

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO DE UN SECADOR DE GRANOS DE CACAO TIPO
INVERNADERO CON PANEL SOLAR”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

KLARIBEL GARCÍA PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN MANUEL URRIETA SALTIJERAL

VILLAHERMOSA, TABASCO.

NOVIEMBRE, 2017



ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS:.....	9
OBJETIVO GENERAL:.....	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	9
CAPITULO 1.- FUNDAMENTO TEÓRICO.....	10
1.1.- ÁRBOL DE CACAO:.....	10
1.2.- TIPOS DE CACAO:.....	11
1.3.- CARACTERÍSTICAS DEL CACAO:.....	14
1.4.- TRATAMIENTO POS COSECHA DEL CACAO.....	15
1.4.1.- Fermentación.....	15
1.4.2.- Secado.....	16
1.4.2.1.- Curva de secado.....	17
1.4.2.2.- Tiempo de secado.....	19
1.5.- PRODUCCIÓN DE CACAO EN TABASCO.....	20
1.6.- MÉTODOS DE SECADO.....	21
1.6.1.- Secado Natural.....	22
1.6.2.- Secado Artificial.....	23

1.7.- TIPOS DE SECADORES.....	25
1.7.1.- Secadores comerciales	25
1.7.1.1.- Secadoras de flujo continuo.....	26
1.7.1.2.- Secadoras flujo concurrente	29
1.7.2.- Secadores Solares	33
1.7.2.1.- Secadores solares directos.....	34
1.7.2.2.- Secadores solares indirectos.....	35
1.7.2.3.- Secador de gabinete (tipo Brace o Lawand)	36
1.7.2.4.- Secador tipo tienda de campaña	36
1.7.2.6.- Secador tipo colector solar	37
1.7.2.7.- Secador solar tipo invernadero	38
1.8.- ENERGIA SOLAR	38
1.9.- SISTEMAS SOLARES.....	39
1.10.- INVERNADERO	39
1.11.- CELDA FOTOVOLTAICA	40
1.11.1.- Funcionamiento de un panel fotovoltaico.....	40
CAPITULO 2.- METODOLOGÍA.....	42
2.1.- BUSQUEDA DE DATOS GEOGRÁFICOS DEL LUGAR	42
2.2.- CARACTERÍSTICAS DE SELECCIÓN DEL DISEÑO DEL SECADOR	42
2.2.1.- Diseño del secador	43
2.3.- METODOLOGÍA PARA CÁLCULOS DE ENERGÍA.....	44
2.3.1.- Cálculo de iluminación.....	44
2.4.- MATERIAL PARA DISEÑO DE LOS SECADORES	46
2.4.1.- Secador a) Con paneles solares superiores.	46
2.4.1.1.- Estructura	46

2.4.1.2.- Características.....	47
2.4.2.- Secador b) Con cuarto de control y acceso	48
2.4.2.1.- Estructura	48
2.4.2.2.- Características:.....	49
2.4.3.- Secador c) Con paneles fuera del secador.	49
2.4.3.1.- Estructura	49
2.4.3.2.- Características.....	50
CAPITULO 3.- RESULTADOS.....	51
3.1.- GEOGRAFÍA DEL SITIO	51
3.2.- SELECCIÓN DEL SECADOR A DISEÑAR.....	51
3.3.- SECADOR PROPUESTO.....	54
3.4.- DATOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO:	55
3.5.- VOLUMEN DE SECADO	56
3.6.- PRESUPUESTO DE LA ESTRUCTURA:	57
3.7.- PRESUPUESTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO:.....	58
3.8.- PARAMETROS A CONSIDERAR EN EL PROCESO DE SECADO	59
CONCLUSIÓN	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Árbol de cacao a; frutos en el tronco b; y en las ramas c.	10
Figura 2.- Fruto del árbol de cacao, a: baya verde, b: baya madura amarilla y c: baya madura roja.....	11
Figura 3.- Cacao criollo	12
Figura 4.- Cacao forastero	13
Figura 5.- Cacao trinitario.....	13
Figura 6.- Curva de secado.....	18
Figura 7.- Curva de velocidad de secado.....	18
Figura 8.- Representación de la acción de los rayos.....	22
Figura 9.- Secado al sol	22
Figura 10.- Secadora de flujo mixto.....	27
Figura 11.- Secadora de flujo cruzado o columnas.	27
Figura 12.- Secadora de columnas de forma circular.	28
Figura 13.- Secadora de persianas.	28
Figura 14.- Secadora de flujos concurrentes.	30
Figura 15.- Secadora de cascadas de forma romboidal.	31
Figura 16.- Secadora horizontal de columnas hexagonales.	32
Figura 17.- Secadora horizontal de lecho fijo.	33
Figura 18.- Secador solar directo.	34
Figura 19.- Secador solar indirecto.	35
Figura 20.- Secador de gabinete.	36
Figura 21.- Secador tipo tienda de campaña.....	36
Figura 22.- Secador tipo chimenea.	37
Figura 23.- Secador tipo colector solar.....	37
Figura 24.- Diseño de secadores solares (a, b, c.).	52
Figura 25.- Diseño de bandejas de secador (c).....	52
Figura 26.- Diseño del secador (c)	52
Figura 27.- Planta de conjunto del secador (c).	53
Figura 28.- Presupuesto de sistema fotovoltaico.....	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Especificaciones del secador (a).....	46
Tabla 2.- Especificaciones del secador (b).....	48
Tabla 3.- Especificaciones del secador (c).....	49
Tabla 4.- Presupuesto de la estructura del secador.	57

RESUMEN

El presente trabajo describe el diseño de un secador tipo invernadero para granos de cacao implementando el uso de panel solar, con el objetivo de almacenar energía en el día y utilizarla durante las noches en la activación del sistema de control de secado, lo que permitirá adaptar tecnología para un mejor funcionamiento y extracción de la humedad de los granos de cacao. Se describe en cada capítulo los detalles de diseño y estrategias de ingeniería para que en un trabajo posterior se pueda construir y ensamblar el diseño propuesto. Tabasco es el primer productor de cacao en México, por lo que el diseño de un secador tipo invernadero utilizando panel solar para el secado de granos de cacao será de gran utilidad para los productores. Para lograr el proceso de secado se requiere mantener dentro del secador una temperatura de 35°C por las noches con el objetivo de alcanzar una humedad final del grano del 7% a 8% y reducir a 2 días de secado como máximo. Para lograr este objetivo se realizó el diseño de tres secadores solares los cuales varían en medidas, materiales de construcción y orientación de paneles solares. Al analizar cada una de las características de diseño se consideró el 3er modelo Tipo invernadero como el más factible a construir, el cual cuenta con medidas de 6.66m de largo x 3.30m de ancho x 1.80m de alto, en el que se ensamblan 4 bandejas donde se coloca el grano de cacao, de acuerdo al tipo de bandeja y medidas se realizó el cálculo del volumen, el cual fue de 3 toneladas por cada proceso, considerando que al colocar los paneles fuera del secador se logrará captar la mayor energía solar en el día durante el proceso debido a que las ventanas corredizas que permitirán el paso directo de los rayos solares. Otra ventaja que presenta el diseño seleccionado es el ensamble de llantas en cada una de las 4 bandejas para poder moverlas o retirarlas para la limpieza del secador y a la vez para facilitar el almacenamiento y resguardo de los granos después que termine el proceso. Se propone utilizar material como lo es PTR galvanizado para la estructura para evitar así la corrosión al momento de estar en contacto directo con los granos, la estructura se cubrirá de policarbonato en color blanco para el techo y los costados. En los tiempos de lluvia la humedad puede perjudicar el proceso de secado por lo que para prevenir este problema se considera que el lugar para instalar el secador sea en un piso de concreto, utilizando tela o polietileno que sirve como aislante térmico. Se considera que esta propuesta contribuirá a la solución de varios de los problemas a los que se enfrentan los productores como son los periodos de lluvia, la presencia de factores de riesgo de contaminación con roedores, agentes externos del proceso de secado y la proliferación de microorganismos como bacterias y hongos que deterioran el grano de cacao.

ABSTRACT

The present work describes the design of a greenhouse dryer for cocoa that implements the solar panel, with the objective of storing energy in the day and to use during the nights in the activation of the system of control of drying, which accepts technology for a better operation and extraction of moisture from cocoa beans. It describes in each chapter the design details and engineering strategies so that in a later work the proposed design can be constructed and assembled. Tabasco is the first cacao producer in Mexico, so the design of a greenhouse dryer using solar panel for the drying of cocoa beans will be of great utility to producers. In order to achieve the drying process it is necessary to maintain a temperature of 35 ° C at night in order to reach a final grain moisture of 7% to 8% and reduce to 2 days of drying at the most. To achieve this objective, the design of three solar dryers was carried out, which vary in measurements, building materials and orientation of solar panels. When analyzing each of the design features, the third greenhouse model was considered the most feasible to construct, which measures 6.66m long x 3.30m wide x 1.80m high, in which are assembled 4 trays where the cocoa bean is placed, according to the type of tray and measurements were made the volume calculation, which was 3 tons for each process, considering that placing the panels outside the dryer will capture the largest solar energy in the day during the process due to the sliding windows that will allow the direct passage of the solar rays. Another advantage of the selected design is the assembly of tires in each of the 4 trays to be able to move them or remove them for cleaning the dryer and at the same time to facilitate the storage and storage of the grains after the end of the process. It is proposed to use material such as PTR galvanized for the structure to avoid corrosion at the moment of being in direct contact with the grains, the structure will be covered in white polycarbonate for the roof and sides. In rainy times, humidity can adversely affect the drying process. To prevent this problem, it is considered that the place to install the dryer is on a concrete floor, using fabric or polyethylene that serves as a thermal insulation. It is considered that this proposal will contribute to the solution of several of the problems faced by producers such as the rainy season, the presence of risk factors for contamination with rodents, external agents of the drying process and the proliferation of microorganisms such as bacteria and fungi that damage the cocoa bean.

INTRODUCCIÓN

El cacao es parte de la historia, la cultura y la economía mexicana. Es una fuente de empleos y hasta hace poco una parte importante del producto interno bruto de los estados de Tabasco y Chiapas ya que producen el 99.45% del total nacional de cacao siendo Tabasco con mayor superficie de cultivo con aproximadamente 60,324.80 hectáreas (González, 2005).

El valor económico, alimenticio, agrícola e industrial asociado a los granos y semillas, demanda cuidados especiales durante la cosecha hasta su almacenamiento, como grano seco listo para la comercialización a la industria chocolatera y sus subproductos para garantizar la conservación de sus propiedades físicas y atributos sensoriales que condicionarán la calidad del producto final. Por lo que es necesario estudiar cada una de las etapas y variables de la producción. El tratamiento pos cosecha del cacao comprende dos procesos independientes que son la fermentación y el secado ambos necesarios para la obtención de granos secos de cacao con calidad aromática para ser exportados por la industria chocolatera (Caballero, 2015).

El proceso de secado de granos de cacao tiene como principal objetivo eliminar el exceso de humedad en el grano, conservando un margen del 7% a 8% de humedad en los granos, límite considerado como unidad crítica para el almacenamiento. Es importante tener en cuenta que la humedad no debe bajar del 7% pues las almendras se vuelven quebradizas, además se debe evitar la germinación de las semillas y mantener el grado de humedad de manera que no permita el crecimiento de bacterias y hongos, así como retardar el desarrollo de ácaros e insectos. El buen cumplimiento de los procesos de fermentación y secado garantiza una excelente calidad de granos (Siguencia, 2013).

Los tipos básicos de secado son naturales y artificiales. Los naturales, son aquellos donde se utiliza la energía solar y se llevan a cabo exponiendo los granos de cacao directamente al sol o en invernaderos (secador solar).

A pesar de la naturaleza rudimentaria del proceso de secado solar natural o tradicional, en la mayoría de los países con poco desarrollo industrial o en vías de desarrollo es el único económicamente viable para secar muchos productos agrícolas. En el método tradicional los productos se colocan sobre una manta, lona o tablas de madera o se cuelgan por un hilo al aire libre, en el sol o en la sombra según el producto aprovechando el calor ambiental. Durante el proceso el primero y segundo día el grano de cacao solamente se expondrá a la radiación solar directa durante un tiempo de tres horas en las primeras horas de la mañana, para permitir que se evapore el agua libre de la superficie del grano. En el tercer día puede aumentarse gradualmente el tiempo de exposición solar permitiendo reducir la humedad interna del grano a un contenido de humedad del 30 % aproximadamente. A partir del cuarto día al grano de cacao se le puede dar exposición continua a la radiación solar hasta finalizar el proceso de secado con un contenido de humedad final entre el 7 % y el 8 % aproximadamente (Fundesyram, 2006).

Mientras que en los métodos artificiales (Samoa) la energía requerida para el secado es suministrada en unidades de calor diseñadas con esa finalidad. El horno se usa cuando el clima está muy lluvioso y el cacao no llega al punto de secado que se espera. En los centros de acopio de cacao en Tabasco se está usando el horno tipo Samoa que tiene una cámara central de ladrillos de barro donde está ubicada la cámara de fuego y sobre ella hay espacio para colocar las bandejas de madera, adentro de la cámara el calor circula hacia la cabecera donde sube por una ancha chimenea (Toledo, 2014).

El secado del grano de cacao en el horno debe ser lento y bien manejado realizando remociones constantes y uniformes. Si el cacao se seca muy rápido el grano adquiere un sabor muy ácido y es un grano de mala calidad, este tipo de secado presenta desventajas como lo son: altos costos en combustible, contaminación, si no se controla la temperatura puede alterar las características que brindan la calidad del producto.

Por lo anterior el presente trabajo tiene como principal objetivo diseñar un secador de cacao, utilizando tecnologías alternativas como lo es el panel solar, el cual nos permita generar un ahorro de energía eléctrica, disminuir los días de secado, reducir el contacto con roedores y combustibles además de aportar granos de mayor calidad organoléptica en comparación con el secado artificial. El secado natural produce mejor aroma pero depende de las condiciones climatológicas. Si el cacao se moja con lluvia aparecerán hongos que anularán la calidad del producto. El aire seco seca mejor que el húmedo, esto sugiere la posibilidad de mejorar el secado mediante el control de la humedad del aire atmosférico, que tradicionalmente es una variable no controlada (Vázquez, 2013).

A continuación se cita la siguiente información que se utilizó como antecedente para diseñar el secador solar tipo invernadero para el secado de granos de cacao.

En Villahermosa, Tabasco se realizó un estudio donde se evaluó el perfil de sabor de los diferentes genotipos de granos de cacao que fueron cultivados en la región de la Chontalpa, dichos granos pasaron por el proceso de fermentación y secado directo al sol por lo que se utilizó un secador tipo invernadero con la finalidad de obtener granos con pH menor a 6, después del proceso pos cosecha los granos se resguardaron en un ambiente controlado utilizando aire acondicionado y extractor de humedad, los resultados fueron de 94 y 96% de almendras bien fermentadas, el peso que se obtuvo fue de 0.93 a 1.25 g por grano y una cantidad de 80 a 107 granos por 100 gramos (Lázaro, 2013).

En Bogotá se evaluó la fermentación del cacao por lo que se realizó un estudio de los efectos de tiempo de fermentación y temperatura sobre el perfil de compuestos volátiles después 2, 4, 6, y 8 días de fermentación seguidos por temperaturas de 60, 70 y 80 °C. Estos tratamientos se compararon con un tipo de cacao seco producido en un secado de Samoa y por un proceso de secado solar. Un total de 58 compuestos volátiles se identificaron por SPME-HS/GC-MS y se clasificaron como: ésteres, alcoholes, ácidos, aldehídos, cetonas y otros compuestos. Seis días de fermentación fue suficiente para producir compuestos volátiles con apuntes de sabor deseable en granos de cacao, así como evitar la producción de compuestos con

apuntes fuera de sabor. El grano seco a 70 y 80 °C en el secado Samoa después de seis días de fermentación presentó características similares al obtenido por el secado solar (Rodríguez, 2012).

Barrios, 2008 en Tabasco, estudió el efecto del tiempo de secado, la profundidad de los granos de cacao en las bandeja, la temperatura y velocidad de extracción de aire, pH y contenido de fenoles totales en granos secos de cacao, el proceso fue secado Samoa en el que se usó un secador tipo bandejas, obteniendo una profundidad de lecho de 2.5 a 7.5 cm, un flujo de aire de 0.3 a 1.2 m/s y una temperatura de 40 a 70 °C. El tiempo de secado en las bandejas fue de 24 horas en comparación con el método tradicional de secado solar que tarda de 3 a 7 días.

En el estado de Veracruz, en un estudio realizado por Mendieta, 2011 se diseñaron distintos modelos de secadores solares tipo invernadero utilizando bambú como material para la estructura de los secadores; las características de los modelos triangulares fueron: lado frontal en triángulo equilátero de 2.6m de lado, altura 2.3m y longitud de 7m; con altura mayor de 2.5m, altura menor 1.8m, ancho 3.43m y longitud 7m para el modelo de un agua y para el modelo dos aguas la altura de las paredes laterales fueron de 1.8m, altura al centro de 2.5m, ancho de 3.96m y longitud 7m. En los secadores se utilizó una cubierta de plástico de 8m de ancho, 7 aletas de 1mx1mx0.2m de alto. Se demostró que el modelo triangular fue el más eficiente para el secado, se obtuvo una humedad menor a 12% en un tiempo de 3 a 12 días.

Mientras que en Ecuador, Plaza, 2012, diseñó e implementó una secadora híbrida para el control y monitoreo del proceso de secado del cacao; se utilizó la parte solar conjuntamente con el gas para su funcionamiento, por lo que se demostró que el sistema de control de flujo de aire a la cámara de secado es el que mantiene constante la temperatura de 100 °C en el interior de la cámara garantizando un mejor secado de los granos de cacao, además con posibilidades de secar mayor cantidad de granos en el menor tiempo.

En las instalaciones del INIFAP de Huimanguillo, Tabasco se realizó el diseño y se construyeron cinco secadores tipo túnel y/o invernadero para el secado del grano de cacao, evitando la contaminación de los granos, ya que los granos de cacao fermentado no estaban en contacto directo con el suelo. Estos secadores se realizaron con la intención de brindar apoyo técnico a los pequeños productores de la región de manera que pudieran generar mayor producción de granos de cacao seco en el menor tiempo posible (Rivera, 2013).

Diferentes autores han estudiado el comportamiento de los diversos secadores solares que existen, de forma general se les han instalado sensores de temperatura, de humedad y pH, de acuerdo al modo de operación (activo, pasivo, indirecto, mezclado y modos híbridos) que se requiere en el proceso (Montero, 2010).

El objetivo general de este trabajo que es el diseño de un secador tipo invernadero con paneles solares surgió debido a la disponibilidad de la materia prima (grano de cacao) en el estado de Tabasco y el norte de Chiapas. En Tabasco se registra un área cultivada de 40,782.70 hectáreas, con una producción de 16,269.56 toneladas, mientras que en Chiapas se cuenta con 20,544.40 hectáreas de área cultivada con una producción de 10,480.21 toneladas. El cultivo de cacao permite el sustento de productores y familias, además de ser un generador importante de empleos e ingresos en las diferentes etapas del cultivo y pos cosecha del cacao (SIAP, 2014).

En México el cacao que se produce en Tabasco y Chiapas es reconocido como de alta calidad por lo que es muy demandado en el mercado europeo y japonés, donde alcanza altos valores comerciales. En nuestro país el kilo de cacao se puede colocar alrededor de 3 dólares mientras que en el mercado exterior alcanza precios de hasta 12 dólares el kilo (De Castro, 2012).

Por lo que se establece una propuesta de diseño de un secador tipo invernadero utilizando panel solar para proporcionar al productor de cacao de la región una alternativa de secado amigable con el medio ambiente ya que la mayoría de los productores presentan problemas en los periodos de lluvia o disponen de espacios pequeños para realizar el proceso de secado, por lo que al utilizar el secador se

conservará el cacao seco durante los periodos fuera de la temporada de cultivo y cosecha sin que éste se vea afectado por la proliferación de bacterias y hongos.

Por otro lado esto permite mantener intacto el aroma y el sabor en sus diversas presentaciones, ya que al mantener el proceso de secado solar (natural) se eleva la calidad final del grano, se disminuyen los costos de producción del secado tradicional actual (Samoa) y se podrán alcanzar parámetros para su comercialización en nichos de mercado específicos.

Al implementar un panel solar para el secado de granos de cacao se busca que el proceso sea continuo, que en el día se utilice la energía solar y por las noches continúe mediante la activación del sistema fotovoltaico, de tal forma que el tiempo sea menor y a su vez los granos conserven sus características nutricionales considerando que el cacao es una excelente fuente de proteínas, grasas, fibras así como de minerales como potasio, magnesio y fósforo, primordiales en la dieta humana (Chevaux *et al.*, 2001).

El fruto del cacao es muy apreciado a nivel internacional y conserva un lugar privilegiado en la cultura de México pero, sobre todo, en Tabasco, lo que ha permitido que la conjugación de factores climáticos y la intervención del hombre en el manejo del cultivo; así como su proceso posterior a la cosecha, diferencian al grano del producido en otras zonas.

En el estado de Tabasco se consideran como importantes zonas productivas de cacao a las regiones de la Chontalpa, Sierra y Centro, a los cuales actualmente se les conoce como la “Región Grijalva” ya que aquí se produce la mayor parte del cacao tabasqueño denominado y conocido internacionalmente como “Cacao Grijalva”. El 26 de agosto de 2013, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesquero del Estado de Tabasco, solicitó la Declaración General de Protección de la Denominación de Origen “Cacao Grijalva”. Para ello, se aportó información de la cual destacan los documentos denominados “Caracterización de las Variedades de Cacao en Tabasco”, elaborado por el Instituto Nacional de

Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), “Diagnóstico del Cacao en México”, elaborado por la Universidad Autónoma de Chapingo y “El Cacao *Theobroma cacao* L en Tabasco”, del Centro de Investigación Regional del Golfo Centro de Campo Experimental Huimanguillo Tabasco y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Así como las aportaciones documentales exhibidas, se especificaron los factores naturales y humanos del Cacao Grijalva tales como:

- La situación geográfica y el clima de Tabasco presenta condiciones únicas para el crecimiento del cacao y ha sido una zona productora desde tiempos prehispánicos.
- Una de las características que otorga la identidad y la calidad del Cacao Grijalva, es que se produce gracias al actuar conjunto de la naturaleza y el hombre en lo que se denominan selvas domesticadas.
- La polinización de la flor de cacao se realiza principalmente y con efectividad por mosquitas del género *Forcipomyia*, con mayor abundancia durante los periodos lluviosos y en épocas de mayor floración del cacao.

La denominación de origen “Cacao Grijalva” otorgada por el IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial), sin duda alguna fortalecerá y reconocerá el cultivo de cacao tabasqueño, otorgará valor agregado a los productos derivados del mismo, elevando la competitividad local, mejorando el rendimiento económico y facilitando el acceso a mercados nacionales e internacionales,

De acuerdo a las condiciones geográficas que prevalecen en el estado, Tabasco es considerado de por sí un lugar idóneo para el cultivo del cacao, por lo que es necesario tener en cuenta que se deben conservar las características organolépticas del grano que demanda el mercado para su comercialización durante el tratamiento poscosecha. Por ello el secador que se diseñó en este trabajo presentará ventajas sobre los secadores tradicionales ya que se podrá realizar el secado solar añadiendo tecnología con el sistema fotovoltaico para el control de temperatura y humedad durante el secado. Esto ayudará a los pequeños y grandes productores que al

implementar nuevas tecnologías podrán obtener un grano seco de cacao de excelente calidad.

Con base a la información anterior el diseño de un secador de granos de cacao tipo invernadero con panel solar ayudará a resolver los siguientes problemas:

- Espacio: Disminuir el espacio ya que el secado natural al sol requiere de grandes patios para ello.
- Lluvia: En los periodos de lluvia se podrá contar con un secador cuyo proceso de secado sea continuo.
- Noche: Durante este lapso la jornada de secado se suspende ya que la energía solar se agota.
- Energía: El costo es elevado y cuando se utiliza combustible se incrementa el gasto.
- Tiempo: El tiempo que tarda en promedio es de 3 a 7 días si las condiciones son óptimas.
- Calidad: Mejorar la calidad organoléptica del grano del cacao para competir en mercados nacionales e internacionales.

OBJETIVOS:

OBJETIVO GENERAL:

Diseñar un secador tipo invernadero utilizando panel solar para el secado de granos de cacao.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Diseñar un secador tipo invernadero con panel solar para el secado de granos fermentados de cacao.
- Adaptar tecnología para un mejor funcionamiento y extracción de la humedad del grano de cacao.
- Adaptar energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable que participe en el proceso de secado.
- Definir y analizar los mejores materiales y diseño para la construcción de un prototipo experimental.
- Calcular los volúmenes de secado y estimar los tiempos para alcanzar la humedad final.

CAPITULO 1.- FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1.- ÁRBOL DE CACAO:

La especie (*Theobroma cacao L.*) es originaria de la cuenca alta del Amazonas específicamente entre los países: Colombia, Ecuador, Perú y Brasil. Esta especie es la más explotada comercialmente, por lo que se considera la más importante económicamente hablando. Para el cultivo de cacao se requieren zonas tropicales, en el caso del continente americano hay una amplia zona que abarca desde los paralelos 20° norte y 20° sur. La familia del cacao se halla en estado natural, en América, desde la amplia zona ubicada entre las cuencas del Amazonas y el Orinoco, en América del Sur, hasta las regiones centrales de Costa Rica, en Centroamérica, por lo que no ha sido posible determinar su origen. Aunque de manera silvestre las regiones de cultivo comprenden entre los 26 ° norte y 26° sur del Ecuador, de igual manera se cultiva en el Oeste de África y Asia (Smulders, 2004).

El árbol del cacao (figura 1) acostumbra a crecer hasta una altura de unos 10m cuando es productivo a partir de los 4-5 años, preferiblemente bajo la sombra de otras especies de mayor envergadura, aunque los métodos actuales de cultivo los dejan crecer solo hasta una altura de 3m para facilitar la recolección de los frutos, se trata de un árbol de hoja perenne y sus hojas tienen hasta unos 300mm de longitud.



Fuente: Afoakwa, 2010

Figura 1.- Árbol de cacao a; frutos en el tronco b; y en las ramas c.

Las flores y los frutos crecen del tronco del árbol y de las ramas más gruesas. Los frutos son una baya grande y ovalada que cuando son maduros tienen una longitud variable, entre 100mm a 350mm y un peso que puede oscilar desde 200g hasta aproximadamente 1kg (Mossu, 1992).

La apariencia externa es un indicador de su estado madurativo y por lo tanto del momento óptimo para la recolección; aunque, según la variedad genética existen considerables variaciones y las bayas pueden presentar distinto aspecto. Se considera que los frutos van del color verde (inmaduros) pasando por el amarillo (cuando van madurando), al rojo cuando ya son maduros y se pueden recolectar (figura 2).



Fuente: Afoakwa, 2010.

Figura 2.- Fruto del árbol de cacao, a: baya verde, b: baya madura amarilla y c: baya madura roja

1.2.- TIPOS DE CACAO:

El cacao es una planta tropical que comprende 22 especies, sin embargo basándose en las características morfológicas se ha clasificado en tres grupos: Criollo, Forastero y Trinitario.

Cacao Criollo: El cacao criollo fue bautizado así por los españoles al llegar a México. Es un cacao reconocido como fino de gran calidad, por su agradable sabor y exquisito aroma, reservado para la confección de chocolates finos. Se considera que el grupo de cacaos criollos fue domesticado por las culturas prehispánicas Olmecas y

Mayas, teniendo su centro dispersión por el sur de México, Centro América, parte de Colombia y Venezuela.

Se caracterizan por:

- Superficie rugosa.
- Forma alargada y puntiaguda de las mazorcas.
- Surcos bien pronunciados.
- Predominan los colores verdes y rojos.
- Los cotiledones frescos de las semillas son de color blanco a cremoso.

Su clase es de árboles delgados y los frutos son típicamente de cubierta delgada y esculpada con pigmentación rojiza, siendo considerado un grupo de muy buena calidad. Las formas Criollo (figura 3) muestran signos de depresión endogámica y, frecuentemente, más bajos rendimientos y mayor susceptibilidad a plagas, este tipo de cacao solamente abarca el 10% mundial de cacao en el mundo, el grano tiene una cascara fina suave y muy poco aromática.



Fuente: Afoakwa, 2010.

Figura 3.- Cacao criollo

Cacao Forastero: Estos tipos de cacao presentan menor calidad relacionada con el sabor y aroma que confieren sus granos al chocolate elaborados con ellos. Son también conocidos como forasteros del Alto y Bajo Amazonas o como cacao amargo (figura 4).

Se caracterizan por:

- Tener apariencia ovalada o amelonada.
- Forma esférica o calabacillo.
- Cascara lisa.
- De color verde pálido a blanquecino antes de la madurez.
- El color interno de la almendra es morado oscuro o violeta oscuro.

Este cacao es el más común, siendo mayor proveniente de África. La cáscara del grano es gruesa, resistente y sin mucho aroma, aproximadamente ocupa un 79% de la producción, considerándose de calidad media.



Fuente: Afoakwa, 2010.

Figura 4.- Cacao forastero

Cacao Trinitario: De origen híbrido entre formas Criollo y Forastero (figura 5), el grupo es respectivamente muy heterogéneo genéticamente y, morfológicamente, muy polimorfo, siendo imposible delimitarlo a través de características comunes y con algunos de éstos de mayor rendimiento y calidad que el forastero.



Fuente: Afoakwa, 2010.

Figura 5.- Cacao trinitario

Las plantas son normalmente muy robustas con frutos verdes o pigmentados y con semillas violeta claro a violeta oscuro, el 10% - 15 % de la producción mundial de cacao se proviene de la variedad Trinitario, el cacao trinitario posee características que se asemejan más a las del forastero, tiene un cuerpo fuerte como el forastero y un delicado sabor como el criollo.

1.3.- CARACTERÍSTICAS DEL CACAO:

La composición de la semilla del cacao depende de factores como el genotipo o las condiciones de crecimiento del árbol (características del suelo, clima, horas de insolación, entre otros) (Jinap *et al*, 1995). Aproximadamente del 48 al 57% del peso de la semilla descascarillada y seca del grano de cacao corresponde a su contenido en lípidos. La fracción lipídica del cacao se conoce como la manteca de cacao y es la responsable de buena parte de las tan apreciadas propiedades sensoriales del chocolate.

Las características sensoriales del chocolate están relacionadas con la composición del grano de cacao y las propiedades intrínsecas del mismo y éstas dictan su elección y aceptabilidad por parte de los consumidores. Estas propiedades se originan en los precursores del aroma que están presentes en los granos de cacao, en los tratamientos post-cosecha y finalmente se transforman en las características sensoriales del chocolate durante el proceso de fabricación, en el cual se desarrollan también las propiedades organolépticas más ligadas al aspecto y a la textura. Además de los factores inherentes mencionados, los ingredientes utilizados y las técnicas de procesado también influyen en que la calidad sensorial final del chocolate, concretamente en la apariencia, olor, aroma, gusto, sabor y textura (Afoakwa, 2010).

1.4.- TRATAMIENTO POS COSECHA DEL CACAO

El tratamiento pos cosecha del cacao comprende 2 etapas que son fermentación y secado, ambas importantes para lograr cacao de calidad, a continuación se describe cada una.

1.4.1.- Fermentación

La fermentación es un proceso natural que ocurre en determinados compuestos o elementos a partir de la acción de diferentes actores y que se podría simplificar como un proceso de oxidación incompleta, es una operación clave para la calidad del cacao, sobre todo cuando este se destina a la elaboración de chocolate. La fermentación limpia las semillas, evita la germinación y mejora la presentación de las semillas.

Durante el fermentado, la acción combinada y balanceada de temperatura, alcoholes, ácidos, PH y humedad matan el embrión, disminuyen el sabor amargo ya que pierde theobromina y se producen reacciones bioquímicas que forman el chocolate.

La fermentación debe realizarse en lugares bien ventilados, si las semillas no fermentan o el proceso se realiza mal o en forma deficiente, el resultado es un producto de baja calidad, conocido como “cacao corriente”. El tiempo de fermentación no debe ser mayor de tres días para los cacaos criollos o de cotiledón blanco y no debe ser mayor de ocho días para los cacaos forasteros o de cotiledón morado o púrpura.

Existen varios métodos para realizar la fermentación, siendo los más empleados la fermentación en montones, en sacos, en cajas, y el método Rohan. La fermentación del cacao es una de las etapas en el procesamiento post-cosecha que influye sobre todo en la calidad del producto final. La fermentación sigue siendo empírica y no da lugar a granos de calidad consistente, lo que obliga a los procesadores a realizar de forma continua cambios de sus formulaciones, es una reacción moderadamente exotérmica (93.3 kJ por molécula de glucosa consumida). Esto conduce a un aumento moderado de la temperatura de la masa, que alcanza los 35 a 40 ° C.

Al mismo tiempo, los polisacáridos en las células del tejido mucilaginoso se descomponen por la acción de las levaduras pectinolíticas. La mayor aireación de la masa debido a la desaparición del mucílago permite a las bacterias del ácido acético desarrollarse e intervenir, por oxidación, que convierte el etanol producido durante la fermentación alcohólica en ácido acético (Gálvez *et al.*, 2007).

1.4.2.- Secado

El secado es una operación unitaria mediante la cual se extrae humedad de un objeto, dependiendo del objeto a secar esta operación puede hacerse de varias maneras: En el caso del cacao, el secado permite que las semillas pierdan el exceso de humedad, se enfoca en la separación de agua y ácido acético del alimento, en la que estos luego de ser separados se eliminan a través de vapor con aire caliente. Cuando se va secar cacao fermentado, es importante reconocer que la fermentación continuará durante las etapas iniciales del secado durante este tiempo las semillas de cacao terminan los cambios para obtener el sabor y aroma a chocolate. También se producen cambios en el color, apareciendo el color típico marrón del cacao fermentado y secado correctamente. Durante el secado, lo ideal es reducir el contenido de humedad de las semillas desde el 55 % hasta un 6 a 8 %. el cacao se seca con fines de comercialización y conservación.

El secado es un método ampliamente usado para la conservación de los alimentos, ya que recientemente en la industria alimentaria se ha evitado usar químicos. El objetivo del secado es eliminar agua hasta un nivel en el cual el crecimiento microbiano y las reacciones de degradación desaparezcan casi por completo. También proporcionan espacio más pequeño para el almacenaje y un peso más ligero para el transporte (Geankoplis, 1998).

Existen distintos métodos de secado. El más económico es el secado natural, que aprovecha el calor radiante de los rayos solares, este secado produce mejor aroma pero depende de las condiciones climatológicas. Si el cacao se moja con lluvia aparecerán hongos que anularán la calidad del producto, cuando la humedad se

reduce demasiado rápido, la cáscara se vuelve excesivamente quebradiza, quedando los cotiledones aún húmedos lo que aumenta la susceptibilidad al ataque de hongos. Un secado lento, hace que las semillas permanezcan húmedas más tiempo y esto facilita la difusión de los ácidos orgánicos que eventualmente proporcionan las deseadas cualidades de sabor y aroma. Si lo que se desea es mejorar la calidad del aroma del producto, es fácil concluir que el mejor secador de cacao será el que mejor imite la acción del secado al sol. Sin embargo, la tecnología de las secadoras típicas no se ha dirigido hacia ese objetivo (Gálvez *et al.*, 2007).

1.4.2.1.- Curva de secado

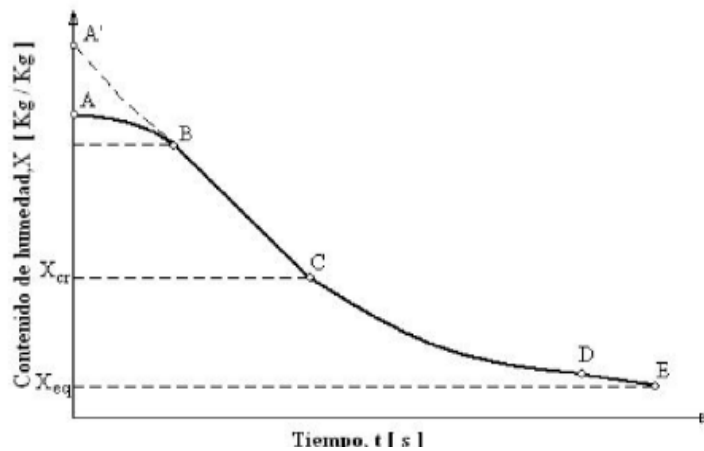
Un proceso de secado es descrito usualmente por diagramas con los siguientes aspectos:

1. Contenido de humedad contra tiempo de secado (*Curva de secado*).
2. Velocidad de secado contra contenido de humedad del material (*Curva de velocidad de secado*).
3. Temperatura del material contra contenido de humedad (*Curva de temperatura*).

Estas curvas son obtenidas bajo condiciones de laboratorio donde se mide el cambio de masa y temperatura con el tiempo a base de muestreo. El proceso de secado es obtenido con estado estable teniendo T_g, U_g y Y como constantes. Usando aire caliente como agente de secado. La letra Y es el contenido de humedad absoluta de masa en el aire. Esto quiere decir el peso de masa de vapor de agua por peso de masa de aire seco Ec.1.

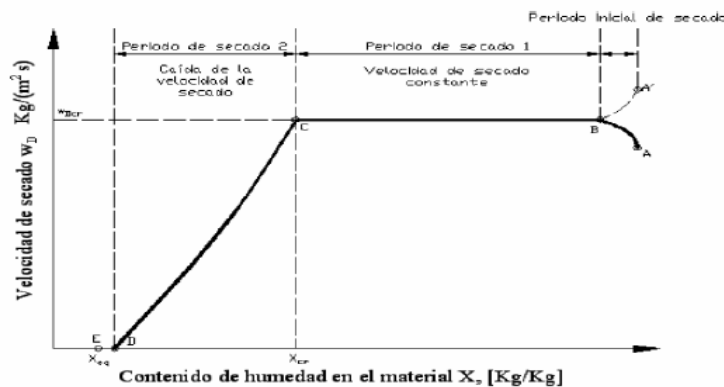
Ec. 1

$$Y = \frac{mA}{mB} = \frac{\text{kg de vapor de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$



Fuente: Dávila, 2014
Figura 6.- Curva de secado.

Este tipo de curva muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado (Fig.6). En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrado en la curva A-B. Al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal del tipo $X=f(t)$, en este periodo la velocidad de secado es una recta constante (B-C). El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llega a un punto crítico (C) donde la línea recta tiende a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad X_{eq} donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado, esto quiere decir que el punto (E) nunca es tocado.



Fuente: Dávila, 2014.
Figura 7.- Curva de velocidad de secado.

Este tipo de curva indica con que velocidad se seca el material (Fig.7). Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos. Este diagrama tiene la función

WD= f(x), donde muestra la cantidad de humedad removida desde el material secado por unidad de tiempo por unidad de superficie secada.

$$\text{Ec.2} \quad WD = - \frac{m dX}{A dt} \quad N = \frac{dX}{dt}$$

Donde:

WD= velocidad de secado del material, por unidad de tiempo y superficie secada.

N= diferencial de la humedad respecto del tiempo de secado.

En esta gráfica también pueden verse los periodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado. La explicación de la forma de la curva de secado está conectada con el fenómeno de transferencia de masa y calor. Antes del secado la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad desatada, libre o capilar. La evaporación empieza con el contacto con el aire. Considerando la resistencia de la transferencia de masa, tenemos las condiciones externas y la capa circulante de gas; limitando la velocidad de secado. Así la velocidad de evaporación puede expresarse como el coeficiente de transferencia de masa y un gradiente de humedad del aire.

1.4.2.2.- Tiempo de secado.

El tiempo de secado depende del material a secar, esto definirá las características de la curva de secado correspondiente, el tiempo de secado se debe determinar indistintamente para cada uno de los periodos de secado. Para el secado de granos se consideran dos etapas durante el proceso, a velocidad constante y a velocidad decreciente (Páez, 1990).

La ecuación 3 define la velocidad de secado, esta puede reacomodarse para obtener el tiempo de secado.

Ec.3
$$\int_0^t dt = -\frac{mS}{A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dX}{WD}$$

Donde X1 y X2 son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo t, respectivamente, el secado en este periodo es constante y por tanto de la Ec.3 se obtiene el tiempo para la primera parte del periodo de secado.

Ec.4
$$tI = \frac{mS}{AWDI} (X1 - X_{cr})$$

Obsérvese que X2 = Xcr en la (Ec. 3) esto es porque representa el contenido de humedad al final del primer periodo. En este período de secado influye la velocidad de secado WDI y depende de los coeficientes de transferencia de calor y masa h y kg entre el agente de secado y la superficie a secar.

Sin embargo los materiales porosos representan un reto debido a su temperatura no uniforme que crea dificultades en la estimación del contenido crítico de humedad. Es por eso que a veces es mejor hacer experimentos bajo condiciones similares a las que se usan en la industria.

1.5.- PRODUCCIÓN DE CACAO EN TABASCO

El cacao es uno de los productos más apreciados en el mercado internacional. Sus derivados tienen gran demanda y por lo tanto alto valor comercial además su industrialización representa una importante fuente de ingresos y empleos.

México es el noveno productor de cacao en grano en el mundo. La producción nacional se genera principalmente en los estados de Tabasco, Chiapas, Guerrero y Oaxaca. El Servicio de Información y Estadística Agropecuaria y Pesquera (SIAP) de

la Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) del gobierno mexicano reporta que, en el período de 1998 a 2008 la producción promedio de Tabasco cubría el 70.1 % del total de la producción nacional. En 2010, como consecuencia de la epidemia de moniliasis, la producción nacional disminuyó. Se estima que la producción anual en México asciende a las 27 mil toneladas de producto con un valor mayor a los mil millones de pesos, sin embargo, Tabasco sigue siendo el productor mayoritario con un 60 % de la producción nacional (SIAP, 2014).

1.6.- MÉTODOS DE SECADO

El hombre desde principios de su historia, se ha preocupado por la conservación de sus alimentos, debido a que no los puede obtener de manera natural en todas las épocas del año y también porque hay alimentos que se producen específicamente en diferentes partes del planeta. Por lo tanto hay que lograr prolongar la vida de almacenamiento y anaquel de los productos para consumo humano (Barbosa, 2000).

En si el secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido volátil de un material sólido. Esta operación, mayormente se lleva a cabo en la etapa final del proceso general al que se somete el material en tratamiento y el producto que se extrae de un secador está listo para ser empaquetado y almacenado.

El secado de granos de cacao, se puede clasificar en dos tipos, dependiendo de la fuente de energía a emplear: el secado natural o al sol y el secado artificial. Cada uno tiene sus características que les dan ventajas y desventajas particulares. En recientes años las técnicas de secado vía solar se han desarrollado, bajo el concepto de no generar contaminantes de hidrocarburos como el caso de secadores artificiales convencionales, además, de ser empleados para el caso de productos orgánicos.

1.6.1.- Secado Natural

El secado natural consiste en la exposición directa del sol sobre los granos de cacao con objetivo de eliminar principalmente humedad y acidez volátil, este método es comúnmente usado por los productores de las diversas regiones cacaoteras en todo mundo, existen variantes en la forma de exposición de los granos en este tipo de secado, dependiendo de la región geográfica de cultivo. En la (figura 8) se representa la acción de los rayos solares sobre el alimento con el objetivo de deshidratar el alimento.



Fuente: García, 2007

Figura 8.- Representación de la acción de los rayos solares sobre granos de cacao.

En la (figura 9) se aprecia el tipo de secado natural que se aplica en algunos países tropicales, asiáticos y latinoamericanos, en estos se coloca el cacao en capas delgadas sobre mallas soportadas en un marco y son removidas manualmente.



Fuente: García, 2007.

Figura 9.- Secado al sol

El secado al sol permite una mejor oxidación de taninos y mayor evaporación de ácido acético que cualquier otro tipo de secado, lo que le confiere un mejor sabor.

Este método tiene ventajas como:

- a) Es simple.
- b) Económico
- c) Maneja pequeñas cantidades.

Entre las desventajas podemos mencionar:

- a) Tiempo de duración más largo comparándolo con el artificial.
- b) Necesidad de extensas superficies.
- c) No se protege de la lluvia, suciedad, polvo.

1.6.2.- Secado Artificial

El secado artificial tiene el mismo objetivo que el natural, sin embargo presentan diferencias. Los procesos de secado se clasifican dependiendo de las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua, pueden ser por secado convectivo con el uso de aire caliente a presión atmosférica; al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto por una pared metálica o por radiación; y por liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado, el secado se puede desarrollar en equipos cerrados ya sea solar o industrial que mejoran la calidad del producto final.

Los equipos de secado varían desde secador tipo bandejas hasta el tipo túnel. En el secador de bandejas, que también se llama secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimientos, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad. Un secador de bandejas típico, tiene bandejas que se cargan y se descargan de un gabinete. Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, en

especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado. En el caso de materiales granulares, como el cacao, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire.

El secado tipo túnel consiste en compartimientos de bandejas o carretillas que operan en serie. Los sólidos se colocan sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos. Muchos alimentos se secan por este procedimiento, incluyendo el cacao (Geankoplis, 1998).

De este método podríamos mencionar las siguientes ventajas;

- a) Una disminución en la pérdida de producto seco.
- b) Mejora en condiciones higiénicas.
- c) Reduce el riesgo de contaminación.
- d) Tiempo de secado más corto en comparación al natural.

Entre las desventajas podemos mencionar las siguientes:

- a) Un sabor más débil.
- b) Acidez más alta
- c) Un color marrón menos intenso

1.7.- TIPOS DE SECADORES

1.7.1.- Secadores comerciales

Las máquinas secadoras comerciales pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Secadoras de flujo continuo
 - Verticales (tipo torre)
 - de flujo mixto (de caballetes)
 - de flujo cruzado (de columnas)
 - de persianas
 - de flujo contracorriente
 - de flujo concurrente
 - De cascadas
 - Horizontales
 - de flujo cruzado (de columnas hexagonales)
 - de flujo mixto
 - de lecho plano
 - fijo
 - fluido
- Secadoras en tandas
 - De flujo cruzado
 - con recirculación
 - estáticas
 - De flujo mixto
 - con recirculación
 - estáticas
- Silos secadores
 - De flujo contracorriente
 - De flujo cruzado

Tanto las máquinas verticales (de menor tamaño) como las de cascadas, horizontales y secadoras en tandas, pueden ser fijas o transportables.

Esta clasificación comprende solamente a las secadoras comerciales, o sea aquellas que se emplean en las plantas de acopio de granos de una capacidad media a alta.

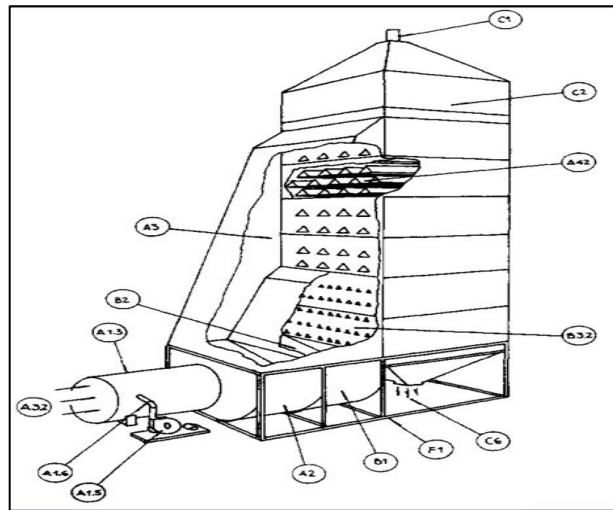
A nivel de pequeño productor existe una amplia gama de diversos equipos de secado, la mayoría de los cuales son de reducida capacidad y de diseños simples, que se utilizan en países donde todavía no ha llegado una tecnología avanzada.

1.7.1.1.- Secadoras de flujo continuo.

Son aquellas en las que el grano se introduce y descarga en forma continua o intermitente, permaneciendo constantemente llenas las secciones de secado y enfriamiento. Las operaciones de secado y enfriamiento se efectúan en forma simultánea e ininterrumpida.

Las secadoras verticales, también llamadas "tipo torre", se caracterizan por el recorrido del grano, desde arriba hacia abajo, y pueden ser clasificadas en varios grupos, de acuerdo al tipo de flujo.

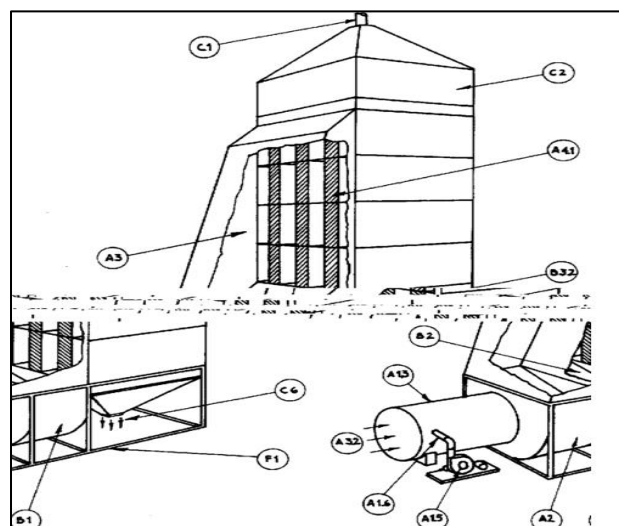
Las secadoras de flujo mixto, también llamadas de "caballetes" (figura 10), tienen como elemento principal, en las zonas de secado y enfriamiento, un conjunto de conductos en forma de V invertida, por donde circula el aire caliente o frío.



Fuente: García, 2007.

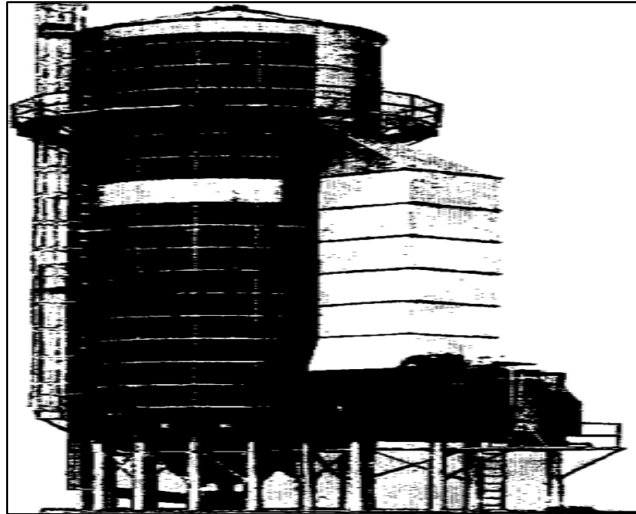
Figura 10.- Secadora de flujo mixto.

Las de flujo cruzado, también llamadas "de columnas" (figura 11) poseen columnas o venas rectas por donde circula por gravedad el grano; las columnas están formadas por paredes de chapas perforadas, las que atraviesa el aire caliente (o frío) en forma cruzada o perpendicular al espesor de la columna. Se conocen también secadoras de columnas de forma circular (figura 12).



Fuente: García, 2007

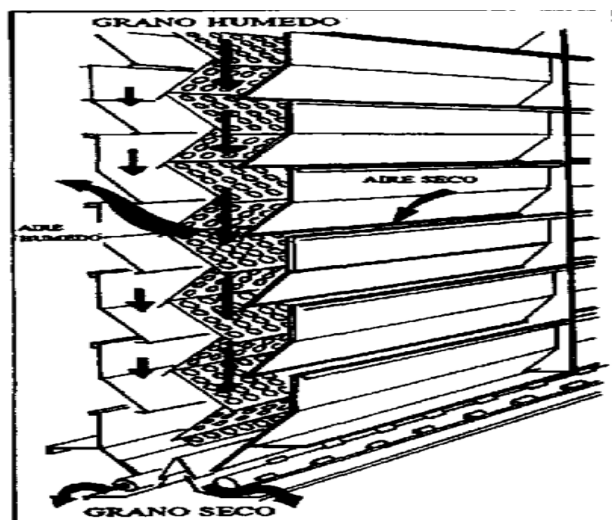
Figura 11.- Secadora de flujo cruzado o columnas.



Fuente: García, 2007.

Figura 12.- Secadora de columnas de forma circular.

Las secadoras de persianas tienen su cuerpo principal formado por tres tabiques verticales, (figura 13) siendo los dos exteriores abiertos en las dos caras, y el tabique medio en zig-zag con grandes perforaciones. Este sistema permite que el grano situado en el costado por donde ingresa el aire caliente descienda más rápidamente que el grano situado en el costado opuesto, con el fin de asegurar un secado más homogéneo. El espesor de la columna es de alrededor de 40 cm.



Fuente: García, 2007.

Figura 13.- Secadora de persianas.

Las de flujo contracorriente y de flujos concurrentes se conocen como de flujos paralelos (de aire y de grano). Las de flujo contracorriente son aquellas en las que el aire y el grano marchan en la misma dirección, pero en sentido contrario. Las de flujo concurrente son las que el aire y el grano marchan en la misma dirección y en el mismo sentido.

1.7.1.2.- Secadoras flujo concurrente

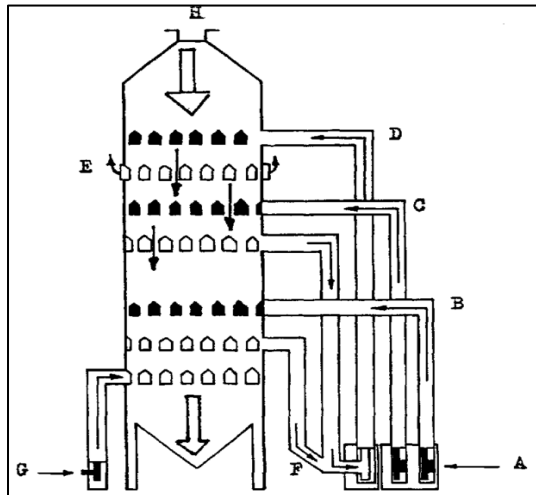
En este tipo, el grano y el aire de secado fluyen en la misma dirección y sentido. De esta forma el aire caliente se encuentra con grano frío y húmedo, pero la transferencia de calor y humedad que tiene lugar asegura que la temperatura del grano no alcance la temperatura del aire de entrada y que descienda rápidamente.

Este diseño tiene la ventaja que se pueden emplear muy altas temperaturas del aire, que originan altas velocidades de secado sin sobrecalentar el grano. Este último está sometido a un tiempo de permanencia más corto, por lo cual no es muy afectado.

Se ha comprobado también que el consumo específico de energía se encuentra entre 850 y 900 kcal por kg. de agua evaporada, que significa una buena eficiencia térmica.

En la práctica se ha comprobado que la extracción de humedad por cada tratamiento de flujo concurrente no supera los dos puntos de humedad, de manera que las secadoras comerciales existentes tienen dos o tres etapas, separadas cada una por secciones de reposo. Tales máquinas son muy altas, la potencia consumida es elevada y los tiempos de residencia más prolongada, todo lo cual está limitando, hasta ahora, la difusión de modelos de este tipo, así como su mayor costo inicial.

Se observa en la (figura 14) una secadora de este diseño, de tres etapas con temperaturas diferenciales con enfriado en flujo contracorriente.



Fuente: García, 2007.

Figura 14.- Secadora de flujos concurrentes.

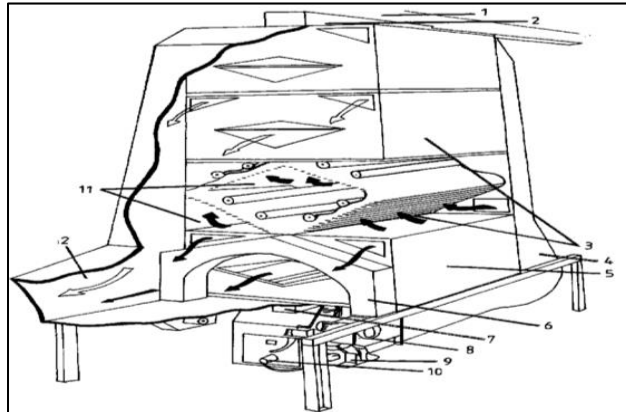
1.7.1.3.- Secadoras en cascadas

Estas máquinas están formadas por uno o dos planos inclinados, compuestos por persianas (las que atraviesa el aire) por las cuales el grano va descendiendo en forma de una cascada continua.

Este sistema tiene la ventaja de que no se tapan agujeros (porque no existen) con borra o basura, como en otras secadoras que tienen paredes perforadas. También son aptas para secar semillas muy pequeñas, como calza, tréboles y otras similares, reduciendo el caudal de aire.

La corriente de aire que pasa por las persianas, además de su función principal de secar y enfriar, realiza una buena limpieza del grano. Las impurezas arrastradas tampoco caen en el plenum o cámara de aire caliente, con lo cual el riesgo de incendio es reducido a un mínimo. Como son equipos de poca inclinación ocupan un área superficial mayor que las secadoras tipo torre. Además la potencia absorbida por toneladas es casi el doble que las secadoras mencionadas.

Con el fin de aumentar la capacidad de secado se han fabricado secadoras con este mismo principio de cascadas, pero verticales, formadas por módulos de forma romboidal (figura 15) que pueden montarse uno arriba del otro, obteniéndose secadoras de hasta 100 t/hora.



Fuente: García, 2007.

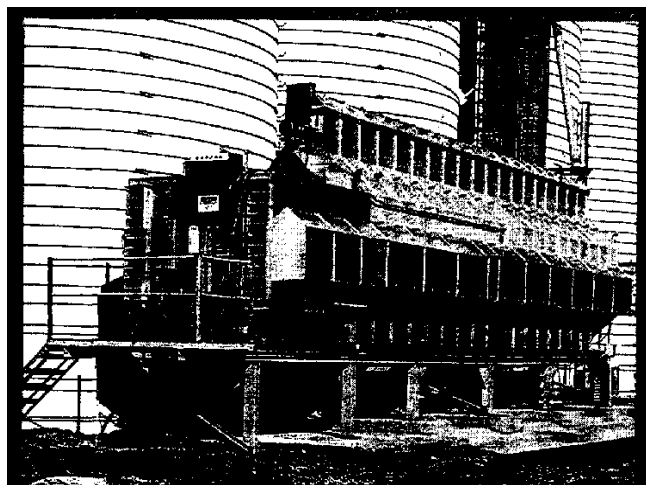
Figura 15.- Secadora de cascadas de forma romboidal.

En general, estas secadoras de lecho en cascadas emplean mayores caudales de aire que las secadoras de flujo mixto, pero trabajan a menores temperaturas del aire de secado. Sus fabricantes dicen que por dichas razones son preferidas estas máquinas por las malterías y los elaboradores de arroz.

1.7.1.4.- Secadores horizontales

Se ubican en este grupo dos tipos: las secadoras horizontales de columnas hexagonales y las secadoras horizontales planas.

Las primeras son similares en su diseño a las secadoras en tandas descritas en el Capítulo VI, pero se diferencian porque su operación es continua, tienen ciclo de enfriamiento, son más complejas, y suelen ser más largas (figura 16).

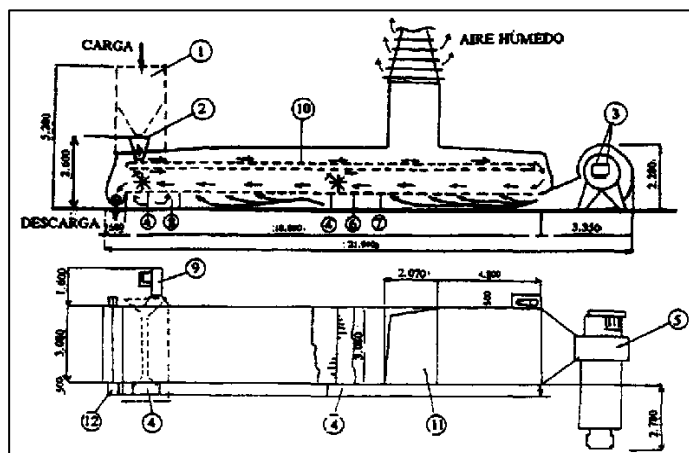


Fuente: García, 2007.

Figura 16.- Secadora horizontal de columnas hexagonales.

La capacidad de estas máquinas se aumenta haciéndolas de mayor longitud. Algunas marcas están formadas por módulos superpuestos, en los que cada módulo es una secadora individual. Esta última disposición tiene la ventaja de que cada módulo puede tener temperaturas de secado diferentes, mayores en los módulos superiores y menores en los inferiores; al mismo tiempo se detienen o suprimen los ventiladores de aire frío (excepto en el módulo inferior), intercalando de esta forma períodos de reposo que mejoran la calidad y eficiencia del proceso.

Las secadoras horizontales planas se caracterizan por tener la sección de secado y enfriamiento en posición horizontal plana. Pueden ser clasificadas en dos modelos: de lecho fijo y de lecho fluido. Las de lecho fijo (figura 17) tienen una cámara de secado plana de un ancho de unos 3 m y una longitud entre 10 y 15 m.



Fuente: García, 2007.

Figura 17.- Secadora horizontal de lecho fijo.

El grano es removido continuamente por un agitador que avanza y retrocede, y es transportado por un piso móvil hacia el extremo de salida. En la última parte de la máquina se lleva a cabo el enfriado del grano.

El grano avanza en capas de 30 a 48 cm, removidas regularmente, produciéndose así un buen contacto entre grano y aire. Según sus constructores, estas características les permiten obtener una alta calidad de grano seco.

1.7.2.- Secadores Solares

Una de las principales ventajas de los secadores solares son las temperaturas más elevadas que estas presentan lo que nos da un secado más rápido y con consecuencia una humedad menor. Los secadores solares están formadas básicamente por el colector solar y la cámara de secado, en el colector solar es donde el aire se calienta debido a la radiación solar y la cámara de secado es donde es puesto el producto a deshidratar, el aire que circula del colector solar a la cámara de secado se hace por circulación forzada y circulación natural. Dentro de los secadores solares se presentan dos tipos; los secadores solares directas y los secadores solares indirectos.

1.7.2.1.- Secadores solares directos

Los secadores solares directos (figura 18) poseen la cámara de secado y el colector solar unidas haciendo que la cámara de secado también sea de colector solar recibiendo la radiación solar, en estos tipos de secadores la radiación solar es absorbida por el producto que se encuentra en la cámara de secado, este método aprovecha la energía del sol más eficientemente para secar la humedad existente en el producto. Estos modelos son más económicos debido a que combina la cámara de secado y el colector solar en una sola estructura, en lo que refiere al tipo de sistema de circulación de aire, por lo general es de circulación natural.



Fuente: Plaza, 2012.

Figura 18.- Secador solar directo.

Las principales características de estos tipos de sistemas son los siguientes:

- ✓ El secado se realiza por la transferencia de calor entre los gases calientes generados por el colector solar y el producto húmedo, en donde los gases calientes extraen líquidos y separa el vapor en el producto.
- ✓ Es muy eficiente ya que consume más combustible por kg de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad en el sólido.

- ✓ Los gases o aires que pueden ser utilizados en la secadora directa como elemento secante puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, gas inerte calentado o vapor de agua sobrecalentado.
- ✓ La eficiencia mejora ya que incrementa la temperatura del ambiente logrando un secado más rápido.

1.7.2.2.- Secadores solares indirectos

La principal característica de los secadores solares indirectos (figura 19) es que el colector y la cámara de secado forman dos unidades independientes entre sí es decir la cámara de secado no recibe radiación solar y el colector solar es el encargado de producir el aire caliente, otra importante diferencia es la transferencia de calor y la separación del vapor, entre las principales características de estos secadores son:

- ✓ El calor generado se pasa al producto a través de una lámina de metal.
- ✓ Las temperaturas que se obtienen van desde – 0 grados a 350 grados en secadoras que utilizan algún tipo de combustible.
- ✓ Para aumentar la eficiencia del traspaso de calor se necesita un medio para agitar o remover el producto de la superficie metálica.

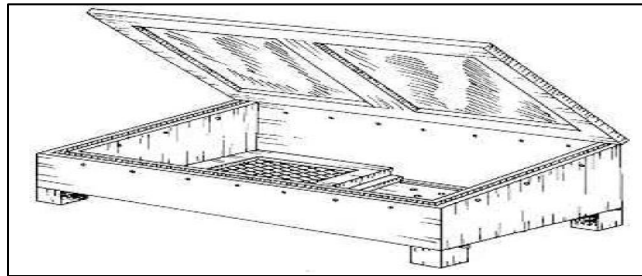


Fuente: Plaza, 2012.

Figura 19.- Secador solar indirecto.

1.7.2.3.- Secador de gabinete (tipo Brace o Lawand)

Consiste en un cajón rectangular con un techo de vidrio, el interior de la caja se pinta de negro, tanto como paredes y piso cuenta con un material aislante para aumentar el grado de calor, la circulación del aire es de tipo natural entrando por los agujeros del piso y saliendo por los de la parte de arriba (figura 20).

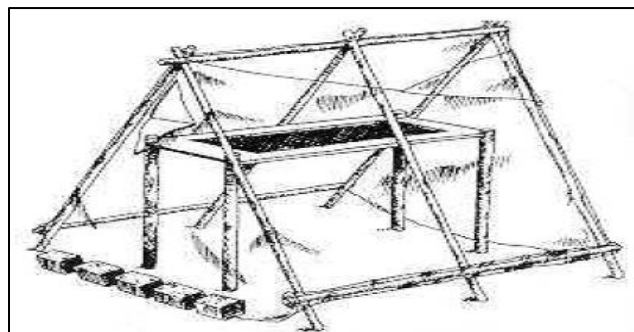


Fuente: Plaza, 2012.

Figura 20.- Secador de gabinete.

1.7.2.4.- Secador tipo tienda de campaña

Es uno de los modelos más básicos de los que existen, su estructura tiene la forma de una tienda de campaña en la cual el producto a secarse se coloca en el interior, para un mejor rendimiento el piso es de color oscuro y sus paredes son de plástico, el control de temperaturas se les hace abriendo o cerrando las aberturas laterales que posee (figura 21).

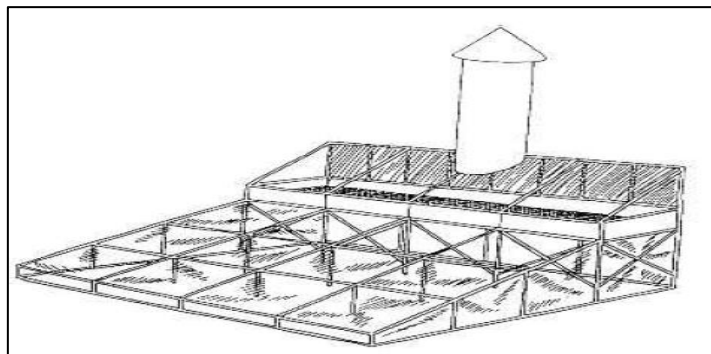


Fuente: Plaza, 2012.

Figura 21.- Secador tipo tienda de campaña.

1.7.2.5.- Secador tipo chimenea con capacidad para una tonelada

Está formada por un colector pintado de negro y una cámara de secado en la cual se ha acoplado una chimenea para la evacuación del aire caliente, la colocación del producto se hace en bandejas, toda la infraestructura está cubierta de plástico transparente, la estructura puede ser de madera o metal (figura 22).

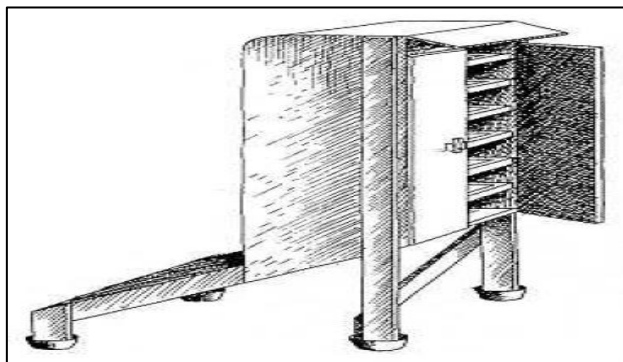


Fuente: Plaza, 2012.

Figura 22.- Secador tipo chimenea.

1.7.2.6.- Secador tipo colector solar

Este modelo presenta un principio de funcionamiento similar al del secador tipo chimenea, está formado por un colector solar y una cámara de secado en la cual se coloca el producto en bandejas (figura 23).



Fuente: Plaza, 2012.

Figura 23.- Secador tipo colector solar

1.7.2.7.- Secador solar tipo invernadero

Este tipo de secador es de tipo directo y por aireación (ventilación) aunque algunos modelos más avanzados utilizan un colector solar para aumentar su rendimiento, se basa en el principio de evaporación, por diferencia de presiones parciales del agua del producto y el agua del aire secado, esto lo hace en dos etapas una vespertina y nocturna y la segunda es diurna, el funcionamiento de máxima eficiencia solo requiere un ciclo.

1.8.- ENERGIA SOLAR

No dejando fuera la energía solar que es la principal fuente de alimentación en este trabajo se sabe que esta energía es transmitida por medio de ondas electromagnéticas presentes en los rayos solares, las cuales son generadas en forma continua y emitida permanentemente al espacio, esta energía la podemos percibir en forma de luz y calor. Cerca del 70% de la energía solar recibida por la tierra es absorbida por la atmósfera, la tierra y por los océanos, mientras que el 30% restante es reflejado por la atmósfera de regreso al espacio.

Es la energía radiante del sol recibida en la tierra, es una fuente de energía que tiene varias importantes ventajas sobre otras y que, para su aprovechamiento, también presenta distintas dificultades. Entre sus ventajas se destacan principalmente su naturaleza inagotable, renovable y su utilización libre de polución. Pero, para su utilización, es necesario tener en cuenta su naturaleza intermitente, su variabilidad fuera del control del hombre y su baja densidad de potencia. Estas dificultades conllevan entonces la necesidad de transformarla a otra forma de energía para su almacenamiento y posterior uso. La baja densidad de potencia resulta en que es una fuente extensiva: para mayor potencia, mayor extensión de equipos de conversión. La ingeniería solar precisamente se ocupa de asegurar el suministro confiable de energía para el usuario teniendo en cuenta estas características.

La energía solar se transforma en la naturaleza en otras formas de energía, como biomasa y energía eólica, pero también se puede transformar a otras formas de energía como calor y electricidad. Las aplicaciones menos difundidas son el secado solar de productos agrícolas y la destilación solar de agua de mar u otras aguas no potables. (Rodríguez, 2009).

1.9.- SISTEMAS SOLARES

La energía solar posee una elevada calidad energética y tiene un impacto negativo mucho menor comparado con otras tecnologías energéticas, presentan dos características principales que la hace diferente a otras fuentes de energía y estos son: dispersión e intermitencia.

- Dispersión: aun en condiciones favorables la densidad energética del sol es muy poca apenas alcanza 1 kW/m^2 por lo cual se requiere utilizar superficie de captación y sistema concentradores para aumentar dicha densidad.
- Intermitencia: la luz del sol no es continua por lo cual se requiere sistemas o dispositivos de almacenamientos.

Las dos maneras de aprovechar la energía solar son de forma pasiva o activa:

- Pasiva: el aprovechamiento de la energía no necesita ningún tipo de sistema para captarla.
- Activa: utiliza sistemas concentradores para aumentar el rendimiento energético.

1.10.- INVERNADERO

El invernadero se define como una construcción de madera, de hierro u de otro material, cubierta por cristales, provista por lo general de calefacción, que a veces, está iluminada artificialmente y en donde se pueden cultivar hortalizas tempranas, flores y plantas verdes, en épocas en la que la luz del lugar en donde se está cultivando serían insuficientes para su crecimiento y su fructificación (Alpi, 1991).

Un invernadero es móvil tanto si está construido con una armadura desmontable, como si está colocado encima de una estructura que le permita moverse sobre unas vías. Los invernaderos de armadura desmontable se usan frecuentemente en los cultivos florales y hortícolas y pueden tener unos 6.5 m de ancho como máximo.

1.11.- CELDA FOTOVOLTAICA

Una celda fotovoltaica 32, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotoeléctrico. A su vez el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética, estos electrones libres, al ser capturados generan una corriente eléctrica.

La unión de celdas fotovoltaicas da origen a un panel fotovoltaico, el que consiste en una red de celdas solares conectadas en serie para aumentar la tensión de salida continua hasta el valor deseado. También se conectan en paralelo con el propósito de aumentar la corriente de salida del sistema.

1.11.1.- Funcionamiento de un panel fotovoltaico

El principio de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos se basa en el efecto fotovoltaico o efecto fotoeléctrico, mediante la captación de fotones provenientes de la luz solar, los cuales inciden con una cierta cantidad de energía en la superficie del panel, esta interacción provoca el desprendimiento de los electrones de los átomos de silicio, rompiendo y atravesando la barrera de potencial de la capa semiconductor. Esto genera una diferencia de potencial en la capa N con respecto a la P. Luego si se conecta una carga eléctrica o elemento de consumo entre los terminales del panel se iniciará una circulación de corriente continua.

El nivel de energía proporcionado por un panel fotovoltaico depende de lo siguiente:

- Tipo de panel y área del mismo
- Nivel de radiación e insolación
- Longitud de onda de la luz solar

Una celda fotovoltaica común de silicio monocristalino de 100 cm² de superficie, puede producir aproximadamente 1.5 Watt de energía, a 0.5 volt (CC) y 3 amperes de corriente bajo condiciones óptimas (luz solar en pleno verano a una radiación de 1000W/m²), la energía entregada por la celda es casi directamente proporcional al nivel de radiación solar (Pérez, 2009).

De acuerdo a toda la literatura revisada para el diseño del secador que es el objetivo principal de este trabajo, se llegó a la conclusión que el modelo ideal es de tipo invernadero, esto por el espacio, condiciones climáticas y por las bandejas, ventilación para la liberación de ácidos, por el tiempo que se considera reducir en el proceso y por conservar las características organolépticas del cacao y así poder seguir comercializando para su posterior uso en los productos derivados del cacao.

CAPITULO 2.- METODOLOGÍA

La metodología del proyecto consistió en dos etapas:

- Investigación de datos geográficos del lugar.
- Diseño del secador.

2.1.- BUSQUEDA DE DATOS GEOGRÁFICOS DEL LUGAR

Se realizó la búsqueda de datos del lugar donde se implementará el uso del secador solar considerando para ello factores como temperatura, humedad, periodos de lluvia, ubicación exacta, orientación solar, periodo de cosecha y producción de cacao entre otros.

2.2.- CARACTERÍSTICAS DE SELECCIÓN DEL DISEÑO DEL SECADOR

Para realizar el diseño del secador se tomaron en cuenta los siguientes trabajos y recomendaciones como los del Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA, 1994), que sugiere para la construcción de secadores tipo invernadero, colocar el grano de cacao en bandejas de malla o lamina a 1m del suelo, así como utilizar en el techo un material grueso y transparente, con una altura del nivel del suelo de 2 m, con una orientación de oriente a poniente para permitir la circulación del aire y evitar que el producto entre en contacto con la lluvia o el sereno.

También se tomaron en cuenta las sugerencias de la Certificadora Mexicana de Productos y Procesos Ecológicos (CERTIMEX, 2009), comité de expertos de los estados de Tabasco y norte de Chiapas, que manejan las normas para la certificación del cacao y que entre sus lineamientos especifican que en la etapa de secado se tienen que cumplir requisitos tales como; el aprovechamiento máximo de la energía del sol, evitar el contacto del grano con el suelo y evitar el uso del combustible fósil (gasolina, diésel, petróleo) que utilizan los secadores tipo Samoa.

Así mismo se revisaron los trabajos de Restrepo y Burbano, 2005 en Amatlán de los Reyes, Veracruz, los cuales compararon diferentes tipos de secadores solares encontrando que la mejor alternativa eran los secadores tipo invernaderos con cubierta de plástico térmico, como el secador tipo parabólico de 20 m² que consta de estructura de bambú y plástico.

Roa *et al.*, 2000, recomiendan el uso de estructuras de madera, cubiertas de polietileno, y una chimenea para facilitar la circulación de aire y reducir las pérdidas de convección de calor durante el secado con secadores solares. Los autores proponen el uso de doble capa de polietileno en las paredes, en donde la exterior debe ser más transparente que la interior. Para que el secado sea más rápido recomiendan que la capa de granos no deba ser mayor a 3 cm.

El secador solar diseñado por el Danish Technological Institute, 2002, para el secado de granos y semillas, considera el uso de ventiladores alimentados por paneles de celdas fotovoltaicas para lograr un mejor secado. Con estos secadores fue posible reducir el contenido de humedad de un 20 al 10 % en día y medio para 500 kg de cacao.

Utilizando la información recabada y las condiciones climatológicas del Estado se seleccionó para el diseño un secador tipo invernadero con paneles solares lo que permitirá captar la mayor cantidad de energía térmica durante el día. Tomando en cuenta que el prototipo se requiere para ser utilizado en los patios de los productores se consideró que fuera de fácil instalación, económico y que no necesitará consumir energía eléctrica durante el proceso de secado.

2.2.1.- Diseño del secador

El diseño del secador fue desarrollado mediante el programa AutoCAD, se decidió utilizar dicho programa debido a que es un programa de diseño asistido por computadora para dibujo en dos y tres dimensiones, gestiona una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc) por lo que fue de fácil uso para lograr los 3 diseños de los secadores.

En los tres diseños de secadores solares tipo invernadero se decidió que estos fueran con la radiación directa a los granos considerando la capacidad de cacao a secar y a la captación de energía solar que se requiere para el proceso. En los 3 modelos se diseñaron bandejas que pudieran soportar el peso del cacao para el proceso de secado, al igual que se incluyó el sistema fotovoltaico para que los paneles solares almacenaran la radiación solar para utilizarla en los periodos en los cuales no se cuenta con la iluminación solar. El flujo de aire será generado por convección natural.

Los aspectos considerados en cada uno de los diseños fueron los siguientes:

- Iluminación por medio de lámparas incandescentes.
- Extractores
- Termómetro
- Paneles solares
- Batería de suministro
- Orientación del secador.
- Temperaturas máximas dentro del secador
- % de humedad de los granos

2.3.- METODOLOGÍA PARA CÁLCULOS DE ENERGÍA.

Se describen los cálculos que permitieron dimensionar la superficie de captación de un secador solar basándose en la energía solar que llega a la tierra.

2.3.1.- Cálculo de iluminación.

El diseño del sistema de iluminación se realizó para un secador tipo invernadero, los niveles de iluminancia mantenida se extrajeron del Manual de Iluminación de Philips, correspondiente a las mínimas iluminancias admisibles para cada aplicación.

Para realizar los cálculos de iluminación, se utilizó el método del flujo total para el cálculo del alumbrado de interiores, para lo cual se definió lo siguiente:

- FL: flujo lumínico de la lámpara que se desea utilizar (Lumen)
- S: superficie de la habitación (m²)
- E: iluminancia promedio que se pretende (Lux)
- μ : factor de utilización, el cual indica la eficiencia luminosa del conjunto lámpara, luminaria y local, por lo tanto depende del sistema de iluminación, de las características de la luminaria, del índice del local (K), del factor de reflexión del techo, piso y paredes de la habitación.

K: índice del local, el cual corresponde a una relación entre las dimensiones del secador, esto es: ancho (A), largo (L) y altura(H) de las luminarias sobre el plano de trabajo, esto se muestra en la Ec.5, la cual se utiliza para distribución con luz directa, semi-directa y mixta.

$$K = \frac{3 \cdot A \cdot B}{2H'(A+B)} \quad \text{Ec.5}$$

Dónde:

A: ancho del local

B: largo del local

H': distancia del techo a la bandeja.

Por lo que al sustituir datos se obtiene el resultado siguiente:

$$K = \frac{3 * 3.30 * 6.66}{2 * 0.75(3.30 + 6.66)} = 4$$

2.4.- MATERIAL PARA DISEÑO DE LOS SECADORES

A continuación se presentan las especificaciones de los materiales para el diseño de los 3 secadores a evaluar.

2.4.1.- Secador a) Con paneles solares superiores.

Tabla 1.- Especificaciones del secador (a)

CARACTERISTICA	MEDIDAS
Altura a los pilares	3.50 m.
Altura a la cumbrera	6.20 m.
Numero de capillas	5
Ancho de cada capilla	10 m.
Ancho de arcos estabilizadores	N/A
Número de arcos estabilizadores	N/A
Anchura total	10.0 m.
Longitud total	25.0 m.
Superficie total cubierta	250.0 m ² .
Separación entre arcos	5.0 m.

2.4.1.1.- Estructura

- Arcos: Tubo de acero galvanizado G90 Cal 14 de 2” Rolado
- Postes: Tubo de acero galvanizado G90 Cal 13 de 2”
- Estructura de carga en arcos con postes radiales al arco para mayor capacidad de carga.
- Lagueros : Tubo de acero galvanizado G90 Cal 14 de 2”
- Ventana Cenital : PTR de acero galvanizado G90 Cal 14de 1 1/4”
- Ventana Lateral: PTR de acero galvanizado G90 Cal 14 de 1 1/4”

- Uniones estructurales: Conectores CONTUB® en hierro nodular de alta resistencia 4mm de espesor galvanizados y tropicalizados.
- Sujeción: Opresores galvanizados grado 9 con resistencia de 2 TON c/u al desprendimiento axial.

Cubierta y sistema de ventanas:

- Cobertura del secador tipo invernadero en película plástica de polietileno para invernadero, 2 Años de protección UV, calibre 720, color Blanco, 30% sombra.
- Ventanas Laterales Fijas de 2.0 mts con malla antiáfidos color cristal 40x25.
- Ventana Cenital Fija de .90 mts con malla antiáfidos color cristal de 25x25.

2.4.1.2.- Características

- Ventilación Cenital
- Ventilación Lateral en 4 Frentes
- 200 m2 de área total.
- Incluye 8 bandejas

2.4.2.- Secador b) Con cuarto de control y acceso

Tabla 2.- Especificaciones del secador (b).

CARACTERISTICA	MEDIDAS
Altura a los pilares	2.0 m.
Altura a la cumbrera	3.0 m.
Numero de capillas	5
Ancho de cada capilla	5.0 m.
Ancho de arcos estabilizadores	5.0 m
Número de arcos estabilizadores	5
Anchura total	10.0 m.
Longitud total	20.0 m.
Superficie total cubierta	200 m2.
Separación entre arcos	4.0 m.

2.4.2.1.- Estructura

- Arcos: Tubo de acero galvanizado G90 Cal 14 de 2
- Postes: Tubo de acero galvanizado G90 Cal 13 de 2”
- Estructura de carga en arcos con postes radiales al arco para mayor capacidad de carga.
- Ventana Lateral: PTR de acero galvanizado G90 Cal 14 de 1 1/4”
- Uniones estructurales: Soldadura.

Cubierta y sistema de ventanas:

- Cobertura del secador tipo invernadero en película plástica de polietileno para invernadero, 2 Años de protección UV, calibre 720, color Blanco, 30% sombra.
- Ventanas Laterales Fijas de 2.0 mts con malla antiáfidos color cristal 40x25.

2.4.2.2.- Características:

- Ventilación en cuarto de control
- 250 m² de área total.
- Incluye 10 bandejas

2.4.3.- Secador c) Con paneles fuera del secador.

Tabla 3.- Especificaciones del secador (c).

CARACTERISTICA	MEDIDAS
Altura a los pilares	1.80 m.
Altura a la cumbrera	0.60 m.
Numero de capillas	4
Ancho de cada capilla	5.0 m.
Ancho de arcos estabilizadores	1.66 m
Número de arcos estabilizadores	5
Anchura total	3.30 m.
Longitud total	6.66 m.
Superficie total cubierta	21.978 m ² .
Separación entre arcos	1.66 m.

2.4.3.1.- Estructura

- Arcos: Tubo galvanizado Cal 14 de 2"
- Postes: Tubo galvanizado Cal 13 de 2"
- Estructura: PTR galvanizado de 2"
- Puertas corredizas: PTR de galvanizado Cal 14 de 1 1/4"
- Uniones estructurales: Soldadura.

Cubierta y sistema de puertas:

- Cobertura del secador tipo invernadero por policarbonato en color blanco para una transparencia con más luz.

2.4.3.2.- Características

- 21.978 m² de área total.
- Puertas corredizas abatibles en 2 hojas.
- 3 charolas integradas.

CAPITULO 3.- RESULTADOS

3.1.- GEOGRAFÍA DEL SITIO

El municipio de Centro se localiza en la región de Centro y tiene como cabecera municipal a la ciudad de Villahermosa, ubicada entre los paralelos 18°20' de latitud norte y 93°15' de longitud oeste. Al igual que la mayor parte del estado de Tabasco, el clima en Villahermosa es cálido-húmedo-seco. La temperatura durante la primavera puede llegar a superar los 40° C con una humedad relativa superior al 90%, durante el corto invierno el clima es mucho más seco y las temperaturas son mucho más bajas. El régimen de precipitaciones se caracteriza por un total de caída de agua de 2,237 mm anuales con promedio máxima mensual de 300 mm en el mes de septiembre y una mínima mensual de 50 mm en el mes de abril. Las mayores velocidades del viento se concentran en los meses de octubre y noviembre con velocidades que alcanzan los 30 km/h., presentándose en el mes de noviembre y diciembre, los menores con velocidades de 18 km/h. en los meses de junio. (INAFED, 2014).

Para determinar la irradiación solar se consideraron las siguientes coordenadas:

18°01'19"N

92°54'15"W

97 m.

La orientación debe ser de Oriente a Poniente, considerando que se pretende instalar en un espacio del Instituto Tecnológico de Villahermosa.

3.2.- SELECCIÓN DEL SECADOR A DISEÑAR

En la figura 24 se presentan los 3 diseños de secadores realizados en el programa AutoCAD, de los cuales se eligió el diseño (c).



Figura 24.- Diseño de secadores solares (a: con paneles solares superiores, b: con cuarto de control y acceso, c: con paneles fuera del secador).

En la figura 25 se muestra el diseño de la bandeja que se incluye en el secador.

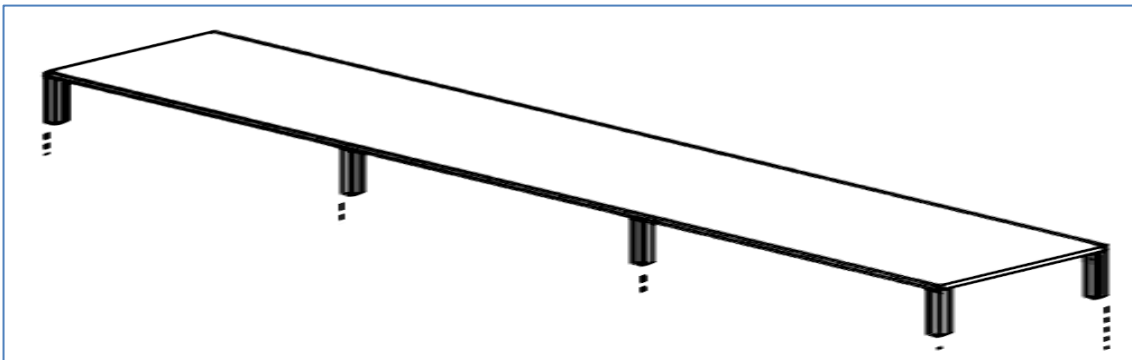


Figura 25.- Diseño de bandejas de secador (c).

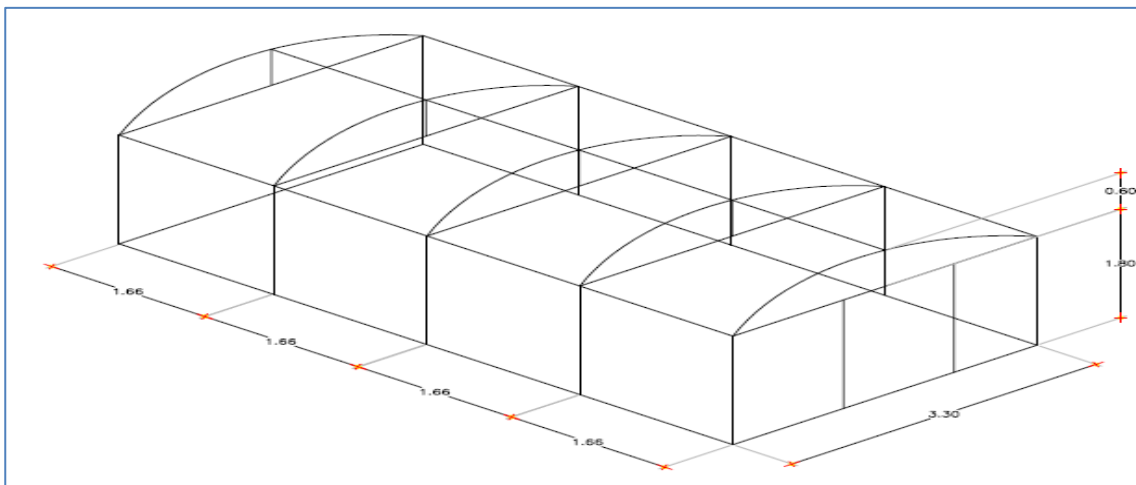


Figura 26.- Diseño del secador (c)

La figura 26 muestra ampliamente el secador, mientras que en la figura 27 se presenta la planta de conjunto del secador.

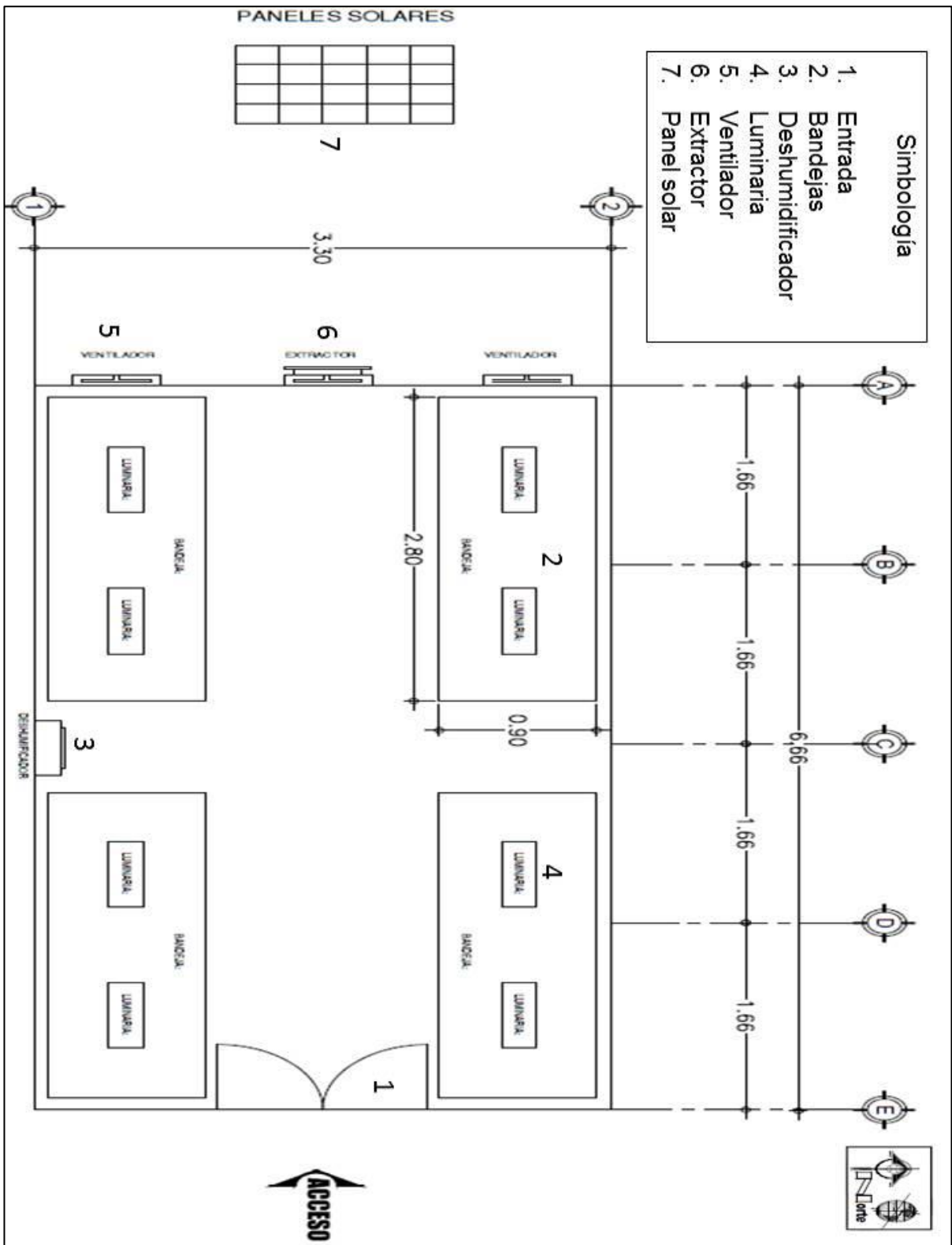


Figura 27.- Planta de conjunto del secador (c).

3.3.- SECADOR PROPUESTO

Al inicio se presentaron tres posibles modelos de los cuales se descartó el secador (a) debido a que por el espacio se pretendía colocar los paneles solares en el techo, pero analizando el diseño se observó que no se aprovecharía captar la luz solar al 100% por el techo, además la estructura tendrá que soportar el peso de los paneles haciéndolo menos resistente.

El secador (b) se descartó por el tipo de acceso a la planta el cual sería por el cuarto de control el cual se pretendía que funcionara como entrada de personal, las puertas de acceso tendrían que ser de medidas considerables para introducir o retirar las bandejas. Otra desventaja es el techo que tiene una ventilación en medio de los arcos por lo que las dimensiones no favorecen el paso de la radiación solar al ser muy alta la estructura de los arcos.

El diseño (c) fue el resultado de la modificación de los dos anteriores; se diseñó con puertas y ventanas corredizas para que la ventilación fuera la adecuada y por las noches, para evitar el sereno o la lluvia, se podrán cerrar los accesos y mantener controlada la temperatura y humedad de secado. Mientras que los paneles solares se colocarán a los extremos de la estructura debido al peso y de manera que se aproveche la irradiación solar.

Por el espacio que se propuso para ensamblar el secador se determinó que las medidas para el diseño fueran las siguientes:

- Ancho: 3.30 m
- Largo: 6.66 m
- Alto a la base: 1.80 m
- Alto al arco: 0.60 m

Considerando 2 ventanas corredizas en cada extremo con las siguientes medidas:

- Ancho: 1.66 m

- Alto: 1.80 m

El acceso principal tiene la medida siguiente:

- Ancho: 1.20 m total y cada hoja tendrá un ancho de 0.60 m
- Alto: 1.80 m

Sin omitir que serán abatibles las dos hojas

Cubierta:

Tanto el techo como los costados se recubrirán con policarbonato color blanco.

3.4.- DATOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO:

De acuerdo a los requerimientos del secador se solicitó asesoría a la empresa ISSEEC. S.A. DE C.V. la cual recomendó lo siguiente:

- Uso de 20 paneles solares con un inversor central de capacidad 3000w tipo isla. Estructuras de montaje a medida de acuerdo al diseño
- Sistema para automatizar invernadero.
 - 2 ventiladores tubulares con fijación 120V - 1/8 HP
 - 1 extractor de aire con persianas de sobre presión con malla de protección capacidad de 120v 3amp por carga
 - 2 louvers de 760mm x530mm
 - 1 deshumificador por condensación 331m³/h, 720w, 6.9a, 115v, 2 velocidades
 - 8 lámparas para soportar una capacidad de 120v 3amp por carga. (Las necesarias de acuerdo a la ec. 1 son 4, por la intensidad se duplica ya que las incandescentes salieron del mercado).

De acuerdo a la vida media del panel solar se estiman 2500 ciclos, entendiendo que por cada ciclo es un proceso de carga y descarga completa de la batería, por lo que se recomienda que las baterías no se descarguen habitualmente menos de un 30%, de esta forma se prolongará la vida útil de las baterías haciendo rentable el diseño.

3.5.- VOLUMEN DE SECADO

Para determinar el volumen de secado se consideró el volumen de las bandejas.

Ancho: 0.90 m

Largo: 2.80 m

Espesor: 0.14 m

$$V = 0.90\text{m} \times 2.80\text{m} \times 0.14\text{m}$$

$$V = \mathbf{0.3528 \text{ m}^3} \text{. Por bandeja}$$

Si como referencia se tiene una bandeja con las siguientes medidas:

Ancho: 0.90 m

Largo: 1.20 m

Espesor: 0.10 m

$$V = 0.90\text{m} \times 1.20\text{m} \times 0.10\text{m}$$

$$V = \mathbf{0.108 \text{ m}^3} \text{.}$$

Con un volumen de **0.108 m³** se secan **250 kg**

Entonces con el $V = \mathbf{0.3528 \text{ m}^3}$ se secan **816.66 kg**

Por lo tanto con 4 bandejas en una sola producción de secado se obtendrán 3,266.64 kg.

3.6.- PRESUPUESTO DE LA ESTRUCTURA:

Tabla 4.- Presupuesto de la estructura del secador.

PARTIDA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
01	Costo de material y mano de obra para la construcción de una estructura con material galvanizado de PTR de 2" con recubrimiento de policarbonato, tanto el techo como los costados, cuyas dimensiones son las sig: 6.66 m x 3.30 m x 1.80 m. Con un arco de 0.60 m, con 2 ventanas corredizas en cada extremo y 1 puerta abatible en 2 hojas como entrada principal. En su interior 4 bandejas cuyas medidas son las sig: 2.80 m de largo, 0.90 m de ancho, 0.14 m de espesor y 0.90 m de alto.	1 pza		\$70,145.00
			Sub total	\$70,145.00
			IVA	\$11,223.20
			TOTAL	\$81,368.20

En la tabla 4 se muestra el presupuesto para la construcción del secador tipo invernadero el cual incluye la descripción del material que se utilizará para su construcción. En la figura 28 se presenta el presupuesto del sistema fotovoltaico y de los equipos necesarios para su instalación.

3.7.- PRESUPUESTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO:

	<p>ISSEEC, S.A. DE C.V. ISS160506U91</p> <p>DOMICILIO FISCAL: Gregorio Méndez 25 Pueblo Nuevo, 86725 Macuspana, Tabasco, MEXICO</p> <p>REGIMEN FISCAL: Régimen General de ley de Personas Morales</p> <p>CONDICIONES: CONTADO</p>	<p>LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION:</p> <p>Villa Benito Juárez, Macuspana, Tabasco a 07/08/2017 10:22:33 p. m.</p>			
<p>CLIENTE: Karbel García Pérez</p> <p>DOMICILIO DEL CLIENTE: , MEXICO</p>		<p>NOTAS: ESTE DOCUMENTO NO ES UN COMPROBANTE FISCAL VALIDO.</p>			
<p>EN ATENCIÓN A SU REQUERIMIENTO ME PERMITO HACERLE LLEGAR LA SIGUIENTE PROPUESTA COMERCIAL:</p>					
<p>SUMINISTRO ELECTRICO CON PANELES SOLARES Y SISTEMA DE CONTROL DE INVERNADERO. INCLUYE:</p>					
<p>*SISTEMA FOTOVOLTAICO QUE CONSTA DE 20 PANELES SOLARES CON UN INVERSOR CENTRAL DE CAPACIDAD 3000W TIPO ISLA INCLUYE ESTRUCTURAS DE MONTAJE A MEDIDA DE ACUERDO AL DISEÑO, CABLEADO, INSTALACION, Y PUESTA EN MARCHA.</p>					
<p>*SISTEMA PARA AUTOMATIZAR INVERNADERO, INCLUYE: DOS VENTILADORES, UN EXTRACTOR DE AIRE CON PERSIANAS DE SOBRE PRESION CON MALLA DE PROTECCION Y DOS LOUVERS. DESHUMIFICADOR PARA CONTROLAR UNA HUMEDAD RELATIVA DE ENTRE 7% Y 8% Y UNA TEMPRATURA ENTRE 35 Y 40 GRADOS CENTIGRADOS.</p>					
<p>*INSTALACION Y PUESTA EN MARCHA</p>					
<p>PLAZO DE ENTREGA: 4 A 5 SEMANAS.</p>					
<p>*PAGO EN UNA SOLA EXHIBICIÓN*</p>					
CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CODIGOS	DESCRIPCION	VALOR UNITARIO	IMPORTE
1	Pieza	SIS-CTRL-101	SISTEMA DE CONTROL DE INVERNADERO	470,000.00	470,000.00
				SUBTOTAL:	470,000.00
				DESCUENTO:	0.00
				IVA:	75,200.00
				RETENCIONES:	0.00
				TOTAL	545,200.00
<p>QUINIENTOS CUARENTA Y CINCO MIL DOSCIENTOS PESOS 00/100 M.N. MONEDA: MXN TIPO DE CAMBIO: 1.00</p>					
<p>ATENTAMENTE</p>					
<p>_____ INSTALACIONES SOLUCIONES SERVICIOS EN ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE CONTROL S.A. DE C.V.</p>					
<p>IRMA FERIA DE LA CRUZ</p>					
<p>CONDICIONES COMERCIALES</p>					

Figura 28.- Presupuesto de sistema fotovoltaico.

3.8.- PARAMETROS A CONSIDERAR EN EL PROCESO DE SECADO

Para evaluar el funcionamiento del secador se debe cumplir los siguientes datos que marca la **NMX-FF-103-SCFI-2003**.

- **Espesor de capas de cacao en el secado:** Los granos del cacao se extienden en capas delgadas de 2 cm a 3 cm de espesor.
- **Peso promedio de grano seco:** criollo: 0.80 - 1.43 g; primera: 0.80 - 1.20 g; estándar: 0.80 - 1.20 g.
- **pH:** lavado y secado: 5.8 - 6.2; fermentado y secado: 4.8 - 5.5
- **Humedad:** El contenido de humedad para todas las designaciones y granos de calidad no deberá rebasar el 7,5 %.

CONCLUSIÓN

Se realizó el diseño de un secador tipo invernadero para grano fermentado de cacao, lo que permitirá alcanzar de 7 a 8% de humedad en las semillas y reducirá los días de secado. Se adaptó tecnología para un mejor funcionamiento utilizándose energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable que participe en el proceso de secado por las noches y en temporadas de lluvia.

Los materiales que se proponen para la construcción de la estructura son galvanizado para evitar la corrosión y no afecte el proceso, y para forrar la estructura se propone policarbonato color blanco incluyendo las ventanas corredizas y puerta de acceso para que en las tardes se deje cerrado y se active el sistema fotovoltaico.

De acuerdo a las medidas del secador que son: ancho: 3.30m, largo: 6.66m, alto de la base: 1.80m, alto al arco: 0.60m se calculó el volumen de secado y por cada ciclo se estiman 3,200 toneladas. Se espera que al utilizar el secador diseñado en este trabajo se obtengan granos secos con una excelente calidad organoléptica para ser comercializado tanto en los mercados locales como internacionales.

Como parte experimental se diseñó de esta manera el secador por lo que se sugiere bajar recursos que permitan hacerlo una realidad y determinar los días de secado que se pretenden reducir a un 50% con este nuevo diseño. Es decir si en patio tarda el proceso de secado de 3 a 4 días usando el secador durante el día y la noche se puede lograr en 1.5 a 2 días conservando las características organolépticas que se requieren para mantener el estado de Tabasco y a México entre los primeros lugares de producción de cacao a nivel mundial.

BIBLIOGRAFÍA

- Afoakwa, E. (2010). Sensory character and flavour perception of chocolates. In E. Afoakwa (Ed.), *Chocolate Science and Technology*, Oxford: Wiley Blackwell. pp. 73-90.
- Alpi, F. T. (1991). *Cultivo en invernadero*. Madrid: Mundi-Prensa Libros. p.12.
- Barbosa, L. (2000); *Deshidratación de alimentos*; Ed. Acribia. Zaragoza, España.
- Barrios, M. (2008). Efecto del tiempo de secado, profundidad de granos en bandeja, temperatura y velocidad de extracción de aire sobre la acidez volátil, pH y contenido de fenoles totales de granos de cacao. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Villahermosa, Tabasco, p.36.
- Caballero, J. (2015). *Diseño de una secadora de cacao para almacenaje con capacidad de 2 t/día*, (Tesis de Licenciatura). Pontificia Universidad Católica de Perú. Lima, p.4.
- CERTIMEX (2009), *Normas para la producción, procesamiento y la comercialización de productos ecológicos*. CERTIMEX – 01-2009, p.39.
- Chevaux, K., y Jakson, L., Villar, M. (2001). Proximate, mineral and procyanidin content of certain foods and beverages consumed by the Kuna Amerinds of Panama, *Journal of Foods Composition and Analysis* 14; pp.553-563.
- Danish Technological Institute (DTI), (2002). *Test of solar dryers in Ghana*. Jensen, O.S. & Kristensen, S.E. (editors). Denmark.
- Dávila, J. (2004). Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire; Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, p. 54.
- De Castro, C. (2012). *Diseño y fabricación de un secador solar de túnel tipo Hohenheim modificado para secado de algodón*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de los Andes, Colombia, pp. 23-28.
- Fundesyram, 2006. <http://www.fundesyram.info/quienes-somos.php>
- Galvez, L.S., Loiseau, G., Paredes, J.L., Barel M and Guiraud J.P. 2007. Study on the microflora and biochemistry of cocoa fermentation in the Dominican Republic. *International Journal of Food Microbiology*. pp. 114, 124-30.
- García, P. (2007). Moisture, Acidity and Temperature Evolution During Cacao. *International Journal of Food Engineering* 79, Vol 3: pp. 1159 – 1165.

Geankoplis, C.J. (1998). Cap. Introducción a los principios de ingeniería y sus unidades, En: Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3ra edición, Editorial Continental, México, pp. 7-17.

González, V. (2005). Cacao en México: competitividad y medio ambiente con alianzas INIFAP e IPRC para USAID, México, p. 6.

Jinap, S., Rosli, W. I. W., Russly, A. R., y Nordin, L. M. (1995). Effect of roasting time and temperature on volatile component profiles during nib roasting of cocoa beans (*Theobroma cacao*). International Journal of Food Science and Agr, 77, 441- 448.

Lázaro, C. (2013). Obtención de un perfil de sabor mediante técnicas de análisis sensorial de los diferentes genotipos de cacao fermentado cultivados en la región de la Chontalpa, Tabasco, México. (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico de Villahermosa. Tabasco, p.14.

Mendieta, J. (2011). Secado de café (*Coffea arabica*) en tres modelos de secadores solares tipo invernaderos con estructura de bambú. (Tesis de Maestría). Colegio de postgraduados, Veracruz, pp. 4-9.

Montero, I. (2010). Design, construction and performance testing of a solar, International Journal of Food agroindustrial by-products. Elsevier, pp. 1510-1521.

Mossu, G. (1992). Cocoa. London, Ed. Mac Millan. p.23

Páez, S; (1990). Diseño Y Construcción De Un Secador De Almidón De Yuca; Escuela Politécnica Nacional; Quito, pp. 17-19.

Parra, P., Ortiz de Bertorelli, L., y Graziani de Fariñas, L. (2009) Características químicas de la semilla de diferentes tipos de cacao de la localidad de Cumboto, Aragua. Agronomía Tropical, Vol 2: pp.133-144.

Pérez, D. (2009). Análisis de un sistema de iluminación, utilizando ampollitas de bajo consumo y alimentado por paneles fotovoltaicos. (Tesis de Licenciatura). Universidad Austral de Chile, Valdivia Chile, pág. 59-62.

Plaza, J. (2012). Diseño e implementación de una secadora híbrida para el control y monitoreo del proceso de secado del cacao. (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, pp. 21-25.

PROARCA (1994). Manual de buenas practicas operativas de producción más limpia en el sector beneficiado de café. www.proarca.org. 11-07-2017.

Restrepo, V.H., y Burbano, J.J. (2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. Scientia Et Technica. 11 (27); pp.127-132.

Rivera, L. (2013). Manual de infraestructura para la construcción de un centro de acopio de cacao. Tegucigalpa, Fundación Helvetas Honduras. pp. 64-72.

Roa, M., Oliveros, C., y Ramírez C. (2000). Utilice la energía solar para secar correctamente el café. CENICAFE. (281). p.2

Rodríguez M. (2012). Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects. Estado Actual de la I&D de las FENR en Colombia. Bogotá. Colciencias, p. 263.

Rodríguez, M. (2009). Moisture, Acidity and Temperature Evolution During Cacao. Drying Journal of Food Engineering 79, vol 2, pp1159 – 1165

SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2014), México.

Siguencia, J. (2013). Evaluación de un secador solar inclinado con absorbedor de zeolita para granos de cacao ccn51 (Tesis de Maestría). Universidad de Cuenca. Ecuador, p.45.

Smulders, (2004). Microbial Fermentation of Cocoa Beans, With Emphasis on Enzymatic Degradation of the Pulp. International Journal of Applied Bacteriology Symposium Supplement 79, pp.965 – 1075.

Toledo, L. (2014). Análisis económico entre los dos métodos de secado de cacao (Theobroma cacao L): el secado con Samoa y secado con secador solar, de la sociedad Productores de cacao la Cueva del Tigre SC de RL. INIFAP. p.5.

Vazquez, R. (2013). Datos Técnicos Para Reducir El Consumo De Energía En Secadoras Tipo Samoa. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco, 1ra Ed, colección José María Pino Suarez; p.19.

PAGINAS WEB CONSULTADAS

- <http://cacaomovil.com/guia/8/contenido/fermentacion/> - 12-10-2017
- <http://ntrzacatecas.com/2017/04/06/saborea-mexico-cacao-de-importacion/>
- http://www.cacaomexico.org/?page_id=981 – 22-08-2017
- http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5439114&fecha=27/05/2016&print=true – 20-11-2016
- <http://www.sni.org.pe/wp-content/uploads/2017/01/Junio-2016-Industria-del-cacao-chocolate-y-otros-derivados.pdf> -
- <https://www.gob.mx/imprensa/cacao-grijalva-se-convierte-en-la-15-denominacion-de-origen-mexicana?idiom=es> – 11-09-2017
- (Fundesyram, 2006). <http://www.fundesyam.info/quienes-somos.ph> - 13-10-2017.