 2.10 que estos equipos constan de un área de secado que se encuentra debajo de un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la polución. El producto a deshidratar se extiende en una capa fina sobre un fondo, donde sea expuesto directamente a la radiación solar. Se utilizan para el secado de productos agrícolas, tales como granos, frutas, forrajes y hortalizas. Este método trae como inconveniente la imposibilidad de control del proceso de secado, una poca capacidad de producción, no tiene un dispositivo para la remoción del producto y largos periodos de secado.

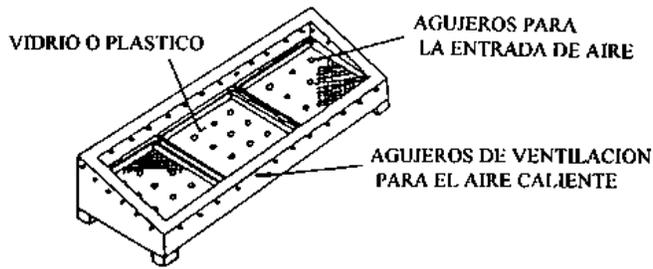


Figura 2. 10 “Deshidratador solar directo por convección natural”

c) Deshidratadores solares directos por convección forzada

Esencialmente consiste en una cabina aislada, similar al dibujo anterior, con la diferencia que en el interior consta de un ventilador para circular el aire a través de un área de secado que se encuentra debajo de un material transparente, que protege al producto de la lluvia y de la polución. El producto a deshidratar se extiende en una capa fina sobre un fondo, donde sea expuesto directamente a la radiación solar.

La circulación forzada facilita el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño como lo muestra la figura 2.11. Este tipo de circulación también facilita el control del proceso de secado. Permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo. La principal desventaja es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica, en la mayoría de los casos para energizar el ventilador. Además este método no tiene un dispositivo para la remoción del producto.

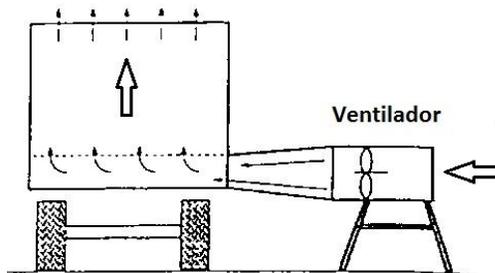


Figura 2. 11 “Deshidratador solar directos por convección forzada”

2.5.2 DESHIDRATADORES SOLARES INDIRECTO

El método indirecto es aquel en el cual una fuente de energía externa calienta el medio secante.

Las características generales operatorias de los secadores indirectos son las siguientes:

- Secado mediante transferencia de calor por conducción y algo de radiación al material húmedo.
- La fuente de calor puede ser agua caliente, gases de combustión, vapor condensado, baños de sales fundidas para transferencia del calor, aceite caliente, o calefacción eléctrica.
- Los secadores indirectos son especialmente adecuados para el secado a presiones reducidas y con atmósferas inertes.
- En los secadores indirectos no son recomendables cuando se requieren contenidos muy bajos de humedad final en el producto.
- La operación de los secadores indirectos se caracteriza a menudo por algún método de agitación para mejorar el contacto entre la superficie metálica caliente y el material húmedo. La naturaleza de este contacto determina el rendimiento total de secado de los secadores indirectos; los materiales pesados y granulados presentan por lo general coeficientes más elevados de transferencia de calor por contacto que los sólidos mullidos y voluminosos.

Por lo tanto los deshidratadores solares indirectos se pueden dividir en tres grupos:

a) Deshidratadores solares indirectos por convección natural

Consta de un colector solar el cual se encarga de elevar la temperatura del aire, luego el aire es dirigido a la cámara de secado para retirar la humedad del producto, permitiendo que el aire húmedo salga al exterior como se muestra en la figura 2.12. El flujo de aire entre la entrada y la salida del colector es ocasionado por un diferencia de temperaturas la cual origina una diferencia de densidades en el

mismo logrando la entrada del aire hacia la cámara de secado. Para permitir que el aire pase fluidamente por el material a secar, se coloca sobre bandejas perforadas situadas unas encima de otras dentro de la cámara de secado. Sin embargo, tiene como inconveniente que con ciertas condiciones ambientales, el flujo de aire no sea suficiente para atravesar por todas las bandejas. Además el producto seca en el intervalo de tiempo que exista radiación solar de intensidad adecuada

Generalmente se utilizan como colectores placas solares para calentar el aire en aplicaciones que utilizan baja y moderada temperatura. Son económicamente rentables y fáciles de ser adaptados para algunos productos. Se reduce significativamente las mermas durante el secado, a diferencia del secado tradicional donde se producen dichas mermas en mayor cantidad. Se disminuye el tiempo de secado comparado con el secado directo.

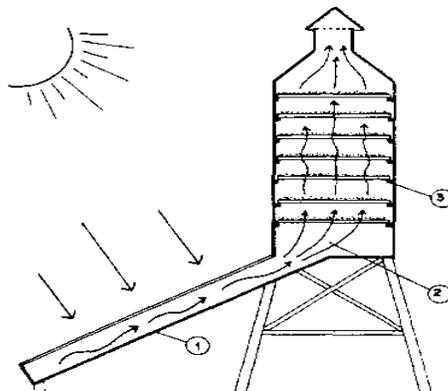


Figura 2. 12 “Secador solar indirecto de bandejas por convección natural”

b) Deshidratadores solares semi-artificiales

Este tipo de deshidratador solar es similar al deshidratador indirecto por convección natural pero con la diferencia que consta con un ventilador para que el caudal másico de aire requerido entre por el colector como se señala en la figura 2.13. Esto permite controlar las condiciones dentro del colector y de la cámara de secado debido a que si hay un aumento repentino de la temperatura en el colector, se procederá a elevar el flujo de aire por medio del ventilador para que la temperatura necesaria para deshidratar el producto se mantenga constante.

La circulación forzada facilita el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño. Este tipo de circulación también facilita el control del proceso de secado y permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo.

Son eficaces, económicamente rentables y fáciles de ser aceptados para algunos productos. Permite obtener un producto final de mayor calidad, así como una considerable disminución del tiempo de secado.

La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica, en la mayoría de los casos.

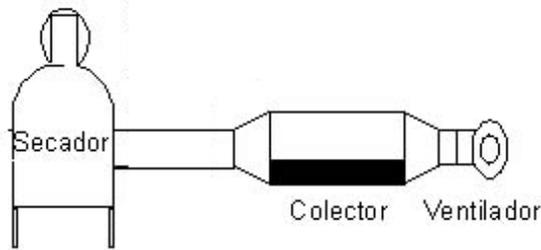


Figura 2. 13 “Deshidratadores solares semi-artificiales”

c) **Deshidratadores solares asistidos**

Son deshidratadores parecidos a los semi-artificiales, estos poseen un equipamiento suplementario que ayuda a proporcionar energía térmica al colector solar cuando la radiación solar sea muy baja.

La circulación forzada facilita el control del proceso de secado y permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo. La principal desventaja de la circulación forzada es el hecho de que se debe disponer de una fuente de energía eléctrica, en la mayoría de los casos.

Son eficaces, económicamente rentables y permite obtener un producto final de mayor calidad disminuyendo el tiempo de secado si es comparado con el secado directo.

El suplemento térmico se justifica principalmente por tres razones:

- Se puede controlar la temperatura de secado.

- El tiempo diario de secado puede ser ampliado a aquellas horas en que no hay sol.
- Se puede prevenir el sobre secado almacenando el exceso de energía solar recogida en los períodos de mayor radiación.

Como ejemplo a este tipo de deshidratador solar asistido, describiendo todas sus partes se presenta la figura 2.14.

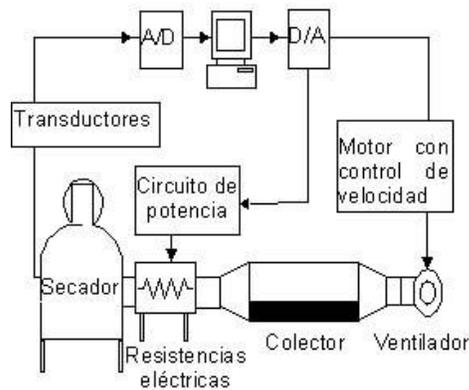


Figura 2. 14 “Deshidratadores solares asistidos”

Una vez estudiados los distintos tipos de deshidratadores solares, es importante analizar los distintos tipos de colectores que estos diversos deshidratadores pueden utilizar.

2.6 COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANAS

Un colector solar es un intercambiador de calor que transforma la energía radiante en calor. El sol actúa como una fuente radiante la cual otorga la transferencia de energía hacia un fluido, generalmente aire, que circula entre las placas del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar de longitudes de onda entre 0.29 y 2.5 μm y es por naturaleza variable con el tiempo. Dentro de los diversos tipos de colectores solares, los colectores solares de placas planas son los más comunes.

Estos pueden ser diseñados y utilizados en aplicaciones donde se requiere que la energía sea liberada a bajas temperaturas, debido a que la temperatura de operación de este tipo de colectores, difícilmente pasa los 100 °C.

Las ventajas que podemos obtener de este tipo de colectores con respecto a los colectores de enfoque, que concentran la radiación solar; es que éstos utilizan la energía solar directa y difusa, no requieren movimiento continuo para dar seguimiento al sol, prácticamente no necesitan mantenimiento y son mecánicamente de construcción más simple que los colectores concentradores. Las principales aplicaciones de estos dispositivos son en el campo del calentamiento de agua a nivel doméstico e industrial, acondicionamiento calorífico de edificios y secado de frutas y granos.

2.6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UN COLECTOR SOLAR PLANO

La energía solar incidente, tiene que atravesar una o varias capas de algún material transparente adecuado, antes de alcanzar la placa de absorción negra que es el elemento más importante del colector solar. En la placa de absorción negra es donde la energía radiante es convertida en calor. Este calor, posteriormente es transferido por convección si el fluido de trabajo es aire o por conducción si el fluido es agua, dicho calor remueve la energía térmica del colector y la transfiere, en este caso al espacio donde producto que va a ser calentado, según la aplicación que se le esté dando. La placa transparente, además de permitir la entrada de la radiación solar hasta la placa de absorción, sirve también para minimizar las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior del colector.

El aislante térmico usualmente es colocado en la parte posterior y lados del colector, esto permite disminuir las pérdidas de calor hacia el medio ambiente en esas partes. Todas las partes mencionadas se encuentran dentro de una caja que sirve como parte estructural del colector.

2.6.2 TIPOS DE COLECTORES SOLARES PLANOS

Los colectores solares planos pueden ser divididos en dos categorías básicas: los que utilizan como fluido de trabajo un líquido y los que utilizan un gas. En general los que calientan aire manejan flujos mucho más grandes que los que calientan agua. Cuando se trabaja con un gas, este fluye por un ducto que forma parte de la placa de absorción.

Placas de absorción para calentamiento de líquidos

En general las placas de absorción pueden estar formadas por tubos con aleta individuales o bien, utilizando una sola placa de absorción, a la cual se le adhieren los tubos.

Placas de absorción para calentamiento de gases

La placa de absorción es el elemento más importante de todo colector para el uso directo de la energía solar, el cual transforma la radiación solar en energía para calentar el aire. La superficie de absorción recoge la radiación directa y difusa, lo que permite calentar el aire incluso en días nublados, cuando toda la radiación incidente es difusa. Mientras más grande sea el área de contacto entre la placa de absorción y el aire circulando a través del colector, es posible asegurar una mejor transferencia de calor.

Entre algunas de las ventajas del uso de colectores solares para calentar el aire se cuentan las siguientes:

- No produce contaminación ni corrosión del dispositivo de distribución del aire y es fuente inagotable de energía.
- Las pérdidas de energía no constituyen un grave problema debido a que los aumentos medios necesarios para el secado de granos son relativamente pequeños.
- El material y la construcción de colectores solares planos son generalmente sencillos.

Los principales inconvenientes son:

- La disponibilidad de energía solar es variable y para el secado de granos se la puede aprovechar en pequeña escala solamente.
- La vida útil del colector solar es normalmente inferior a la de los demás equipos de secado.

Colector solar plano con superficie de absorción y lámina transparente

Los colectores solares planos con superficie de absorción cubierta por una lámina transparente se componen de una placa, generalmente metálica, pintada de negro opaco, que absorbe la radiación solar y está cubierta por una película semitransparente, esta película actúa como aislante térmica en la parte superior. En la parte inferior el colector lleva aislamiento térmico.

Colector solar plano con superficie de absorción suspendida

Los colectores solares planos de superficie de absorción suspendida se caracterizan por el paso del flujo de aire por debajo o por los costados de la superficie de absorción.

Colector almacenador de energía solar con cubierta transparente

Los colectores almacenadores de energía solar con cubierta transparente acumulan una parte de la energía solar en forma de calor sensible, en un lecho de piedras por ejemplo, que actúa como superficie de absorción, atenuando las elevaciones bruscas de temperatura y promoviendo la estabilidad relativa de sus incrementos. El colector almacenador continúa calentando el aire durante cierto tiempo después de la puesta de sol, debido a la temperatura almacenada en el lecho de absorción. La magnitud de dicho incremento de temperatura y de los períodos adicionales de funcionamiento del equipo dependen de varios factores, tales como: flujo de aire, radiación solar incidente, espesor del lecho de piedras y otros detalles de la construcción del colector

Aunque esta investigación trate sobre colectores solares de placas planas es relevante conocer las diferentes maneras de secar otros productos debido a que estos distintos métodos serán tomados en cuenta en el diseño del área de secado.

2.7 SECADORES POR CONVECCION

Con este método, los gases se calientan previamente usando energía eléctrica, fósil o solar y luego se ponen en contacto con el material húmedo a secar para facilitar la transferencia de calor y de masa, siendo la convección el mecanismo principalmente implicado. Por lo tanto, son secaderos directos.

2.7.1 SECADORES DE BANDEJAS

Están formados por una cámara metálica rectangular, en cuyo interior se disponen unos bastidores móviles. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas colocándose sobre ellas el producto a secar como se muestra en la figura 2.15. Estos secadores suelen ser utilizados para una gran variedad de frutos y plantas por su comodidad de distribución y su versatilidad en cuanto a la capacidad del producto que se coloca a secar. El producto obtenido en este secador es más denso, duro e irregular que el obtenido en lecho fluidizado, ya que éstos tienden a ser más porosos, menos densos y más esféricos.

Son secaderos muy utilizados a pequeña escala, en laboratorio y en plantas piloto. Es relativamente fácil ajustar y controlar las condiciones óptimas de secado en el interior del armario, por esta razón se pueden utilizar para deshidratar productos sensibles al calor en pequeñas cargas. En este tipo de secaderos se puede tratar prácticamente cualquier producto, alimentos de cualquier tamaño y forma, pero a causa de la mano de obra requerida para la carga y descarga, su operación resulta costosa para su baja capacidad de producción.

Su principal problema es que el secador no es uniforme entre bandejas en distintas ubicaciones. Algunas sustancias tienden a migrar desde el centro del gránulo hasta la superficie durante el secado.

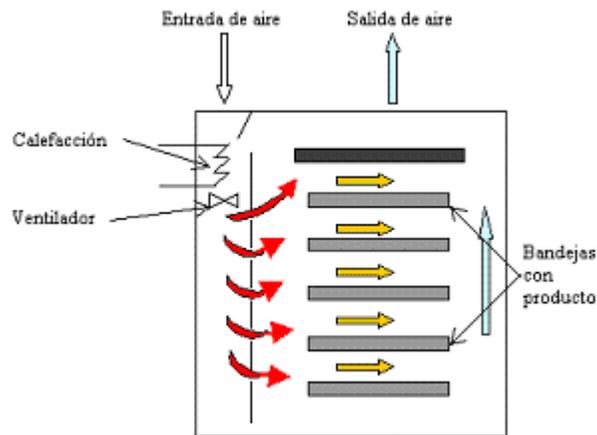


Figura 2. 15 “Secador de bandejas”

2.7.2 SECADORES DE TÚNEL

Los secadores de túnel pueden presentar configuraciones diferentes pero en general son cámaras de secado rectangulares como la mostrada en la figura 2.16. Son semejantes a los secadores de bandejas, pero de funcionamiento semicontínuo, para lo cual el producto a secar va colocado también sobre unas bandejas, que son transportadas por el interior del túnel en carretillas, que entran por un extremo con el producto húmedo y salen por el extremo opuesto con el producto seco. Pueden alcanzar hasta 24m de longitud y consisten en una cabina en la que hay un mecanismo de rieles que mueven carros con producto a lo largo de ella. Suelen utilizarse mayormente en las industrias que no tienen excesiva demanda de productos deshidratados.

Los secadores de túnel son simples y móviles en comparación con otros tipos de secadores, conservan la flexibilidad de los secadores de bandejas en cuanto a la gama de productos que permiten tratar, en tanto que se adaptan a elevadas capacidades de producción con un funcionamiento prácticamente continuo. Debido a su versatilidad son muy utilizados a gran escala para el secado de varios tipos de alimentos.

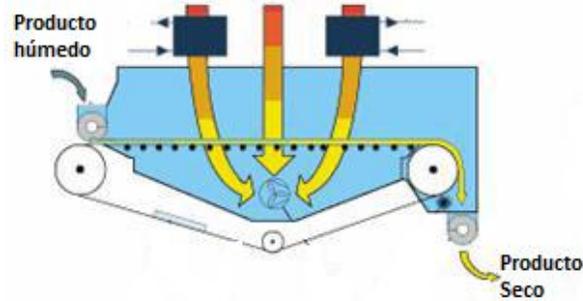


Figura 2. 16 “Secador de túnel”

2.7.3 SECADORES DE CINTA TRANSPORTADORA

Son secadores continuos con circulación de aire a través del material, que se traslada sobre un transportador de cinta perforada como el mostrado en la figura 2.17. Esta cinta suele ser de malla metálica o de lámina de acero perforada. Se usan comúnmente en líneas de producción en empresas a gran escala y se colocan capas muy delgadas de producto sobre las cintas transportadoras.

Están diseñados para la durabilidad, higiene y confiabilidad, los equipos de cinta transportadora de paso permiten controlar la temperatura, la humedad del aire de proceso y el caudal de aire en todo el proceso. El diseño de caudal de aire paralelo al movimiento del producto permite que el caudal de aire longitudinal optimice el aire de proceso con el máximo acceso interior para la limpieza. Su principal desventaja es la laboriosa construcción de dicho equipo, además de su gran tamaño.

Algunas de las aplicaciones más comunes para este tipo de secador son: cereales, bocadillos, nueces, fruta, vegetales, papas, alimento para mascotas, alimento para peces, carbón vegetal, pigmentos, productos químicos, especialidades en polímeros, y tabaco.

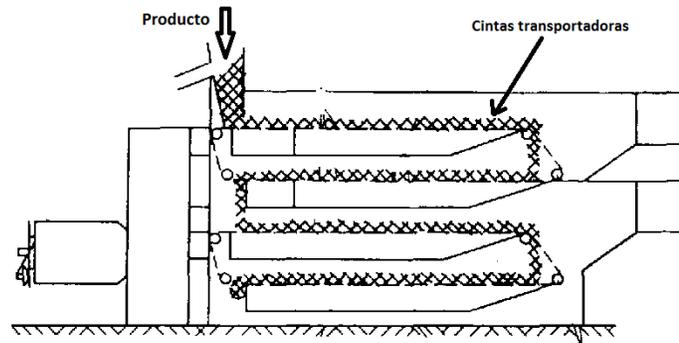


Figura 2. 17 “Secador de cinta transportadora”

2.7.4 SECADORES ROTATORIOS

Son secadores de funcionamiento continuo que constan de una carcasa cilíndrica como se muestra en la figura 2.18 que gira sobre unos soportes adecuados, por lo general esta carcasa está ligeramente inclinada respecto a la horizontal.

El producto húmedo se introduce por un extremo del cilindro, avanza por él por gravedad, en virtud de la rotación del mismo y de la inclinación de la carcasa, y sale seco por el otro extremo. Cuando los gases calientes circulan en el sentido del avance del material, le ayudan a desplazarse a lo largo del secadero.

El secado es rápido y uniforme, estos aparatos se utilizan para el secado de azúcar, cacao, trozos de carne destinados a la alimentación animal.



Figura 2. 18 “Secador rotatorio”

2.7.5 SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO

El aire caliente se utiliza simultáneamente como agente de secado y de fluidización al ser forzado a pasar a través del lecho de partículas del alimento como se puede observar en la figura 2.19. El aire con alta velocidad, la suficiente para

vencer las fuerzas gravitacionales del producto y mantener las partículas en estado suspendido. De este modo se consiguen grandes velocidades de transferencia de materia entre el sólido y el aire, y por lo tanto tiempos de secado muy cortos. Cabe destacar que el tipo de grano que utiliza este equipo suele tener pequeñas dimensiones para ser posible suspenderlo en el lecho de aire. Este tipo de secador es comúnmente utilizado en las industrias para secar el arroz.

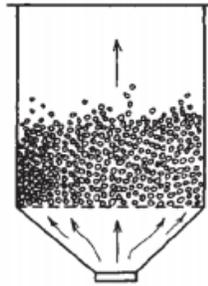


Figura 2. 19 “Secador de lecho fluidizado”

El secador de lecho fluidizado tiene el problema de que el material que está siendo secado tiene que fluidizarse y algunos de los productos se encuentran muy mojados para fluidizar correctamente. Si el producto tiene una distribución de tamaño muy amplia, de tal manera que la velocidad del fluido suficiente para fluidizar las partículas grandes, pudieran presentar pérdidas de pequeñas partículas del lecho.

Su principal inconveniente es su complicada construcción y solamente funciona para granos muy pequeños. Además el material que está siendo secado tiene que fluidizarse y algunos de los productos se encuentran muy mojados para fluidizar correctamente. Si el producto tiene una distribución de tamaño muy amplia, de tal manera que la velocidad del fluido, suficiente para fluidizar las partículas grandes, puede representar pérdidas de pequeñas partículas del lecho.

Las ventajas de este secador son:

- Los coeficientes de transferencia de calor entre el lecho fluidizado y los objetos inmersos, como son paneles de calentamiento, son altos.

- La transferencia de calor y de masa entre el gas y las partículas es rápido, evitando así un sobrecalentamiento.
- No existen piezas móviles, lo cual significa entre otras cosas, un bajo mantenimiento.
- El rápido mezclado de los sólidos permite obtener unas condiciones casi isotérmicas a través de todo el lecho fluidizado, consiguiendo por ejemplo un control fácil y seguro del proceso de secado.
- El contacto prolongado entre sólidos y gas hacen que las unidades sean compactas y deshidraten mayor cantidad de producto.
- El manejo de las partículas es gentil comparado con otros tipos de secadores.

2.7.6 SECADOR TIPO TRANSPORTADOR POR VIBRACIÓN

Es un equipo complejo que se puede utilizar en procesos de secado continuos. El aire caliente se inyecta en la parte inferior en el compartimiento del transportador vibrador que lleva el material a secar, luego a través de un secador de lecho fluidizado pasa a la parte superior y finalmente pasa a un conducto colector.

El lecho fluidizado de densidad uniforme se mantiene en la zona de secado por vibración del transportador y uso de pequeños obstáculos para retención del material. El tiempo de residencia se determina por la longitud de la zona de secado, frecuencia y amplitud de la vibración del transportador y de la altura de los obstáculos. En cada zona debe existir control del aire y de temperatura. La capacidad del secado está limitada por el tiempo de retención del material en el transportador como se observa en la figura 2.20.

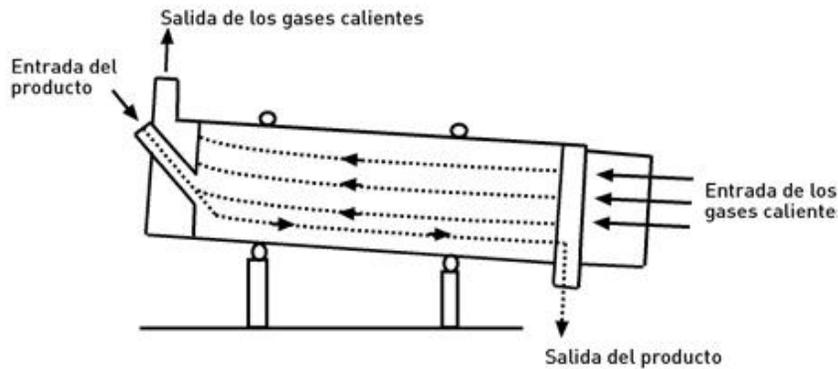


Figura 2. 20 “Secador tipo transportador por vibración”

2.7.7 SECADOR EN SPRAY O ATOMIZADOR

El secador se compone un recipiente para la carga del material, una cámara de secado, un clasificador sólido-gas y un dispositivo de recolección mostrados en la figura 2.21. Sólo se utiliza para manipular fluidos como soluciones y pastas delgadas. El fluido se dispersa como gotas finas en una corriente de gas caliente donde el líquido se evapora antes de alcanzar la pared de la cámara. Al final, se obtiene un material seco fino que es llevado por una corriente de gas a un recipiente recolector.

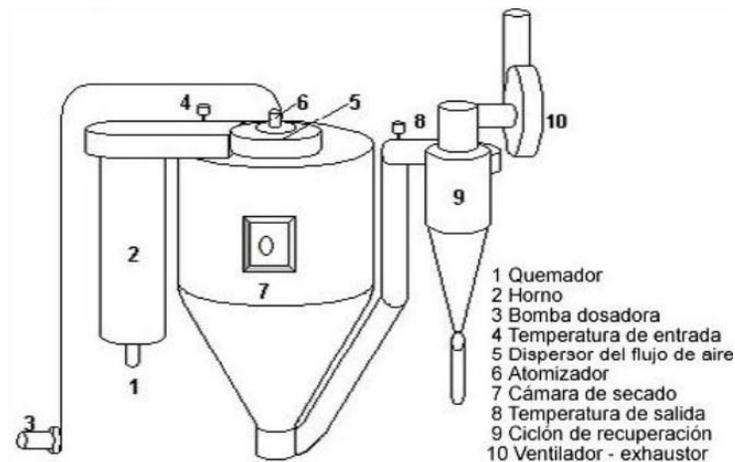


Figura 2. 21 “Secador tipo spray o atomizador”. Fuente: SPRAY PROCESS

Entre algunas ventajas presentes en el secador tipo atomizador se tiene que:

- a) Es perfecto para el secado de materiales sensibles al calor y oxidación sin degradarlos
- b) Produce partículas esféricas de excelente flujo y mínima área superficial.
- c) Se puede utilizar en operaciones de recubrimiento de sólidos y líquidos porque a medida que se evapora el material de recubrimiento envuelve la partícula que enmascara el olor y sabor mejorando la estabilidad, recubrimiento entérico y la liberación sostenida.

2.7.8 SECADOR TURBO DE BANDEJAS

Está formado por una serie de bandejas circulares rotantes alrededor de un eje central apiladas verticalmente. Su velocidad de rotación promedio es de 0.5 rpm. El aire caliente circula a través de las bandejas con ayuda de ventiladores montados en el centro de la columna.

El material húmedo se coloca en la parte superior del secador y una pala estacionaria se encarga de esparcirlo uniformemente. Cuando la bandeja circular rota un 90% el material es pasado a través de unos orificios radiales a la bandeja de abajo donde de nuevo se esparce y homogeniza. La transferencia de masa de una bandeja a otra se produce después de una revolución. Así continúa sucesivamente hasta que el material llegue a la parte inferior.

La ventaja es que el material continuamente está exponiendo superficies nuevas al aire circulante y que el secado ocurre más rápidamente que en los secadores de túnel, como muestra la figura 2.22.

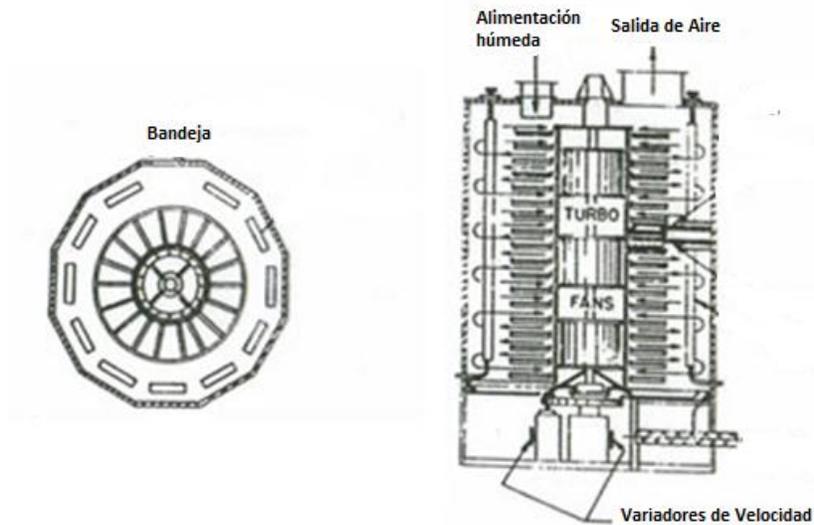


Figura 2. 22 “Secador turbo de bandejas”

2.7.9 SECADORES POR CONDUCCIÓN

Este tipo de secadores se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el producto húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica, son por lo tanto secaderos indirectos. Ellos se pueden dividir en:

a) Secadores de bandejas a vacío

Son secadores formados por una cámara herméticamente cerrada como se muestra en la figura 2.23, provista de placas calefactoras y bandejas que soportan el material a secar. Este se dispone sobre bandejas metálicas que se colocan sobre la superficie calefactora. El calor se transmite por conducción hasta el producto, que a baja temperatura libera vapores de disolvente debido al elevado grado de vacío que se aplica a la cámara.



Figura 2. 23 “secador de bandejas a vacío”. Fuente: DIRECT INDUSTRY

El secado a vacío es uno de los métodos más caros de secado, sus costo de operación son comparables al secado por congelación. Este secador se utiliza industrialmente para deshidratar productos altamente valiosos, sensibles a la temperatura o fácilmente oxidables o incluso para recuperar disolventes valiosos.

Presenta las siguientes ventajas:

- Seguridad para los trabajadores, el medio ambiente y el producto.
- Homogeneidad y uniformidad del lote secado.
- Tiempos de secado reducidos.
- Sencillez en la limpieza interna y externa.
- Facilidad para la inspección y acceso.

b) Secadores de tornillo sinfín

Son secaderos continuos de calentamiento indirecto, formados esencialmente por un transportador de tornillo sinfín horizontal encerrado dentro de una carcasa cilíndrica encamisada como se muestra en la figura 2.24. El producto, que se alimenta por un extremo, se transporta lentamente a través de la zona caliente y se descarga por el otro extremo.

Estos secaderos son útiles para operar con sólidos demasiado finos o demasiado pegajosos para ser tratados en secaderos rotatorios. Están completamente

cerrados y permiten recuperar los vapores del disolvente. Si disponen de alimentadores con cierre adecuado, pueden trabajar bajo un vacío moderado.

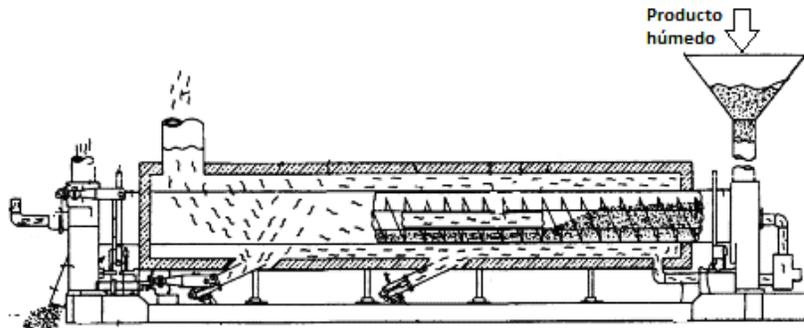


Figura 2. 24 “Secador de tornillo sinfín”

c) Secadores de rodillos

En los secadores de rodillos el producto se seca sobre la superficie de un rodillo giratorio calentado interiormente como se observa en la figura 2.25. El cilindro se calienta interiormente con vapor de agua a presión, o bien con menos frecuencia, con agua u otro, líquido transmisor de calor. El producto seco se separa en forma de película continua por medio de una cuchilla que rasca longitudinalmente la superficie del cilindro.

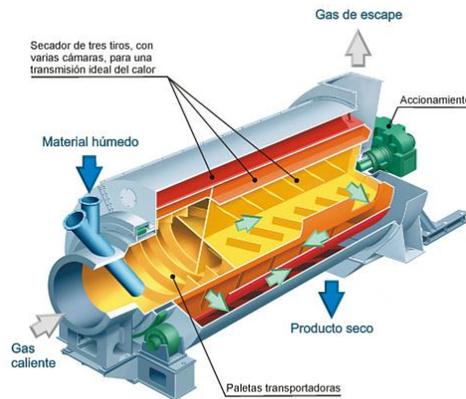


Figura 2. 25 “secadores de rodillo”. Fuente: GEBR.PFEIFFER

Generalmente, los cilindros de estos secadores están contruidos en bronce o acero de un espesor de varios centímetros, con el fin de resistir la presión del vapor de calefacción. Las dimensiones de los cilindros son variables, sin embargo su relación longitud/diámetro está limitada por la deformación de los cilindros. El diámetro de los cilindros varía entre 30 y 200 cm y la superficie de evaporación de 2 a 36 m².

Se emplean en la preparación de puré de patatas en escamas, pulpa de tomate y otras frutas y en la fabricación de cereales para desayuno

2.8 PSICROMETRIA

La psicometría se define según Moran y Shapiro (2005) como “el estudio de sistemas consistentes en aire seco y agua”

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de post cosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos.

El aire que compone nuestra atmósfera es una mezcla de gases (N₂, O₂, Ar, CO₂, H₂, Ne, He, Kr, Xe) entre los cuales destacan principalmente el nitrógeno y el oxígeno. Para fines prácticos el aire puede considerarse como una mezcla de N₂ y O₂ (aire seco) y de vapor de agua (humedad). El aire atmosférico nunca estará libre de agua por completo por lo tanto siempre existirá aire húmedo.

Si el vapor está a la presión y temperatura de saturación, la mezcla se conoce como una mezcla saturada, y para la mezcla aire – vapor se utiliza el término aire saturado.

La entalpía del aire húmedo es la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua.

$$h = h_s + wh_v \quad (2.15)$$

donde;

$$h_s = Cp * \Delta T \quad (2.16)$$

$$h_v = h_g = \text{entalpia de vapor saturado}$$

Para obtener un mejor secado en los deshidratadores es necesario aumentar la temperatura del aire antes que esté en contacto con el producto húmedo para obtener un mayor intercambio de energía entre el aire y el sólido, esto se justifica mediante la ecuación 2.16 ya que el aire tiene un calor específico constante y la única manera de aumentar la entalpia es mediante una diferencia positiva de temperatura.

2.8.1 Carta Psicrométrica

Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua que constituyen el aire atmosférico, se pueden presentar adecuadamente en forma de gráfico, con el nombre de carta psicrométrica, el cual se construye según una presión atmosférica determinada, aunque suele haber curvas de corrección para otras presiones. A continuación en la figura 2.26 se representara un caso cualquiera para ilustrar el proceso general de secado, visto en una carta psicrométrica.

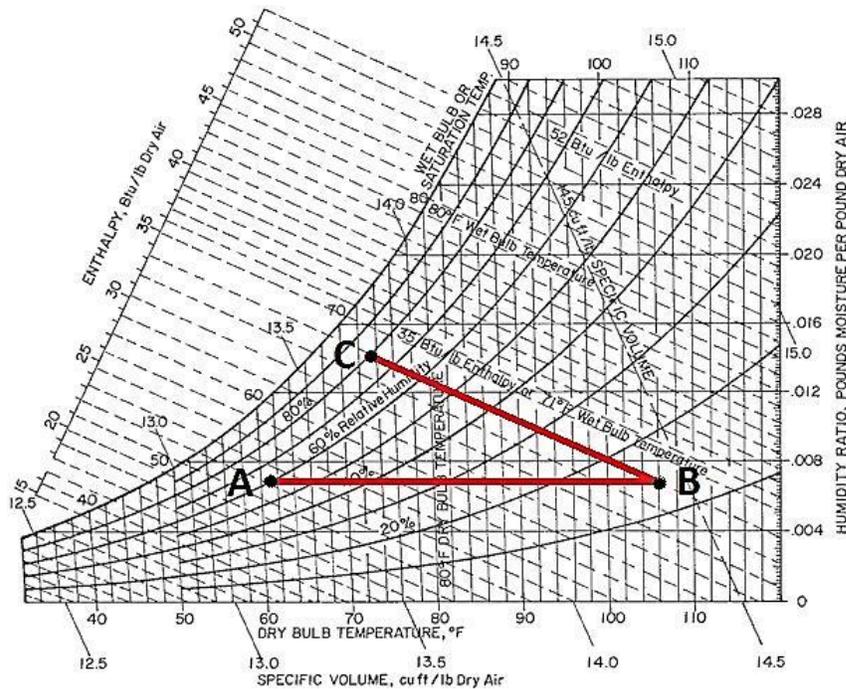


Figura 2. 26 “Proceso general de secado en carta psicrometrica”

Se puede apreciar que desde el punto A el aire aumenta su temperatura disminuyendo su humedad relativa hasta el punto B, por lo tanto el aire obtiene más capacidad de absorber humedad del producto, también es apreciable que la humedad absoluta del aire se mantiene constante en el tramo AB, esto ocurre porque no existe nada que absorba esa cantidad de humedad que tiene el aire en un principio.

Luego desde el punto B se observa que el aire mantiene constante su entalpia aire-vapor hasta el punto final C, esto será explicado más adelante mediante un balance energético.

De este modo se evidencia que el tramo AB es la etapa donde el aire se calienta y el tramo BC es la etapa donde el aire retira la humedad del producto.

2.9 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA Y CONSERVACION DE LA MASA

Para aplicar la primera ley, necesitamos primero identificar el volumen de control, una región de espacio limitada por una superficie de control a través de la cual pueden pasar la energía y la materia aplicado a un volumen de control abierto.

El requerimiento de conservación de la energía para un volumen de control abierto, donde el flujo de masa proporciona el transporte de energía interna, cinética y potencial hacia dentro y fuera del volumen de control. En tales casos, es habitual dividir el intercambio de la energía en forma de trabajo en dos contribuciones. La primera contribución, denominada trabajo de flujo, se asocia con el trabajo realizado por fuerzas de presión que mueven el fluido a través de la frontera del volumen de control. Para una masa unitaria, la cantidad de trabajo es equivalente al producto de la presión por el volumen específico del fluido ($P * V$). Respecto a todos los otros trabajos se supone que los realiza el volumen de control y se incluyen en el término W . De aquí, si se supone que se transferirá calor al volumen de control, no ocurre conversión de energía dentro de éste, y la operación se encuentra en condiciones de estado estable. La ecuación de balance de energía se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{m} \left(u + Pv + \frac{v^2}{2} + gZ \right)_i - \dot{m} \left(u + Pv + \frac{v^2}{2} + gZ \right)_o + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (2.17)$$

Aplicando un balance de energía al área de secado donde se colocara el producto, mostrado en la figura 2.27:

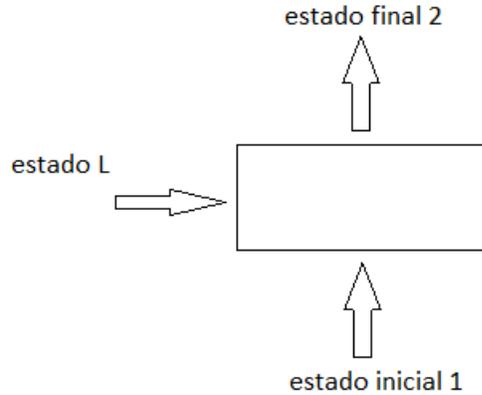


Figura 2. 27 “Volumen de control del área de secado”

Suposiciones:

- No hay trabajo externo.
- No existe transferencia de calor.
- La velocidad del aire de entrada es la misma que la velocidad de salida.
- La energía potencial es la misma en la entrada y en la salida del área de secado.
- Régimen estacionario.

Evaluando la ecuación 2.17 para el área de secado y aplicando las suposiciones ya expuestas, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$0 = \Delta U_{21} \quad (2.18)$$

$$0 = \dot{m}_a [h_a + \omega h_v]_2 - \dot{m}_a [h_a + \omega h_v]_1 - \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_l \quad (2.19)$$

Dónde:

\dot{m}_a : Flujo másico del aire

h_a : Entalpía de aire seco

ω : Humedad absoluta

h_v : Entalpia de vapor de agua

h_l : Entalpia del agua

Subíndice 1: entrada al área de secado

Subíndice 2: salida del área de secado

En este caso cabe destacar que en el área de secado del prototipo el término $\dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)$ se refiere al flujo másico de humedad que se transfiere al aire desde el producto. Este término es despreciable debido a que la humedad absoluta expresada en Kg/Kg es siempre un número muy inferior a la unidad, al multiplicarlo por h_l el cual es un valor pequeño en comparación a h_g , hace que el término sea muy cercano a 0. Por esta razón la ecuación queda de la siguiente manera:

$$0 = \dot{m}_a[h_a + \omega h_v]_2 - \dot{m}_a[h_a + \omega h_v]_1 \quad (2.20)$$

Acomodando términos:

$$\dot{m}_a[h_a + \omega h_v]_1 = \dot{m}_a[h_a + \omega h_v]_2 \quad (2.21)$$

Esto quiere decir que las entalpías de mezcla aire-vapor del estado inicial y final son prácticamente iguales, de esta manera se justifica matemáticamente que en el tramo BC en la carta psicrometrica de la figura 2.26 el proceso de secado ocurre en entalpia constante.

Aplicando un balance de energía en el colector solar de placas planas tal como se muestra en la figura 2.28 queda:

Suposiciones:

- Proceso adiabático
- Régimen estacionario

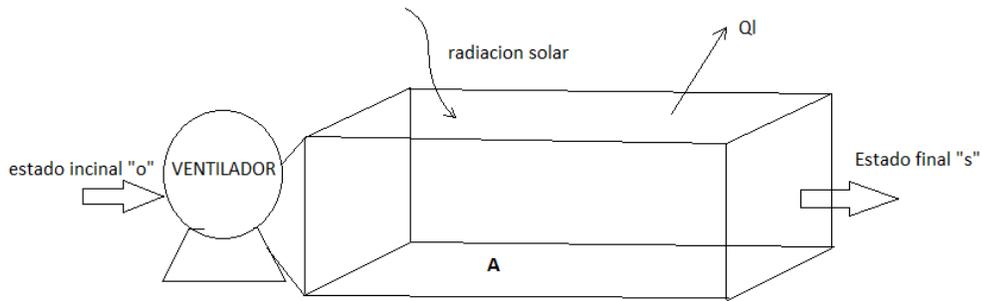


Figura 2. 28 “Volumen de control en colector de placas planas”

$$\alpha\tau I - \dot{Q}_l - \dot{W}_v = \dot{m}_a(h_{as} - h_{ao}) \quad (2.22)$$

$$\dot{Q}_l = hA(T_c - T_o) \quad (2.23)$$

Dónde:

τ : Transmisividad solar de la placa transparente.

α : Absortividad solar de la placa de absorción.

I : Radiación solar.

h : Coeficiente convectivo.

A : Área por donde se pierde calor al medio.

T_s : Temperatura del aire en la salida.

T_o : Temperatura del aire en la entrada.

\dot{W}_v : Potencia del ventilador.

\dot{m}_a : Flujo másico del aire.

h_{as} : Entalpia del aire en la salida.

h_{ao} : Entalpia del aire en la entrada.

La transmisividad solar (τ) del primero término $\alpha\tau I$ en la ecuación 2.22 se refiere a la cantidad de energía que el material de la placa transparente deja pasar al colector, por lo tanto es importante seleccionar algún material con su transmisividad alta. La absortividad solar α es la cantidad de energía que el material de la placa inferior del colector es capaz de absorber, de este modo se debe utilizar materiales conductores térmicos, como por ejemplo materiales metálicos.

El segundo término \dot{Q}_l se refiere a la pérdida de calor que ocurre en la placa de absorción, como las pérdidas de calor en esta placa son inevitables se usara un material aislante térmico para disminuir dichas pérdidas. Por último, el tercer término \dot{W}_v se refiere al trabajo del ventilador, como el ventilador consume energía de una fuente externa, el trabajo se vuelve positivo y contribuye a un mejor intercambio de calor dentro del colector solar.

La radiación solar sólo incrementa la temperatura del vapor de agua, más no así la del aire seco ya que es transparente a la radiación solar. Por otra parte la radiación incrementa la temperatura tanto de la placa de absorción como la de placa transparente por ambos lados, dando origen a un gradiente de temperatura entre las superficies y el fluido de trabajo. Es importante destacar que la variación de temperatura fue seleccionada para las condiciones climáticas de menor irradiación solar con la finalidad de garantizar que el equipo funcione la mayor parte del día. También es importante señalar que la temperatura ambiente es menor que la temperatura en la superficie de la placa transparente, esta condición nos garantiza que el fenómeno de convección sea desde las superficies hacia el aire dentro del colector y no desde el aire hacia las superficies.

2.10 IRRADIACIÓN SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

La energía incidente sobre un receptor situado fuera de la atmosfera se denomina Irradiación solar Extraterrestre y es la máxima cantidad de energía posible que se podría aprovechar en la tierra, ya que una vez que está entra a la atmosfera ocurren ciertos fenómenos que reducen la cantidad disponible en la superficie terrestre como: dispersión de los rayos por la interacción con moléculas gaseosas y polvo, reflexión de la radiación de vuelta al espacio, absorción de la energía por vapor de agua y dióxido de carbono, entre otros.

En la figura 2.29 se puede apreciar que de la energía incidente en la atmosfera, las líneas nombradas como directa, difusa del cielo y reflejada del suelo, llegan hacia

la superficie plana inclinada representada en la figura como el colector. Dichas líneas se definen de la siguiente manera:

- La radiación directa es aquella constituida por los rayos que se reciben en línea directa con el sol
- La radiación difusa procedente del cielo se debe a rayos directos dispersados por la atmosfera
- La radiación procedente del suelo se debe a la reflexión de la radiación incidente en él.
- La radiación global que incide una superficie plana inclinada colocada sobre la superficie de la tierra es la sumatoria de la radiación directa, difusa del cielo y la reflejada por el suelo.

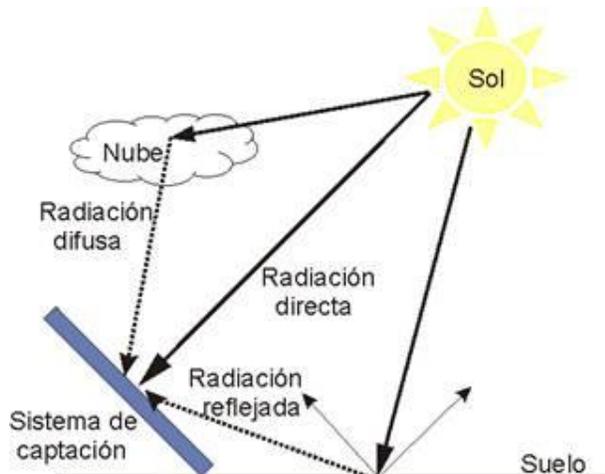


Figura 2. 29 “Irradiación solar para un colector”

2.10.1 RADIACIÓN HORARIA SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

La mayoría de los datos conocidos de irradiación solar se obtuvieron para superficies horizontales; sin embargo es de interés práctico conocer cuanta energía se encuentra disponibles a cierto ángulo de inclinación que tenga una estructura, para así estimar la cantidad de energía que el arreglo proveerá.

El hecho de inclinar una superficie implica que la forma como se suponga la radiación difusa tendrá una definición fundamental en la estimación de la irradiación global que incide sobre el área inclinada. La suposición más simple es la de considerar que la radiación difusa y de alrededor se comportan de forma isotrópica, denominado modelo de cielo isotrópico, para lo cual Liu y Jordan (1960) desarrollan la expresión mostrada en la ecuación 2.24.

$$I_t = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_h \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.24)$$

Dónde:

I_b es la irradiación directa [KW_h/m^2]

R_b es la relación entre radiación global inclinada y horizontal

I_d es la irradiación difusa [KW_h/m^2]

β es el ángulo de inclinación de la superficie [$^\circ$]

I_h es la irradiación global sobre superficie horizontal [KW_h/m^2]

ρ_g es la reflectividad del suelo

I_t es la irradiación global sobre superficie inclinada [KW_h/m^2]

Es importante mencionar que la expresión de la relación entre las radiaciones global inclinada y horizontal (R_b), se puede evaluar en base horaria y diaria, lo que cambia el termino de cómo el ángulo de desplazamiento solar ω se plantea. En la expresión de la ecuación 2.25 se muestra esta relación en base horaria considerando, que la superficie se encuentra orientada hacia el sur absoluto.

$$R_b = \frac{a}{b} \quad (2.25)$$

$$a = [\text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) \text{sen}(\beta) - \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) \text{sen}(\beta)] \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi + [\text{cos}(\delta) \text{cos}(\phi) \text{cos}(\beta) - \text{cos}(\delta) \text{cos}(\phi) \text{cos}(\beta)] (\text{sen}(\omega_2) - \text{sen}(\omega_1)) \quad (2.26)$$

$$b = [\text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi)] \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi + [\text{cos}(\delta) \text{cos}(\phi)] (\text{sen}(\omega_2) - \text{sen}(\omega_1)) \quad (2.27)$$

Dónde:

δ es el ángulo de declinación de la tierra

ϕ es latitud del sitio

ω es el ángulo horario solar. El estado 2 corresponde al punto en el intervalo evaluado más cercano al medio día solar ($\omega_2 < \omega_1$)

La cantidad de energía que pueda absorber una superficie inclinada expresada bajo el modelo de cielo isotrópico, depende de los productos de transmisividad-absortividad de cada componente radiativa.

De esta manera mientras más cantidad de irradiación solar pueda recibir el dispositivo, mayor será el calor que se le transfiera al aire ocasionando una elevación en su temperatura y de este modo el prototipo podrá secar más cantidad de producto.

Por lo tanto en esta investigación el dispositivo para calentar el aire debe tener la capacidad de cambiar su inclinación con respecto al suelo. Así cuando se construya el prototipo se podrá saber experimentalmente cuál es el mejor ángulo para obtener la mayor cantidad de irradiación solar.

CAPITULO III

3.1 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE DATOS

3.1.1 ENCUESTA

Una encuesta se realiza con la finalidad de recolectar información de interés sobre un determinado tema a una población específica de individuos afectados. Con esta información recolectada es posible determinar las necesidades de la comunidad evaluada y posteriormente indagar la solución más favorable.

Para enmarcar la metodología de la búsqueda de información, según Cadoche (1998) es posible clasificar las encuestas de diversas maneras, donde se clasifican dependiendo el ámbito que comprendan, la forma de obtener de los datos y el contenido, de la siguiente forma:

- Encuestas exhaustivas y parciales: Aquellas que comprenden todas las unidades estadísticas que componen el universo, población o conjunto estudiado. Las encuestas parciales son aquellas que no son exhaustivas.
- Encuestas sobre hechos y encuestas de opinión: Tienen por objetivo principal averiguar lo que el público en general piensa sobre una determinada materia o en una circunstancia determinada lo que considera debe hacerse.

También es posible clasificar las preguntas con respecto a la forma de sus respuestas, estas pueden ser:

- Preguntas cerradas: Aquellas en las que se le proporcionan al entrevistado una serie de opciones de las cuales deberá seleccionar una de ellas como su respuesta.
- Preguntas abiertas: Son las que dejan al sujeto observado la total libertad para expresarse, según lo considere.
- Preguntas semi-abiertas: Son aquellas preguntas que proporcionan una serie de opciones como respuesta, dejando una de las opciones abiertas para que el

encuestado pueda expresar alguna otra idea que no se encuentra en las opciones proporcionadas.

Según Cadoche (1998), este instrumento puede ser aplicado en cualquiera de estas cuatro siguientes formas:

1. Aplicación dirigida.
2. Aplicación mediante entrevista.
3. Auto aplicación.
4. Observación.

3.2 TÉCNICAS Y PROCESOS DE ANÁLISIS DE DATOS

3.2.1 TORMENTA DE IDEAS

Se trata de un método que tiene como finalidad reunir la mayor cantidad de ideas que puedan expresar un grupo de personas, de las cuales ninguna debe ser juzgada en el momento en el que se desarrolle la técnica.

Las normas básicas que se deben seguir para realizar una tormenta de ideas son:

- Seleccionar a un grupo de personas para que emitan ideas. El mismo debe estar familiarizado con el problema, pero no es necesario contar con expertos en el área, basta presentar de manera clara la situación en conflicto, con lo cual los participantes estarán capacitados para la actividad.
- Ninguna idea debe sea criticada, por lo cual se impondrá como condición ya que de producirse lo contrario se aminoraría el proceso creativo del grupo. De igual forma se debe dejar claro que las ideas extravagantes serán bien recibidas, los participantes deberán intentar de perfeccionar o combinar las ideas sugeridas por otros.
- Deben registrarse las ideas propuestas, si es necesario realizar breves entrevistas con los participantes que aportaron ideas que no se comprenden claramente. Posteriormente evaluar las ideas expuestas durante la tormenta, lo cual puede realizarse por medio de una matriz de decisiones.

3.2.2 MATRIZ DE DECISIONES

La matriz de decisiones es un método utilizado para la selección de la idea más competitiva entre un grupo de alternativas, donde se eligen los parámetros de mayor relevancia para servir como criterios de selección a los cuales se aplica un valor porcentual según su importancia en el diseño, apoyándonos en opiniones de personas involucradas con el proceso de una u otra manera para así poder llegar a una solución acertada.

Para realizar la evaluación en la matriz de decisiones cada criterio en cada propuesta se evaluará con la siguiente escala de puntuación:

- Deficiente: 1
- Aceptable: 2
- Bueno: 3
- Excelente: 4

Posteriormente para obtener el valor final de la propuesta, se multiplica la puntuación anterior de cada alternativa de solución por el porcentaje de peso asignado, se suman todos los resultados y el valor se mostrara en base a 100 puntos de esta manera se obtendrá el total a comparar entre las distintas propuestas. La alternativa con mayor puntaje será la seleccionada como ganadora para continuar el proceso de diseño.

CAPITULO IV

CAMARA DE SECADO

El objetivo del secado en la cámara es reducir el contenido de humedad del grano, para diseñar el equipo es necesario establecer las condiciones más críticas bajo las exigencias del grano de cacao a la momento de secado. Éste entrará a la cámara de secado con una humedad entre el 50% y el 70% y se desea extraerlo de la mismo hasta con un 7% u 8% en base húmeda. Esta reducción en el contenido de humedad permite la conservación de la almendra en condiciones de seguridad en cuanto a su calidad.

Durante el proceso de secado la temperatura del aire debe subir lentamente y no exceder los 45°C. El secado dentro de la cámara consiste en dejar entrar aire con bajo contenido de humedad el cual atravesara un lecho de granos, el mismo debe ser removido constantemente para obtener una superficie grande de evaporación, un secado homogéneo, como también ayudar a la eliminación de la pulpa restante (mucilago) del cacao y la exposición de toda la superficie de este a la superficie calefactora o al aire libre.

Para determinar los requerimientos en la cámara de secado se llevó a cabo una investigación de campo en la localidad de Trincheras del estado Carabobo, donde se realizaron encuestas tipo entrevista a distintos representante de organizaciones agrícolas productores de cacao del sector, a través de éstas fue posible determinar una serie de factores traducidos en requerimientos para el diseño de la cámara de secado. Para más detalles sobre las encuestas revisar anexo 4.

4.1 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO

La cámara de secado para el prototipo debe cumplir con ciertas características:

- Tener una capacidad máxima de 50 Kg.
- Poseer una configuración tal que facilite su limpieza.

- No debe condensarse agua en lugares que interfiera con el proceso de secado.
- Debe permitir la salida del aire húmedo.
- Debe contener dispositivo para mover los granos de cacao.
- La entrada del aire caliente en la cámara de secado debe distribuirse de forma homogénea.
- Seleccionar materiales que se encuentren en contacto directo con el producto los cuales eviten la modificación de las propiedades de los granos de cacao.
- Seleccionar materiales resistentes al calor y a la corrosión para la construcción de la cámara de secado.
- El diseño debe ser de fácil construcción.
- El diseño debe ser ergonómico.
- Deben minimizarse todas las pérdidas de calor de la cámara al medio ambiente.
- No debe permitir la entrada de insectos, animales u otro agente contaminante dentro de la cámara de secado.

4.2 LIMITACIONES DE LA CÁMARA DE SECADO

- Tamaño máximo de las bandejas para fácil manejo.
- Proceso de fabricaciones disponibles en a nivel regional para construcción de la cámara de secado.
- Dimensiones máximas de la cámara de secado que se ajuste al espacio donde será ubicado.
- Debe utilizarse materiales económicos.
- Los materiales deben tener disponibilidad en el mercado nacional.
- Su estructura debe ser capaz de soportar las solicitaciones de esfuerzos a las cuales estarán sometidos durante su uso.
- El material de las bandejas no debe cambiar la calidad del producto.

4.3 SELECCIÓN DE MATERIALES Y DISEÑO

Alternativas de material para la construcción de la cámara de secado

Propuesta N ° 1: Aluminio:

Posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 Kg/m^3) en comparación con el acero. Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente económico por ello comúnmente las latas de refrescos mostradas en la figura 4.1 se fabrican de aluminio. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica hasta los 690 MPa. Mecánicamente es un material blando y maleable. Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se producen aleaciones con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material.

Las aleaciones de aluminio se comportan bastante peor a corrosión que el aluminio puro, especialmente si llevan tratamientos de recocido, con los que presentan problemas graves de corrosión intercrystalina y bajo tensiones debido a la microestructura que presentan en estos estados.



Figura 4. 1 “Latas de aluminio”

Propuesta N ° 2: Acero Comercial:

El acero es la denominación que comúnmente se le da en ingeniería a una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,1 y el 2,1% en peso

de su composición, aunque normalmente estos valores se encuentran entre el 0,2% y el 0,3%. Permite una buena mecanización en máquinas herramientas antes de recibir un tratamiento térmico. Algunas formas de su comercialización se muestran en la figura 4.2.

Un aumento de la temperatura en un elemento de acero provoca un aumento en la longitud del mismo. El coeficiente de dilatación para el acero vale aproximadamente $0,000012^{\circ} C^{-1}$. El acero da una falsa sensación de seguridad al ser incombustible, pero sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas por las altas temperaturas que pueden alcanzar los perfiles en el transcurso de un incendio.



Figura 4. 2 “Piezas en acero comercial”

Propuesta N ° 3: Acero Inoxidable:

El acero inoxidable es un acero de elevada pureza y resistente a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasiva, evitando así la corrosión del hierro. El principal componente es el hierro, al que se añade una pequeña cantidad de carbono. Sus usos son muy variados, se destacan los equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche, intercambiadores de calor, contenedores de productos químicos, tanques para almacenamiento de vinos y cervezas, partes para extintores de fuego, algunas de ellas mostradas en la figura 4.3.



Figura 4. 3 “Equipos en acero inoxidable”

Propuesta N ° 3: Acero Galvanizado:

El acero galvanizado es aquel que se obtiene luego de un proceso de recubrimiento de varias capas de la aleación de hierro y zinc. Al ser recubrimientos obtenidos por inmersión en zinc fundido, cubren la totalidad de la superficie de las piezas, tanto las exteriores como las interiores de las partes huecas así como otras muchas áreas superficiales de las piezas que no son accesibles para otros métodos de protección.

El galvanizado del acero es una práctica común para proteger las piezas de acero que van a ser expuestas a condiciones ambientales adversas por un largo tiempo. El galvanizado por inmersión en caliente es un proceso industrial destinado a proteger contra la corrosión a una gran variedad de productos de hierro o acero.

El acero galvanizado suele utilizarse en los ductos de acondicionadores de aire como los mostrados en la figura 4.4, por su resistencia a la corrosión y fácil disponibilidad en el mercado.



Figura 4. 4 “Ductos de acero galvanizado”

Selección del material para la construcción de la cámara de secado:

Para la selección del material con el que se construirá la estructura base de la cámara de secado, se tomaron en cuenta los criterios mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4. 1 “Criterios de selección material para estructura en cámara de secado”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Resistencia:	Se evaluará la capacidad del material para resistir fallas, bien sean por flexión, compresión y corte. Siendo mayor el puntaje otorgado mientras mayor sea la resistencia del material estudiado.
Precio:	Se tomará en cuenta el costo de adquisición del material. Recibiendo mayor puntaje mientras más económico sea.
Maquinabilidad:	Se valorará la facilidad de que el material sea trabajado en los distintos procesos de fabricación. Obtendrá mayor puntaje mientras más sencillo sea de maquinar.

Resistencia a la corrosión:	Este factor toma en cuenta la capacidad que tiene el material de evitar la corrosión sin aditivos. La ponderación será mayor mientras mayor sea esta resistencia en particular.
Disponibilidad:	Tiene que ver con la oferta en el mercado nacional para el material estudiado. Se le dará mayor puntaje mientras más fácil de conseguir sea el material.

Utilizando la matriz de decisiones mostrada en la tabla 4.2, se le otorga mayor porcentaje al puntaje del criterio Resistencia a la corrosión debido a que el equipo de deshidratación podrá estar expuesto a la intemperie y un requerimiento relevante en el diseño es la durabilidad del equipo. El orden de mayor a menor importancia se tomaron los criterios Resistencia, Maquinabilidad, disponibilidad y por último Precio.

Tabla 4. 2 “Matriz material de construcción”

Material de construcción	%	1	2	3	4
Resistencia	25	2	4	4	4
Maquinabilidad	20	4	3	2	2
Resistencia a la corrosión	30	2	1	4	3
Disponibilidad	15	3	4	1	4
Precio	10	3	3	2	3
TOTAL	100	66,3	70	73,8	80

Como es posible observar en la tabla 4.2 se escoge de esta manera la alternativa #4 el acero galvanizado con 80 puntos en base a 100.

Alternativas de material aislantes para la estructura de la cámara de secado:

Propuesta N ° 1: Corcho:

El corcho posee ciertas propiedades las cuales hacen a este material muy usado en muchas áreas de la ingeniería, algunas de estas propiedades son: alta impermeabilidad, amortiguador de impactos, no es tóxico, durabilidad, inatacable por insectos. Es un producto imputrescible, al que no hay que tratar para protegerlo de hongos o microorganismos, al contrario que la madera. Actualmente en el mercado nacional es posible conseguir láminas de corcho (figura 4.5) como aislante a un precio de 244 Bs por metro cuadrado con espesor de 1 pulgada.

- Su densidad es 110 Kg/m^3 .
- Su coeficiente de conductividad térmica es 0.039 W/mK .
- Es un material idóneo para equipos de aislamiento térmico por el exterior.
- Opera a una temperatura máxima de $65 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 4. 5 “Lamina de corcho”

Propuesta N ° 2: Espuma de poliestireno

La espuma de poliestireno que se muestra en la figura 4.6 también llamada comúnmente anime, es un aislante derivado del petróleo y del gas natural, de los que se obtiene el polímero plástico estireno en forma de gránulos. A pesar de perder propiedades físicas cuando se somete continuamente a cambios bruscos de temperatura, posee buenas cualidades en casos como los siguientes:

- Se le denomina Difícilmente Inflamable.
- Posee un buen comportamiento térmico en densidades que van de 12 Kg/m^3 a 30 Kg/m^3 .
- Tiene un coeficiente de conductividad desde $0,034$ hasta $0,045 \text{ W/mK}$, que depende de la densidad (a mayor densidad menor coeficiente de conductividad).

- Opera óptimamente hasta una temperatura máxima de 105 °C.
- Posee una alta resistencia a la absorción de agua.
- No forma llama ya que al quemarse se sublima.
- El costo actual por metro cuadrado y 5 cm de espesor esta entorno a los Bs.22.



Figura 4. 6 “Material espuma de poliestireno”

Propuesta N ° 3: Lana de vidrio

La lana de vidrio garantiza la no condensación de la humedad relativa del aire sobre el ducto, evitando el proceso corrosivo de la lámina metálica, cuando el fluido del aire transportado tiene una temperatura inferior a la del medio ambiente. Eliminándose la posibilidad de llegar a la temperatura del punto de rocío. Su presentación a la venta es por rollos como muestra la figura 4.7, de 1,2m de ancho y hasta 30m de largo con un costo aproximado de Bs.38 el metro cuadrado con espesor de 25,4mm (1 pulgada).

- Presenta una gran durabilidad en el tiempo por su resistencia a las temperaturas en un amplio rango.
- Posee un buen comportamiento térmico en densidades que van de 14 Kg/m³ a 80 Kg/m³
- Tiene un coeficiente de conductividad desde 0.032 hasta 0.44 W/mK
- Opera óptimamente hasta una temperatura máxima de 200 °C.



Figura 4. 7 “Material lana de vidrio”

Propuesta N ° 4: Espuma de poliuretano

La espuma comprimida de poliuretano es conocida por ser un material aislante de alta calidad. Tiene múltiples aplicaciones como aislante térmico tanto en construcción como en sectores industriales. Se puede conseguir en presentación líquida expandible al momento de secado aplicándola directamente a la superficie, es importante destacar que no es de aplicación sencilla. Mientras que la presentación en láminas mostrada en la figura 4.8, de ancho 1,16m, largo máximo de 9m, presenta menos inconvenientes al momento de instalación. Su costo en el mercado nacional se encuentra alrededor de los Bs.400 el metro cuadrado de lámina con espesor de 8cm.

- Posee una densidad de 35Kg/m^3
- Tiene un coeficiente de conductividad de $0,023\text{ W/mK}$
- Opera óptimamente hasta una temperatura máxima de $100\text{ }^\circ\text{C}$.
- Suele perdurar en el tiempo si se instala de la forma adecuada.



Figura 4. 8 “Láminas de espuma de poliuretano”

Selección de la alternativa para el material aislante:

Para la selección del material aislante que se utilizará en la cámara de secado, se tomaron en cuenta los criterios mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4. 3 “Criterios de selección para material aislante”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Coeficiente de conductividad:	Se evaluará la resistencia que ofrece el material para evitar la conducción de calor atreves del mismo. Obteniendo mayor el material con menor coeficiente de conductividad.
Temperatura de operación:	Se tomará en cuenta el rango de temperatura de operación de cada material. Recibiendo mayor puntaje el elemento que tenga la temperatura de operación más alta.

Densidad:	Se refiere al volumen que ocupa el elemento en función del peso. Dándole mayor puntaje al que ofrezca menor densidad.
Instalación:	Se valorará la facilidad de instalar el material en el equipo. Obtendrá mayor puntaje mientras más sencillo sea de instalar.
Durabilidad:	Este factor toma en cuenta la capacidad que tiene el material de no perder sus propiedades térmicas. La ponderación será mayor mientras mayor durabilidad tenga el material.
Precio:	Este criterio hace referencia al costo del producto al público. El aislante que tenga menor precio obtendrá mayor puntaje.

Utilizando la matriz de decisiones mostrada en la tabla 4.4, se le otorga mayor porcentaje a los puntajes de los criterios; Instalación y Durabilidad, ya que la facilidad con la que se debe instalar el material aislante es tan importante como la durabilidad del mismo. Mientras que los criterios Coeficiente de conductividad, Temperatura de Operación, Densidad y Precio se evalúan con el mismo porcentaje cada uno debido a ser características de cada material con la misma relevancia en la selección.

Tabla 4. 4 “Matriz material aislante”

Material Aislante	%	1	2	3	4
Coeficiente de Conductividad	10	3	3	3	4
Temperatura de operación	10	1	2	4	3
Densidad	10	2	4	4	3
Instalación	30	3	4	2	4
Durabilidad	30	4	1	3	3

Precio	10	2	4	3	1
TOTAL	100	72,5	70	72,5	80

Según la matriz de decisiones aplicada en la tabla 4.4 la alternativa ganadora es la opción #4 espuma de poliuretano.

Alternativas de dispositivos para la remoción del cacao dentro de la cámara de secado:

Propuesta N ° 1: Rastrillos rectos.

Esta alternativa contempla un dispositivo de rastrillos estilo peine por bandeja como el mostrado en la figura 4.9 donde se colocara el cacao. Los rastrillos pueden moverse en forma longitudinal, separando los granos y cambiándolos de posición para que exista un secado homogéneo sin necesidad de abrir la cámara de secado para realizar su función ya que el dispositivo se encuentra fijo a la deshidratador.

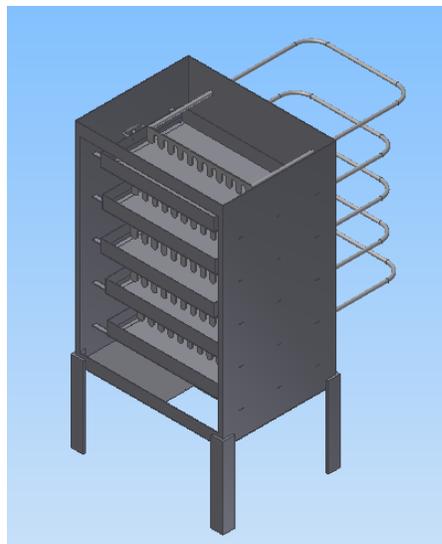


Figura 4. 9 “Dispositivo rastrillos rectos”

Propuesta N ° 2: Cepillos giratorios.

Se basa en una serie de cepillos circulares como se muestra en la figura 4.10, uno por cada bandeja perforada donde se colocan los granos y el aire atraviesa de forma perpendicular a la superficie del lecho, estos cepillos son capaces de levanta porciones de granos desde la parte inferior hasta la superior del lecho ya que estos pueden girar y desplazarse a lo largo de toda la bandeja sujetos a un riel.

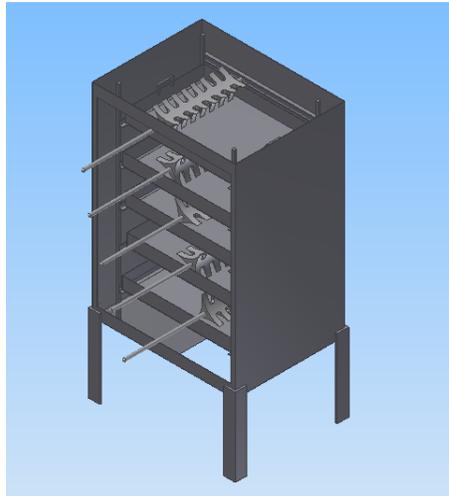


Figura 4. 10 “Dispositivo cepillos giratorios”

Propuesta N ° 3: Vibraciones.

Esta alternativa contempla unos dispositivos por bandeja los cuales son capaces de producir oscilaciones con las cuales el lecho de cacao comenzara a moverse permitiendo que los granos cambien de posición y el aire atraviese perpendicularmente secando la capa de almendras. Este dispositivo no requiere de perforaciones en la cámara de secado como lo muestra la imagen 4.11.

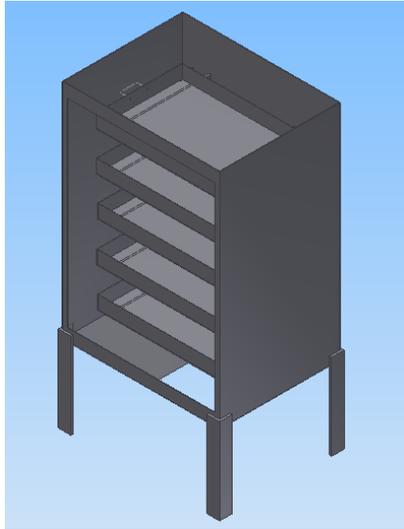


Figura 4. 11 “Dispositivo de vibraciones”

Propuesta N ° 4: Cilindros.

Esta opción contempla una serie de cilindros perforados por donde traspasará el aire seco de manera transversal al eje, colocando los granos de cacao dentro de ellos. Cada cilindro es atravesado por un eje concéntrico al mismo, el cual es posible girar desde el exterior de la cámara de secado, haciendo que las almendras queden expuestas a la superficie calefactora y produciendo un secado homogéneo. Como se muestra en la figura 4.12 este dispositivo es mucho más compacto que otras alternativas.

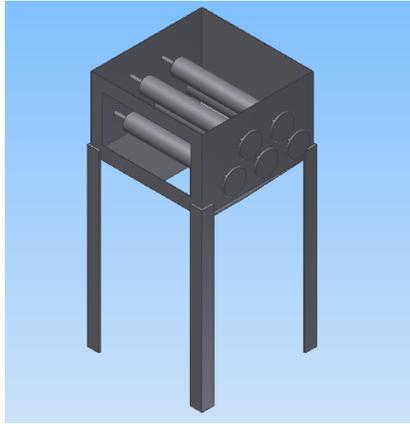


Figura 4. 12 “Cilindros giratorios”

Propuesta N ° 5: Paletas giratorias.

Esta propuesta establece una serie de bandejas circulares perforadas, las cuales están provistas en el fondo por una serie de paletas mostradas en la figura 4.13, haciendo girar estas desde el exterior de la cámara de secado producen movimiento a los granos de cacao, cambiando su ubicación y proporcionando un secado uniforme. Una desventaja de este dispositivo es la cantidad de maquinaria necesaria para mover todas las paletas de conjunto, por lo cual es una propuesta costosa.

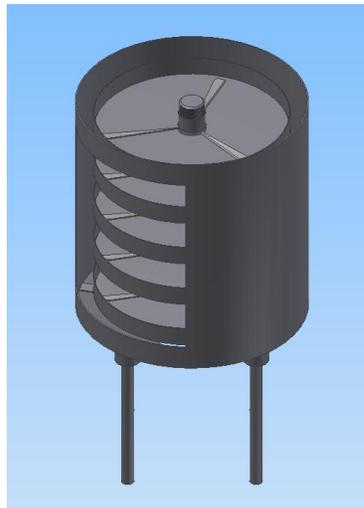


Figura 4. 13 “Paletas giratorias”

Selección del dispositivo para movimiento del cacao:

Para la selección del dispositivo para mover los granos de cacao dentro de la cámara de secado, se tomaron en cuenta los criterios mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4. 5 “Criterios de selección para dispositivo de movimiento del cacao”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Fabricación:	Se evaluará la facilidad para la construcción o ensamblaje. Siendo mayor el puntaje otorgado al equipo de mayor sencillez de fabricación.
Fluidez del aire:	Se tomará en cuenta la facilidad con la que puede fluir el aire a través del producto sin que el dispositivo interfiera en ello. Recibiendo mayor puntaje el dispositivo que permita mayor fluidez del aire en cámara.
Ergonomía:	Se quiere evaluar que tan amigable es la relación hombre-máquina. Dándole mayor puntaje al que tenga mayor comodidad para la operación del usuario.
Movimiento del cacao:	Se tomará en cuenta la facilidad del dispositivo para mover el cacao y dejando una superficie homogénea expuesta al proceso de secado. Tendrá mayor puntaje aquel dispositivo que movilice la mayor cantidad de frutos deshidratándolos de forma uniforme.
Tamaño:	Se evaluará la relación espacio-capacidad. Donde obtendrá mayor puntaje el dispositivo que con menor espacio pueda deshidratar la misma cantidad de producto.
Hermeticidad:	Este criterio toma en consideración que tan

	sellada estará la cámara de secado, impidiendo fugas de aire o entrada de agentes contaminantes. Se le dará mayor puntaje al modelo que tenga mayor hermeticidad.
--	---

Utilizando la matriz de decisiones mostrada en la tabla 4.6, se le otorga mayor porcentaje a los puntajes en los criterios; Fabricación y Movimiento de cacao, ya que la facilidad para mover los granos de cacao y distribuirlos de forma homogénea es tan relevante como la construcción del dispositivo de forma sencilla. Con la mitad del porcentaje que los anteriores, el criterio Tamaño tiene importancia en economiza el espacio donde será ubicado el equipo, con un porcentaje de puntuación un poco menor estarán los criterios de; Ergonomía, para el fácil uso de los operarios y el criterio Fluidez del aire, relevante para conseguir la deshidratación del producto en todas las bandejas. Finalmente el menor porcentaje de puntuación se le otorga a la Hermeticidad sacrificando las fugas de aire en la cámara de secado, antes de fallar en cualquiera de los criterios restantes.

Tabla 4. 6 “Matriz, dispositivo para movimiento del cacao”

Dispositivo para Movimiento del Cacao	%	1	2	3	4	5
Fabricación	30	4	2	3	2	2
Fluidez del aire	10	4	3	4	1	3
Ergonomía	10	3	3	2	4	1
Movimiento del cacao	30	3	4	1	2	4
Tamaño	15	3	3	2	4	3
Hermeticidad	5	3	2	3	4	4
TOTAL	100	85	73,8	56,3	62,5	71,3

Como se mostró en la tabla 4.6 se escoge la opción #1 Rastrillos rectos con un puntaje de 85 en base a 100 puntos.

Alternativas de dispositivos para la salida del aire en la cámara de secado:

Propuesta N ° 1: Techo inclinado.

Esta propuesta consiste en un techo simple donde un extremo del techo esté más elevado que el otro extremo como lo muestra la figura 4.14, esto permite que la lluvia no caiga dentro de la cámara de secado ni que el agua se estanque en el techo, gracias a la acción de gravedad que dirigiría al agua pendiente abajo. Este techo tendrá la salida del aire húmedo debajo de los extremos del techo.

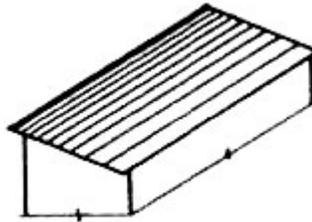


Figura 4. 14 “Techo inclinado”

Propuesta N ° 2: Techo a dos aguas

Esta alternativa es similar a la propuesta anterior pero con la diferencia que el techo es doblemente inclinado, tal como se muestra en la figura 4.15, esto permite que la lluvia no caiga dentro de la cámara de secado ni que el agua se estanque en el techo, por acción de la acción de gravedad que dirigiría al agua cuesta abajo. Este techo también poseerá la salida del aire húmedo debajo de los extremos laterales del techo.

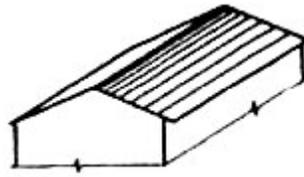


Figura 4. 15 “Techo a dos agua”

Propuesta N ° 3: Techo con chimenea.

Esta propuesta consiste en un techo con inclinación y una chimenea en el centro de la parte superior del techo como se muestra en la figura 4.16, esto permite una mejor salida del aire húmedo dentro de la cámara de secado. Al igual que los techos anteriores no permite la entrada de insecto ni de lluvia dentro de la cámara, como también la desviación del agua de lluvia.

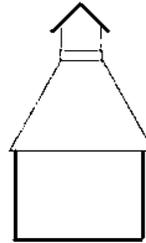


Figura 4. 16 “Techo con chimenea”

Propuesta N ° 4: Techo semicircular.

Esta propuesta consiste en un techo semicircular como se observa en la figura 4.17, nuevamente presentando ventajas en no dejar entrar la lluvia como en su desviación. El techo semicircular tendrá la salida del aire húmedo debajo de los extremos del techo.

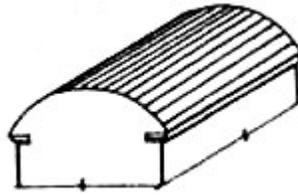


Figura 4. 17 “Techo semicircular”

Selección del dispositivo para la salida del aire en la cámara de secado:

Para la selección del dispositivo para la salida del aire en la cámara de secado, se tomaron en cuenta los criterios mostrados en la tabla 4.7.

Tabla 4. 7 “Criterios de selección de dispositivo para salida del aire”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Agentes contaminantes:	Este criterio se refiere a la contaminación que pueden producir agentes externos como insectos, bacterias, lluvia, entre otros que sean capaces de ingresar a la cámara de secado. Obteniendo mayor puntaje el dispositivo que evite de mejor forma el ingreso de estos a la deshidratador.
Fluidez del aire:	Se tomará en cuenta la facilidad con la que puede fluir el aire y salir de la cámara de secado. Recibiendo mayor puntaje el dispositivo que permita la salida más cómoda sin producir estancamientos.
Condensación:	Se evaluara la capacidad que puede tener el dispositivo para evitar condensación de agua en lugares que pueda interferir con el proceso de secado. Dándole mayor puntaje al que facilite la salida de agua condensada.

En cuanto al criterio Fluidez del aire se le otorgó el mayor porcentaje mostrado en la matriz de decisiones de la tabla 4.8, debido a la importancia que representa la facilidad con la que el aire puede salir la cámara mediante cada alternativa estudiada. Se concede un porcentaje intermedio al criterio Agentes contaminante y el menor porcentaje lo obtiene el criterio de Condensación debido a la pequeña posibilidad de que este fenómeno ocurra en todo momento de uso del equipo.

Tabla 4. 8 “matriz dispositivo para salida del aire”

Dispositivo para salida del aire	%	1	2	3	4
Agentes contaminantes	30	4	4	4	4
Fluidez del aire	60	3	2	4	2
Condensación	10	3	3	4	2
TOTAL	100	82,5	67,5	100	65

La alternativa seleccionada según la matriz de decisiones de la tabla 4.8, es la opción #3 techo con chimenea con 100 puntos.

4.4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA

4.4.1 MATERIALES A UTILIZAR

Las bandejas de la cámara de secado y el rastrillo son elementos en el deshidratador donde se debe poner especial cuidado ya que en este compartimiento estará en contacto directo con los frutos a secar y ocasionalmente deberá lavarse el equipo. Por tanto lo más apropiado para esta situación es utilizar el material por excelencia para estos casos, el acero inoxidable austenítico AISI 304 es la opción adecuada, destacando características como; excelente resistencia a la corrosión prácticamente frente a cualquier agente corrosivo de concentración elevada, hasta en temperaturas de aproximadamente 300° C, se suelda fácilmente, tiene buena

resistencia la tracción, tenacidad y ductilidad. Principalmente este acero inoxidable se utiliza en la industria alimentaria, química, nuclear, en transportes aéreos hasta en instrumentación quirúrgica.

El material más conveniente para la carcasa de la cámara de secado, el techo y difusor es el acero galvanizado debido a que este recubrimiento le otorga al acero una excelente protección, también le entrega buenas propiedades entre las que se encuentra su gran resistencia a la abrasión. El acero galvanizado está constituido por varias capas de aleaciones zinc-hierro, más duras incluso que el acero, y por una capa externa de zinc que es más blanda, forman un equipo muy resistente a los golpes, a la abrasión y a la corrosión.

El aislante a usar en la cámara de secado será espuma de poliuretano comprimida ya que este material presenta una buena resistencia a deteriorarse en la intemperie, además posee un coeficiente de conductividad térmica bastante bajo lo cual trae como consecuencia que las pérdidas de calor por conducción y convección sean bajas. Cabe destacar que para proteger este aislante y comodidad en el diseño se le colocara en su parte externa otra lámina de acero galvanizado, de esta manera se asegura que el material quede bien protegido.

4.4.2 DESCRIPCION Y CALCULOS DE DIMENSIONAMIENTO PARA LA CAMARA DE SECADO

El techo a cuatro aguas seleccionado para la cámara de secado que se muestra en la figura 4.18, funciona como una tobera debido a que hay un cambio de sección entre la cámara de secado y la salida del aire. De acuerdo con Muñoz y Sifontes (2012) la mejor configuración para la tobera es un ángulo de $22,5^\circ$ con respecto a la horizontal. Como se demuestra en la matriz de decisiones se seleccionó un techo con una chimenea céntrica, la cual facilitara la salida del aire húmedo al mismo tiempo que evita el ingreso de agentes contaminantes al compartimiento de secado donde se colocaran los granos a deshidratar. De igual manera la inclinación del techo evitara condensación de agua en lugares que interfieran con el proceso de secado.

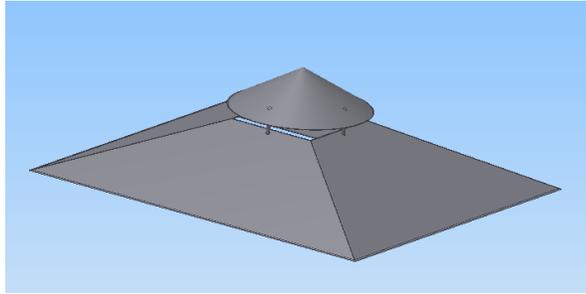


Figura 4. 18 “Techo de cámara de secado”

Para acceder a las bandejas de la cámara de secado se dispondrá de una puerta con un par de bisagras a los extremos laterales. La misma contará con una goma a su alrededor (empacadura de nevera) que internamente dispone de un imán, por lo cual el marco de la puerta donde cerrara la cámara de secado se le debe colocar una tira imantada que mantendrá la puerta unida a la estructura base evitando fugas de aire. También debe disponer de un dispositivo de seguridad para impedir que la puerta pueda abrirse en caso que el flujo de aire en el interior venza la fuerza de unión en los imanes.

Cada bandeja dentro de la cámara contará con un dispositivo para mover homogéneamente el cacao así garantizar un mejor secado, el dispositivo se compone por cepillos desarmables como el mostrado en la figura 4.19, compuesto de un pasador que une el mango con el cepillo base, de tal forma que no dificulte la extracción de las bandejas. El cepillo está conformado por dientes de menor espesor que la dimensión promedio de una almendra de cacao y la separación entre dientes es cuatro veces mayor que esta dimensión, de esta forma se evitará la acumulación del cacao al mover el dispositivo y permitirá el movimiento homogéneo.

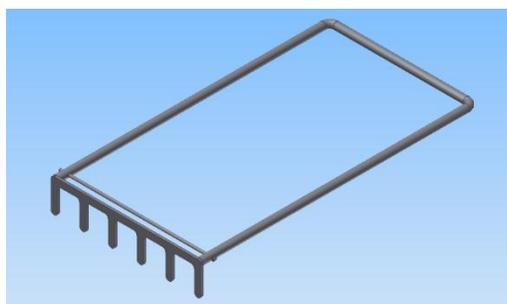


Figura 4. 19 “Cepillo desarmable”

Para dimensionar la cámara de secado es necesario determinar las dimensiones de las bandejas, la cual se establecerá según el volumen y peso de los granos de cacao colocados en las mismas. Según Villamizar y Hernández (s.f) el peso específico aparente del cacao es 527 N/m^3 con un 60% de humedad. De acuerdo a la tabla 4.9 la mejor configuración para la cámara de secado es tener 5 bandejas de 0,5m de ancho y 0,7m de largo, cada una de las bandejas tendrá alrededor de 10 Kg de producto con un lecho de cacao de 5,4 cm de profundidad, por esta razón la altura de la bandeja será de 8cm para permitir el movimiento de los granos durante el secado. Las bandejas serán de acero inoxidable 304 de 2mm de espesor y perforadas, de tal forma que la superficie tenga por lo menos el 77% de perforaciones, para evitar que el aire se quede estancado debajo de las bandejas.

Tabla 4. 9 “Dimensionamiento de bandejas”

Espesor de Lecho			2 cm		3 cm		4 cm		5 cm		6 cm	
Dimensión de Bandeja			Peso [kg]	Cant. Ban								
1	X	1	10,5	4,7	15,8	3,2	21,1	2,4	26,4	1,9	31,6	1,6
1	X	0,5	5,3	9,5	7,9	6,3	10,5	4,7	13,2	3,8	15,8	3,2
1,5	X	0,5	7,9	6,3	11,9	4,2	15,8	3,2	19,8	2,5	23,7	2,1
0,7	X	0,5	3,7	13,6	5,5	9,0	7,4	6,8	9,2	5,4	11,1	4,5
1,5	X	1	15,8	3,2	23,7	2,1	31,6	1,6	39,5	1,3	47,4	1,1
0,6	X	1	6,3	7,9	9,5	5,3	12,6	4,0	15,8	3,2	19,0	2,6

Esfuerzos en las bandejas de la cámara de secado:

Una vez dimensionada la bandeja, se calculan las solicitaciones de los esfuerzos en los apoyos mediante el método para determinar esfuerzos en vigas, expuesto según Shigley y Mischke (2002). Calculando el factor de seguridad y de ser mayor a uno es posible suponer que el equipo no fallará. De esta manera se podrá garantizar la resistencia de la bandeja a soportar el peso del cacao.

Para los cálculos se supone cada bandeja como una viga simplemente apoyada con carga distribuida uniformemente y espesor $e = 0,003\text{m}$.

Peso por bandeja

$$\begin{aligned}q_1 &= 0,23V_a\rho_{acero} & (4.1) \\q_1 &= 0,23(b \times l \times e)\rho \\q_1 &= 0,23(0,5 \times 0,7 \times 0,003)7800 \\q_1 &= 18,47 \text{ N}\end{aligned}$$

Peso de cacao por bandeja

$$q_2 = 98,1 \text{ N}$$

Carga total distribuida mostrada en el diagrama de fuerzas de la figura 4.20.

$$\begin{aligned}q_T &= q_1 + q_2 & (4.2) \\q_T &= 116,57 \text{ N}\end{aligned}$$

Carga unitaria

$$\begin{aligned}q_u &= \frac{q_t}{l} & (4.3) \\q_u &= 166,5 \text{ N/m}\end{aligned}$$

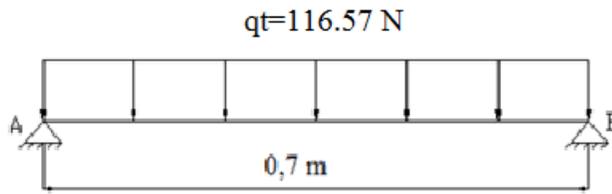


Figura 4. 20 “Carga distribuida en la bandeja”

Reacciones en los apoyos mostrada en la figura 4.21.

$$R = R_A = R_B = \frac{qt}{2} = 58,28 \text{ N} \quad (4.4)$$



Figura 4. 21 “Reacciones en apoyos de bandeja”

El cálculo del momento flector máximo que se muestra en la figura 4.22, se realizó de la siguiente manera:

$$M = \frac{qux}{2}(l - x) \quad (4.5)$$

Donde el M_{max} ocurre en la mitad de la bandeja:

$$M_{max} = \frac{qu l^2}{8} \quad (4.6)$$

$$M_{max} = 10,24 \text{ Nm}$$

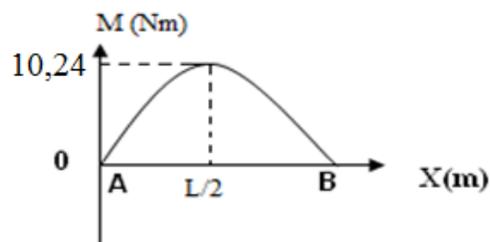


Figura 4. 22 “diagrama momento flector – bandeja”

Esfuerzo flector máximo:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I_x/C} \quad (4.7)$$

Dónde:

$$I_x = \frac{be^3}{12} \text{ y } C = e/2$$

Sustituyendo:

$$I_x/C = \frac{be^2}{6} \quad (4.8)$$

De esta manera:

$$\sigma_{max} = 9,71 \text{ Mpa}$$

Factor de seguridad:

$$FS = \frac{S_{y \text{ acero}}}{2\sigma_{max}} \quad (4.9)$$

$$FS = 15,95$$

Elongación máxima en la bandeja:

$$y_{max} = -\frac{5q_u l^4}{384EI_x} \quad (4.10) \quad \text{Dónde: } I_x = \frac{le^3}{12}$$

$$y_{max} = 0,00165 \text{ m}$$

$$y_{max} = 1,65 \text{ mm}$$

Esfuerzos en los apoyos de las bandejas de la cámara de secado:

Para el diseño del apoyo de la bandeja se seleccionaron ángulos estructurales de acero de sección transversal mostrada en la siguiente figura y con un área de $0,02m^2$.

En el diagrama de fuerzas de la figura 4.23 se evidencia que la parte inferior del ángulo será el que resistirá la fuerza ejercida por el peso de la bandejas y el cacao, por esta razón se estudiará esta sección para verificar que no se deforme calculando el factor de seguridad del apoyo de la bandeja.

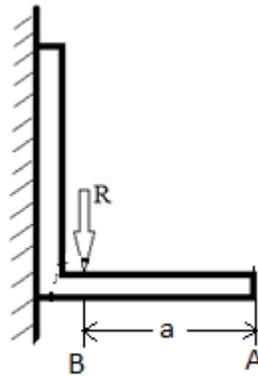


Figura 4. 23 “Diagrama de fuerzas en el apoyo”.

Para el cálculo del factor de seguridad será necesario hallar el esfuerzo que soporta el elemento, determinándose mediante la teoría de tensión de Von Mises en una viga.

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma^2 + 3\tau^2)} \quad (4.11)$$

En donde σ y τ son:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{I_x/c} \quad (4.12)$$

$$\tau = \frac{R}{A} \quad (4.13)$$

El momento flector máximo en el apoyo en el punto B mostrado en la figura 4.21 será:

$$M_{max} = aR \quad (4.14)$$

Sustituyendo:

$$M_{max} = 2,34 \text{ Nm}$$

El esfuerzo máximo del apoyo

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}C}{I_x} \quad (4.15) \quad \text{Donde: } I_x = \frac{bh^3}{3} \quad \text{y} \quad C = h/2$$

$$\sigma_{max} = 2,44 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante en el apoyo

$$\tau = \frac{R}{A} = 2,93 \text{ KPa}$$

El esfuerzo total será:

$$\sigma_v = 2,44 \text{ MPa}$$

Finalmente

$$FS = \frac{S_y}{2\sigma_v} = 63,5$$

Esfuerzos en los soportes de la Cámara de Secado:

Se trataran los apoyos de la cámara de secado como columnas largas de sección rectangular con carga puntual en un extremo, trabajándose el caso de columna con ambos extremos empotrados propuesto por Shigley y Mischke (2002), mediante la ecuación de Euler. La constante C de condición de extremos será 1 ya que se usará el valor conservador. Además se supondrá que todo el peso de la cámara de secado estará apoyado sobre uno de los cuatro soportes para evaluar el caso más crítico. El diagrama de cuerpo libre para uno de los apoyos se describe en la figura 4.24.

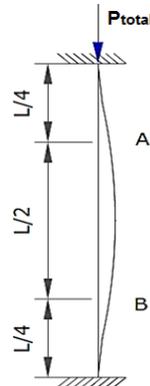


Figura 4. 24 “Columna con ambos extremos empotrados”

Carga critica

$$P_{cr} = C \frac{\pi^2 EI_x}{L^2} = 6338,31 \text{ N} \quad (4.16)$$

Peso total de la cámara de secado

Peso del cacao= 490,5 N

Peso de las bandejas= 92,39 N

Peso de la carcasa= 324,5 N

Peso del aislante (lana de vidrio)= 4,53 N se supone la máxima densidad del aislante

$$P_{total} = 911,92 \text{ N}$$

Factor de seguridad para los apoyos de la cámara de secado

$$FS = \frac{P_{cr}}{P_{total}} = 6,95 \quad (4.17)$$

Entrada del aire a la cámara de secado

Es necesario saber la velocidad máxima que puede tener el aire para que atraviese los lechos de cacao, sin levantar los granos en las bandejas. Para esto se utilizara la ecuación 2.14 expuesta en el marco teórico. Barbosa y Vega (2000) muestran que la densidad del cacao es de 480 Kg/m^3 y como densidad del aire se utiliza $1,19 \text{ Kg/m}^3$ a 25°C según Van Wylen (2007).

$$V_{mf} = \left(\frac{d_{esf}(|\rho_s - \rho_g|g)}{24,5\rho_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

El volumen aparente de un grano de cacao es $3,70\text{cm}^3$ según estudios realizados Villamizar y Hernández (s.f)

$$d_{esf} = \sqrt[3]{\frac{6v}{\pi}} \quad (4.18)$$

$$d_{esf} = 0,0191 \text{ m}$$

De este modo:

$$V_{mf} = 1,75 \text{ m/s}$$

Como el aire atravesará en primer momento el colector solar, se determina el área transversal máxima posible del colector, la cual será de 1 m de ancho y 10 cm de separación entre placas y se procede a calcular el flujo másico máximo en el equipo.

$$\dot{m}_a = \rho_a AV_{mf} = 0,208 \text{ Kg/s} \quad (4.19)$$

Como el colector debe tener la capacidad de cambiar su ángulo con respecto al suelo y su diámetro hidráulico, se utilizará un ducto flexible que conecte el colector con la cámara de secado, éste tendrá la facilidad de adaptarse a cualquier modificación que el usuario amerite colocar el colector. Por lo cual se debe considerar el tamaño de la entrada del aire en la cámara de secado, ya que en el mercado a nivel nacional los ductos flexibles tienen un diámetro máximo de 0,3048m (12 pulgadas), esto trae como consecuencia un cambio de sección entre el ducto y el área transversal de la cámara de secado que contendrá las bandejas con cacao, por lo tanto se producirán pérdidas en la presión.

Una forma de hacer menores las pérdidas asociadas a un cambio de sección, es hacer la variación de forma gradual mediante un cono u otra geometría tal como se muestra en la figura 4.25. El inconveniente práctico que tiene el uso de un difusor es el espacio que éste ocupa, es decir mientras más gradual sea la expansión, mayor longitud tendrá el difusor.

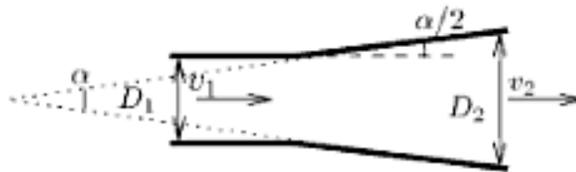


Figura 4. 25 "Ensanchamiento gradual. Difusor de apertura lineal"

Otro inconveniente de los difusores son las pérdidas que se producen por rozamiento como en cualquier tubería, y los torbellinos que se forman por la diferencias de presión. A menos ángulo de incidencia, menor pérdida de carga

localizada. Por lo tanto se trata de hallar el valor de α mostrado en la figura 4.25, para que la pérdida de carga total producida sea mínima.

Según la ecuación de Gibson donde demuestra que el ángulo óptimo de conicidad es se encuentra alrededor de 6 grados como se muestra en la tabla 4.10 y proporciona la ecuación 4.20 para calcular las pérdidas de cargas totales en el difusor:

$$h_f = \lambda \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) \frac{v_1^2}{2g} \quad (4.20)$$

Los valores de λ según Gibson son los siguientes:

Tabla 4. 10 “Coeficientes de perdida λ vs α ”

α	6	10	15	20	30	40	50	60
λ	0,14	0,20	0,30	0,40	0,70	0,90	1,00	1,10

En este caso la cámara de secado tiene de limitante la altura máxima, la cual no puede exceder de 1,90 m para esto los soportes de la cámara tendrán una longitud de 0,78 m. Se requiere colocar un ducto flexible por debajo de la cámara de secado para que el flujo del aire sea perpendicular a las bandejas. Se establece como largo máximo para el difusor 0,39 m, de esta manera se determina que el ángulo más crítico en el difusor debe ser de 30°, con una velocidad máxima de 1,75m/s y una velocidad mínima 0,17 m/s se obtiene un rango de pérdidas de presión. A continuación se determinaran las pérdidas de presión en esta sección, usando la ecuación de Gibson 4.20.

$$h_{fmax} = 0,07 Pa$$

$$h_{fmin} = 0,007 Pa$$

Dado que la perdida de presion en el difusor es pequeña en relacion a la perdidas en la camara de secado, se utilizará el angulo establecido de 30° para la entrada del aire de la camara de secado.

Pérdidas de calor en la cámara de secado

El poliuretano es el material aislante seleccionado según la matriz de decisiones aplicada, este aislante es comercializado a nivel nacional en láminas de 25,4mm (1 pulgada) de espesor, por lo tanto se utilizará dicha dimensión para realizar los cálculos de pérdidas de calor, en caso de no ser despreciables se evaluará utilizar mayores espesores.

Se calcula la tasa de pérdida de calor hacia el medio ambiente por la pared de la cámara de secado con mayor área superficial, para esto se supone; placa plana de longitud infinita, todas las paredes internas estarán a 60°C y la temperatura ambiente a 28°C. Se utiliza un coeficiente convectivo promedio entre el ambiente y la cámara de secado. El coeficiente convectivo entre la superficie externa de la cámara de secado y el aire ambiente, externo al colector solar “ h_2 ” mostrado en la figura 4.26, depende de la velocidad del viento en el exterior (V_V [m/s]) según la correlación de McAdams:

$$h = h_2 = 5,7 + 3,8V_V \quad (4.21)$$

Usando una velocidad de viento de 3m/s:

$$h_2 = 17,1 \frac{W}{m^2K}$$

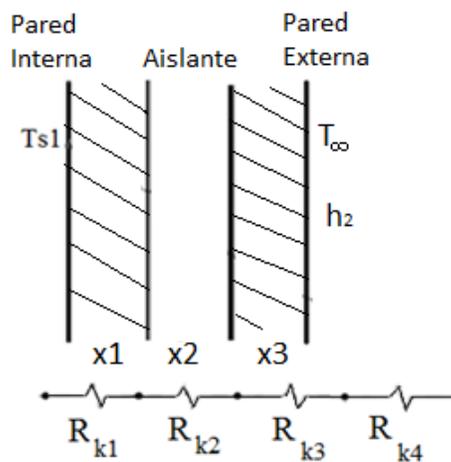


Figura 4. 26 “Análisis de resistencia a lo largo de la cámara de secado.”

$$Q_{per} = \frac{(T_{s1} - T_{\infty})}{R_{k1} + R_{k2} + R_{k3} + R_{k4}} \quad (4.22)$$

$$Q_{per} = \frac{(T_{s1} - T_{\infty})}{\frac{\Delta x_1}{K_{acero} A} + \frac{\Delta x_2}{K_{ais} A} + \frac{\Delta x_3}{K_{acero} A} + \frac{1}{h_2 A}}$$

Sustituyendo los valores de mayor área superficial en la cámara de secado la cual es de $0,648 \text{ m}^2$, se tiene:

$$Q_{per1} = 58 \text{ W}$$

Se calcula la pérdida de calor por la cara de menor área superficial igual a $0,468 \text{ m}^2$, utilizando nuevamente la ecuación 4.22:

$$Q_{per2} = 80 \text{ W}$$

Es esta manera el calor total perdido viene dado por la ecuación 4.23:

$$Q_{Tper} = 2(Q_{per1} + Q_{per2}) \quad (4.23)$$

$$Q_{Tper} = 276 \text{ W}$$

Con esta pérdida de calor se calcula el máximo cambio de temperatura que tendrá el aire con el mínimo flujo másico (10% del flujo másico máximo).

$$\dot{Q}_{Tper} = \dot{m}_a C_{pa} \Delta T \quad (4.24)$$

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_{Tper}}{\dot{m}_a C_{pa}} \quad (4.25)$$

$$\Delta T_{max} = 15,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Usando nuevamente la ecuación 4.25 se obtiene el mínimo cambio de temperatura del aire con el máximo flujo másico.

$$\Delta T_{min} = 1,57 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este cambio de temperatura calculado es una aproximación del cambio que se obtendrá en la realidad, sin embargo hay que recordar la suposición de 60°C como temperatura homogénea en la pared interna. Se tiene el conocimiento que en la realidad la pared pierde temperatura a medida que el aire asciende, esto trae como

consecuencia que las pérdidas de calor sean menores que las calculadas, por lo tanto las caídas de temperatura en la cámara de secado serán mucho menores que las obtenidas mediante cálculos.

De esta manera es posible apreciar que el aislante seleccionado para la cámara de secado con espesor de 25,4mm (1 pulgada) es idóneo para utilizar en el secado de cacao debido a que la pérdida de calor al medio ambiente es despreciable.

Dilatación superficial en la cámara de secado

Si existe libertad de dilatación no se plantean grandes problemas secundarios, pero si esta dilatación está impedida en mayor o menor grado por el resto de los componentes de la estructura, aparecen esfuerzos complementarios que hay que tener en cuenta. Por lo tanto se estudiara el caso más crítico en las superficies laterales de la cámara de secado. De esta manera se asegura que no surjan estos esfuerzos adicionales debido a la dilatación. Donde el cambio del área de cada pared viene dado por la ecuación 4.26 y los respectivos tamaños se pueden apreciar en la figura 4.27:

$$\Delta A = 2\alpha_{dil} \Delta T A \quad (4.26)$$

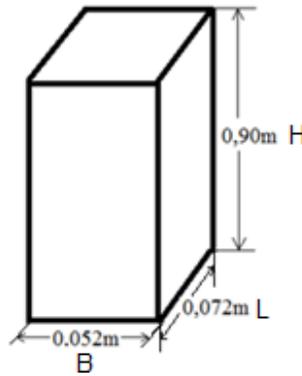


Figura 4. 27 “Vista isométrica de la cámara de secado”

$$\Delta A_{xz} = 2\alpha_{dil} \Delta T BH \quad (4.27)$$

$$\Delta A_{yz} = 2\alpha_{dil} \Delta T LH \quad (4.28)$$

Sustituyendo:

$$\Delta A_{xz} = 0,359 \text{ cm}^2$$

$$\Delta A_{yz} = 0,497 \text{ cm}^2$$

Ya que el cambio de área por pared en la estructura de la cámara de secado es despreciable, no se estudiarán los esfuerzos que pudiera ocasionar la dilatación ya que los mismos serían igualmente despreciables.

CAPITULO V

COLECTOR SOLAR

Un colector solar convierte la radiación solar en calor, la radiación atraviesa una capa de vidrio o algún otro material transparente para llegar a la placa de absorción del colector, ésta comúnmente se pinta de algún color oscuro para aumentar sus propiedades absorptivas, por tanto es en este lugar es donde la radiación es transformada en calor, el mismo que se transmite al fluido de trabajo por conducción y convección.

Para el diseño del colector se estudiaron distintos deshidratadores solares mostrados en el anexo 6, con la finalidad de como las dimensiones, materiales de construcción y productos a deshidratar.

5.1 REQUERIMIENTOS DEL DISEÑO PARA EL COLECTOR SOLAR

1. Variar el diámetro hidráulico.
2. El equipo debe tener la capacidad de aumentar la temperatura del aire dentro de él hasta un máximo de 90°C.
3. Variar el ángulo con respecto al suelo.
4. Rotar con respecto al eje longitudinal de simetría.
5. Variar la longitud total del colector solar.
6. Debe seleccionarse materiales resistentes al calor y a la corrosión para la construcción del colector.
7. El diseño debe ser de fácil construcción.
8. Las pérdidas de calor del colector solar al medio ambiente deben ser mínimas.

5.2 LIMITACIONES PARA EL COLECTOR SOLAR

- Proceso de fabricación disponibles en a nivel regional para construcción del colector solar.
- Dimensiones máximas del colector solar para su fácil manejo en el espacio donde será ubicado.
- Dimensiones mínimas del colector solar que permitan alcanzar a las temperaturas requeridas.
- Debe usar materiales económicos para su construcción.
- Los materiales deben tener disponibilidad en el mercado nacional.
- Su estructura debe ser capaz de soportar las sollicitaciones de esfuerzos a las cuales estarán sometidos durante su uso.

5.3 SELECCION DE MATERIALES Y DISEÑO

Alternativas de material para la placa transparente del colector solar:

Propuesta N ° 1: Vidrio templado

El vidrio es un material inorgánico duro, frágil, transparente y amorfo que se encuentra en la naturaleza aunque también puede ser producido por el hombre. El vidrio artificial se usa para hacer ventanas, lentes, botellas como las mostradas en la figura 5.1, además de una gran variedad de productos.

Si bien su densidad a temperatura ambiente es relativamente alta ($2,2 \text{ g/cm}^3$) su coeficiente de dilatación lineal medio a temperaturas inferiores a los 1.000°C es extremadamente pequeño: se sitúa en $5,1 \times 10^{-1} \text{ K}^{-1}$.

El vidrio templado es un tipo de vidrio utilizado principalmente en la industria del motor y la construcción. Hay dos maneras de templar el vidrio: templado químico y templado térmico.

El vidrio cuando es templado, también adquiere otras propiedades importantes como: la resistencia a la flexión del vidrio recocido al templarlo aumenta desde

400MPa hasta 2.000Mpa, lo que equivale de 4 a 5 veces la resistencia de un vidrio normal. La resistencia al choque térmico (diferencia de temperatura entre una cara y otra de un paño que produce la rotura de éste) pasa de 60 °C a 240 °C, por lo que es recomendado en puertas de hornos de cocina y lámparas a la intemperie.



Figura 5. 1 “Botellas de vidrio”

Propuesta N ° 2: Acrílico

El acrílico mostrado en la figura 5.2, es una de las tantas variantes del plástico. La ventaja del acrílico es que puede permanecer largo tiempo en la intemperie, sin sufrir daño alguno. Por lo mismo, el acrílico es un material utilizado en construcciones debido principalmente al hecho de que es más flexible de lo normal. El acrílico también es utilizado para la fabricación de parabrisas en ciertos medios de transporte, como por ejemplo motos y lanchas.

Dentro de sus características técnicas el acrílico soporta largas horas a la exposición de los rayos ultravioletas, sin dañar su estructura ni sus colores. La temperatura máxima recomendada para servicio continuo es de 82°C a 93°C. Ligero en comparación con el vidrio, con una densidad de unos 1190 Kg/m³ es sólo un poco más pesado que el agua. Ofrece buenas propiedades de resistencia a la tensión, al impacto y a la flexión. Una de las ventajas del acrílico es que es más resistente que el vidrio, por lo tanto es más difícil que se rompa y en caso de hacerlo no se astilla, esta característica es importante ya que otorga seguridad al usuario. Por otra puede ser reciclado en un 100%.



Figura 5. 2 “Acrílico”

Propuesta N ° 3: Película de poliéster

Los poliésteres que existen en la naturaleza son conocidos desde 1830, pero el término poliéster generalmente se refiere a los poliésteres sintéticos (plásticos), provenientes de fracciones pesadas del petróleo.

El poliéster es una resina termoestable obtenida por polimerización del estireno y otros productos químicos. Se endurece a la temperatura ordinaria y es muy resistente a la humedad y a los productos químicos.

La película de poliéster es transparente y los productos ofrecen excelente resistencia a la abrasión, químicos, y envejecimiento. Se usan para una gran variedad de aplicaciones que incluyen: letreros iluminados por detrás, estandartes, etiquetas, folletos, catálogos, transparencias y tarjetas. También puede comercializarse en rollos como los mostrados en la figura 5.3.



Figura 5. 3 “Película de poliéster”

Selección del material para la placa transparente del colector solar:

Para la selección del material que se utilizará para construir la placa transparente del colector solar se tomaron en cuenta los criterios mostrados en la tabla 5.1.

Tabla 5. 1 “Criterios de selección para material de la placa transparente”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Transmisividad:	Se evaluará la proporción de radiación solar que es capaz de atravesar dicho material. Obteniendo mayor puntuación el material con mayor transmisividad.
Instalación:	Se valorará la facilidad de instalar y manejar el material en el equipo. Obtendrá mayor puntaje mientras más sencillo sea de instalar.
Durabilidad:	Este factor toma en cuenta la capacidad que tiene el material de no perder sus propiedades transmisivas. La ponderación será mayor mientras mayor durabilidad tenga el material.
Precio:	Este criterio hace referencia al costo del producto al público. El aislante que tenga menor precio obtendrá mayor puntaje.

Para evaluar los criterios de selección en la matriz de decisiones de la tabla 5.2 se le otorgo mayor porcentaje al criterio Instalación, ya que este material será usado en varias ocasiones para modificar las dimensiones del colector, es de suma importancia que sea fácil de manejar para comodidad del usuario. Al criterio Transmisividad se le concede un porcentaje un poco inferior, seguido por el Precio y por último aunque no de menor importancia el criterio Durabilidad.

Tabla 5. 2 “Matriz material de placa transparente”

Material placa transparente	%	1	2	3
Transmisividad	30	4	4	4
Instalación	35	1	4	2
Durabilidad	15	4	3	1
Precio	20	2	3	4
TOTAL	100	63,8	91,3	71,3

Como se muestra en la matriz de decisiones de la tabla 5.2 se elige la alternativa #2 Acrílico como material para la placa transparente con una puntuación de 91,3 en base a 100 puntos.

Alternativas para modificar la longitud del colector solar:

Propuesta N ° 1: Módulos conectados:

Esta propuesta ofrece una serie de módulos de dimensiones iguales los cuales se deberán ir acoplando como bloques de acuerdo a la longitud final deseada, por lo tanto se trata de un dispositivo desarmable de fácil uso y construcción, sin embargo los rangos de trabajo se ven limitados a la suma de las distancia de la cantidad de módulos que se utilicen en la configuración del dispositivo.

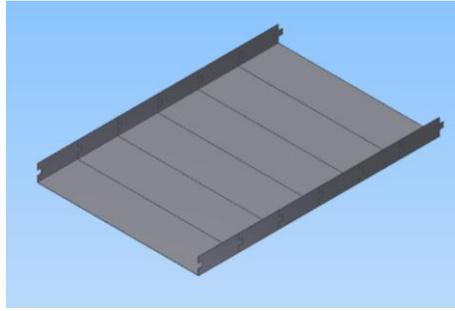


Figura 5. 4 . “Módulos conectados”.

Propuesta N ° 2: Módulos con correderas:

Los módulos con correderas es un dispositivo no desarmable ya que el cambio de longitud se realiza al deslizar una lámina sobre la otra mediante una corredera. Se logra incrementar la longitud final del colector a medida que se despliegue mayor cantidad de módulos. El número de configuraciones posibles para este modelo solo se encuentra limitado por un valor máximo y un valor mínimo de longitud.

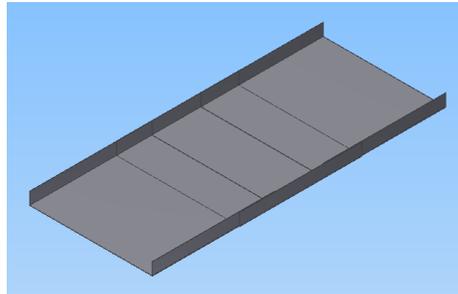


Figura 5. 5 “Módulos con correderas”.

Selección del dispositivo para modificar la longitud del colector solar:

Para la selección del dispositivo que modificara la longitud del colector solar se utilizaron los criterios de selección mostrados en la tabla 5.3.

Tabla 5. 3“Criterios de selección para configuración longitudinal de colector”

CRITERIO	DEFINICIÓN
----------	------------

Fabricación:	Se evaluará la facilidad para la construcción o ensamblaje. Siendo mayor el puntaje otorgado al dispositivo de mayor sencillez de fabricación.
Ergonomía:	Se quiere evaluar que tan amigable es la relación hombre-máquina. Dándole mayor puntaje al que tenga mayor comodidad para la operación del usuario.
Rango de trabajo:	Este factor toma en cuenta la mayor cantidad de configuraciones posibles en el dispositivo. La ponderación será mayor mientras mayor rango de trabajo tenga.

En la matriz de decisiones mostrada en la tabla 5.4 para la selección del dispositivo que modifica la longitud del colector solar se concedió mayor porcentaje en el puntaje a los criterios Ergonomía, favoreciendo la comodidad del usuario y Rango de trabajo optando por el dispositivo que logre trabajar mayor número de configuraciones dentro del rango requerido, por ultimo con la mitad de porcentaje otorgado a los criterios anteriores se tiene la Fabricación, aunque sea factor relevante para el diseño se elige sacrificar facilidad de fabricación para obtener un equipo con mayores rangos de trabajo y más amigable de operar.

Tabla 5. 4 “Matriz configuración longitudinal”

Configuración Longitudinal	%	1	2
Fabricación	20	4	2
Ergonomía	40	2	4
Rango de trabajo	40	2	4
TOTAL	100	60	90

De esta forma es posible observar en la matriz de decisiones de la tabla 5.4 la selección de la alternativa # 2 Módulos con corredera con 90 puntos en base de 100.

Alternativas de arreglos para modificar la separación entre la placa de absorción y la transparente en el colector solar:

Propuesta N ° 1: Apoyos Fijos:

Este dispositivo cuenta con soportes en forma de corredera a distintos niveles de altura como muestra la figura 5.6 donde es posible deslizar la placa transparente que se apoyara sobre la parte superior del módulo a la altura de soporte que se desee. Una desventaja de los apoyos fijos es efectuar el cambio de separación entre placas debido a la necesidad de quitar completamente la placa transparente y colocarla en el otro nivel deseado.

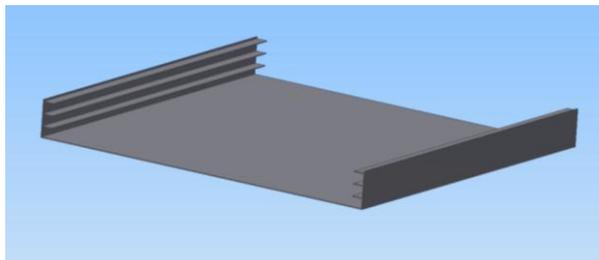


Figura 5. 6 “Apoyos fijos”.

Propuesta N ° 2: Apoyos Móviles:

La alternativa de apoyos móviles para la placa transparente del colector solar ofrece la opción de cambiar la separación entre esta placa y la placa de absorción a través de unos soportes individuales ajustados por un pasador a un nivel específico de altura mostrado en la figura 5.7, el cual puede ser cambiado solo con extraer el pasador liberando el apoyo y ajustarlo al otro nivel deseado, sin necesidad de quitar la lámina traslucida.

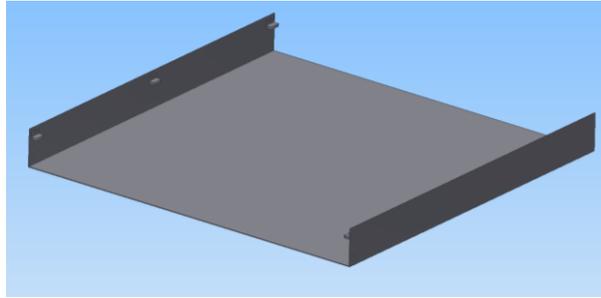


Figura 5. 7 “Apoyos móviles”.

Selección del dispositivo para modificar la separación entre las placas del colector solar:

En la tabla 5.5 se muestran los criterios de selección que se utilizaran para escoger el dispositivo que modificara la separación entre las placas del colector solar.

Tabla 5. 5 “Criterios de selección para arreglos de separación entre placas”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Fabricación:	Se evaluará la facilidad para la construcción o ensamblaje. Siendo mayor el puntaje otorgado al dispositivo de mayor sencillez de fabricación.
Ergonomía:	Se quiere evaluar que tan amigable es la relación hombre-máquina. Dándole mayor puntaje al que tenga mayor comodidad para la operación del usuario.
Fluidez del aire:	Este factor toma en cuenta la circulación del aire dentro del colector solar. Se le otorgará mayor ponderación al dispositivo que no dificulte la movilización del aire.

Debido a que los dos dispositivos propuestos son de construcción relativamente sencilla se le otorgó menor porcentaje en el puntaje de selección al criterio Fabricación, mientras que Fluidez del aire fue seleccionado como el criterio de mayor relevancia porque de existir interferencia de los elementos del dispositivo con el flujo de aire, las condiciones de las distintas configuraciones a simular no estarán bajo los mismo factores y podrán presentar variaciones en los resultados. Por otra parte la Ergonomía se mantiene como criterio con porcentaje razonable por lo amigable que pueda ser el dispositivo como el operario al momento de uso.

Tabla 5. 6 “Matriz arreglo de separación entre placas”

Arreglos de separación entre placas	%	1	2
Fabricación	10	4	3
Ergonomía	30	4	3
Fluidez del aire	60	2	3
TOTAL	100	70	75

La propuesta elegida mostrada en la matriz de decisiones de la tabla 5.6 fue el dispositivo # 2 apoyos móviles, con 75 puntos en base a 100.

Alternativas de arreglos para modificar el ángulo con respecto al plano horizontal y giro con respecto al eje longitudinal de simetría en el colector solar:

Propuesta N ° 1: Apoyos en el eje longitudinal:

Para poder modificar el ángulo con respecto al plano horizontal la opción de apoyos en el eje longitudinal ofrece la opción de cambiar la longitud en uno de sus soportes y de esta forma contar con un rango de ángulos entre el plano horizontal y el elemento principal. Mientras que para girar el colector con respecto del eje

longitudinal de simetría del mismo, será necesario rotar el elemento teniendo como pivote los soportes anclados al eje de simetría longitudinal del equipo.

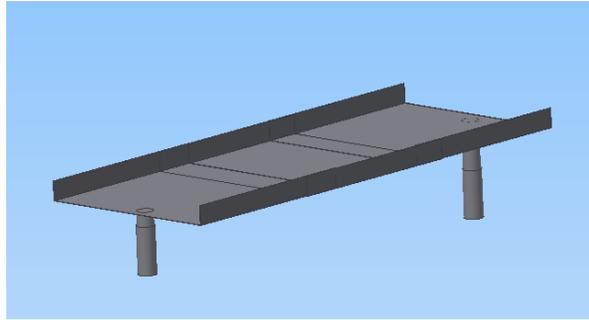


Figura 5. 8 “Apoyos en el eje longitudinal”.

Propuesta N ° 2: Apoyos en los vértices:

En este dispositivo similar a la propuesta anterior, para poder modificar el ángulo con respecto al plano horizontal se requiere cambiar la longitud en los dos soportes ubicados en la salida del colector solar y de esta forma contar con un rango de ángulos entre el plano horizontal y el elemento principal. De la misma forma para poder rotar el colector con respecto a su eje longitudinal, será necesario cambiar la longitud en los soportes de uno de los laterales y de esta forma hacer girar el colector a la inclinación deseada.

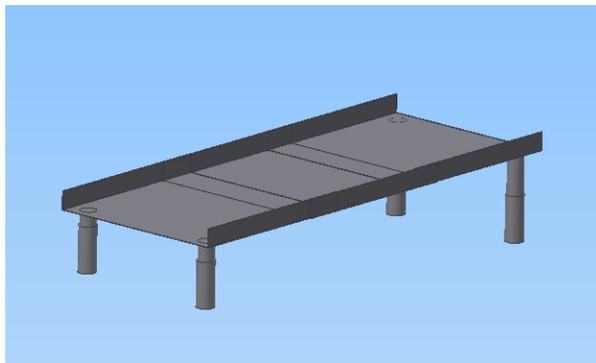


Figura 5. 9 “Apoyos en los vértices”.

Selección de dispositivo para modificar los dos ángulos de incidencia solar en colector:

Para la selección del dispositivo que modificara los ángulos de incidencia solar con el colector, se establecen los criterios de selección mostrados en la tabla 5.7.

Tabla 5. 7 “Criterios de selección para configuración de ángulos en colector”

CRITERIO	DEFINICIÓN
Fabricación:	Se evaluará la facilidad para la construcción o ensamblaje. Siendo mayor el puntaje otorgado al dispositivo de mayor sencillez de fabricación.
Ergonomía:	Se quiere evaluar que tan amigable es la relación hombre-máquina. Dándole mayor puntaje al que tenga mayor comodidad para la operación del usuario.
Estabilidad:	Este factor evaluara la capacidad de que el colector solar mantenga fija la posición otorgada por el usuario. Obtendrá mayor ponderación al dispositivo que otorgue mayor estabilidad.

El criterio de selección que se consideró de mayor importancia en este dispositivo fue Estabilidad, es necesario que las inclinaciones establecidas por el usuario en el colector solar se mantengan firmes sin posibilidad que varíen y produzcan errores al momento de simular distintas configuraciones. De igual forma la Ergonomía juega papel importante en la selección, como en los casos anteriores la comodidad del usuario es importante. Mientras que la fabricación termina con menor porcentaje sacrificando nuevamente esta por un diseño más estable y ergonómico.

Tabla 5. 8 “Matriz configuración de ángulos”

Configuración de ángulos	%	1	2
Fabricación	15	3	4
Ergonomía	30	3	2
Estabilidad	55	2	4
TOTAL	100	61,3	85

La propuesta escogida según la matriz de decisiones de la tabla 5.8 fue la alternativa #2 apoyos en los vértices, obteniendo 85 puntos en base a 100.

5.4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA SELECCIONADA

5.4.1 MATERIALES A UTILIZAR

Se seleccionó el mismo material para la placa de absorción y estructura del colector que el utilizado en la estructura de la cámara de secado ya que las alternativas y los criterios de selección son adecuados para este equipo. Por lo tanto se utilizará acero galvanizado el cual posee las mejores características para esta aplicación. Sin embargo se sugiere que la placa en el colector que hará la función de placa de absorción se pinte de negro mate para aumentar su capacidad de absorber calor y por ende aumentar la temperatura del aire en el colector solar.

De igual forma que en la cámara de secado se elige el poliuretano como material aislante para el colector solar bajo los mismos criterios de selección. Este aislante se colocará debajo de la placa de absorción minimizando las pérdidas de calor por conducción y convección al medio ambiente. Se colocará una lámina de acero galvanizado por la parte externa del colector cubriendo el aislante, asegurando mayor durabilidad del material.

Para la placa transparente fue seleccionado el acrílico gracias a sus ventajas sobre otros materiales, principalmente mejor difusión de luz y mayor durabilidad ya que conserva su color original por mayor tiempo en comparación contra otros materiales.

Para los apoyos del colector solar se eligen 4 gatos mecánicos tipo tijera con tiene una capacidad máxima de 1500 kilogramos por gato, optando por este modelo gracias a su precisión al momento de modificar la altura y su facilidad de uso. Cada gato estará ubicado en vértices del colector solar, permitiendo que el colector pueda girar según desee el usuario.

5.4.2 DESCRIPCION Y CALCULOS DE DIMENSIONAMIENTO PARA EL COLECTOR SOLAR

Para modificar las condiciones del aire en el colector solar es necesario relacionar el diámetro hidráulico y el número de Reynolds. Con las ecuaciones 5.1 y 5.5 es posible obtener esta relación, donde “b” es el ancho del prototipo, “d” y “l” es la altura y longitud del colector respectivamente mostrados en la figura 5.10.

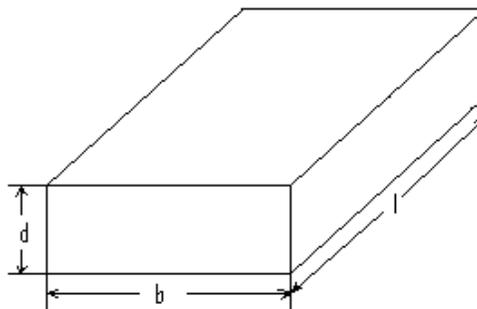


Figura 5. 10 “Vista isométrica general del colector solar”

$$D_h = \frac{4 \text{ area}}{\text{perimetro}} = \frac{4(b*d)}{2(b+d)} = \frac{2b}{\left(\frac{b}{d}+1\right)} \quad (5.1)$$

$$Re = \frac{\rho * u * D_h}{\mu} \quad (5.2)$$

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho * b * d} \quad (5.3)$$

Sustituyendo 5.3 en 5.2, se tiene:

$$Re = \frac{2\dot{m}}{(b+d)*\mu} \quad (5.4)$$

Sacando factor común “d” en el denominador se obtiene:

$$Re = \frac{2\dot{m}}{d * (\frac{b}{d} + 1) * \mu} \quad (5.5)$$

Por lo tanto para variar el diámetro hidráulico y el número de Reynolds se podrán establecer las relaciones mostradas en la tabla 5.9 junto con el rango de valores más apropiados para trabajar, los cuales son propuestos por Baritto y Bracamonte (2012). Así mismo esta tabla establecerá un estimado de las posibles dimensiones que pudiese tener el colector solar.

Tabla 5. 9 “Relaciones dimensionales del colector solar”

Relaciones Dimensionales			
Transversal	Longitudinal	Reynolds	Diámetro Hidráulico
b/d	l/Dh	Re	Dh (m)
10	8	2500	0,27
25	16	40000	0,11

Según el trabajo de Lopardo, Torres (2012) se podrán determinar cuáles son las dimensiones exactas que cumplan con las temperaturas máximas establecidas para este trabajo. En la tabla 5.10 se muestra las temperaturas máximas y mínimas que puede alcanzar el colector solar trabajando dentro del rango de diámetro hidráulico deseado. Mientras que en la tabla 5.11 se muestra cuáles son las temperaturas máximas y mínimas en las configuraciones del colector más desfavorables.

Tabla 5. 10 “Temperaturas en el colector solar en configuración deseada”

Dimensiones del Colector [m]			Temperatura en el día [°C]	
Longitud	Ancho	Alto	Temp MIN	Temp MAX
3	1	0,1	32,4	78,4
1,5	1	0,05	32,8	74

Tabla 5. 11 “Temperaturas en el colector solar en configuración extrema”

Dimensiones del Colector [m]			Temperatura en el día [°C]	
Longitud	Ancho	Alto	Temp MIN	Temp MAX
3	1	0,05	33,1	99
1,5	1	0,1	31,4	59,3

Para cumplir el rango de longitud, el diseño del colector solar constará de dos módulos uno dentro del otro y cada uno de 1,5 m de longitud sumando en total 3 m. El módulo externo tendrá cuatro soportes compuesto por dos gatos mecánicos tipo tijera y dos soportes retractiles en sus respectivos vértices, el modulo interno dispondrá solamente en un extremo de dos gatos tipo tijera en sus vértices correspondientes y el lado opuesto estará conectado al primer módulo mediante rieles los cuales permitirán el deslizamiento del módulo interno con respecto al externo. Por lo tanto se podrá variar la longitud del colector de 1,5m a 3m.

La separación entre la placa transparente y la placa de absorción se realizara por medio de unos apoyos móviles, los cuales constaran de tres configuraciones distintas empezando por 0,05m luego una en 0,075m y por ultimo 0,1m. Estas configuraciones y el cambio de longitud del colector permiten que el usuario tenga un amplio rango de relaciones dimensionales.

El ancho del colector solar se mantendrá fijo dado que para variar las relaciones dimensionales basta con cambiar una sola dimensión de la sección transversal.

Para calcular las temperaturas máximas y mínimas en el colector fue utilizado un flujo constante de 0,015 Kg/s, la cual se considera el flujo másico. La temperatura máxima sobrepasa la temperatura óptima para el secado del cacao ya que se desea ser conservador en este aspecto, debido a que esta investigación no contempla el análisis de la caída de presión y temperatura a lo largo del ducto flexible entre el colector y la cámara de secado.

Ángulos de incidencia solar

El ángulo del colector con respecto al suelo trabajará con un rango de 0° a 15° de inclinación utilizando la longitud mínima del colector y para la longitud máxima tendrá un rango de 0° a 7°, ya que Venezuela se encuentra ubicada muy cerca del ecuador y su latitud se encuentra en un rango desde 1° hasta 12° según el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Se puede calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar directa con la placa transparente mediante la expresión (Duffie y Beckman, 1996; Bértiz, 1977):

$$\cos \theta = \cos(L - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(L - \beta) \sin \delta \quad (5.6)$$

Dónde:

- θ : Ángulo de incidencia formado por la normal a la superficie y el rayo incidencia de ella.
- L : Latitud del punto de la superficie terrestre considerado, el cual es el ángulo que forma el radio terrestre que pasa por dicho punto con el ecuador.
- β : Ángulo de inclinación del colector solar con respecto al suelo
- ω : Ángulo de desplazamiento del sol de este a oeste en el meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje, siendo negativa en la mañana y positiva después del mediodía. Dicha rotación es de 15° por hora. (Duffie 1980).

$$\omega_1 = 15 * (\text{hora solar} - 12) \quad (5.7)$$

- δ : Declinación, se refiere a la posición del sol al medio día solar (cuando el sol se encuentra en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, siendo positiva una declinación norte $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. (Duffie 1980).

Se desea que la irradiación solar sea perpendicular a la placa transparente, por lo tanto $\theta = 90^\circ$ de esta manera:

$$\cos(L - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(L - \beta) \sin \delta = 0 \quad (5.8)$$

Ahora se busca cual es la mejor configuración que debe tener el colector para que la ecuación 5.8 sea cero.

$$\cos(L - \beta) \cos \delta \cos \omega = -\sin(L - \beta) \sin \delta \quad (5.9)$$

$$\frac{-\sin(L-\beta)}{\cos(L-\beta)} = \frac{\cos \delta \cos \omega}{\sin \delta} \quad (5.10)$$

En la ecuación 5.10 se evaluara cual debe ser la mejor configuración al mediodía solar, ya que se conoce que a esta hora es donde mayor irradiación emite el sol y por lo tanto es esencial que el colector aproveche al máximo esta energía.

$$\frac{-\sin(L-\beta)}{\cos(L-\beta)} = 0 \quad (5.11)$$

$$(L - \beta) = 0 \quad (5.12)$$

$$\beta = L \quad (5.13)$$

Esta solución sugiere que mientras más cercano sea el valor del ángulo β a la latitud de Venezuela al mediodía solar, más próximo será el ángulo de incidencia a 90° .

El giro con respecto al eje longitudinal de simetría del colector solar proporciona el ángulo de desplazamiento del sol, el cual tendrá un rango de -30° a 60° con respecto a la horizontal, calculados mediante la ecuación 5.7, siendo -30° para las 10am solar y 60° para las 4pm solar, permitiendo al usuario colocar el

colector en diferentes configuraciones para distintas horas del día dentro del rango propuesto. La norma ANSI/ASHRAE 93-2003 establece que la orientación de colector debe ser hacia el sur.

Dilatación lineal en el colector solar

Como es conocido todos los sólidos se dilatan según su coeficiente de dilatación, por lo tanto se estudiara la elongación lineal en lo ancho de la lámina transparente, debido a que dicha dimensión estará muy próxima a las paredes del colector y si este aumento se ve impedido por los componentes de la estructura aparecerán esfuerzos complementarios que se deben tener en cuenta. Estudiando la elongación se asegura que no surjan estos esfuerzos adicionales debido a la dilatación, por lo tanto se estudia el caso más crítico, un cambio de temperatura desde 28°C hasta 94°C. Donde la elongación en el ancho de la lámina viene dado por la ecuación 5.14 y los respectivos tamaños se pueden apreciar en la figura 5.11:

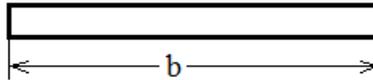


Figura 5. 11 “Vista frontal de la lámina de acrílico en el colector”.

$$\Delta l_{yz} = \alpha_{dil} * \Delta T * b \quad (5.14)$$

$$\Delta l_{yz} = 0,0042 \text{ m}$$

$$\Delta l_{yz} = 4,2 \text{ mm}$$

Por lo tanto el acrílico se dilatará 2,1mm por lado, para ello se dejará el mismo espacio entre el acrílico y la pared del colector para garantizar que no ocurran esfuerzos adicionales.

Pérdidas de calor en el colector solar

La configuración en el colector solar que presenta mayores pérdidas de calor corresponde a un escenario con flujo másico de 0,015 Kg/s, velocidad de viento de 3m/s, 3m de longitud en el colector, 1m de ancho y separación entre las placas de absorción y transparente de 5cm. Debido a que se tiene la mayor área de transferencia de calor esta representa la condición más desfavorable, la mayor temperatura dentro del equipo por el bajo flujo y la velocidad más alta del viento.

Se obtiene por simulación en el programa de Lopardo y Torres (2012) una temperatura en la placa aproximadamente de 95°C y 99°C para la temperatura de salida del aire. Introduciendo como dato en el programa las configuraciones máximas del colector solar, 25,4mm (1 pulgada) de espuma de poliuretano comprimido como aislante térmico y un valor de 1000 W/m² de irradiación promedio que existe en las regiones de estudio a las 12 del mediodía.

A pesar de que el programa consideró las pérdidas de calor en el colector solar, éstas se calculan con la temperatura de salida del aire obtenida del programa para corroborar que sean despreciables.

La mayor parte de la pérdida de calor ocurre en la placa transparente, ya que el resto estará aislado. El coeficiente convectivo depende de la velocidad del viento (exterior) según la correlación de Mc Adams:

$$h = 5,7 + 3,8V = 17,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5.15)$$

Por lo tanto usando $T_s = 99^\circ\text{C}$ y $T_o = 30^\circ\text{C}$:

$$Q_{perdido,max} = hA(T_s - T_o) \quad (5.16)$$

$$Q_{perdido,max} = 2593 \text{ W}$$

Considerando el colector solar en operación regular con 3m/s como velocidad del viento, se supone que la placa alcanzará equilibrio con el aire y estará a $T_s = 45^\circ\text{C}$

temperatura máxima permitida para el secado de cacao, por lo tanto la pérdida de calor producida en operación regular del equipo, sería:

$$Q_{perdido} = hA(T_s - T_o) = 17,2 \times 3 \times 1 \times (45 - 30) = 774 \text{ W}$$

Se considera aceptable utilizar 25,4mm de espuma de poliuretano como aislante, ya que el programa da como resultado 99°C como temperatura máxima de salida del aire, garantizando que el aire se calentara lo suficiente para cumplir con los requerimientos de temperatura.

Deflexión del colector solar

Para otorgar mayor rigidez al colector solar, se le colocará entre la placa de absorción y la lámina protectora del aislante 2 vigas de aluminio tipo “T” de 1pulg contrapuestas para formar vigas tipo “I”, otorgándole al colector la rigidez requerida con el menor peso posible. En las siguientes figuras muestra la vista frontal de los módulos del colector solar y la ubicación de las vigas tipo “I” en los mismos.

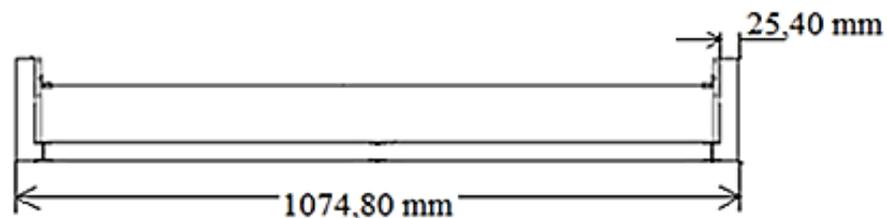


Figura 5. 12 “Vista frontal modulo interno”.

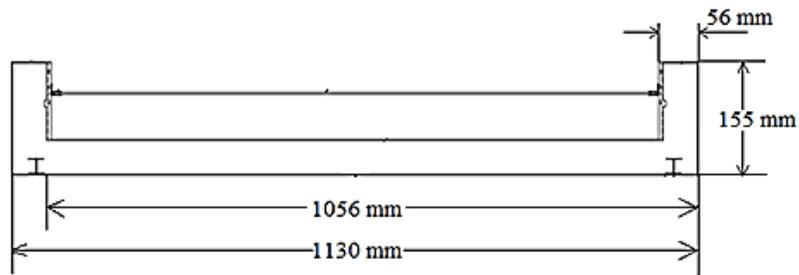


Figura 5. 13 “Vista frontal modulo externo”

Tal como se muestra en la figura 5.13 el módulo externo tendrá una separación entre las vigas y la lámina superior de la estructura, dejando de tal manera un espacio para introducir un módulo (módulo interno) dentro del otro y obtener en el colector la mínima longitud deseada.

Se realiza el estudio de deflexión al caso más crítico, cuando los módulos se encuentran retraídos uno dentro del otro, por lo tanto el peso total del colector recaerá sobre el módulo externo. Cada viga de aluminio tendrá un espesor de 2mm y una altura de 0,0254m.

Se calcula la deflexión para la vista lateral y para la vista frontal mostrada en la figura 5.14, donde los módulos se encuentran retraídos y el colector solar tiene una longitud de 1,5m. No se estudia el pandeo en los soportes del colector ya que fueron seleccionados gatos mecánicos tipo tijera con una capacidad de soporte máximo de 1500 Kg por gato.

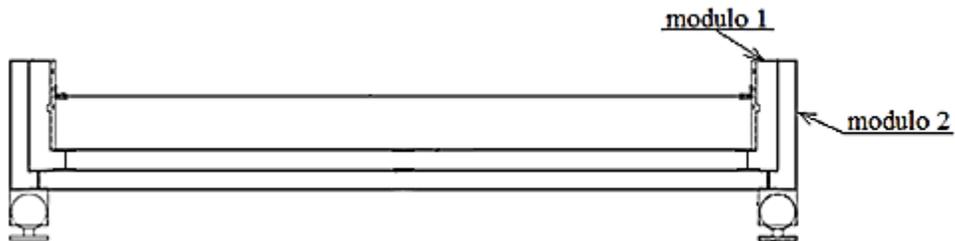


Figura 5. 14 “Vista frontal del colector con ambos módulos”.

Ya que la estructura de los módulos es acero galvanizado e internamente poseen vigas de aluminio y poliuretano como aislante, no es posible utilizar las

ecuaciones propuestas por Shigley (2002) para evaluar la deflexión, por ello se analizará el caso más desfavorable donde la espuma de poliuretano soportará todo el peso de la estructura.

En la figura 5.15 se muestra la vista frontal de la lámina de poliuretano la cual será evaluada como viga utilizando la siguiente ecuación para determinar la deflexión máxima:

$$y_{max} = -\frac{5q_u l^4}{384EI_x} \quad (5.17)$$

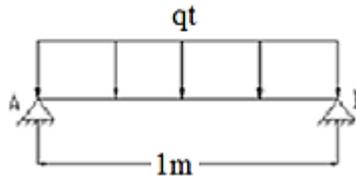


Figura 5. 15 “Vista frontal de la placa con carga distribuida”.

$E = 100 \text{ MPa}$

$$I_x = \frac{el^3}{12} \quad (5.18) \quad \text{Dónde: } e = 0,0254 \text{ m} ; \quad l = 1 \text{ m}$$

$$I_x = 0,00211 \text{ m}^4$$

Se busca q_u

$$\text{Volumen de cada lamina de acero} = 4 \times (1\text{m} \times 1,5\text{m} \times 0,002\text{m}) = 0,012\text{m}^3$$

$$\text{Volumen de la lámina de acrílico} = 2 \times (1\text{m} \times 1,5\text{m} \times 0,005\text{m}) = 0,015\text{m}^3$$

$$\text{Volumen del poliuretano} = 2 \times (1\text{m} \times 1,5\text{m} \times 0,0254\text{m}) = 0,076\text{m}^3$$

$$\text{Volumen de las vigas de aluminio} = 2 \times (0,0254\text{m} \times 3\text{m} \times 0,002\text{m}) = 0,00030\text{m}^3$$

$$\text{Peso total de las láminas de acero} = 924,10 \text{ N}$$

$$\text{Peso de la lámina de acrílico} = 175,10 \text{ N}$$

$$\text{Peso de las vigas de aluminio} = 4,02 \text{ N}$$

$$\text{Peso del poliuretano} = 38,87 \text{ N}$$

$$P_{total} = \text{Peso total del colector} = 1142,09 \text{ N}$$

$$q_u = \frac{P_{total}}{L_c} = 1142,09 \text{ N/m} \quad (5.19)$$

Por lo tanto de la ecuación 5.17:

$$y_{max} = 0,0070 \text{ m} = 7 \text{ mm}$$

De igual forma se estudia la elongación máxima para una viga de aluminio tipo “I” del colector solar en vista lateral con su mínima longitud:

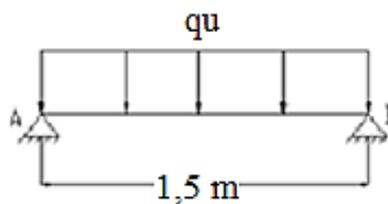


Figura 5. 16 “Vista lateral de viga i con carga distribuida”.

En este caso:

$$q_u = \frac{P_{tc}}{L_c} = 761,39 \text{ N/m}$$

$$E = 70 \text{ GPa}$$

$$I_x = \frac{el^3}{12} \quad \text{Donde:} \quad e = 0,0254 \text{ m} \quad ; \quad l = 1,5 \text{ m}$$

$$I_x = 0,00714 \text{ m}^4$$

Por lo tanto se tiene de igual manera con la ecuación 5.17:

$$y_{max} = 0,0000001 \text{ m} = 0,0001 \text{ mm}$$

CAPITULO VI

INSTRUMENTACIÓN

Los instrumentos son herramientas indispensables que sirven para conseguir o conservar la calidad de un producto que este bajo cierto proceso. También se usan para controlar las variables de un proceso en forma tan exacta como se necesite para satisfacer las especificaciones del producto. El instrumento o el equipo de instrumentación puede ser mecánico, neumático, hidráulico, eléctrico, electrónico o una combinación de dos o más de estas formas básicas.

Se presenta la normativa técnica en el ámbito internacional que proporciona métodos para la determinación del desempeño del equipo. Se considerara esta norma en el diseño para elegir la instrumentación adecuada en el colector solar y establecer el lugar más apropiado para su instalación.

6.1 INSTRUMENTACIÓN EN EL COLECTOR SOLAR

6.1.1 NORMA ANSI/ASHRAE 93-2003 MÉTODOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE COLECTORES SOLARES.

La norma ANSI/ASHRAE 93-2003 se creó con el propósito de proveer métodos de prueba para la determinar el desempeño térmico de colectores solares que usan fluidos en una sola fase, y no tienen almacenamiento energético interno significativo.

El estándar se enfoca en proveer métodos de prueba y procedimientos de cálculo para estipular el desempeño en estado estacionario o cuasi-estacionario de equipos con o sin concentración de energía en los cuales el fluido, en estado líquido o gaseoso, entre y salga del equipo a través de una sola entrada y una sola salida. Así mismo, se excluyen aquellos equipos: sin cubierta transparente, que posean

acumuladores integrados y en los que el fluido de trabajo cambie de fase. Los casos excluidos se abordan por otras normas, siendo la ASHRAE 1980 para los equipos sin cubiertas transparentes y la ASHRAE 109-2003 en los que el fluido de trabajo cambie de fase.

Es importante destacar que en la forma se definen tres tipos de áreas: absorción (A_c), apertura (A_a) y bruta (A_g). El área de absorción es aquella en la que la energía incidente es absorbida y transmitida al fluido. El área de apertura es la máxima superficie por la cual la energía solar es admitida y el área bruta es la máxima superficie del equipo incluyendo los medios para el montaje.

El desempeño térmico del colector solar se determina mediante la obtención de valores, combinando la eficiencia instantánea con la radiación incidente, temperaturas ambiente y de admisión de fluido. Esto requiere de medición experimental bajo un estado estacionario o cuasi-estacionario, por esta razón es necesario determinar las características del tiempo de respuesta del equipo, y como la eficiencia instantánea cambia bajo diferentes ángulos de incidencia entre el rayo directo y la normal al área de apertura del colector solar.

La norma recomienda esquemas de funcionamiento para bancos de prueba según su fluido de trabajo, sea líquido o sea aire. En el caso del banco de prueba propuesto se utiliza el esquema mostrado en la figura 6.1 cuando el fluido de trabajo es aire

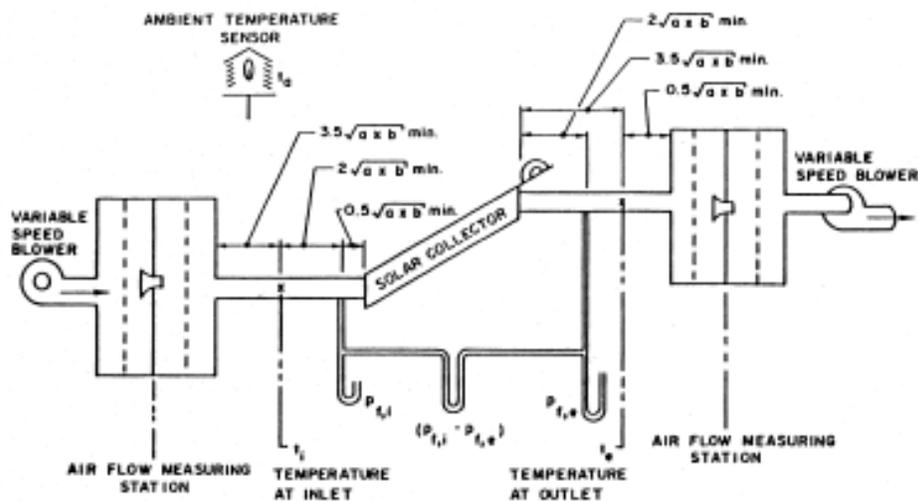


Figura 6. 1 “Configuración de prueba cuando el fluido de trabajo es aire”

Fuente: Norma ASHRAE 93-2003

Es posible observar en la figura 6.1 la instrumentación necesaria para determinar los parámetros requeridos estandarizados por la norma, los cuales son:

- Medidor de radiación solar.
- Medidor de flujo: la exactitud del sensor debe ser igual o menor a $\pm 1\%$ de la cantidad medida en unidad de masa por tiempo.
- Sensores de temperatura para: admisión, descarga del fluido y ambiente. Los sensores recomendados para medir la diferencia de temperatura entre la admisión y descarga del colector solar son termocuplas tipo T, termómetros de precisión por resistencia, termómetros de precisión, entre otros capaces de tener una exactitud para medir temperatura de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y una precisión de $\pm 0,2^\circ\text{C}$.
- Medidor de velocidad del viento: el sensor empleado debe permitir que la velocidad promedio integrada tenga una exactitud en $\pm 0,8 \text{ m/s}$
- Manómetros: de presión absoluta para la entrada del colector y presión diferencial para establecer caída de presión a través del equipo. Los

sensores para la medición en la admisión y posterior caída en el colector deben tener una exactitud de $\pm 3,5 \text{ KPa}$

Según Lopardo y Torres (2012) la caída de presión diferencial en el colector solar es de 500 Pa por lo tanto para medir está en el colector solar se utilizarán manómetros diferenciales tipo “U”, este tipo de manómetro expresa la diferencia de presión entre dos extremos de un tubo mediante una medición de diferencia de altura de un líquido, dicha medida mostrada en la figura 6.2 se puede obtener analíticamente con las siguientes condiciones:

- El gas sobre el líquido en ambos extremos del manómetro tendrá densidad despreciable en comparación con la del líquido.
- El diámetro del tubo debe ser idéntico en ambos lados.
- La presión en los extremos serán llamadas P_1 y P_2 .
- El líquido a la temperatura de operación tendrá densidad ρ y la diferencia de altura será h

Entonces la diferencia de presiones viene dada por la ecuación 6.1:

$$P_2 - P_1 = \Delta P = \rho g h \quad (6.1)$$

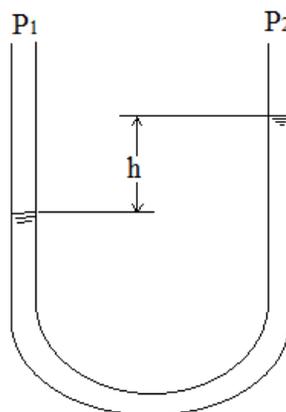


Figura 6. 2 “Manómetro diferencial tipo U”

Para la instrumentación restante en el colector solar se recomienda usar los siguientes instrumentos de marca OMEGA:

- RTD OMEGA PR-25AP-A-1800-0-M12
- Trasmisor de Velocidad de Aire y temperatura FMA-900-V Series

6.2 INSTRUMENTACIÓN EN LA CÁMARA DE SECADO

Con respecto a la cámara de secado no se encuentra alguna norma que establezca el tipo de instrumentación para determinar el desempeño del mismo. Sin embargo se recomienda para medir la humedad y temperatura del aire después de cada bandeja transmisores Humedad y Temperatura OMEGA HX94ACW. En la tabla 6.1 se presentan las características más resaltantes del equipo

Tabla 6. 1 “Características de omega HX94ACW”

	Rango	Precisión	Material	Peso	Aplicación	Salida
Temperatura	0 a 100°C	±2,5 %	Acero inoxidable	198 g	Ductos y paredes	0 a 1 Vdc o 4 a 20 mA
Humedad R.	0 a 100%	±0,6 °C				

Según Lopardo y Torres (2012) la caída de presión diferencial en la cámara de secado es de 375 Pa. Se usara un manómetro diferencial tipo “U” que use agua como liquido de trabajo y tendrá una diferencia máxima de 3,82 cm.

6.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

Todos los instrumentos estarán conectados a un data logger Measurement Computing USB-TC 8 channel el cual registrara la información para enviarla al computador donde se podrá llevar un respaldo de todas las medidas obtenidas por cada uno de los instrumentos, de esta manera determinar cuál será la mejor

configuración en el deshidratador según las condiciones externas que se simulen con el equipo.

En la figura 6.3 es posible apreciar la ubicación sugerida de los instrumentos de medición para el colector solar y la cámara de secado en los puntos AC se colocaran termocuplas tipo k que estarán encargadas de medir la temperatura de la lámina de acrílico y en los puntos BD también se colocaran el mismo tipo de termocuplas para medir la temperatura de la lámina de absorción del colector. Se recomienda el uso de termocuplas k debido a que son las más económicas y fácilmente de conseguir en el mercado nacional, además tienen buena resistencia a medios corrosivos. Se muestra el resto de las características de todos los instrumentos en la tabla 6.2.

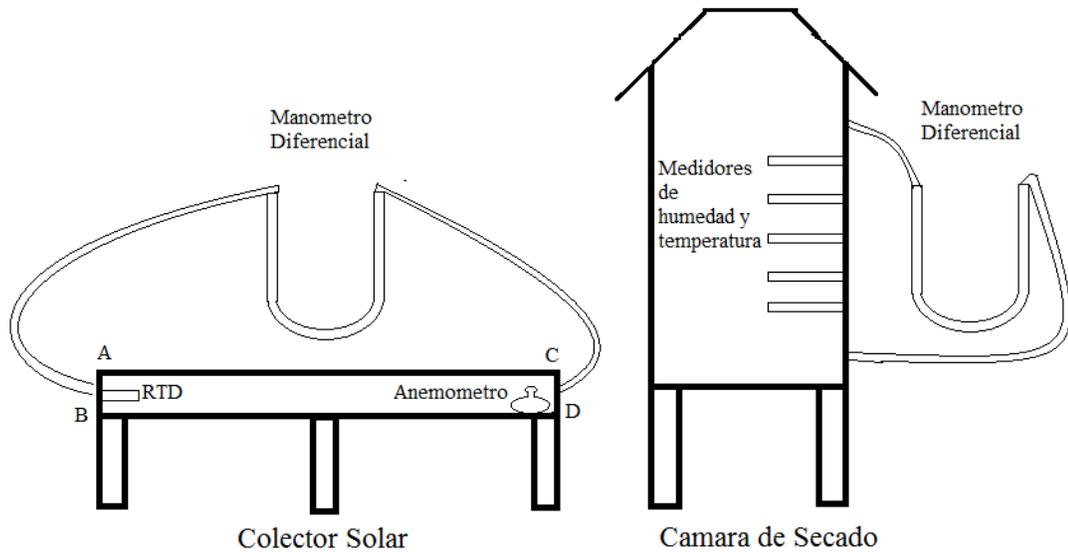


Figura 6. 3 “Esquema de instrumentación sobre deshidratador”

En la tabla 6.2 se presenta las cantidades y especificaciones de los instrumentos a usar en el deshidratador solar:

Tabla 6. 2 “Instrumentación para deshidratador solar”

Cantidad	Instrumento	Salida	Precisión	Rango
4	Termocupla tipo K	4-20 mA	1,50%	-200 – 1100°C
1	RTD OMEGA PR-25AP-A-1800-0-M12	4-20 mA	1,50%	-100 – 250°C
5	Transmisor Humedad/Temperatura OMEGA HX94ACW	0-1 Vdc o 4-20 mA	2,50%	0-100°C y 0-100%
1	Trasmisor de Velocidad de Aire y temperatura FMA-900-V Series	0-5 Vdc o 4-20 mA	1,50%	0-100 PPM

CAPITULO VII

7.1 SIMULACION DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Para simular la temperatura ambiental se utilizaran acondicionadores de aire para posibilitar la variación de temperatura dentro del laboratorio de transferencia de calor donde estará ubicado el banco de prueba. Para la simulación de la velocidad del viento dentro del laboratorio se utilizara un ventilador axial de pedestal oscilante de diámetro 0,4064m (16 pulgadas).

Se calcula la cantidad de acondicionadores de aire necesarios para obtener una temperatura ambiente del laboratorio de transferencia de calor de 20°C cuando la temperatura en el exterior sea de 29°C. Tomando en cuenta que el laboratorio tiene 4 paredes por donde existirán pérdidas de calor por convección natural hacia el exterior.

El laboratorio mide 14m de largo, 6m de ancho y 3,8m de alto. Las paredes están constituidas por láminas de acero con espesor de 6mm, un espacio de aire y otra lamina de acero como muestra la figura 7.1 dando un total de espesor por pared de 6cm. Debido a que el techo del laboratorio es un cielo raso y la diferencia con el techo real en la edificación es alrededor de 3m, se supone que no existen pérdidas en esta área superficial.

La pérdida de calor total en el laboratorio viene dada por la siguiente ecuación:

$$Q_t = Q_k + Q_l + Q_p + Q_m \quad (7.1)$$

Se aplica un estudio de transferencia de calor en las paredes del laboratorio para determinar las pérdidas por conducción, usando la correlación de McAdams se supone una velocidad máxima de 3m/s y se obtiene tanto para el ambiente interno como el externo del laboratorio un coeficiente convectivo $h_1 = 17,1 \frac{W}{m^2K}$.

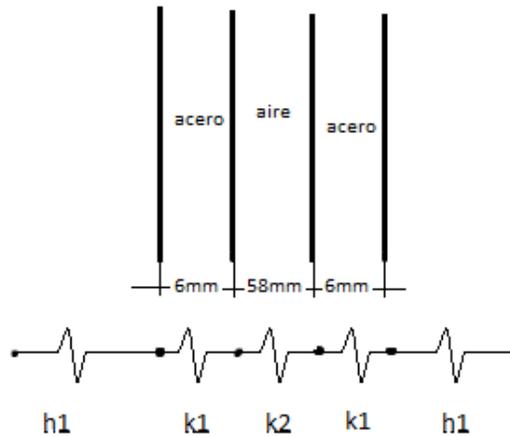


Figura 7. 1 “Esquema para pared de laboratorio”

$$Q_k = 2U_{ac}A_1\Delta T_e + 2U_{ac}A_2\Delta T_e + 2U_aA_2\Delta T_e + 2U_aA_2\Delta T_e \quad (7.2)$$

$$Q_k = 2A_1\Delta T \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{k_{ac}X_{ac}} + \frac{1}{k_aX_a} + \frac{1}{k_{ac}X_{ac}} + \frac{1}{h_1} \right) \\ + 2A_2\Delta T \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{k_{ac}X_{ac}} + \frac{1}{k_aX_a} + \frac{1}{k_{ac}X_{ac}} + \frac{1}{h_1} \right) \\ Q_k = 1102 \text{ w}$$

El laboratorio consta de 48 lámparas fluorescentes para su iluminación de $W_l = 11\text{W}$ cada una y 8 lámparas de haluro metálico de $W_{lh} = 400\text{W}$ cada una.

$$Q_l = 8W_{lh} + 48W_l \quad (7.3)$$

$$Q_l = 8 * 400 + 48 * 11$$

$$Q_l = 3728 \text{ W}$$

Se supone el laboratorio ocupado por un máximo de 20 estudiantes al momento de realizar pruebas al deshidratador, donde se estima que cada estudiante producirá metabólicamente $W_p = 200\text{W}$ de energía.

$$Q_p = 20W_p \quad (7.4)$$

$$Q_p = 4000 \text{ W}$$

Además el banco de prueba contará con un ventilador centrífugo acoplado a un motor eléctrico de 0,5 hp que le proporcionará potencia y generará pérdidas de calor dentro del laboratorio.

$$Q_m = \frac{W_m}{0,9} \quad (7.5)$$

$$Q_m = \frac{372.85}{0,9}$$

$$Q_m = 414,28 \text{ W}$$

Por lo tanto de la ecuación 7.1:

$$Q_t = 9244 \text{ W}$$

$$Q_t = 31541,83 \text{ BTU/h}$$

Según el calor total que se produce en el laboratorio es necesario dos aires acondicionados de 16000 BTU/h cada uno para cubrir con los requerimientos establecidos.

7.2 SIMULACION DE LA CIRCULACION DEL AIRE DENTRO DEL COLECTOR

Para la simulación de la circulación de aire dentro del colector se selecciona un ventilador centrífugo que satisfaga los requisitos de caudal y presión con que debe circular el aire en el equipo. La pérdida de presión que debe vencer el ventilador necesario para selección del mismo, fue determinada con el programa de modelado matemático de Lopardo y Torres (2012).

Se calcula con la siguiente ecuación el caudal máximo de aire que circulará por el área transversal del colector solar utilizando las dimensiones máximas del mismo.

$$Q_{max} = U_{mf} * A \quad (7.6)$$

$$Q_{max} = 0,175 \text{ m}^3/\text{s}$$

De acuerdo con el trabajo especial de grado de Muñoz y Sifontes (2012) se propone utilizar entre 10-40% de la velocidad máxima, por lo tanto el caudal máximo de operación será:

$$Q_{Omax} = 0,40 \times 0,175 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.7)$$

$$Q_{Omax} = 0,07 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con el caudal máximo de operación se escoge el ventilador. Uno de los requerimientos de selección son los PCM (pies cúbicos por minutos) por lo tanto;

$$\text{PCM} = 0,07 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 2118.9 \quad (7.8)$$

$$\text{PCM} = 148$$

De igual forma mediante el programa de Lopardo y Torres (2012) se determina cual será la potencia máxima del motor, por lo tanto:

$$Pot_{max} = 0,25 \text{ hp}$$

Con este conjunto de datos se selecciona un ventilador centrífugo de alta presión modelo SFTP-40 ya que suelen utilizarse para caudales pequeños y pérdidas de carga grandes. Según el mercado en Venezuela es posible conseguir este ventilador centrífugo de capacidad 128 PCM caída de presión 3 pulgadas de agua, acoplado a un motor de ½ hp a 1800 rpm con voltaje 230/3.

Para variar el caudal de aire según lo que desee el usuario estudiar en el colector solar, será necesario acoplar un variador de frecuencia 6SL3211-0AB13-7UA1 al motor de 0,5 hp conectado al ventilador centrífugo, de esta forma variar las rpm del mismo y conseguir una variación de caudal para poder modificar el número de Reynolds.

7.3 SIMULACION DE LA IRRADIACION SOLAR EN EL COLECTOR

Según build it solar (2012) las lámparas de haluro metálico son las más recomendadas para simular irradiación solar ya que reúne las siguientes ventajas:

- Buena iluminación, alrededor de 90 lumens por W, esto quiere decir menos energía consumida y menos cantidad de calor disipado al aire.
- Este tipo de luces es comúnmente utilizado en iluminación de calle, iluminación de amplios lugares y crecimiento de plantas, por lo tanto existe amplia disponibilidad en el mercado nacional.
- Su color espectral es de 4200K el cual está dentro del rango de la luz solar aproximadamente entre 2900K y 5500K.

Para seleccionar la cantidad de lámpara de haluro metálico a utilizar para la simulación de irradiación solar en el colector se supone un día soleado a las doce del mediodía con una irradiación solar promedio de 1000 W/m^2 , se escoge una lámpara con un área de $0,076 \text{ m}^2$, potencia 400W y ángulos de apertura de $7,54^\circ$ y $78,69^\circ$ tal como se muestra en la figura 7.2 y 7.3

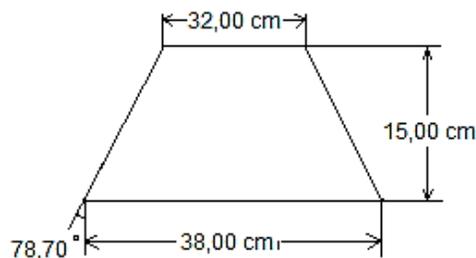


Figura 7. 2 “Vista frontal de la lámpara de haluro metálico”

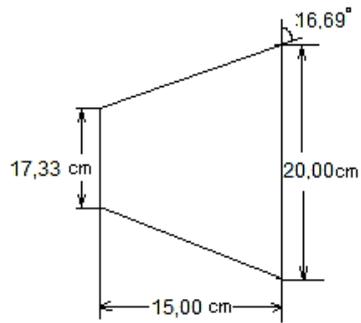


Figura 7.3 “Vista lateral de la lámpara de haluro metálico”

Se calcula el área efectiva de trabajo que se necesita de una lámpara según la irradiación requerida;

$$I_{Lamp} = \frac{Pot_{Lamp}}{A_{lamp}} \quad (7.9)$$

$$A_{lamp} = \frac{400}{1000} \quad (7.10)$$

$$A_{lamp} = 0,40 \text{ m}^2$$

Ya que el colector tendrá 1m de ancho y máximo 3m de largo se selecciona que el área iluminada sobre el colector por lámpara sea de 0,5m de ancho por 0,8m de largo, como se muestra en la figura 7.4. Se colocarán los reflectores de tal forma que el área iluminada por cada lámpara no se sobreponga al área iluminada vecina ya que se obtendría una sobreirradiación en dicha área, para lo cual se calcula la altura requerida para que la irradiación sea la adecuada.

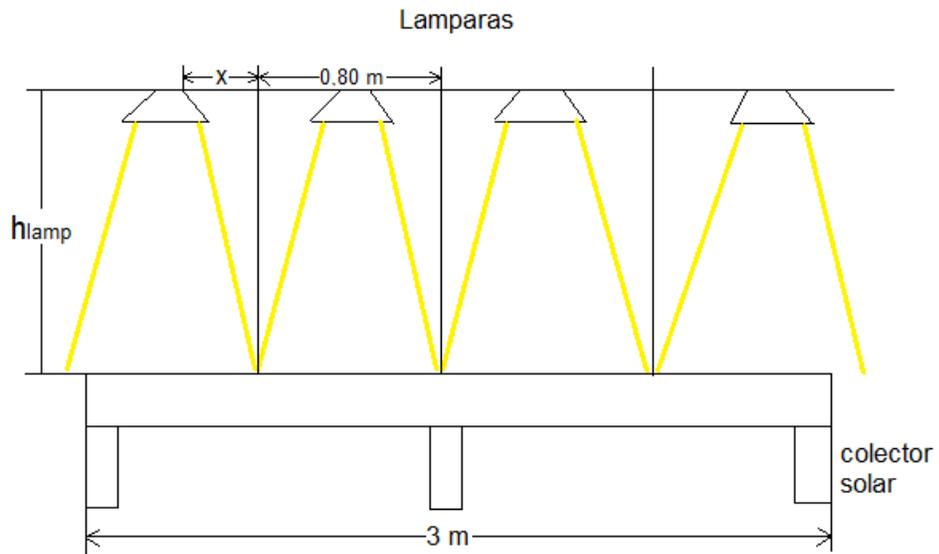


Figura 7. 4 “Vista lateral del colector con 4 lámparas”

En la vista lateral se calcula la distancia “x” para la separación entre lámparas y la altura “ h_{lamp} ” según muestra la figura 7.4 a la cual estarán ubicadas:

$$80 - 32 = 2x \quad (7.11)$$

$$x = 24 \text{ cm}$$

$$\text{Tan}(78,69^\circ) = \frac{h_{Lamp}}{x} \quad (7.12)$$

$$h_{Lamp} = 120 \text{ cm}$$

Para la vista frontal de igual forma se calcular la separación “x” y la altura h_{lamp2} que se muestra en la figura 7.5:

$$50 - 17,33 = 2x \quad (7.13)$$

$$x = 16,33 \text{ cm}$$

$$\text{Tan}(9,54^\circ) = \frac{x_2}{h_{Lamp2}} \quad (7.14)$$

$$h_{Lamp2} = 97,16 \text{ cm}$$

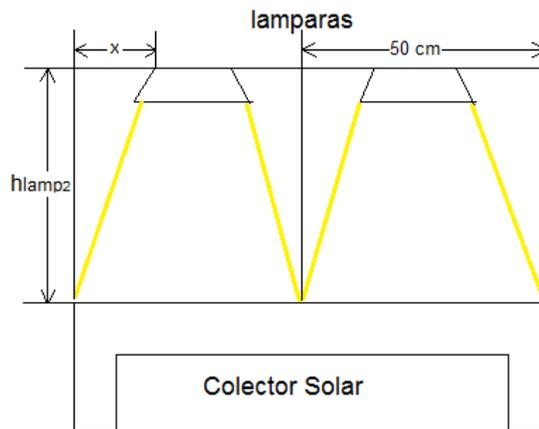


Figura 7. 5 “Vista frontal de colector con 2 lámpara”

Es posible observar que $h_{lamp} > h_{lamp2}$ por lo tanto se utilizara h_{lamp2} para la separación entre la lámpara y el colector. Esto trae como consecuencia que la luz proyectada a lo largo del colector sea mayor a la requerida y se calcula nuevamente la proyección a lo largo del colector con una separación de “ x_L ” mostrada en la figura 7.6 y la irradiación por la lámpara “ I_{Lamp2} ” con una altura de 0,97m.

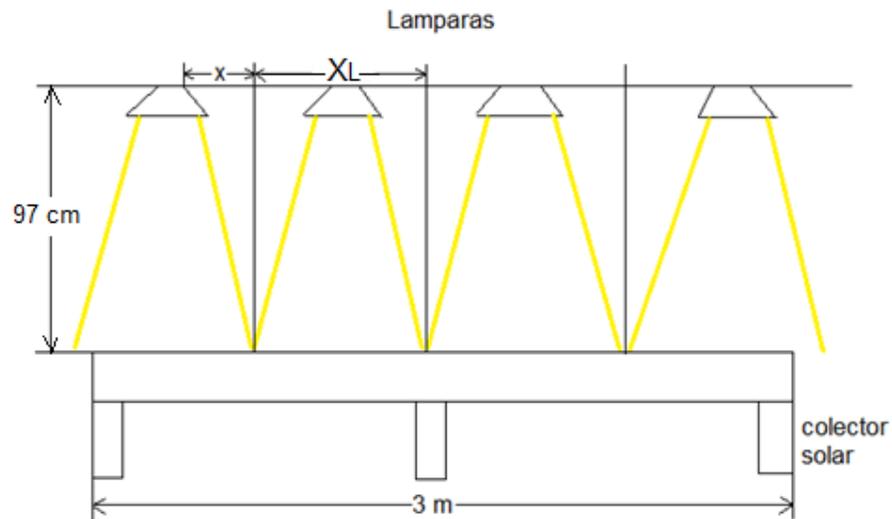


Figura 7. 6 “Vista de perfil del colector para distribución de lámparas”

$$\text{Tan}(78,69^\circ) = \frac{h_{Lamp2}}{x} \quad (7.15)$$

$$x = 19,43 \text{ cm}$$

$$x_L = 2x + 38 = 73,70 \text{ cm} \quad (7.16)$$

$$A_{lamp2} = 0,768 \times 0,500 = 0,3843 \text{ m}^2 \quad (7.17)$$

$$I_{Lamp2} = \frac{Pot_{Lamp}}{A_{lamp2}} \quad (7.18)$$

$$I_{Lamp2} = 1040 \frac{W}{m^2}$$

Como la irradiación solar en las regiones estudiadas se encuentra entre 1000 W/m^2 y 1100 W/m^2 , este nuevo valor es aceptado para los futuros ensayos.

Se necesitarán en total 8 lámparas para cubrir con los requerimientos de irradiación, estas estarán dispuestas cuatro a lo largo y dos a lo ancho del colector. Para fijar estas lámparas por encima del colector solar se diseña una estructura conformada por ángulos y pletinas. Las lámparas estarán sujetas a las pletinas, como se muestra en la figura 7.7.

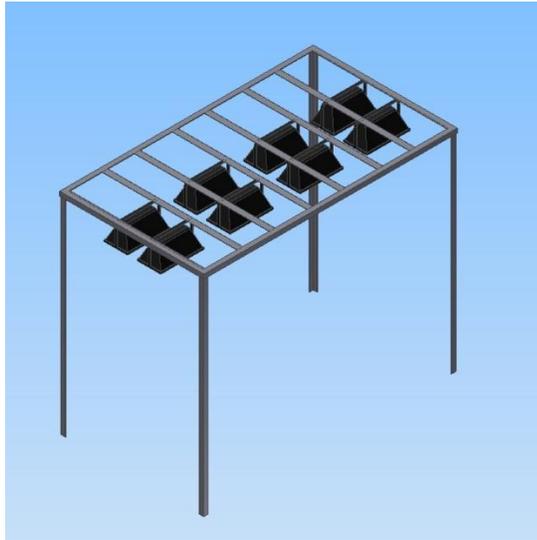


Figura 7. 7 “Soporte de lámparas”

Para garantizar que las pletinas de acero soporten las cargas puntuales producidas por las lámparas se utiliza la ecuación 7.19 presentadas por Chang y Veas (2010), para calcular la deflexión máxima en una pletina con una carga puntual en el centro, se considera este caso el más crítico ya que las lámparas están muy cercanas al

centro de la pletina así que se supondrán las dos lámparas apoyadas sobre el centro de la pletina. El peso aproximado de cada lámpara es 4Kg, como las lámparas estarán apoyadas sobre dos pletinas, estas se distribuyen el peso equitativamente, por esta razón una sola pletina soportara 2Kg de cada lámpara.

$$y_{max} = \frac{q_{lamp} L^3}{48EI} \quad (7.19)$$

Dónde: $I = \frac{bh^3}{12}$

$$b = L = 1,16m$$

$$h = 0,00316m$$

El peso de la lámpara:

$$q_{lamp} = 2 \times 2kg \times 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (7.20)$$

$$q_{lamp} = 78,48 N$$

Por tanto de la ecuación 7.19 se tiene:

$$y_{max} = 0,002 m = 2mm$$

Para ser conservadores esta elongación máxima se compara con la elongación permisible que se calcula con la ecuación 7.21. Si la elongación máxima es menor o igual a este número se considera aceptable dicha elongación.

$$y_{per} = \frac{l}{500} \quad (7.21)$$

$$y_{per} = 0,00232 m = 2,32 mm$$

Como $y_{max} \leq y_{per}$ se considera el resultado como una elongación aceptable.

7.4 SOPORTE MÓVIL PARA EL DESHIDRATADOR SOLAR

El deshidratador solar dispondrá de dos soportes móviles para transportar al exterior del laboratorio, de este modo se podrá evaluar el desempeño del deshidratador en condiciones no simuladas. Cada unidad móvil estará conformada por vigas huecas de sección transversal cuadrada de 60mm por lado y espesor 2,25mm.

Además cada una posee tubo de sujeción con el objetivo de facilitar el empuje y el giro de todo el colector y un par de pasadores, uno a cada costado para unir los dos soportes como uno solo.

La primera unidad que soportará la cámara de secado y la parte fija del colector solar medirá 3m de largo y 1,17m de ancho con seis ruedas de 101.6mm (4 pulgadas) de diámetro cada una y con una capacidad máxima de resistir 100 Kg. La otra unidad móvil tendrá el mismo ancho y un largo de 1,7m y contará con cuatro ruedas del mismo tipo mencionado, en este soporte se posará el ventilador centrífugo y la parte móvil del colector solar. Para garantizar la estabilidad del equipo un par de ruedas por soporte tendrán freno incorporado.

La figura 7.8 muestra el colector solar en su máxima longitud, las unidades móviles estarán separadas mientras que la figura 7.9 muestra el colector en su mínima longitud y las unidades móviles unidas por medio de los pasadores.

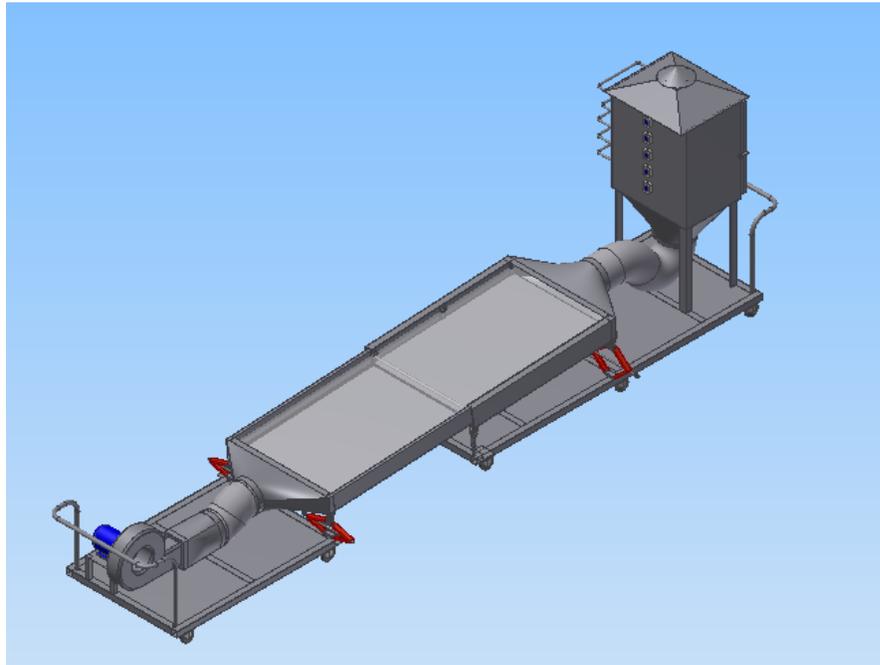


Figura 7. 8 “Deshidratador solar con soportes móviles a máxima longitud”

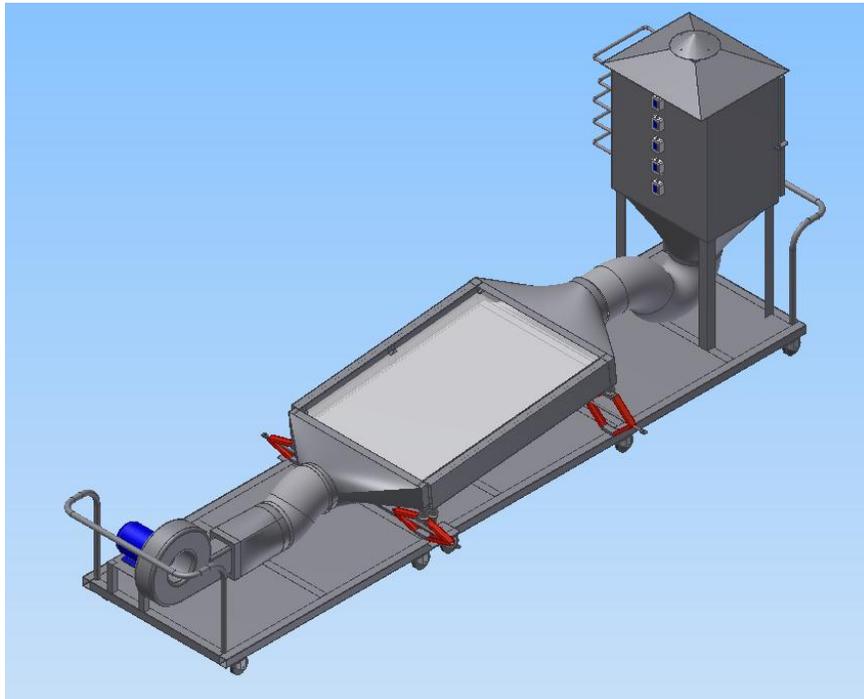


Figura 7. 9 “Deshidratador solar con soportes móviles a mínima longitud”

Para comprobar que el dispositivo de soportes es capaz de resistir las cargas de los elementos del deshidratador solar, se evalúa el caso más crítico posible, donde todo el peso de los componentes se concentre entre dos ruedas del soporte con mayor longitud.

$$W_c = \text{Peso de la base} = 3,98 \times (3+3+1,17+1,17+1,17) = 37,84 \text{kg} \times 9,81 = 371,21 \text{ N}$$

$$\text{Peso de las láminas de acero} = (3\text{m} \times 1,17\text{m} \times 0,002\text{m}) = 54,756 \text{ Kg} \times 9,81 = 537,15 \text{ N}$$

$$P_{Total\ ca} = \text{Peso de la cámara de secado} = 911,92 \text{ N}$$

$$P_{Total\ co} = \text{Peso del colector} = 1142,09 \text{ N}$$

$$\text{Peso total} = 2962,37 \text{ N}$$

$$y_{max} = -\frac{5q_u l^4}{384EI_x} \quad \text{Donde:} \quad I_x = \frac{et^3}{12}$$

$$y_{max} = 4,3 E10^{-8} m$$

Como las cargas no son simétricas a lo largo del soporte podría ocurrir que el lado B mostrado en la figura 7.10 tienda a levantarse debido al peso de la cámara de secado ubicada en punto “A”, por ello se calcula el peso necesario de “P” mostrado en el diagrama de fuerzas para evitar este fenómeno.

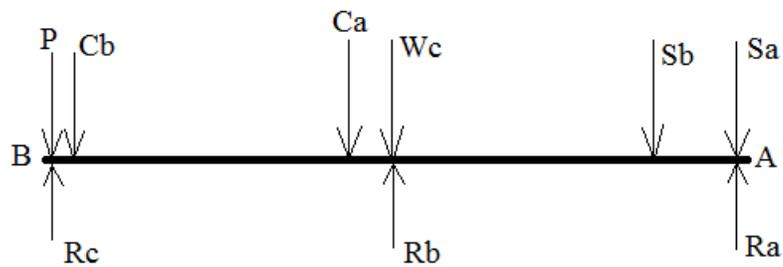


Figura 7. 10 “Diagrama de fuerzas en vista lateral del soporte”

$$\sum F_y = 0$$

$$S_b + W_c + C_a + C_b + P = R_b + R_c + R_a \quad (7.22)$$

Las reacciones deben ser iguales ya que las ruedas en el caso ideal deben soportar la misma magnitud de carga por rueda, por lo tanto:

$$R_t = \frac{S_b + W_c + C_a + C_b + P}{3} \quad (7.23)$$

Ahora los momentos en el punto A deben ser cero para evitar un volcamiento.

$$\sum M_A = 0$$

$$0,6S_b + 1,5W_c + 1,5C_a + 3C_b + 3P = 1,5R_b + 3R_c \quad (7.24)$$

$$P = \frac{1,5R_b + 3R_c - 0,6S_b - 1,5W_c - 1,5C_a - 3C_b}{3} \quad (7.25)$$

$$P = \frac{4,5R_t - 0,6S_b - 1,5W_c - 1,5C_a - 3C_b}{3} \quad (7.26)$$

Se sustituye la ecuación 7.23 en 7.26, se tiene:

$$P = \frac{4,5\left(\frac{S_b + W_c + C_a + C_b + P}{3}\right) - 0,6S_b - 1,5W_c - 1,5C_a - 3C_b}{3} \quad (7.27)$$

$$C_a + C_b = P_{Total\ co} \quad (7.28)$$

$$S_a + S_b = P_{Total\ ca} \quad (7.29)$$

$$W_c = 371,21\ N$$

Sustituyendo 7.28 y 7.29 en 7.27 se obtiene:

$$P = 79,24\ N$$

Por lo tanto se debe colocar un contrapeso de masa 8 Kg para mantener en todo momento las ruedas en el lado A sobre el piso.

CAPITULO VIII

8.1 ESTIMACION DE COSTOS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARA LA CÁMARA DE SECADO

	Unidad	Cantidad	Precio Unitario Bs.	TOTAL Bs.
1- Estructura base para cámara de secado	UND	1		2069

Lamina de acero galvanizado E = 2mm calibre 14	PZA	2,5	504	1260
Angulo estructural 65 x 6	m	3,1	88	272
Angulo estructural 40 x 6	m	5,2	52	271
Aislante 3p Ductal E=1"	PZA	3/4	354	265

2- Techo para cámara de secado	UND	1		756
---------------------------------------	------------	----------	--	------------

Lamina de acero galvanizado E = 2mm calibre 14	PZA	1,5	504	756
--	-----	-----	-----	-----

3- Puerta para Cámara de Secado	UND	1		1510
--	------------	----------	--	-------------

Lamina de acero galvanizado E = 2mm calibre 14 (1m x 2m)	PZA	1	504	504
Aislante 3p Ductal E=1" (1.2m x 2m)	PZA	1/3	354	118
Manilla	PZA	1	122	122
Goma para frigoríficos	m	3,2	52	166
Bisagras	PZA	2	300	600

4- Bandeja de 10 kg para Cámara de Secado	UND	5		9260
--	------------	----------	--	-------------

Lamina perforada de acero inoxidable 3016L E = 3mm - Ø 6mm	PZA	1/4	2051	513
pletina de acero inoxidable 3" x 3/16"	m	2,4	558	1339

5- Cepillos para mover cacao en bandejas de la Cámara de Secado **UND** **5** **6799**

Barra lisa 5/8" de acero inoxidable 304	m	0,1	210	21
Barra lisa 5/16" de acero inoxidable 304	m	0,5	315	158
Tubo de acero inoxidable 304 1/2" SHD 10	m	2,1	116	244
Lamina de acero inoxidable 316L E = 6mm calibre 4	PZA	1/8	7500	938

TOTAL = Bs. 20394

8.2 ESTIMACIÓN DE COSTOS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PARA EL COLECTOR SOLAR

	Unidad	Cantidad	Precio Unitario Bs.	TOTAL Bs.
1- Estructuras base para el colector solar	UND	2		3004

Lamina de acero galvanizado calibre 18 (1m x 2m)	PZA	2	392	784
Viga tipo TES aluminio 1" x 6.1m	PZA	1	104	104
Pletina 2" x 3/16" x 6m	PZA	½	167	84
Aislante 3p Ductal E=1" (1.2m x 2m)	PZA	1 1/2	354	530
Gomas para sellar fugas E= 12mm	m	3	11	33

2- Placa transparente **UND** **2** **6391**

Lamina de acrílico E = 5mm (1.22m x 2.44m)	PZA	1	3195	3195
--	-----	---	------	------

3- Soportes para placa transparente **UND** **1** **568**

Lamina de acero galvanizado calibre 18	PZA	1	392	392
Pasador roscado	PZA	8	15	120
Pasador soporte	PZA	8	7	56

8.3 ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA LOS ELEMENTOS EXTERNOS

Especificación	Unid	Cantidad	Precio Unitario Bs.	TOTAL Bs.
Acondicionadores de aire 16000 BTU	UND	2	5890	11780
Ventilador centrífugo alta presión modelo SFTP-40	UND	1	23125	23125
Variador de frecuencia 6SL3211-0AB13-7UA1. 0,5hp. 220v	UND	1	3200	3200
Ventilador de pedestal oscilante de 16 plug	UND	1	500	500
Reflector 400w Metal Halide 220v	UND	8	2850	22800
Ducto flexible de 12pulg	m	2	500	1000

Soporte móvil para el deshidratador solar				12239
Ruedas diámetro 4 pulg x 100kg	PZA	10	480	4800
Viga cuadrada estructural 60x60 mm x 6 m	PZA	3	1064	3192
Lamina acero estriada 3mm (1m x 2.4m)	PZA	2	2016	4032
Tubo de acero 1-1/2 pulg	PZA	1	215	215

Soporte para lámparas				1219
Angulo estructural 40x6 x 6m	PZA	3	313	939
Pletina 2plug x 1/8 plug x 6m	PZA	2	140	280

TOTAL = Bs. 75863

TOTAL GLOBAL = Bs. 165251

Todos los costos de los materiales fueron cotizados para la fecha de 20 de febrero del año 2013.

Para calcular el valor aproximado de esta estimación de costos en años posteriores se recomienda la siguiente ecuación:

$$S = C \left[1 + \left(\frac{INCP_{reciente}}{INCP_{antiguo}} \right) \right]$$

Dónde:

S : es el valor del costo en el mes del año que se desea evaluar [Bs].

C : es el valor del costo mostrado anteriormente [Bs].

$INCP_{antiguo}$: es el índice nacional de precios al consumidor en el mes de febrero del 2013.

$INCP_{reciente}$: es el índice nacional de precios al consumidor en el mes del año que se desea evaluar.

Sustituyendo los respectivos valores la ecuación queda de la siguiente manera:

$$S = 165.251 \left[1 + \left(\frac{INCP_{reciente}}{334,8} \right) \right]$$

Para obtener los valores del INPC reciente se puede ingresar en la página web del Banco Central de Venezuela (dirección electrónica <http://www.bcv.org.ve/>) y conseguir la tabla actualizada a la fecha de interés como la mostrada en el anexo 5.

CAPITULO IX

RESULTADOS

Una vez concluida las fases de diseño se explica de forma resumidas los resultados obtenidos en la estructura del banco de prueba para deshidratación solar de cacao. Separando la cámara de secado y el colector solar en sus características más relevantes de diseño:

Para las estructuras de la cámara de secado mostrada en el anexo 1 plano “Estructura base de cámara de secado” y el colector solar en anexo 2 plano “Colector solar ensamblado” se escogió el acero galvanizado por su gran resistencia a los esfuerzos de flexión que estarán sometidos durante su uso y además de su excelente capacidad para evitar la corrosión en ambientes expuestos a ella. De igual manera fue seleccionada la espuma comprimida de poliuretano como aislante térmico para las dos estructuras, con el propósito de mantener estables las condiciones dentro de la cámara de secado y evitar las pérdidas de calor en todo el banco de prueba.

En cuanto a la cámara de secado es importante resaltar que en este diseño será posible mover los granos de cacao en cada bandeja sin necesidad de abrir la cámara, ya que cada una de las cinco bandeja dispondrá de un rastrillo recto como se muestra en el anexo 1 plano “Ensamble de cámara de secado”, el cual se opera desde el exterior del deshidratador, de este modo se evitara la perdida de calor y los desagradables aromas que desprende el cacao en el momento de secado.

Las bandejas que sostendrán el cacao se dimensionaron a 0,7m de largo por 0,5m de ancho (ver anexo 1 plano “Bandejas para 10 Kg de cacao”) con la finalidad que albergaran la mayor cantidad de producto, sin perjudicar la facilidad de mover estas afuera de la cámara de secado. Al igual que el rastrillo recto (ver anexo 1 plano “Ensamble rastrillo”) serán construidas de acero inoxidable debido a que este material es conocido por no dañar ni contaminar el producto con el que tendrán contacto directo.

Con respecto al techo de la cámara de secado se pensó en un dispositivo removible, que facilitará el desplazamiento del deshidratador en lugares donde la altura mínima sea menor a 1,90m. El mismo tendrá una salida central de aire mostrado en el anexo 1 plano “Techo”, el cual evitará la acumulación de gases dentro de la cámara de secado.

Para el colector solar se obtuvo un diseño compuesto de dos módulos (ver anexo 2 plano “Colector solar ensamblado”) que ajustan uno dentro del otro y garantizan que el usuario pueda establecer cualquier dimensión en un rango de longitud desde 1,5m hasta 3,0m. Modifica el diámetro hidráulico desde 0,095m hasta 0,181m cambiando la separación de la placa transparente con respecto a la placa de absorción en tres alturas diferentes 50mm, 75mm y 100mm. De igual forma el diseño garantiza la variación del ángulo entre el colector y el plano horizontal en un rango de 0° a 15° con longitud de 1,5m y de 0° a 7° para 3m de longitud. En cuanto al giro del colector con respecto a su eje longitudinal será posible seguir la trayectoria del sol desde las 10am hasta las 3pm solar.

El banco de prueba dispondrá de un ventilador centrifugo con un variador de frecuencia el cual debe manejar un flujo másico desde $0,0826 \frac{Kg}{s}$ hasta $0,00826 \frac{Kg}{s}$ y por tanto el número de Reynolds se podrá variar desde 8957 hasta 8631.

Para comodidad del usuario se diseñaron unos soportes móviles mostrados en anexo 2 plano “Ensamble de soportes”, que facilitan su desplazamiento al exterior para trabajar con radiación solar real y condiciones ambientales aleatorias, comprobando que tan resistente es el deshidratador solar a la intemperie. Mientras que dentro del laboratorio se propone la construcción de un soporte donde se instalarán las lámparas de haluro metálico (ver anexo 3 plano “Estructura soporte de lámparas”) que simularan la radiación solar para diferentes casos que el usuario desee estudiar. En la figura 9.1 se muestra el diseño del equipo de deshidratación con todas sus partes situado dentro del laboratorio con máxima longitud del colector solar.

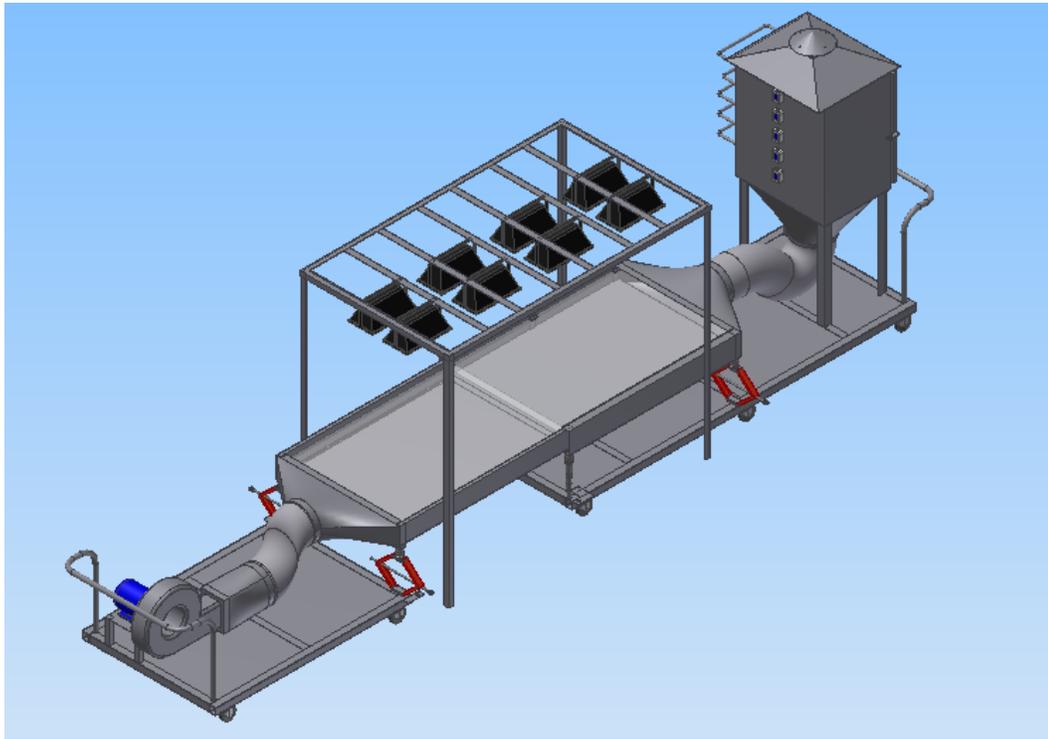


Figura 9. 1 “Deshidratador solar en laboratorio”

CONCLUSIONES

Es posible diseñar un prototipo de deshidratador solar para pruebas de laboratorio que permita la variación de ciertos parámetros con el presupuesto aprobado por el Fonacit.

- La cámara de secado y el colector solar cumplieron con todos los requerimientos establecidos en este proyecto.
- La estructura de la cámara de secado y del colector soportaran todas las cargas a las cuales estarán sometidos.
- Las pérdidas de calor en la cámara de secado y en el colector solar son mínimas.
- Es necesario tener programas simuladores de deshidratadores solares para establecer las dimensiones mínimas y máximas del colector solar.
- El flujo másico de aire debe ser pequeño para poder lograr que su temperatura llegue a su punto máximo.
- El flujo de aire siempre estará en régimen turbulento
- Es posible acondicionar el laboratorio de transferencia de calor para las condiciones climatológicas en el país.

RECOMENDACIONES

Para el buen funcionamiento del equipo se recomienda seguir los siguientes pasos al momento de poner a prueba el deshidratador solar dentro del laboratorio de transferencia de calor:

1. Se ajusta la temperatura ambiente con los acondicionadores de aire y se espera hasta que el laboratorio llegue a la temperatura configurada.
2. Se prende el ventilador axial y se configura tal que la altura quede por encima del colector solar.
3. Se encienden las lámparas y se espera alrededor de un minuto para que se calienten y lleguen a su máxima irradiación.
4. Se conectan todos los instrumentos al data logger para llevar registro de todas las variables en la computadora.
5. Se configura las dimensiones del colector solar a los requerimientos del usuario.
6. Con el variador de frecuencia se ajusta las rpm del motor y a su vez se configura la velocidad inicial del aire.
7. Se procede a encender el motor para que el ventilador induzca el aire por el colector solar.
8. Se coloca el cacao húmedo en cada una de las bandejas.
9. Se asegura que la puerta de la cámara de secado este bien cerrada y que los acoples estén bien conectados.
10. Se espera hasta que el equipo alcance el régimen permanente de operación.

De igual forma para mejorar y mantener el desempeño del deshidratador solar propuesto, se recomienda:

- Mantener limpio todos los equipos del deshidratador solar.
- Operar el equipo dentro del laboratorio según los pasos sugeridos para evitar daños en el equipo o sobrecalentamiento en el acrílico.
- Durante el proceso de deshidratación, no exponer los granos de cacao dentro de la cámara de secado a temperaturas mayores a 45 °C.
- Para aumentar la temperatura del aire dentro del colector solar es recomendable pintar la lámina de absorción de negro mate.
- Colocar gomas en todas las zonas donde pueda existir fugas de aire, como los orificios del mango de los rastrillos, el acople entre los ductos flexibles y la cámara de secado o el colector solar y los espacios entre el acrílico y el colector solar que no ajuste en el diseño.
- Colocar aislante tanto en el difusor de aire de entrada en la cámara de secado como en el ducto flexible para evitar pérdidas de calor.
- Colocar en cajas resistentes al agua la instrumentación electrónica que pueda sufrir daños al momento de evaluar el desempeño del deshidratador solar en la intemperie.
- Luego de utilizar el deshidratador solar, es recomendable limpiar las bandejas de la cámara de secado cuando sea utilizada con productos que generen desperdicios.
- Es posible que con el uso del colector solar en diferentes longitudes generen rayones en el acrílico, se recomienda acudir a un especialista en acrílicos que pule la superficie.

- Colocar señalización de precaución en el colector solar y las lámparas de haluro metálico, las cuales pueden alcanzar altas temperaturas que al contacto con la piel podrían ocasionar quemaduras.
- Mover los rastrillos de la cámara de secado al menos una vez cada media hora, con el fin de garantizar el secado homogéneo.
- Evaluar el desempeño del colector solar por convección natural.
- Evaluar las posibles pérdidas de calor en el ducto flexible entre la cámara de secado y el colector para disminuir las dimensiones del colector.

BIBLIOGRAFIA

Barbosa, G. y Vega, H. (2000) *Deshidratación de alimentos*. (1^{ra} ed.) Zaragoza, España: Acribia.

Baritto, M., y Bracamonte, J. (2011). A dimensionless model for the outlet temperature of a nonisothermal flat plate solar collector for air heating. *Solar energy*. Extraído el 26 de agosto del 2012 desde [http:// www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener)

Bermúdez, J y Maiz, V. (2004) *Diseño y construcción de un secador de alimentos de origen vegetal en el estado Amazonas*. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela. Venezuela.

Bérriz, L. (1977). Cálculo de colectores e instalaciones solares. Informe científico-técnico No. 3. Academia de Ciencias de Cuba.

Build it solar (2012). *A Sun Simulator for Solar Thermal Collector Testing*. Recuperado el 23 de enero del 2013 en <http://www.builditsolar.com/Experimental/SunSim/SunSim.htm>

Cadoche, L. (1998) *Material del Seminario de Encuestas en Educación*. (1^{ra} ed). México: UAQ.

Chang, J. y Veas, V. (2010) *Deformaciones en vigas*. Universidad de Chile, Facultad de arquitectura y urbanismo, Departamento de ciencias de la construcción.

Cortez, N., Cerón, O., Janampa, K., Montes, C., Morales, O., Oré, J. (2008). Optimización de un prototipo de secador solar para secado de Lúcumá en Ayacucho”. *Programa de investigación de Energías Renovables*. Perú.

Duffie, J., Beckman, W. (1980). *Solar Engineering Thermal Processes*. (2^{da} ed). Wisconsin. Estados Unidos: Wiley.

Duffie, J. A. y Beckman, W. (1996). *Solar energy thermal processes*. (4^{ta} ed.). Madrid, España: Pergamon Press.

Durán, G., Condorí, M., Díaz, G. y Echazú, G. (2010). *Secador solar híbrido para la Producción continua a escala industrial de pimienta para pimentón*. Ponencia presentada en el XVII Simposio Peruano de Energía Solar. Cusco, Perú.

FAO (s.f). *El uso de hielo en pequeñas embarcaciones de pesca*. Recuperado el 12 de octubre del 2012 en <http://www.fao.org/docrep/008/y5013s/y5013s07.htm>.

Gebr. Pfeiffer (s.f) *Construcción secador triplex TRT*. Recuperado el 20 de febrero del 2013 en <http://www.gpse.de/index.php?id=191&L=3>.

Incropera, F. y De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. (4^{ta} ed.). Mexico: Prentice Hall.

Lara, G. (2011). *Evaluación del proceso de secado de granos de cacao fermentado, en un secador de bandejas con convección forzada de aire*. Trabajo de Grado. Universidad de Oriente.

Larios, L. y Texeira, J. (2004). *Diseño y construcción de un deshidratador indirecto de cacao mediante uso de aire calentado por energía solar*. Trabajo de grado. Universidad Central de Venezuela.

Levenspiel O. (1998). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. (3^{ra} ed.) México: Reverté.

Liu, B. y Jordan, R. (1960). The interrelationship and characteristics distribution of direct, difusse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4 (3), 86-93.

Lopardo, A. y Torres, G. (2012) *Modelado de la operación transitoria de un deshidratador solar para secado de cacao*. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela.

Morán, M. y Shapiro, H. (2005). *Fundamentos de Termodinámica*. (2^{da} ed). Barcelona, España: Reverté.

Muñoz. D, y Sifontes F. (2012) *Un estudio del comportamiento fluidodinamico y térmico de una cámara de secado tipo bandeja para cacao*. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela.

Ong, K. (1995). Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure. *Solar Energy*, 55 (2), 54- 60.

Potter, M. y Wiggert, D. (2002) *Mecánica de fluidos* . (3^{ra} ed.) Mexico: Mc Graw Hill.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2012) *Información sobre la República Bolivariana de Venezuela*. Recuperado el 27 de noviembre del 2012 en

http://www.pnud.org.ve/index.php?option=com_content&task=view&id=56&Itemid=83.

Reyes, H. y Capriles, L. (2000) *El cacao en Venezuela. Moderna tecnología para su cultivo*. (1^{ra} ed.) Caracas, Venezuela: Chocolates El Rey, C.A.

Sánchez, T. (2008) *Diseño y construcción de un prototipo de secador solar para vainilla*. Trabajo de Grado. Universidad del Caribe.

Shigley, J. y Mischke, C. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. (6^{ta} ed). Caracas, Venezuela: McGraw-Hill.

Tinoco, H. y Ospina, D. (Julio, 2010) Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado. *EIA, ISSN 1794-1237,3*, 53-63. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).

Van Wylen. (2007). *Fundamentos de termodinámica*. (2^{da} ed.) Mexico: Limusa Wiley.

Villamizar, F., Hernández, J., (s.f). *Determinación de parámetros y simulación matemática del proceso de secado del cacao (Theobroma cacao)*. Universidad de Colombia, Colombia.

Vivas, J. (2005). *Cacao, cosecha, fermentación y secado*. (1^{ra} ed.) Caracas, Venezuela: Cesvi.