

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE CONCEPCIÓN - REY BALDUINO DE BÉLGICA**

**DISEÑO DE SECADOR SOLAR TÉRMICO, DE TIPO MIXTO, PARA LA
DESHIDRATACIÓN DE EXCEDENTES AGRÍCOLAS EN ZONAS RURALES
DE LA PROVINCIA DE CONCEPCIÓN**

Trabajo de Titulación para optar al Título
de Ingeniero de Ejecución en
MECÁNICA DE PROCESOS Y
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno:

Sebastián Gabriel Reyes Fredes

Profesor guía:

MSc. Víctor Hugo Valdebenito Cartes

2018

RESUMEN

El desarrollo de este trabajo consistió en exponer una idea de cómo diseñar una herramienta, que se basa en aprovechar una de las fuentes de energías renovables en una aplicación poco convencional en la Provincia de Concepción.

El secador solar térmico de productos agrícolas es una herramienta que fue diseñada para cumplir con la protección del medio ambiente y la inserción del desarrollo a la sociedad, además de satisfacer los requisitos de secado de productos agrícolas entregando así grandes beneficios.

En el primer capítulo se realiza la descripción del problema, dando a conocer el motivo de por qué se optó por diseñar un secador solar. Posteriormente se hace mención a las fuentes de energías existentes, destacando la energía solar como la principal alternativa para el diseño.

A continuación, en el marco teórico se definen los fenómenos físicos y químicos relacionados con la deshidratación de alimentos. Como así también la descripción de los distintos tipos de colectores solares y cámaras de secado existentes en la actualidad. En el diseño de la solución se da conocer los cálculos que comprueban cual es la mejor posición del secador solar en Concepción, para así obtener un mayor rendimiento de la captación de la incidencia solar en el colector.

ÍNDICE

RESUMEN

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS 2

ALCANCE Y LIMITACIONES.....3

 CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. LA NECESIDAD DE IMPULSAR EL CONSUMO DE FUENTES DE
ENERGÍA ALTERNATIVAS 4

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 5

1.3. LA ENERGÍA SOLAR COMO LA BASE DEL DESARROLLO PARA UN
FUTURO SUSTENTABLE 6

1.4. FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA 7

1.5. ENERGÍA SOLAR 8

 1.5.1. Beneficios de la energía solar 9

 1.5.2. Principales desventajas.....9

 1.5.3. Energía solar en Chile 10

 1.5.4. Energía solar térmica.....10

 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS POR DESECACIÓN 11

 2.1.1. Características del proceso de secado 11

 2.1.2. Actividad del agua en los alimentos.....15

2.2. PROPIEDADES DEL AIRE PARA EL SECADO DE ALIMENTOS 17

 2.2.1. Temperatura de bulbo seco y bulbo mojado 19

 2.2.2. Temperatura de punto de rocío 19

 2.2.3. Humedad relativa y específica 19

 2.2.4. Psicrometría del aire húmedo.....20

 2.2.5. Ubicación geográfica y datos climáticos.....22

2.3.	FUENTES DE ENERGÍA.....	23
2.3.1.	Fuentes de energía renovables	23
2.3.2.	Energía solar.....	24
2.3.3.	Energías no renovables	24
2.4.	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	24
2.4.1.	Conducción	25
2.4.2.	Convección.....	25
2.4.3.	Radiación.....	26
2.5.	SECADOR SOLAR TÉRMICO	26
2.5.1.	Secador solar tipo directo.....	27
2.5.2.	Secador solar tipo indirecto.....	27
2.5.3.	Secador solar mixto.....	28
2.6.	RADIACIÓN SOLAR.....	28
2.6.1	Radiación solar en Chile	29
2.6.2.	Radiación solar en Talcahuano	30
2.6.3.	Radiación solar media y temperatura del ambiente	31
2.6.4.	El espectro de radiación solar	31
2.6.5.	Formas de la radiación solar en una superficie	33
2.6.6.	Variaciones estacionales de la radiación solar	34
2.7.	CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE AIRE	35
2.7.2.	Forma de la placa absorbente.....	35
2.7.3.	Rendimiento	37
2.7.4.	Factores que influyen en el rendimiento de un colector solar de aire	38
2.7.5.	Estándar asociado al rendimiento térmico	38
2.8.	COMPONENTES DEL SECADOR SOLAR TÉRMICO DE TIPO MIXTO..	40
2.8.1.	Circulación del aire	41
2.8.2.	Forma de operación.....	42
2.8.3.	Capacidad de producción	42
2.8.4.	Nivel tecnológico	43

2.9.	FORMA DE LA CÁMARA DE SECADO	45
2.10.	DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR SOLAR.....	46
2.11.	CÁLCULO DEL EQUIPO SOLAR TERMICO DE TIPO MIXTO	46
2.11.1.	Cálculo del volumen del producto a secar	46
2.11.3.	Cálculo del calor aportado por el aire	47
2.12.	CALOR NECESARIO PARA EL PROCESO DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS	47
2.12.1.	Calor necesario para elevar la temperatura del producto hasta la temperatura inicial de secado	48
2.12.2.	Calor necesario para calentar el aire húmedo al interior del secador.....	48
2.12.3.	Calor absorbido para el incremento de temperatura del agua contenida en el producto.....	49
2.13.	ORIENTACIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN	50
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA SOLUCIÓN		
3.1.	¿POR QUÉ UN SECADOR SOLAR TÉRMICO?	51
3.2.	CALOR NECESARIO PARA INCREMENTAR LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADOR SOLAR.....	51
3.2.1.	Propiedades del aire en Talcahuano.....	52
3.2.2.	Cálculo de la energía necesaria para cubrir el salto térmico	52
3.3.	CANTIDAD DE AGUA A EVAPORAR.....	53
3.4.	CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA	54
3.4.1.	Irradiación diaria media mensual sobre superficie horizontal para Talcahuano	54
3.4.2.	Irradiación diaria media mensual efectiva sobre superficie horizontal (He) .	54
3.4.3.	Determinación de la inclinación del colector solar	55
3.4.4.	Determinación de horas útiles de sol en un día medio de cada mes	56
3.4.5.	Aplicación del factor de inclinación (k).....	56
3.4.6.	Irradiancia solar para una inclinación de 30°	57
3.5.	DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE.....	58
3.5.1.	Componentes básicos de un colector solar de aire.....	59
3.5.2.	Cubierta transparente	59

3.5.3.	Materiales para cubiertas de colectores solares.....	60
3.5.3.1.	Materiales plásticos	60
3.5.4.	Placa de captación de la irradiación solar incidente	61
3.5.5.	Aislamiento térmico	61
3.5.6.	Bastidor	61
3.6.	CÁLCULO DEL CALOR ABSORBIDO POR EL COLECTOR SOLAR.....	62
3.7.	DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO	64
3.7.1.	Bandejas	65
3.8.	DISEÑO DEL MURO TROMBE	65
3.9.	TRATAMIENTO DE ALIMENTOS PREVIOS AL SECADO.....	66
3.9.1.	Tratamientos para el secado	67
3.9.1.1.	Escaldado.....	67
3.9.1.2.	Sulfitado	67
3.9.1.3.	Acidificado	68
3.9.1.4.	Bicarbonato de sodio	68
3.9.1.5.	Salado	68
3.9.1.6.	Almibarado	68
3.9.2.	Efectos del pre-tratamiento en los alimentos	69
3.10.	MANTENIMIENTO	70
3.10.1.	Programa de mantenimiento	70
3.10.1.1.	Plan de vigilancia	70
3.10.1.2.	Plan de mantenimiento preventivo	71
CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA		
4.1.	ACTUALES MÉTODOS PARA EL SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS	72
4.1.1.	Deshidratado en horno a gas licuado	72
4.1.2.	Deshidratadores eléctricos	72
4.2.	CALOR NECESARIO Y DURACIÓN DEL PROCESO DE SECADO	73
4.2.1	Calor necesario para el proceso de secado	73
4.2.2.	Duración del proceso de secado.....	74

4.3. PÉRDIDAS DE CALOR EN EL COLECTOR 75

4.3.1. Pérdida de calor por las paredes del colector 76

4.3.2. Rendimiento del colector solar.....78

4.4. AHORRO DE GAS LICUADO AL UTILIZAR EL SECADOR SOLAR 79

4.5. PROPUESTA DE SECADOR SOLAR TÉRMICO DE TIPO MIXTO 80

4.5.1. Características principales del diseño tipo mixto.....80

4.5.2. Exposición del equipo a la intemperie 81

4.5.3. Resistencia a la acción del viento.....82

4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO.....83

4.6.1. Costos de inversión 83

4.6.2. Costos de materiales del secador solar.....83

4.6.3. Costos de fabricación de la estructura del colector y cámara de secado....84

4.6.4. Costos de producción 84

4.6.5. Costo de mantenimiento.....85

CONCLUSIÓN 86

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Diagrama de planteamiento del problema.....5

Figura 1-2. Diagrama de las fuentes de energía.....7

Figura 1-3. Aprovechamiento de la energía solar.....9

Figura 2-1. Curva de humedad de equilibrio.....12

Figura 2-2. Curva de pérdida de humedad.....13

Figura 2-3. Tasa de secado en el tiempo,,.....13

Figura 2-4. Curva de la tasa de secado.....14

Figura 2-5. Velocidad de alteración de los alimentos, en función de
la actividad del agua.....16

Figura 2-6. Representación del proceso de secado.....18

Figura 2-7.	Carta Psicrométrica del aire húmedo.....	20
Figura 2-8.	Curva de Planck para un cuerpo negro.....	32
Figura 2-9.	Esquema de formas de la radiación incidente en la tierra.....	33
Figura 2-10.	Desplazamiento de la tierra en un año.....	34
Figura 2-11.	Forma de la placa absorbente.....	36
Figura 2-12.	Forma del flujo de aire.....	37
Figura 2-13.	Componentes de un secador solar de tipo mixto.....	40
Figura 3-1.	Diseño del colector de aire (escala 1:10).....	57
Figura 3-2.	Diseño de la cámara de secado.....	62
Figura 3-3.	Diseño del muro trombe.....	64
Figura 4.1.	Deshidratador de alimentos a gas licuado.....	70
Figura 4-2.	Dimensiones del secador solar térmico de tipo mixto.....	77
Figura 4-3.	Detalle del techo y salida de aire.....	78
Figura 4-4.	Estructura de la cámara de secado.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1.	Contenido de humedad inicial y final en productos agrícolas.....	21
Tabla 2-2.	Registro anual de mediciones del viento.....	22
Tabla 2-3.	Radiación mensual en Talcahuano.....	30
Tabla 2-4.	Radiación y temperatura media en Talcahuano.....	31
Tabla 2-5.	Clasificación por capacidad de carga.....	43
Tabla 3-1.	Registro mensual de mediciones del viento.....	52
Tabla 3-2.	Calor necesario para cubrir el salto térmico.....	53
Tabla 3-3.	Cantidad de agua a evaporar en cada producto.....	53
Tabla 3-4.	Registro mensual de irradiación diaria media en Talcahuano.....	54
Tabla 3-5.	Cálculo de la irradiación efectiva sobre superficie horizontal.....	54
Tabla 3-6.	Horas útiles de sol en un día medio de cada mes.....	56
Tabla 3-7.	Cálculo del factor de inclinación “k”.....	56
Tabla 3-8.	Cálculo de la irradiancia solar en plano inclinado a 30°.....	57
Tabla 3-9.	Calor absorbido por la placa en un día medio de cada mes.....	63
Tabla 3-10.	Procedimiento para el secado de alimentos.....	66
Tabla 3-11.	Efectos del pre-tratamiento en los alimentos.....	69
Tabla 3-12.	Plan de vigilancia.....	70
Tabla 3-13.	Plan de mantenimiento preventivo.....	71
Tabla 4-1.	Duración del secado en un día medio de cada mes.....	74

Tabla 4-2.	Costo de los materiales del secador solar propuesto.....	82
Tabla 4-3.	Costo de fabricación del colector solar y la cámara de secado.....	83
Tabla 4-4.	Costo del pre-tratamiento según el tipo de producto.....	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1.	Humedad relativa del aire en un año.....	22
Gráfico 2-2.	Estimación de la radiación solar en regiones de Chile.....	29
Gráfico 2-3.	Radiación solar mensual en (kWh/m²).....	30
Gráfico 3-1.	Variación mensual entre Irradiación diaria media normal y efectiva.....	55
Gráfico 3-2.	Comparación entre radiación horizontal e inclinada.....	57
Gráfico 3-3.	Curva de Irradiancia solar en un año para Talcahuano.....	58
Gráfico 3-4.	Variación de la radiación captada por el colector en un año.....	63

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1.	Actividad del agua en un alimento.....	16
Ecuación 2-2.	Humedad específica de un producto.....	19
Ecuación 2-3.	Humedad específica de un producto.....	19
Ecuación 2-4.	Humedad específica de un producto.....	19
Ecuación 2-5.	Transferencia de calor por convección.....	25
Ecuación 2-6.	Rendimiento del colector solar.....	37
Ecuación 2-7.	Constante de tiempo.....	38
Ecuación 2-8.	Volumen de producto a secar.....	46
Ecuación 2-9.	Calor aportado por el aire.....	47
Ecuación 2-10.	Calor absorbido por el producto.....	48
Ecuación 2-11.	Calor absorbido por el aire húmedo.....	49
Ecuación 2-12.	Calor absorbido por el agua.....	49
Ecuación 3-1.	Calor necesario para el incremento de temperatura del aire.....	52
Ecuación 3-2.	Proporción de agua a evaporar contenida en el alimento.....	53
Ecuación 3-3.	Calor absorbido por la placa del colector solar.....	62
Ecuación 3-4.	Coefficiente de transmitancia y absortancia.....	62

Ecuación 4-1. Calor necesario para alcanzar la temperatura de secado.....73

Ecuación 4-2. Calor necesario para la evaporación del agua contenida.....73

Ecuación 4-3. Calor útil ganado por el colector solar en una hora.....75

Ecuación 4-4. Coeficiente total de pérdidas térmicas del colector.....75

Ecuación 4.5. Flujo de calor a través de una pared.....76

Ecuación 4.6. Coeficiente de pérdidas por la base del colector.....76

Ecuación 4.7. Coeficiente de pérdidas laterales.....77

Ecuación 4-8. Cantidad de gas licuado necesario para el secado.....78

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

ASHRAE	:	Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
ERNC	:	Energías Renovables No Convencionales
CNE	:	Comisión Nacional de Energía
GLP	:	Gas Licuado de Petróleo
M	:	Masa
PC	:	Poder Calorífico
SST	:	Sistema Solar Térmico
Q	:	Calor
T	:	Temperatura
V	:	Volumen
η	:	Rendimiento
%	:	Porcentaje
CO^2	:	Dióxido de carbono
\$	:	Peso chileno

SIMBOLOGÍA

σ	:	Constante de Stefan Boltzmann
β	:	Latitud
μ	:	Micra
mm	:	Milimetro
cm	:	Centimetro
m	:	Metro
m^2	:	Metro cuadrado
m^3	:	Metro cúbico
k	:	Kilo
M	:	Mega
J	:	Joule
Cal	:	Caloria
W	:	Vatio
l	:	Litro

$^{\circ}K$: Grados Kelvin

$^{\circ}C$: Grados Celsius

m/s : Metros por segundo

W/m^2 : Vatios por metro cuadrado

INTRODUCCIÓN

El modelo actual de desarrollo se ha basado históricamente en el uso y explotación de los recursos energéticos de origen fósil. Estos combustibles han suministrado las fuentes energéticas del desarrollo económico del planeta, de manera intensiva desde el nacimiento de la Revolución Industrial hasta nuestros días.

Este acelerado desarrollo, sin embargo, también ha generado voces de alerta sobre los impactos ambientales que genera la explotación de los recursos que, por su lenta velocidad de regeneración respecto de su explotación, son clasificados como no renovables. Los impactos ambientales que estos combustibles generan (cambio climático, lluvia ácida, capa de ozono, smog), ha obligado a la comunidad internacional a buscar un nuevo modelo de desarrollo basado en el Desarrollo Sostenible, sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones. [1]

La única alternativa para que el Desarrollo Sostenible sea posible, es decir, obtener energía pero sin alterar en mayor grado el ecosistema, es aprovechando la disponibilidad de los recursos energéticos renovables no convencionales los cuales son inagotables y están presentes en cualquier lugar.

Chile se encuentra en una etapa de alto crecimiento productivo, lo que implica la creciente necesidad de disponer de energía, que en general es escasa o cara, convirtiéndose en un factor crítico para los productores nacionales. Es por este motivo que las energías renovables no convencionales (ERNC) surgen como una alternativa limpia, inagotable y amigable con el medio ambiente, que puede complementar los actuales sistemas de generación de energía.

Las ERNC entran al sector para apoyar la agricultura, gracias a que nuestro país posee grandes fuentes de recursos energéticos: viento, altos niveles de radiación solar y grandes caudales de agua. Junto con esto, también se hacen relevantes los desechos agroindustriales, de los cuales se puede generar biogás, tanto para energía térmica como eléctrica. [2]

El secado solar es una rama altamente rentable de la explotación de las fuentes renovables de energía, caracterizada por su alto potencial energético, económico, social y ecológico, contribuyendo a la conservación del medio ambiente al evitar emisiones equivalentes de CO₂ y Óxidos de Nitrógeno y azufre, pues sustituye al consumo de electricidad y de combustibles fósiles. [3]

Hoy en día encontramos equipos de desecación tecnificados, adaptados a las condiciones ambientales de cualquier parte del planeta, con un alto rendimiento de producto seco obtenido gracias al uso de energías convencionales como el gas y la electricidad. Sin embargo los costos de la energía y su disponibilidad en zonas rurales hacen que el secado de alimentos sea cada vez menos económicamente rentable.

Es por ello que este proyecto busca diseñar un secador solar que sea energéticamente eficiente y de bajo costo de fabricación, que contribuya al desarrollo de la agricultura generando ingresos a partir de los excedentes de las cosechas de frutas en la provincia de Concepción.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar un secador solar térmico, de tipo mixto, para la deshidratación de excedentes agrícolas en zonas rurales de la Provincia de Concepción.

Objetivos específicos

- Analizar la energía solar térmica, mencionando sus aplicaciones actuales y los beneficios que conlleva el deshidratado de alimentos, utilizando únicamente la energía solar como fuente de energía.
- Especificar según la disponibilidad de energía solar térmica en la Provincia de Concepción las necesidades energéticas del equipo de secado solar para ejecutar su diseño.
- Sugerir el método de secado mixto, como una alternativa factible para el diseño del equipo de secado solar térmico.
- Realizar la evaluación técnica y económica del secador solar.

ALCANCE Y LIMITACIONES

Alcance

El proyecto en desarrollo tiene como alcance diseñar un secador solar térmico, de tipo mixto, para la deshidratación de excedentes agrícolas en zonas rurales de la provincia de Concepción, el cual es una investigación sobre las características constructivas que el diseño debe poseer tales como:

- El ángulo de posicionamiento del colector solar, que debe ser paralelo a la posición del sol para un rendimiento óptimo de deshidratado.
- El tipo de secador apropiado para la zona.
- Las dimensiones del colector y la cámara de secado.
- La adecuada selección de materiales de fabricación del secador solar para obtener una eficiencia ideal de transferencia de energía.

Limitaciones

El desarrollo del proyecto no contempla una profundización en el estudio de las curvas de secado y las reacciones físicas y químicas que desencadena la actividad del agua en un alimento.

Solo se hace referencia en el capítulo del marco teórico acerca de los tipos de desecación existentes.

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. LA NECESIDAD DE IMPULSAR EL CONSUMO DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVAS

En la actualidad, nuestro país se enfrenta al desafío de contar con recursos energéticos suficientes y competitivos para alcanzar el anhelado desarrollo en las próximas décadas. Esto, debido a que la disponibilidad de la energía es la base para el desarrollo industrial y económico de nuestra sociedad.

Siendo las fuentes de energía primarias en Chile, los combustibles fósiles (petróleo 43%, gas natural 12%, hidroelectricidad 9%, carbón 16% y leña 20%). [4]

Las que para su disponibilidad requieren ser obtenidas de países productores y con ello generando la dependencia, entre otras desventajas como: Los altos costos de transporte y el riesgo de derrames, las oscilaciones en los precios internacionales, la necesidad de almacenamiento y las emisiones contaminantes liberadas por la combustión.

Es por ello que es primordial enfocar los esfuerzos en fomentar el uso racional de la energía y la sustitución de los combustibles fósiles por otras fuentes de energía. Siendo una alternativa el uso de la energía solar como fuente de energía térmica.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Durante los periodos de cosecha de fruta en zonas rurales de la provincia de concepción se producen excedentes de cosechas de frutas y verduras, esto se debe a los desacuerdos que se producen en la etapa de distribución.

La fruta de mejor aspecto se selecciona para las empresas exportadoras de productos agrícolas y supermercados, siendo los alimentos de menor calidad o los que no están en el punto de maduración adecuado los que se denominan como “excedentes”. La mala administración de estos excedentes conlleva una posterior eliminación, privando a los agricultores de generar ganancias a partir de estos.

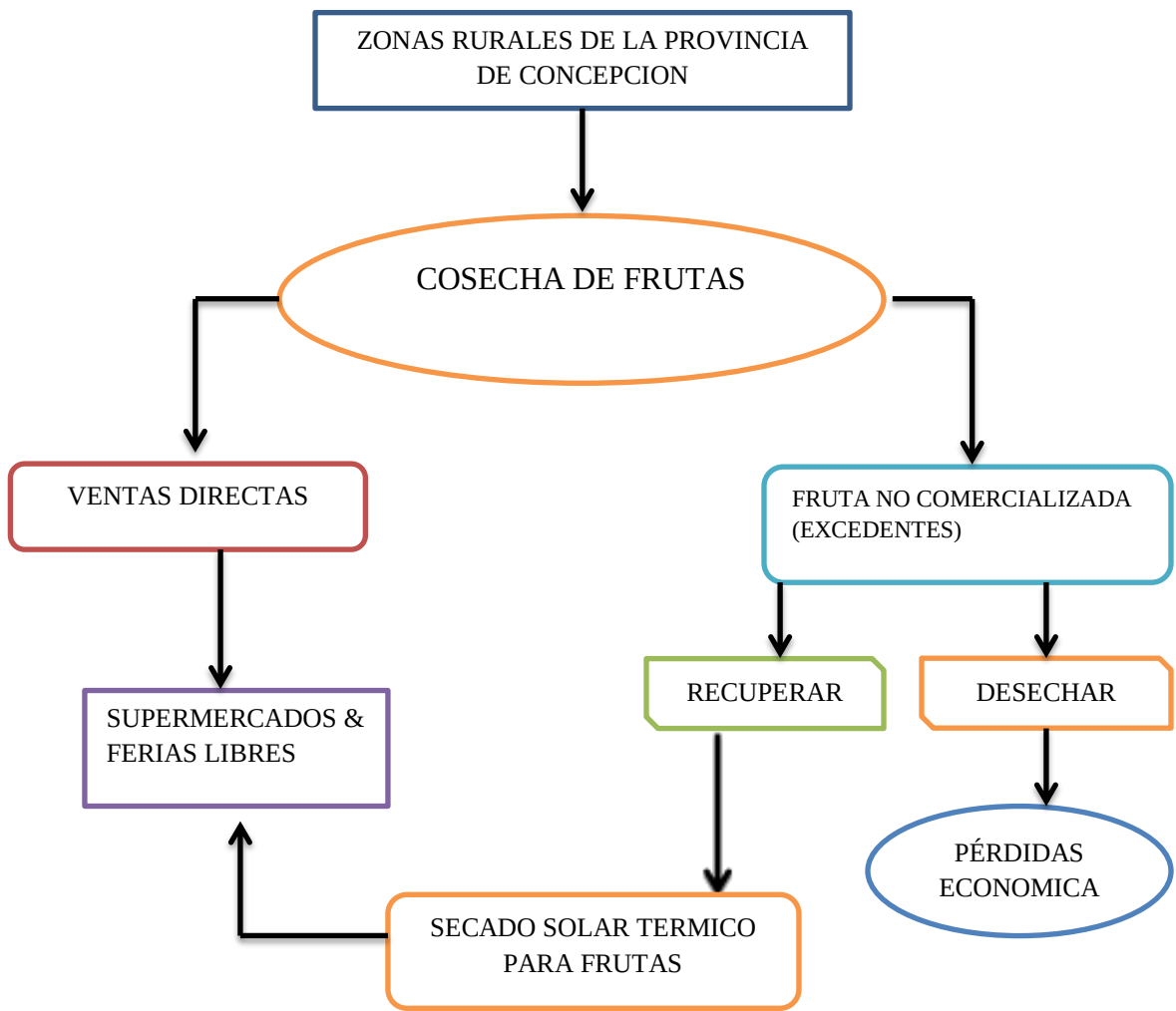


Figura 1-1. Diagrama de planteamiento del problema.
Fuente: Tecnología del secado Solar

1.3. LA ENERGÍA SOLAR COMO LA BASE DEL DESARROLLO PARA UN FUTURO SUSTENTABLE

En la actualidad algunos agricultores practican el deshidratado de sus excedentes agrícolas, utilizando principalmente gas licuado de petróleo o electricidad. Estas fuentes de energías convencionales presentan la desventaja que tienen un alto costo y un considerable impacto ambiental, debido a ello es que se plantea utilizar la energía solar térmica para el deshidratado de los excedentes agrícolas. Esta energía alternativa es gratuita y limpia, siendo la fabricación y el mantenimiento del secador solar la única inversión inicial necesaria.

Cabe destacar que el sol emite sobre la superficie de la Tierra aproximadamente cuatro mil veces más de energía, que la que vamos a consumir. Es por esta razón que es de suma importancia que se aproveche de la mejor manera esta energía que es limpia, gratuita e inagotable. Que hoy en día se abre camino como la energía con mayor proyección que disminuirá en un futuro no muy lejano nuestra dependencia de los combustibles de origen fósil.

Es por ello que es necesario implementar un tipo de secador solar de frutas en las zonas agrícolas de la provincia de concepción, con el propósito de recuperar los productos desperdiciados en los periodos de cosecha. Recuperación que es posible mediante la deshidratación de los productos y su posterior comercialización a un valor más elevado que al del producto fresco.

1.4. FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA

Se denomina energía renovable a aquellas energías que se obtienen a partir de fuentes naturales que en teoría son inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. [5]

Las fuentes renovables de energía renovable se dividen en dos categorías:

Fuentes limpias contaminantes:

- Los Biocombustibles y la Biomasa.
- Residuos sólidos urbanos.

Fuentes No Contaminantes:

- El Sol: Energía solar.
- El Viento: Energía Eólica.
- El interior de la tierra: Energía geotérmica.
- El Mar: Energía Mareomotriz.
- Los ríos: Energía hidráulica.

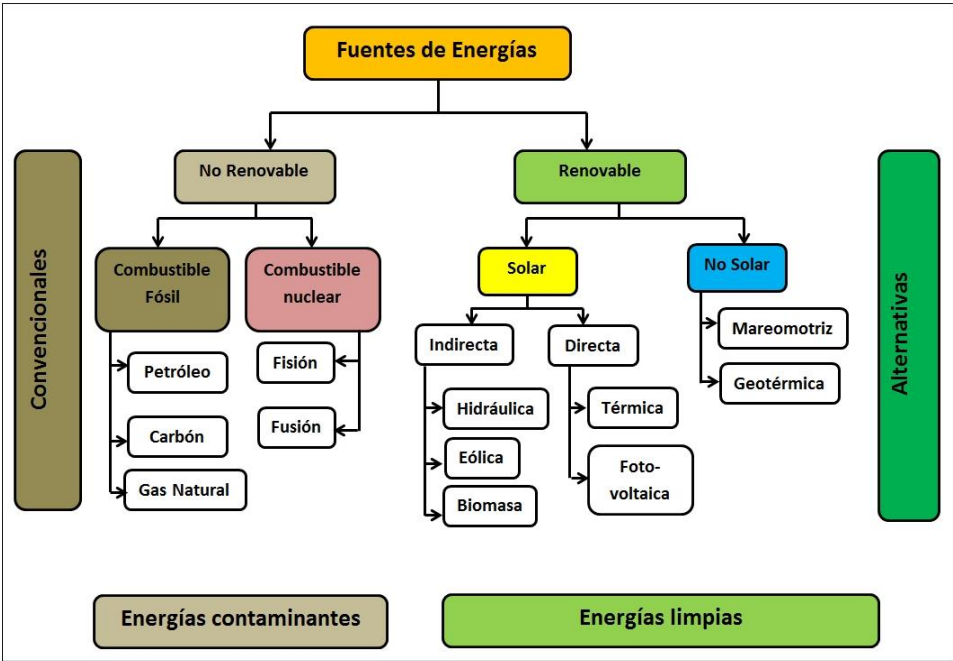


Figura 1-2. Diagrama de las fuentes de energía.

Fuente: igbio.net

Las fuentes de energía contaminantes (que son las realmente renovables, es decir, que se renuevan) se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, y se pueden utilizar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), bien convertida en bioetanol o biogás mediante procesos de fermentación orgánica o en biodiesel, mediante reacciones de transesterificación y de los residuos urbanos.

Las energías de fuentes renovables contaminantes tienen el mismo problema que la energía producida por combustibles fósiles: en la combustión emiten dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y a menudo son aún más contaminantes puesto que la combustión no es tan limpia, emitiendo hollines y otras partículas sólidas.

Sin embargo se encuadran dentro de las energías renovables porque el dióxido de carbono emitido será utilizado por la siguiente generación de materia orgánica. También se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos, que también es contaminante. [6]

1.5. **ENERGÍA SOLAR**

Recibe el nombre de energía solar aquella que proviene del aprovechamiento directo de la radiación del sol, y de la cual se obtiene calor y electricidad. El calor se obtiene mediante colectores térmicos, y la electricidad a través de paneles fotovoltaicos.

En los sistemas de aprovechamiento térmico el calor recogido en los colectores solares puede destinarse a satisfacer numerosas necesidades, como por ejemplo: obtención de agua caliente para consumo doméstico o industrial, o bien para fines de calefacción, aplicaciones agrícolas, entre otras.

Los paneles fotovoltaicos, que constan de un conjunto de celdas solares, se utilizan para la producción de electricidad, y constituyen una adecuada solución para el abastecimiento eléctrico en las áreas rurales que cuentan con un recurso solar abundante. La electricidad obtenida mediante los sistemas fotovoltaicos puede utilizarse en forma directa, o bien ser almacenada en baterías para utilizarla durante la noche. [15]

1.5.1. Beneficios de la energía solar

- Energía limpia y de origen natural, no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero.
- Disponibilidad ilimitada.
- Ahorro económico en costos de suministro.
- Alta inversión inicial pero garantiza estabilidad en la disponibilidad de energía.

1.5.2. Principales desventajas

- Oscilaciones de la radiación solar según época del año, clima y hora.
- Altos costos del sistema de almacenamiento de energía.
- El proceso de fabricación de un panel fotovoltaico tiene gran impacto medioambiental, debido al alto consumo de energía, agua limpia y químicos.

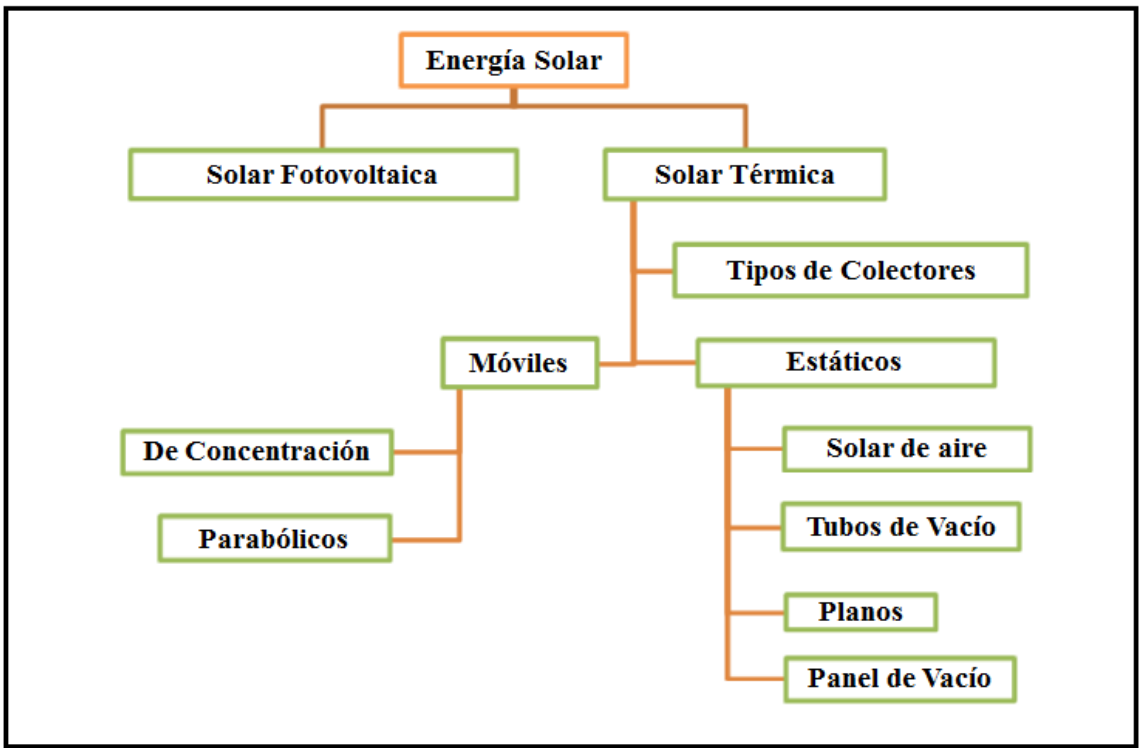


Figura 1-3. Aprovechamiento de la energía solar.
Fuente: Solar Drying Technology

1.5.3. Energía solar en Chile

El norte de Chile cuenta con excepcionales niveles de irradiación debido a su escasa nubosidad y cercanía al trópico. Sin embargo, a pesar de estas incomparables ventajas, muy pocos esfuerzos se han orientado a la masificación del uso de paneles fotovoltaicos y colectores solares. [16]

En la actualidad existen empresas que ofrecen equipos solares para distintas aplicaciones y con la entrada de empresas extranjeras se han ido reduciendo los costos, por lo que hay una amplia variedad de empresas especializadas en el rubro.

De acuerdo a los anuarios estadísticos de la Comisión Nacional de Energía (CNE), en el año 2005 la energía solar fotovoltaica no aparecía entre las fuentes de generación eléctrica del país, pero en 2014 ya representaba el 1%. En la actualidad, representa el 7% de la generación eléctrica total en Chile.

La política nacional de energía pretende alcanzar el 70% de generación con energías renovables hacia 2050, una de las metas es que al año 2035, Chile se convierta en exportador de tecnología y servicios para la industria solar. [17]

1.5.4. Energía solar térmica

La energía solar térmica es un área del aprovechamiento de la energía solar para la generación de calor a partir de la radiación solar. Un colector solar o un panel solar es el elemento encargado de captar la radiación y transferir el calor a un fluido destinado a calefacción o agua caliente sanitaria.

El calentamiento es la aplicación más obvia, pero se puede lograr la refrigeración solar para una red de refrigeración de un edificio mediante el uso de un enfriador de adsorción o absorción impulsado por calor (bomba de calor). Existe una coincidencia productiva de que cuanto mayor es el calor de conducción del aislamiento, mayor es la salida de enfriamiento.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS POR DESECACIÓN

La exposición directa bajo el sol de alimentos y otros productos usando la radiación solar como fuente de energía para el secado es una de las técnicas de conservación más antiguas usadas por la humanidad. Esta forma de la energía es renovable y abundante en cualquier lugar del planeta.

El secado es prioritariamente practicado en países en vía de desarrollo cuya agricultura se beneficia de la desecación de alimentos, lo cual ofrece una alta efectividad en la conservación cuando existen sequias, o en el caso contrario, cuando hay excedentes de cosecha y se desea obtener un mayor beneficio económico de esta.

La conservación por secado básicamente es el proceso de evaporación de líquido desde un elemento que la contiene mediante la transferencia de calor entre un objeto y el sistema que lo rodea, hasta alcanzar el contenido de humedad deseado.

La eliminación de la humedad contenida en los alimentos previene el crecimiento y proliferación de microorganismos tales como; bacterias, hongos y levaduras además de reducir otras reacciones que causan la descomposición. Además el proceso de evaporación genera una reducción sustancial del peso y volumen final del producto, minimizando costos de almacenamiento y transporte, debido a que el producto seco puede ser almacenado a temperatura ambiente

El objetivo principal del secado de alimentos, además de extender su durabilidad y almacenamiento, es el de mejorar su calidad, facilitar el transporte y el procesamiento.
[7]

2.1.1. Características del proceso de secado

En el proceso de secado el calor es la energía necesaria para producir la evaporación del agua y el aire es el medio que sustrae la humedad desde la superficie del producto. Hay dos mecanismos básicos involucrados en un proceso de secado, uno es la liberación del agua contenida en la estructura interna hacia la superficie por medio de difusión en fase líquida o en forma de vapor, mientras que en la segunda etapa ocurre la evaporación del agua desde la superficie del producto por medio del aire circundante.

El secado es un proceso de transferencia de calor y masa el cual depende de factores externos al producto, tales como la temperatura, humedad y velocidad del aire, además influyen otros parámetros como las características físicas del producto (superficie áspera o suave), la composición química (contenido de azúcar, almidón, etc.), la estructura física (porosidad, densidad, etc.), el tamaño y la forma.

La velocidad de evacuación de la humedad contenida en el producto hacia el exterior varía considerablemente de un producto a otro, ya que depende si este es higroscópico o no. Un elemento no higroscópico en un proceso de secado puede alcanzar el nivel cero de contenido de humedad, mientras que un elemento higroscópico como lo son la gran parte de los productos alimenticios estos siempre conservan un contenido de humedad residual.

La humedad contenida en un elemento higroscópico, es la humedad ligada que permanece en el material debido a los capilares cerrados, o debido a las fuerzas de la superficie y la humedad no unida que permaneció en el material debido a la tensión superficial del agua, tal como se muestra en la figura 2-1.

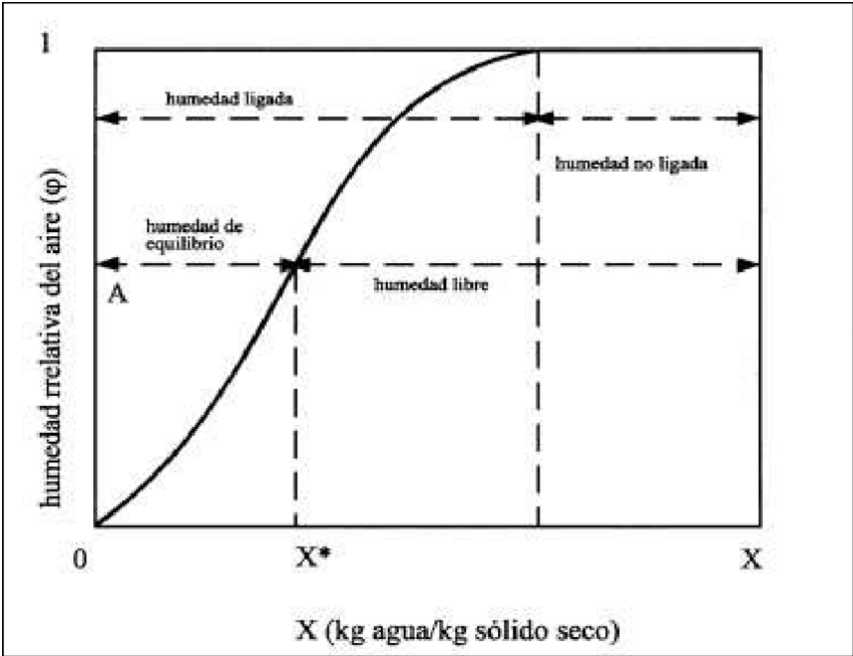


Figura 2-1. Curva de humedad de equilibrio.

Fuente: researchgate.net

Cuando el material higroscópico es expuesto al aire este liberará humedad dependiendo de la humedad relativa del aire. El contenido de humedad en equilibrio (X^*) será alcanzado cuando la presión de vapor de agua en el material se iguala a la presión parcial del agua en el aire circundante. Por ello es importante considerar el contenido de humedad en equilibrio, porque es el nivel máximo de humedad extraída en un material higroscópico bajo ciertas condiciones para el secado.

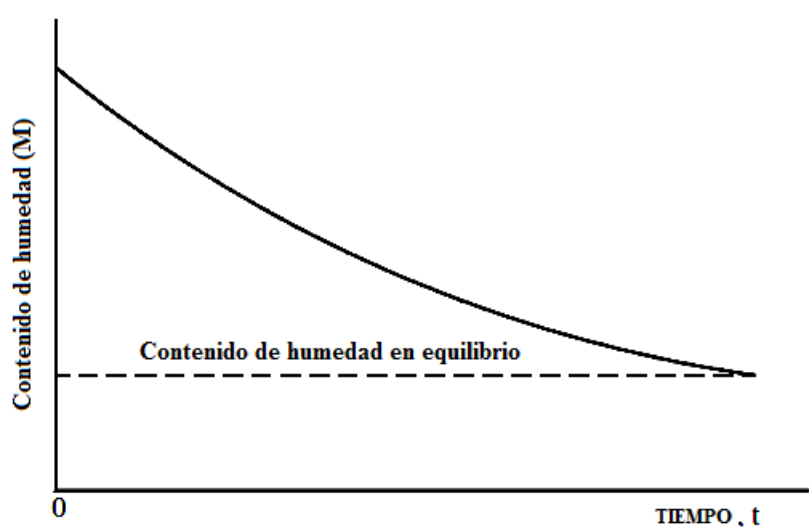


Figura 2-2. Curva de pérdida de humedad.
Fuente: researchgate.net

Existen diversas curvas para el proceso de secado, cada una refleja con mayor detalle el contenido de humedad en cierto tiempo. La curva de la imagen 2-3 grafica la tasa de secado versus tiempo.

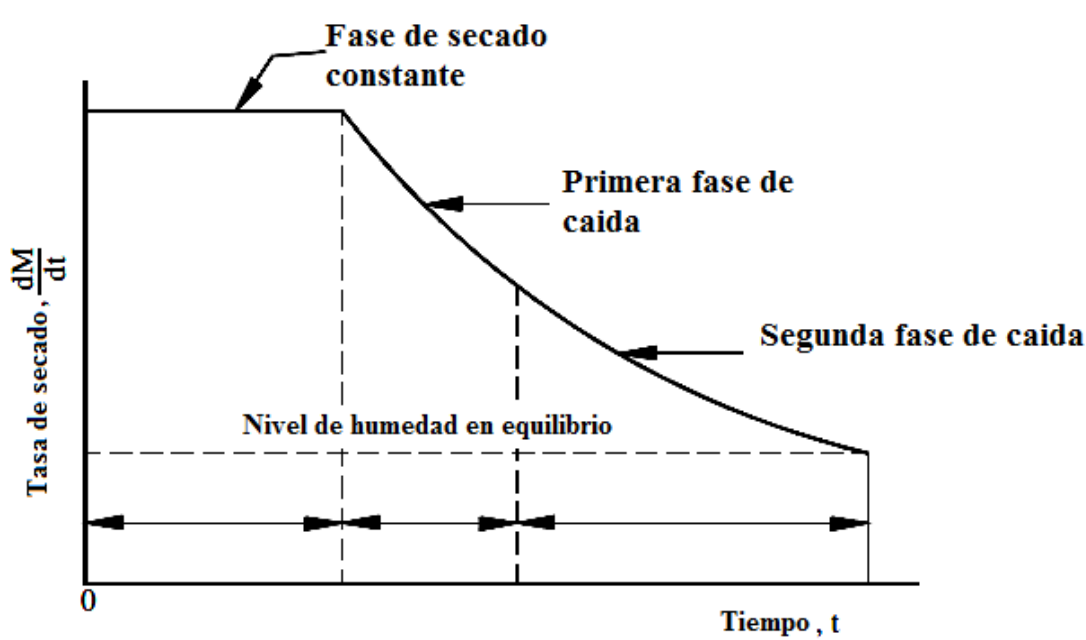


Figura 2-3. Tasa de secado en el tiempo.
Fuente: researchgate.net

Como se observa en la figura 2-4 hay una tasa de secado constante que termina en el contenido de humedad crítico seguido de una tasa de secado decreciente.

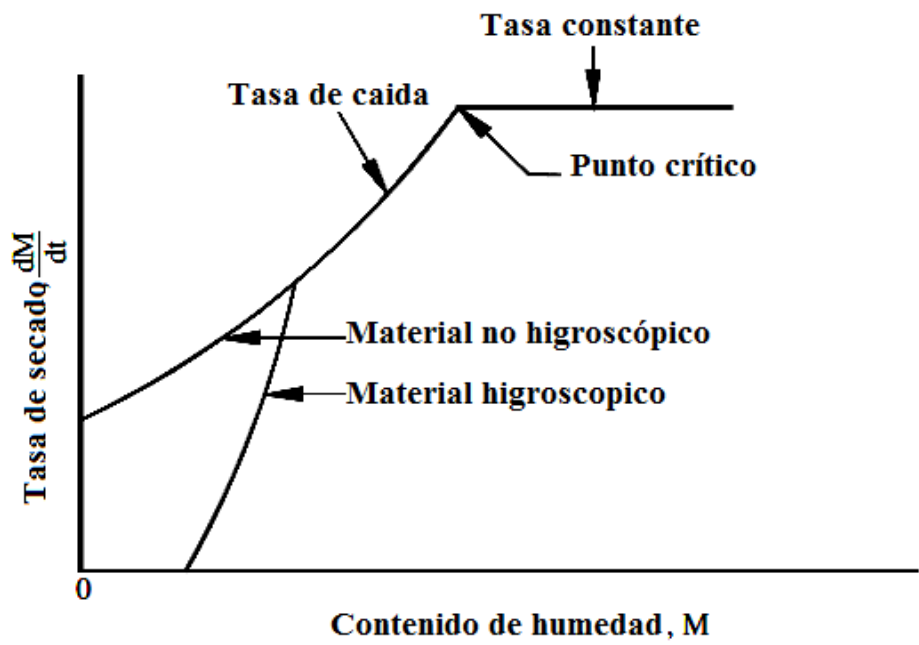


Figura 2-4. Curva de la tasa de secado.

Fuente: Solar Drying Technology

La velocidad de secado es constante en ambos materiales (higroscópicos y no higroscópicos), mientras que el periodo de caída presenta una leve diferencia. Sin embargo, en los materiales no higroscópicos durante el periodo decreciente, la velocidad de secado continúa disminuyendo hasta que el contenido de humedad se vuelve cero.

Mientras que en los materiales higroscópicos, el periodo de caída es similar hasta que el contenido de humedad no ligada se elimina por completo, luego la velocidad de secado disminuye y se elimina algo de humedad residual y continúa hasta que la presión de vapor del material sea igual a la presión de vapor del aire secante. En el momento que se alcanza este equilibrio entonces la tasa de secado llega a cero.

El periodo de secado es constante para la mayoría de los materiales orgánicos como frutas, verduras, madera, etc. Es corto y es el periodo de la tasa de caída en el que es de más interés y que depende de la velocidad a la que se elimina la humedad. En el régimen de tasa de caída la humedad se migra por difusión y en los productos con alto contenido de humedad, la evaporación es comparativamente más lenta debido a las células erectas y los intersticios llenos.

En la mayoría de los productos agrícolas hay minerales y agua en fase líquida que también migran a la superficie, los cuales incrementan la viscosidad, y por lo tanto, reducen la presión de vapor de la superficie, lo que reduce la tasa de evaporación de la humedad.

El secado se realiza de dos formas, el secado de capa fina y el secado de capa profunda. El más común es el secado de capa fina, que se realiza en la mayoría de las frutas y verduras. El producto se extiende en capas finas con toda la superficie expuesta al aire que se mueve a través del producto y la ley de Newton de enfriamiento es aplicable en la tasa de caída. La mayoría de los granos se secan en una capa profunda que puede considerarse como una serie de capas delgadas donde la temperatura y humedad varían de una capa a otra. [8]

2.1.2. Actividad del agua en los alimentos

Probablemente en el hogar nos hemos percatado que los vegetales y las frutas frescas se deterioran con mayor rapidez que un alimento preservado. La razón de que esto suceda tiene directa relación con la actividad del agua.

La actividad del agua es un parámetro importante que está correlacionado con la calidad y el periodo de almacenamiento de los productos alimenticios. Comúnmente los ingredientes de los alimentos que poseen un alto contenido de humedad son altamente propensos a la descomposición.

La presencia de agua en los alimentos hidratados se muestra de dos formas, ya sea como agua libre o humedad ligada. El contenido de agua libre toma parte en reacciones químicas y procesos biológicos, que principalmente deterioran la calidad de los alimentos. La actividad del agua en un producto húmedo influye mucho en las reacciones químicas (reacciones enzimáticas y no enzimáticas), germinación de esporas y cultivo de microorganismos, como bacterias, moho, hongos y levaduras. Por lo cual se debe mantener la tasa de reacciones bajo control manteniendo por debajo de 0.6 la actividad del agua.

El control de la actividad del agua en un alimento se mantiene al reducir su contenido de humedad o añadiendo sustancias químicas tales como sales, azúcares y glicerina que controlan el contenido de agua disponible para la reacción. Sustancias que son efectivas pero alteran el sabor del producto.

En el secado la actividad del agua (a_w) es el término que indica la disponibilidad de agua libre de un producto para reacciones químicas y el crecimiento de microorganismos. La cual se puede definir como la relación entre la presión parcial del vapor de agua justo por encima del producto húmedo y la presión parcial del agua pura a la misma temperatura.

La actividad del agua aumenta con el aumento de la temperatura y la presión, se mide en un rango entre 0 y 1 y se expresa como en la ecuación 2-1. [9]

$$a_w = \frac{p}{p_0} [\%]$$

Ecuación 2-1. Actividad del agua en un alimento

Fuente: Solar Drying Technology

Dónde:

p – es la presión parcial del vapor de agua en el producto húmedo a cierta temperatura específica.

p_0 – es la presión parcial del agua pura en saturación y la misma temperatura.

La tasa de deterioro de un producto y la actividad del agua se muestra en el gráfico 2-5 que representa un mapa de estabilidad. El cual muestra las velocidades de reacción de oxidación, pardeamiento y reacciones enzimáticas. Además se puede deducir que la calidad de un producto se ve principalmente afectada por hongos, bacterias y otros microorganismos que se desarrollan cuando la actividad del agua es superior a 0.7.

En la zona de baja actividad del agua, la calidad del producto se ve afectada por reacciones químicas como el pardeamiento, la oxidación y las reacciones enzimáticas en lugar del desarrollo de microorganismos.

El desarrollo de microorganismos no solo depende de la actividad del agua, también influyen otros factores tales como, temperatura, contenido nutricional, nivel de PH, preservantes, contenido de oxígeno y otros componentes alimenticios.

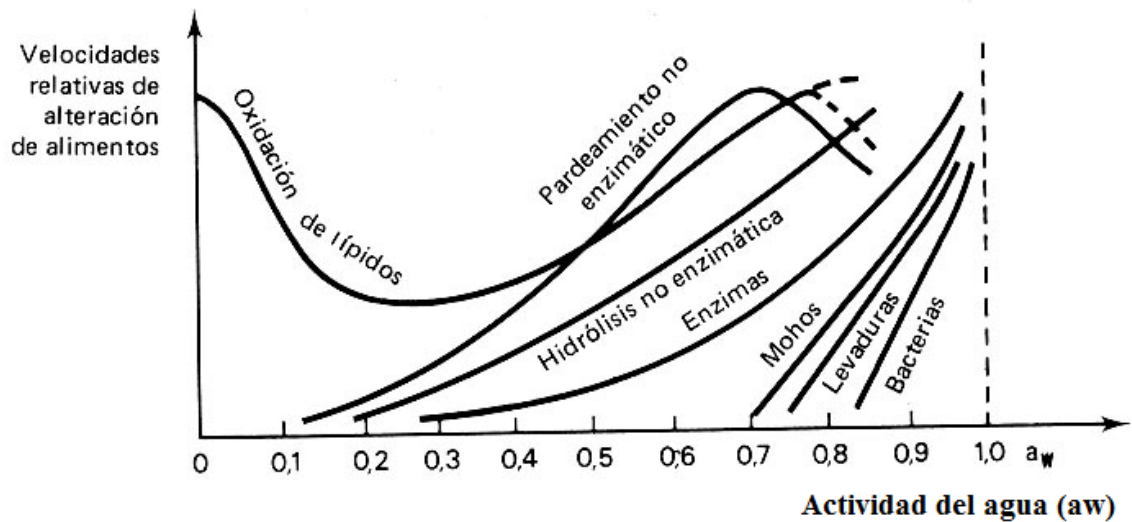


Figura 2-5. Velocidad de alteración de los alimentos, en función de la actividad del agua.

Fuente: www.fundaciónrural.org.ar

2.2. PROPIEDADES DEL AIRE PARA EL SECADO DE ALIMENTOS

En el proceso de secado las propiedades del aire y la velocidad de eliminación de humedad desde el producto son los parámetros importantes para la estimación de la duración del secado.

La capacidad del aire para eliminar humedad depende principalmente de su temperatura y su humedad inicial. Mientras mayor sea la temperatura del aire y menor su contenido de humedad, mayor será la capacidad del aire para remover humedad desde el producto.

La relación entre la temperatura, la humedad y otras propiedades termodinámicas está representada por la tabla psicrométrica. Es importante apreciar la diferencia entre la humedad absoluta y la humedad relativa del aire.

La humedad absoluta es el contenido de humedad del aire (masa de agua por unidad de masa de aire) mientras que la humedad relativa es la relación, expresada como porcentaje, del contenido de humedad del aire a una temperatura específica con respecto al contenido de humedad del aire si estuviera saturado a esa temperatura.

Los cambios en la condición del aire cuando se calienta usando la energía solar y luego circula hacia el interior de la cámara de secado que contiene el producto húmedo se muestran en la figura 2-6.

El calentamiento del aire desde la temperatura T_A a T_B está representado por la línea AB. Durante el calentamiento la humedad absoluta permanece constante en ω_A mientras que la humedad relativa desciende desde ϕ_A hasta ϕ_B . A medida que el aire se mueve a través del material que se va a secar, este absorbe la humedad.

Hipotéticamente en el secado adiabático, el calor sensible en el aire se convierte en calor latente y el cambio en la condición del aire se representa a lo largo de una línea de entalpía constante BC.

Tanto la humedad absoluta como la humedad relativa aumentan de (ω_B) a (ω_C) y desde (ϕ_B) a (ϕ_C) respectivamente, pero la temperatura del aire disminuye a T_C . La absorción de humedad por el aire sería la diferencia entre las humedades absolutas en C y B.

Si el aire no calentado pasa a través de la bandeja, el proceso de secado estaría representado por la línea AD. Suponiendo que el aire en D esté a la misma humedad relativa, ϕ_C , como el aire calentado en C, entonces la humedad absorbida sería ($\omega_D - \omega_A$), considerablemente menor que la absorbida por el aire caliente ($\omega_C - \omega_A$).

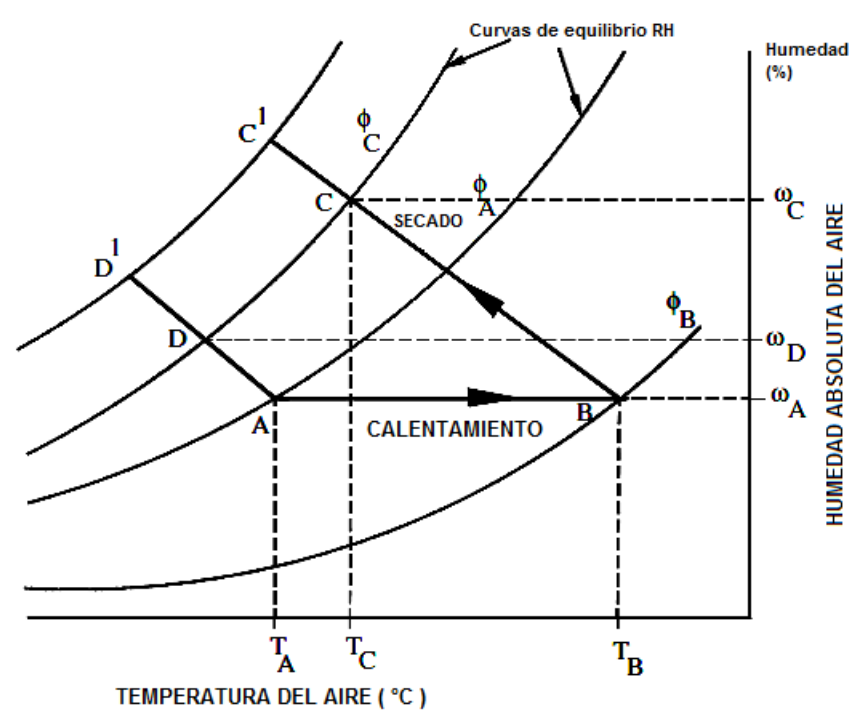


Figura 2-6. Representación del proceso de secado.
Fuente: Technology of Solar Drying

2.2.1. Temperatura de bulbo seco y bulbo mojado

La medición de la temperatura del aire en un lugar determinado con un termómetro común recibe el nombre de temperatura de bulbo seco (Tbs). La temperatura de bulbo mojado por el contrario se realiza al cubrir el termómetro con un paño mojado y tomar de esa forma la medición de la temperatura.

En condiciones de saturación del aire, la temperatura de bulbo seco y bulbo mojado serán las mismas. En otros casos, la temperatura de bulbo seco será mayor que la temperatura de bulbo mojado. Aquella diferencia entre la temperatura de bulbo seco y bulbo mojado se conoce como depresión de bulbo mojado.

2.2.2. Temperatura de punto de rocío

La temperatura a la cual se forma el rocío se conoce como temperatura del punto de rocío y se produce por el enfriamiento del aire a presión constante hasta que la humedad alcanza una condición de saturación y el vapor de agua se condensa como rocío.

2.2.3. Humedad relativa y específica

El aire atmosférico contiene cierta cantidad de vapor de agua y los parámetros humedad específica y humedad relativa se utilizan para indicar la cantidad de ella. La humedad específica o simplemente la humedad es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco en la mezcla de vapor y aire, que generalmente se expresa en gramos de agua por kilogramo de aire seco.

La humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor de agua en una mezcla y la presión parcial de la mezcla saturada a la misma temperatura, y se expresa como porcentaje. El grado de saturación del aire húmedo es la relación entre la masa de vapor de agua en una unidad de masa de aire seco y la masa de vapor de agua en una unidad de masa de aire seco cuando el aire está saturado a la misma temperatura.

$$\text{Humedad específica} = \frac{\text{masa de vapor de agua}}{\text{masa de aire seco}} = \frac{m_w}{m_a} = 0.662 \frac{P_w}{P_a} = 0.662 \frac{P_w}{P_t - P_w}$$

Ecuación 2-2. Humedad específica de un producto

Fuente: Solar Drying Technology

Dónde:

P_w ; Presión parcial del vapor de agua.

P_a ; Presión parcial del aire.

P_t ; Presión total del aire y vapor.

$$\text{Grado de saturación} = \frac{\text{masa de vapor de agua}}{\text{masa de vapor de agua saturada}} = \frac{H}{H_s}$$

Ecuación 2-3. Humedad específica de un producto

Fuente: Solar Drying Technology

$$\text{Humedad relativa (HR)} = \frac{P_w}{P_{ws}} \times 100$$

Ecuación 2-4. Humedad específica de un producto

Fuente: Solar Drying Technology

Dónde:

P_w ; Presión parcial del vapor de agua a cierta temperatura.

P_{ws} ; Presión parcial del vapor de agua saturado a la misma temperatura.

2.2.4. Psicrometría del aire húmedo

El proceso de secado se caracteriza principalmente por las propiedades de la mezcla de vapor aire-agua. Una carta psicrométrica indica la interrelación de todas las propiedades importantes de la mezcla de vapor aire-agua. Además representa la humedad absoluta, la temperatura de punto de rocío y volúmenes específicos respecto a la temperatura de bulbo seco.

Las temperaturas de bulbo seco y la masa de contenido de humedad por kg de aire seco se trazan en ejes horizontales y verticales, respectivamente. Las temperaturas del punto de rocío están marcadas en la línea de la curva superior, que corresponde al 100% de humedad relativa. Aquella línea se conoce como línea de saturación, y las líneas de humedad relativa constante en porcentaje se marcan entre la línea de saturación y la línea de base del gráfico.

Las líneas de bulbo húmedo son líneas diagonales que se inclinan hacia la derecha formando un ángulo de 30° con respecto al eje horizontal. El volumen específico del volumen de la mezcla de vapor aire-agua por kg de aire seco, es otra línea diagonal más empinada a 60 [°C].

En la figura 2-7 se muestra un gráfico psicrométrico simple. Los procesos psicrométricos de calentamiento sensible o enfriamiento sensible se indican a lo largo de la línea horizontal, lo que muestra que durante el proceso, la relación de humedad permanece constante. La humedad relativa disminuye con el calentamiento y aumenta con el enfriamiento.

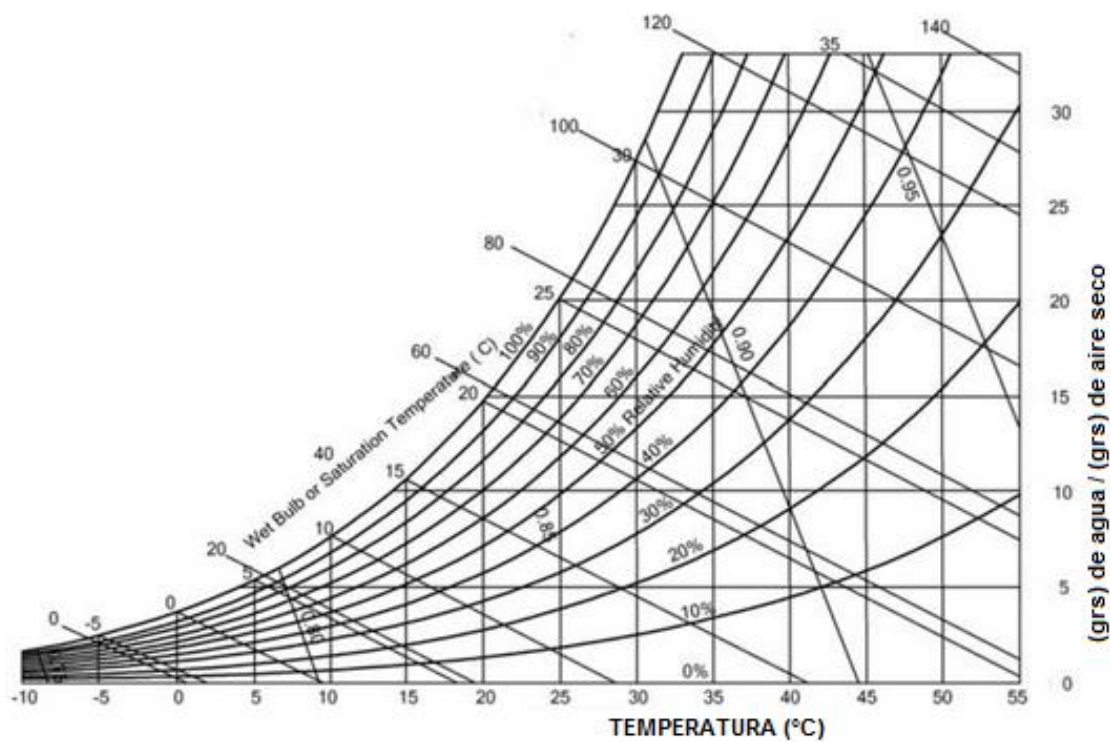


Figura 2-7. Carta Psicrométrica del aire húmedo.

Fuente: Solar Drying Technology

PRODUCTO	CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL (%)	CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL (%)
AJÍ	80	5
AJO	80	4
CEBOLLA	80	4
COLIFLOR	80	6
CAMOTE	75	7
DAMASCO	85	18
DURAZNO	85	18
MAÍZ	24	14
MANZANA	80	24
PAPA	75	13
PLATANO	80	15
UVA	80	15-20
ZANAHORIA	70	5

Tabla 2-1. Contenido de humedad inicial y final en productos agrícolas.

Fuente: Solar Drying Technology

2.2.5. Ubicación geográfica y datos climáticos

El diseño de un secador solar térmico se realiza en base a las características climáticas, disponibilidad horaria de irradiación solar, características del producto a secar, etc.

Para el estudio de las características del secador solar de tipo mixto se consideró a la ciudad de Talcahuano como ubicación geográfica. Talcahuano se localiza entre las coordenadas 36°43’ de latitud sur y 73°07’ de longitud oeste y se encuentra a una altitud de 15(m) sobre el nivel del mar.

Las propiedades físicas del aire son de gran relevancia para calcular el tiempo necesario para la obtención de producto seco. Para ello se recopilaron datos referentes a la humedad relativa, temperatura y velocidad media del aire para el año 2017, estos datos fueron obtenidos desde la estación climatológica Punta Parra, en la comuna de Tomé.

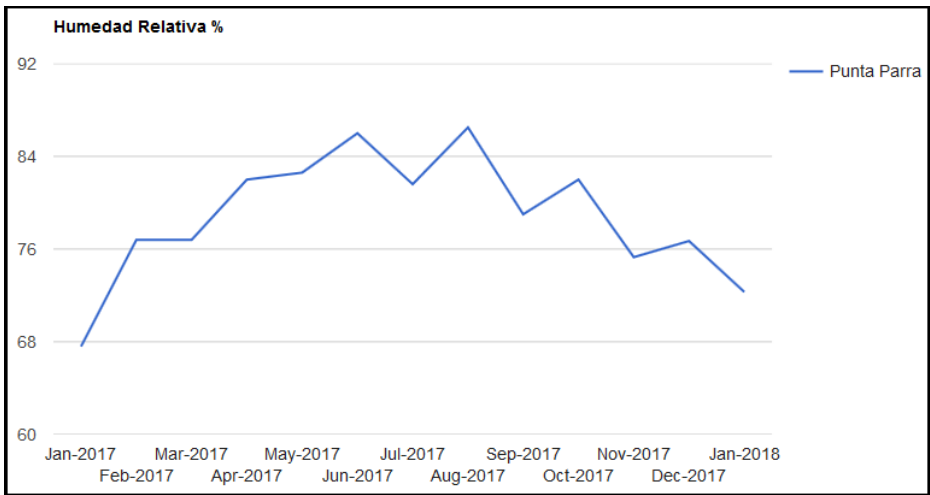


Gráfico 2-1. Humedad relativa del aire en un año.

Fuente: agromet.inia.cl/estaciones

En el gráfico 2-1 se aprecia que la humedad relativa del aire presenta un alto contenido de humedad, siendo en los meses octubre a marzo donde el contenido de humedad bordea un 76[%]. Por lo tanto se debe extraer una cantidad considerable de humedad desde el aire para que el proceso de secado sea efectivo. No obstante la zona cuenta con condiciones favorables en cuanto a velocidad media del viento como se puede observar en la tabla 2-2.

MES (2017)	DIRECCIÓN	VELOCIDAD (m/s)	TEMPERATURA AIRE (°C)
Enero	Sur-oeste	3.8	18,2
Febrero	Sur-oeste	2.7	17
Marzo	Sur-oeste	2.3	15,3
Abril	Este	2.2	14
Mayo	Este	3.2	10,7
Junio	Este	3.9	9,3
Julio	Norte	3	8,8
Agosto	Norte	3.7	8,6
Septiembre	Norte	2.9	9,9
Octubre	Norte	4	11,3
Noviembre	Norte	3.4	13,9
Diciembre	Nor-este	3.1	15,2

Tabla 2-2. Registro anual de mediciones del viento.

Fuente: agromet.inia.cl/estaciones.php

2.3. **FUENTES DE ENERGÍA**

Una fuente de energía es cualquier material o fenómeno a partir del cual podemos obtener energía; materiales como el carbón o el petróleo, y fenómenos como el viento o las olas, constituyen fuentes de energía. Las fuentes de energía pueden ser, además, renovables o no renovables. [10]

2.3.1. **Fuentes de energía renovables**

Las fuentes de energía renovables se caracterizan porque, en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil, no se consumen ni se agotan en una escala humana de tiempo. [1]

Entre las principales fuentes de energía renovables no convencionales se encuentran:

- Energía solar (radiación solar).
- Energía eólica (viento).
- Energía de la biomasa (vegetación).
- Energía mareomotriz (mareas).
- Energía geotérmica (calor de la tierra).
- Energía Hidráulica (energía potencial del agua).

2.3.2. Energía solar

La Energía solar es la que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del Sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear.

El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas: por conversión térmica de alta temperatura (sistema fototérmico) y por conversión fotovoltaica (sistema fotovoltaico). [11]

2.3.3. Energías no renovables

Las Fuentes de energía no renovables son aquellas que se encuentran de forma limitada en el planeta y cuya velocidad de consumo es mayor que la de su regeneración. [12]

Existen varias fuentes de energía no renovables, como son:

- Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural)
- La energía nuclear (fisión y fusión nuclear)

2.4. TRANSFERENCIA DE CALOR

Si un cuerpo caliente se pone en contacto con otro frío, la experiencia nos dice que el primero se enfría y el segundo se calienta hasta que ambos igualan sus temperaturas. Esto es debido a una transferencia de energía del cuerpo caliente al frío. Esta energía transferida a través de los límites de un sistema, en virtud de una diferencia de temperatura, constituye calor. [13]

El calor es un fenómeno transitorio, en el cual dos cuerpos que están a temperaturas distintas y constituyen cada uno por separado un sistema. Los cuerpos no contienen calor pero sí energía y al poner a ambos sistemas en contacto el calor es transferido desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el cuerpo de menor temperatura hasta alcanzar un equilibrio térmico, por lo que al final del proceso ninguno de los sistemas contiene calor.

Existen tres mecanismos físicos por cuales el calor es transferido de un cuerpo a otro, los cuales son: conducción, convección y radiación.

2.4.1. Conducción

Es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero.

La propiedad física de los materiales que determina su capacidad para conducir el calor es la conductividad térmica. La propiedad inversa de la conductividad térmica es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales para oponerse al paso del calor.

2.4.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de la materia o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

En la naturaleza, la mayor parte del calor ganado por la atmósfera por conducción y radiación cerca de la superficie, es transportado a otras capas o niveles de la atmósfera por convección.

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:

$$H = hA(T_A - T)$$

Ecuación 2-5. Transferencia de calor por convección

Fuente: Mecanismos de transferencia de calor

Dónde:

H: Coeficiente de convección, en $W/(m^2K)$

A: es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T .

2.4.3. Radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de radiación electromagnética.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. [14]

2.5. SECADOR SOLAR TÉRMICO

Un secador solar térmico está formado por un colector solar de aire, una cámara de secado, bandejas y un escape de aire para la extracción del aire húmedo. El sistema requiere de un flujo de aire seco para realizar el secado, mientras menor sea el contenido de humedad del aire, mayor será la cantidad de humedad removida desde el producto.

Los sistemas de secado se clasifican según el rango de temperatura de funcionamiento en dos grupos; secadores de alta temperatura y secadores de baja temperatura. Sin embargo, los secadores se clasifican más ampliamente según su fuente de energía en; secadores alimentados con combustibles fósiles (más comúnmente conocidos como secadores convencionales) y secadores solares.

Estrictamente, todos los diseños prácticos de secadores de alta temperatura funcionan con combustibles fósiles, mientras que los secadores de baja temperatura son sistemas basados en energía fósil o energía solar.

Los secadores solares se pueden clasificar en base a los siguientes criterios:

- Modo del movimiento del aire.
- Dirección del flujo de aire.
- Disposición del secador.
- Estado de la contribución solar.

Además los secadores solares se clasifican según el modo de calefacción y el grado de aprovechamiento de la energía solar principalmente en dos grupos:

- Sistemas de secado solar activos (secadores solares híbridos).
- Sistemas de secado solar pasivos (sistemas de secado de circulación natural del aire).

Los sistemas de secado solar se sub-clasifican en tres modelos según la disposición de los componentes del sistema y el grado de aprovechamiento del calor solar. [15]

2.5.1. Secador solar tipo directo

El método de secado directo consiste en exponer los productos a secar directamente a la luz solar y aislada del medio solamente por una cubierta de material transparente. La cubierta transparente permite el ingreso de la radiación solar a la cámara de secado, produciendo un efecto invernadero donde se encuentra el producto, aumentando la temperatura del aire y del producto que se está secando.

La principal desventaja de este tipo de secador es su incapacidad para controlar la temperatura al interior de la cámara debido a la absorción directa de radiación, lo que puede causar la pérdida de nutrientes de los productos sensibles a la luz solar.

2.5.2. Secador solar tipo indirecto

El producto es situado en una cámara opaca y es calentado por el aire que circula a través de ella. El aire, a su vez, ha captado energía térmica antes de entrar a la cámara al circular por el interior de un colector solar de aire. Este tipo de secado es empleado en el secado de productos perecederos y frutas que sufren una notable alteración en nutrientes al ser expuestos directamente al sol.

Los secadores indirectos pueden alcanzar temperaturas de operación más elevadas que los directos y con ellos conseguir productos deshidratados de mayor calidad.

En referencia a las desventajas hay que tener en cuenta las fluctuaciones de temperatura y la dificultad para mantener unas condiciones constantes en la cámara de secado. En comparación de los directos requieren inversiones iniciales mayores y también los costos de operación y mantenimiento son superiores.

2.5.3. Secador solar mixto

Se combina la acción directa de la radiación solar con un pre-calentamiento del aire. El diseño básico tiene los mismos elementos que un secador indirecto pero algunas superficies transparentes. [16]

2.6. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es el flujo de energía que recibe la tierra por parte del sol, en forma de ondas electromagnéticas y es una magnitud física que se expresa en términos de potencia o energía por unidad de área.

Se estima que la radiación solar que llega a la tierra, en forma perpendicular al sol antes de ingresar a la atmosfera, alcanza un valor promedio de 1366 (W/m²), cantidad denominada como constante solar.

La energía solar es en parte absorbida, reflejada y dispersada por las nubes, las partículas y las moléculas que componen la atmósfera terrestre. De esta manera la composición de la atmósfera influye en la cantidad de radiación solar que llega a la superficie del planeta en cada punto y en cada momento.

Los principales procesos involucrados en la modificación de la radiación que recibe la superficie son la absorción de la radiación, principalmente debido al ozono y al vapor de agua, y la dispersión de la radiación por efecto de las nubes. [17]

2.6.1 Radiación solar en Chile

En el año 1987 el laboratorio de energía solar de la Universidad Técnica Federico Santa María publicó el Archivo Nacional de Evaluaciones Solarimétricas.

En dicho archivo se presentan los promedios mensuales y anuales de radiación global diaria sobre superficie horizontal de 28 estaciones meteorológicas. En la tabla siguiente se indica la radiación solar diaria total horizontal promedio anual para las regiones del país.

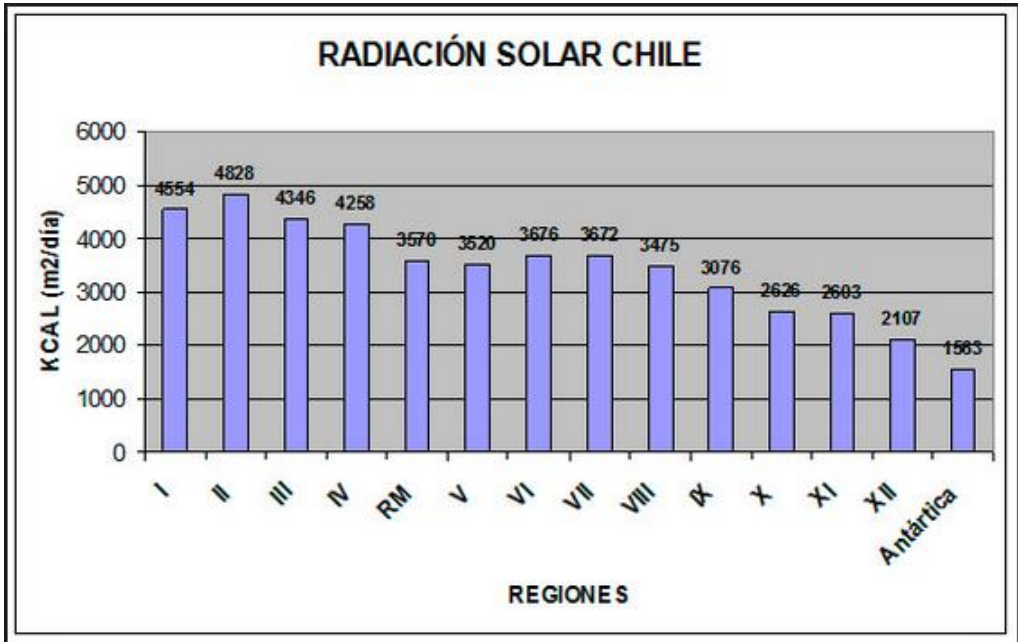


Gráfico 2-2. Estimación de la radiación solar en regiones de Chile.
Fuente: chilerenovables.cl/radiacion-solar-chile-por-regiones/

Se demuestra que el norte de Chile presenta condiciones extraordinariamente favorables para la utilización de la energía solar. Entre las regiones I y IV el potencial de energía solar puede clasificarse entre los más elevados del mundo. Las radiaciones observadas entre las regiones V y VIII también son susceptibles de ser utilizadas en aplicaciones solares. [18]

2.6.2. Radiación solar en Talcahuano

Como se puede apreciar en la tabla 2.3. la ciudad de Talcahuano posee excelentes índices de radiación solar, lo que hace factible el secado solar de productos agrícolas, sin embargo el gráfico muestra una acentuada diferencia en los niveles de radiación durante el año, lo que se traduce en tiempos de secado más extensos. [19]

Mes	Radiación solar mensual (kWh/m2)
Enero	222,22
Febrero	168,22
Marzo	149,45
Abril	98,45
Mayo	57,22
Junio	45,22
Julio	50,22
Agosto	77,22
Septiembre	113,45
Octubre	165,22
Noviembre	192,45
Diciembre	216,22
Total	1.555,57

Tabla 2-3. Radiación mensual en Talcahuano.
Fuente: Sistemas Solares Térmicos II, guía de diseño e instalación sistemas de A.C.S.

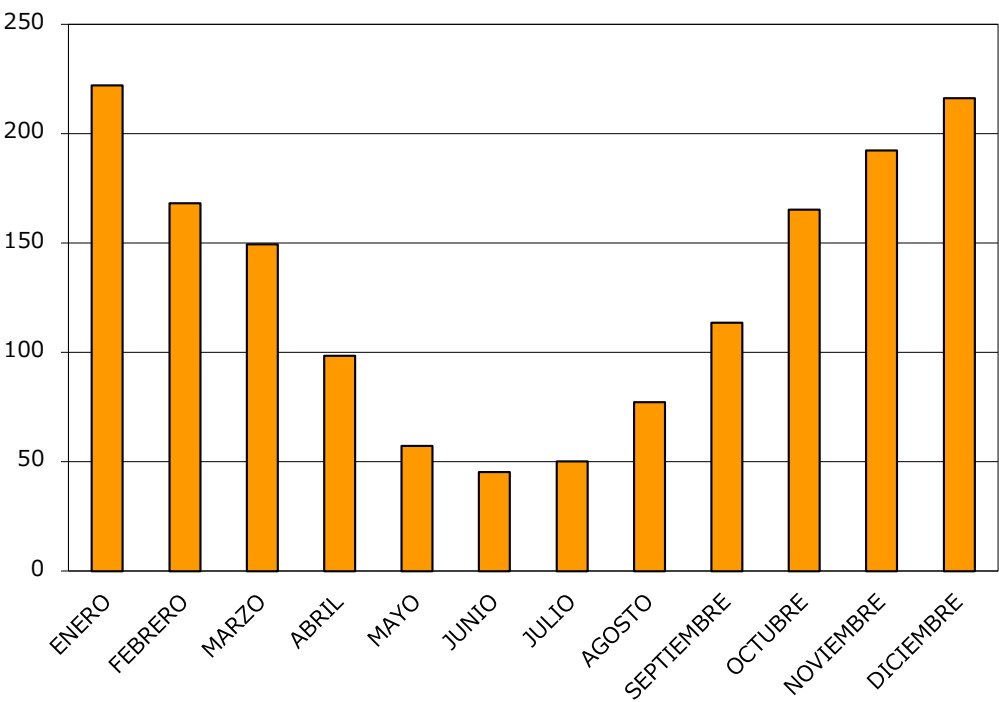


Gráfico 2-3. Radiación solar mensual en (kWh/m²)
Fuente: Sistemas Solares Térmicos II, guía de diseño e instalación sistemas de A.C.S.

2.6.3. Radiación solar media y temperatura del ambiente

MES	RADIACIÓN SOLAR (MJ/m2)	TEMPERATURA MEDIA (°C)
Enero	29,2	19
Febrero	22,4	17
Marzo	17,4	15
Abril	12,2	14
Mayo	8,7	11
Junio	5,5	10
Julio	8,1	9
Agosto	9,6	9
Septiembre	14,9	10
Octubre	18,3	12
Noviembre	24	14
Diciembre	25,7	16
MEDIA ANUAL	24	13

Tabla 2-4. Radiación y temperatura media en Talcahuano
Fuente: meteored.cl

2.6.4. El espectro de radiación solar

El espectro de radiación tiene distintas frecuencias, donde aproximadamente la mitad de esta energía puede ser detectada por el ojo humano, la que conocemos como la luz visible. En la otra mitad se encuentran los infrarrojos y los ultravioletas, de los cuales la mayor parte se sitúa en la parte infrarroja del espectro.

La cantidad de radiación proveniente del sol no está distribuida de forma homogénea en las distintas longitudes de onda. Al medir el espectro de radiación fuera de la atmosfera terrestre se observa que la longitud de onda está relacionada con la energía que posee cada fotón de luz. Mientras menor sea la longitud de onda, mayor es la cantidad de energía de cada fotón.

En la figura se muestra la curva de radiación de un cuerpo negro, representada por la línea continua en forma de campana, correspondiente a un cuerpo con una temperatura de 5700 (°K), equivalente a la temperatura de la capa más externa del sol. La línea discontinua representa la radiación en el tope de la atmosfera, estimada a partir de diversas observaciones.

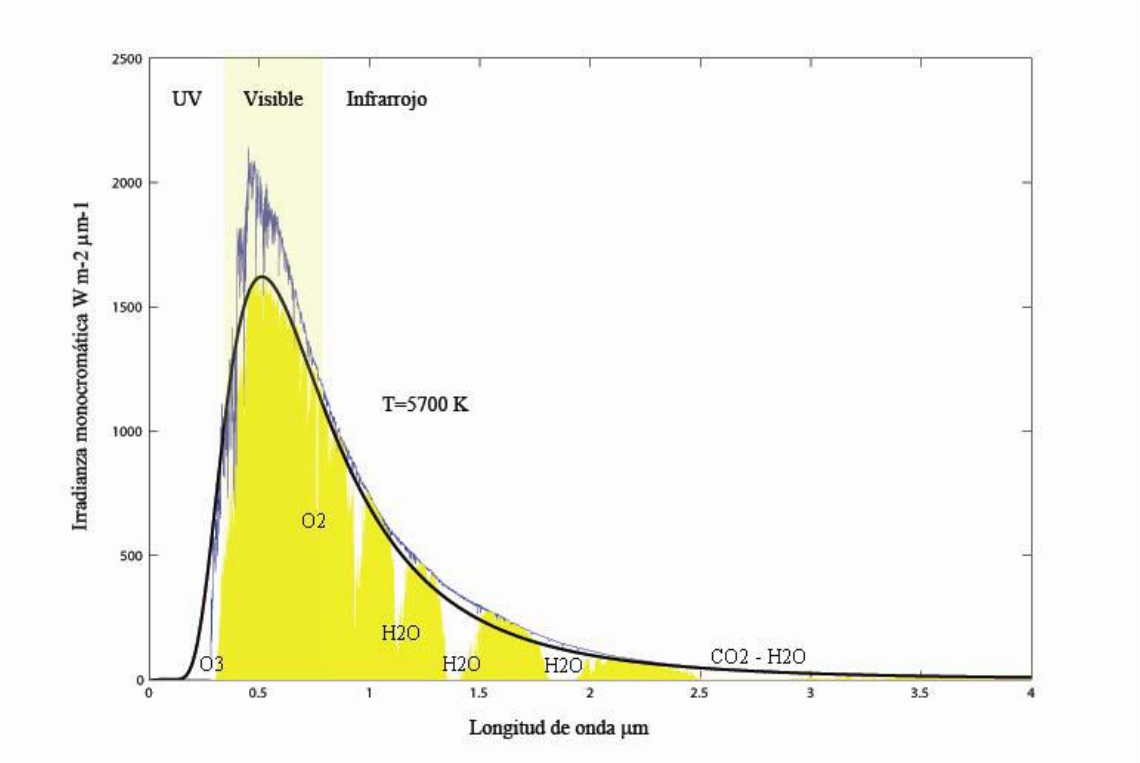


Figura 2-8. Curva de Planck para un cuerpo negro.
Fuente: Explorador del recurso solar en Chile

La curva de radiación para un cuerpo negro indica que la mayor cantidad de radiación solar se encuentra en longitudes de onda próximas a 0.5 (μm). Esto es consistente con que la radiación solar observada concentra su máximo en la parte del espectro llamada “banda visible” que va desde los 0.4 a 0.7 (μm).

En esa parte del espectro hay muy poca absorción atmosférica y por lo tanto la mayor parte de la radiación llega sin sufrir alteraciones a la superficie terrestre. Plantas y animales ocupamos la energía que llega en la banda visible para nuestro metabolismo, de manera directa a través de la fotosíntesis, o de manera indirecta a través de la alimentación. [20]

2.6.5. Formas de la radiación solar en una superficie

Respecto a cómo reciben la radiación los objetos situados en la superficie terrestre se pueden distinguir tres tipos de radiaciones principales.

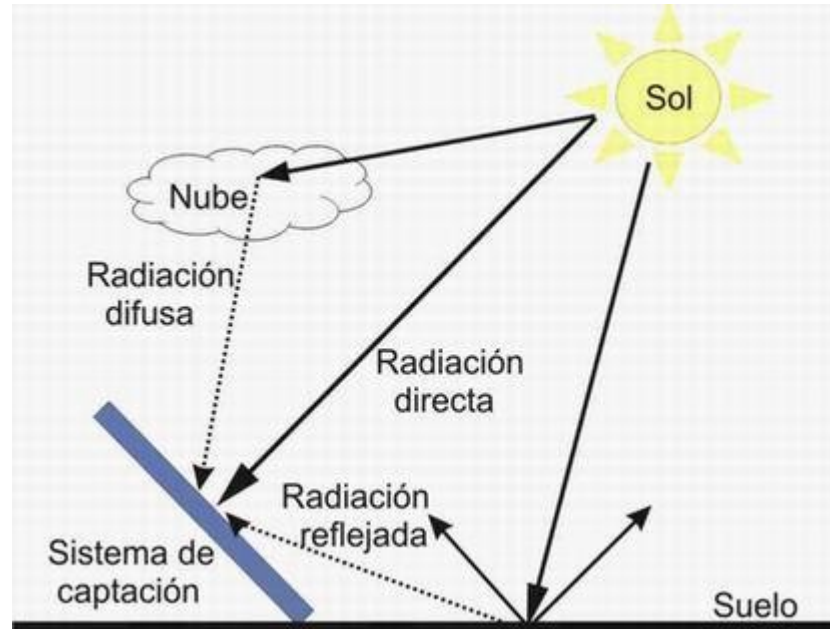


Figura 2-9. Esquema de formas de la radiación incidente en la tierra.

Fuente: esrenovable.com

- Radiación directa: Es aquella que alcanza la superficie directamente desde el sol, sin experimentar ningún tipo de cambio de dirección o reflexión. Este tipo de radiación se caracteriza por el hecho de formar sombras muy definidas en los objetos opacos que intercepta.
- Radiación difusa: Parte de la radiación es reflejada o absorbida por las nubes. Esta energía se le llama difusa, va en todas direcciones, y no sólo son las nubes las que producen las absorciones o reflexiones, sino que también por las partículas del polvo atmosférico, las montañas, los árboles, los edificios, el mismo suelo, etcétera.

Este tipo de radiación se destaca por no producir sombra alguna con respecto a los objetos opaco que se le interponen. Las superficies horizontales son las que más reciben ésta radiación difusa.

- Radiación reflejada: Esta radiación es la que, como su nombre lo indica, es reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de esta radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie.

- Las superficies horizontales no reciben ninguna parte de esta radiación, ya que no ven la superficie terrestre, más las superficies verticales son las que más la reciben.
- Radiación total: Es la suma de la radiación difusa y la radiación directa.
- Radiación global: Son todas las radiaciones, es decir, la suma de la radiación reflejada y la radiación total. [21]

2.6.6. Variaciones estacionales de la radiación solar

La radiación que llega a la tierra desde el sol presenta grandes fluctuaciones a lo largo del año. El cambio en la intensidad de la radiación solar que llega al tope de la atmósfera se explica principalmente debido a las variaciones de la posición de la tierra en su órbita alrededor del sol y de la posición del eje terrestre respecto del plano de la órbita.

En la situación más sencilla, si la tierra girara en torno al sol en una órbita circular y su eje no estuviera inclinado respecto al plano de la órbita, no existirían cambios en la radiación experimentada al tope de la atmósfera en distintas épocas del año, pues la radiación recibida se debilita según el cuadrado de la distancia al sol. [22]

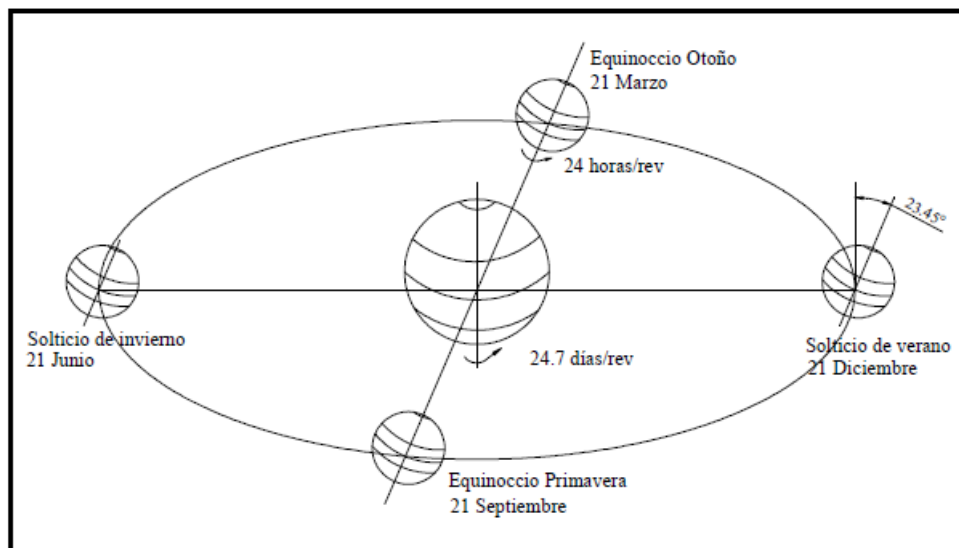


Figura 2-10. Desplazamiento de la tierra en un año.

Fuente: dgf.uchile.cl

2.7. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UN COLECTOR SOLAR TÉRMICO DE AIRE

Para realizar el proceso de secado de excedentes agrícolas el colector solar térmico de aire debe poseer ciertas características en su diseño y construcción para obtener calor de manera eficiente, además de ser una alternativa rentable en comparación a los secadores convencionales que consumen electricidad u otra fuente de energía de origen fósil.

Un colector solar de aire permite calentar el aire a partir de la radiación emitida por el sol. Los componentes básicos de un colector solar térmico de aire son, placa absorbente, pasaje de aire y aislante térmico. La radiación solar transmitida a través de la cubierta calienta la placa absorbente, que a su vez calienta el aire en el conducto de aire.

2.7.1. Ventajas y desventajas de los colectores solares de aire

Ventajas

- El aire no se evapora, no se congela y no se producen daños cuando hay una fuga.
- El daño producto de la corrosión es más lento.
- El sistema no funcionará mal si hay pequeñas fugas.
- El aire no es tóxico, es abundante y es ilimitado.

Desventajas

- El aire tiene baja capacidad para almacenar calor.
- El diseño del ducto debe ser amplio para el flujo del aire.
- Baja transferencia de calor desde la placa absorbente al aire.

2.7.2. Forma de la placa absorbente

El colector solar de aire de placa absorbente expuesta es el diseño más sencillo para la captación de radiación solar. El aire ingresa a través de la cavidad que se encuentra entre la superficie aislante y la pared superior que actúa como el elemento que transfiere calor al aire por medio de la convección.

Una cubierta transparente montada sobre la placa absorbente aumenta significativamente la eficiencia en el aprovechamiento de la radiación absorbida por el colector solar de aire. La desventaja de los colectores solares planos es el bajo coeficiente de transferencia de calor entre la placa absorbente y el flujo de aire al interior del colector.

La transferencia de calor puede incrementarse al añadir aletas a la placa absorbente o haciendo que la placa sea corrugada, o desbastando su cara posterior. En la figura 2-12 se detallan posibles perfiles de la placa absorbente para un colector solar térmico de aire.

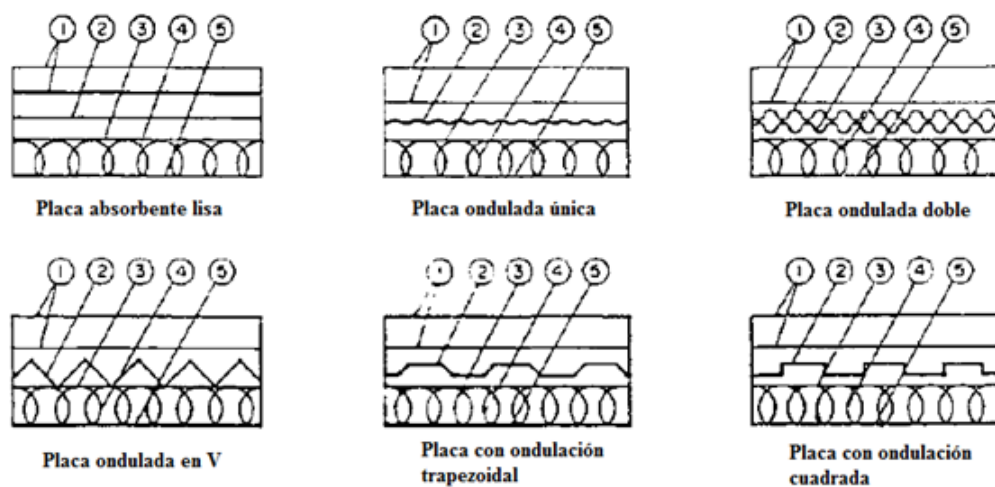


Figura 2-11. Forma de la placa absorbente.

Fuente: Solar Drying

Detalle:

- 1) Cubierta transparente (material vidrio o policarbonato).
- 2) Placa absorbente (material metálico de color negro opaco).
- 3) Placa posterior.
- 4) Aislante térmico.
- 5) Estructura de soporte.

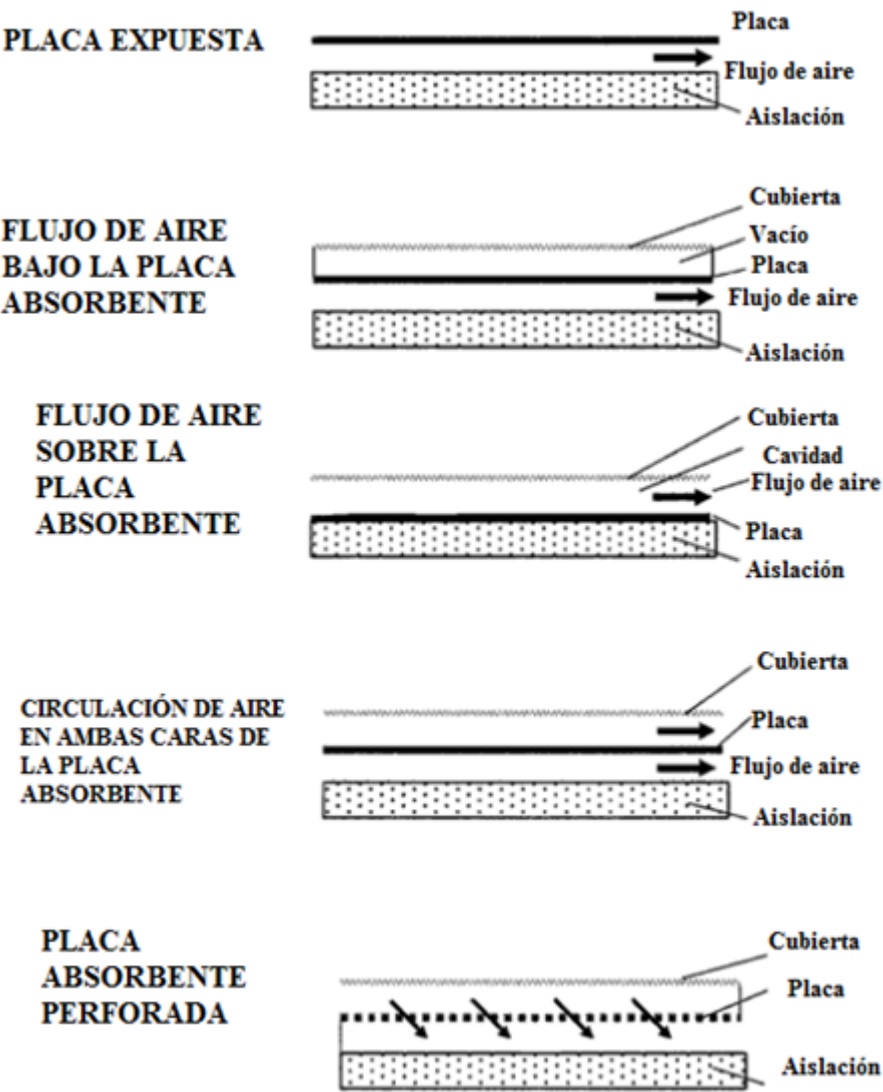


Figura 2-12. Forma del flujo de aire.
Fuente: Solar Drying

2.7.3. Rendimiento

El rendimiento de un colector de placa plana (a) se puede cuantificar mediante el cálculo de la eficiencia de captación; la relación entre el calor acumulado por el colector y la radiación incidente en su superficie.

La eficiencia es una función de la velocidad del aire a través del colector, la geometría del conducto de aire, la capacidad de absorción de la superficie de absorbente y la transmisividad de la cubierta.

La relación entre la irradiación solar en una superficie y la potencia térmica en el aire de salida se expresa como (b):

$$\mathbf{a)} \quad n = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G}$$

$$\mathbf{b)} \quad \dot{Q}_u = \dot{m} \cdot C_p (T_o - T_i)$$

Ecuación 2-6. Rendimiento del colector solar.

Fuente: Solar Drying

Donde:

n	Rendimiento
Qu	Potencia útil (W)
Ac	Área de captación (m ²)
G	Irradiación solar global (W/m ²)
m	Flujo másico de aire (kg/s)
Cp	Calor específico del aire (kJ/kgK)
To	Temperatura de salida
Ti	Temperatura de entrada

2.7.4. Factores que influyen en el rendimiento de un colector solar de aire

- Disponibilidad energética.
- Ángulo de inclinación del colector.
- Posibles sombras.
- Grado de transmitividad de la cubierta transparente.
- Capacidad del absorbente para almacenar calor.
- Pérdidas de calor por conducción en las paredes.
- Mantenimiento del colector solar de aire. [23]

2.7.5. Estándar asociado al rendimiento térmico

El estándar ASHRAE 93-77 establece los procedimientos de prueba para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares bajo condiciones estandarizadas. Dentro de la regulación se especifica el procedimiento para determinar la constante de tiempo, el rendimiento térmico y la modificación del ángulo de incidencia en el colector solar térmico de aire o agua.

La constante de tiempo se mide al operar el colector en condiciones estables o casi constantes con un flujo solar de al menos 790 (W/m²) y luego cortar abruptamente el flujo incidente a cero, mientras continúa midiendo las temperaturas de entrada y salida del fluido. El fluido de entrada se equilibra en $\pm 1(^{\circ}\text{C})$ con respecto a la temperatura ambiente. La constante de tiempo es lo que se denomina como el tiempo que se debe alcanzar.

$$\frac{T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}}}{T_{\text{s inicial}} - T_{\text{entrada}}} = 0.30$$

Ecuación 2-7. Constante de tiempo.

Fuente: Principles of Solar Engineering

Para determinar el rendimiento térmico del colector el estándar ASHRAE 93-77 indica las condiciones de ensayo para obtener mediciones estándares en la curva de eficiencia.

Las condiciones de ensayo deben incluir:

- Ángulo de incidencia preciso con un margen menor o igual a 5° cercano al mediodía solar.
- Al menos cuatro ensayos para cada temperatura del fluido de entrada, dos antes y dos después del mediodía solar.
- Cuatro valores distintos para la temperatura del fluido de entrada, para obtener diferentes valores de ΔT .

El estándar ASHRAE 93-77 especifica que se debe establecer una curva para el modificador del ángulo de incidencia determinando las eficiencias de un colector para ángulos promedio de incidencia de 0°, 30°, 45° y 60° mientras se mantiene un rango de temperatura de entrada al colector en $\pm 1(^{\circ}\text{C})$ con respecto al ambiente. [24]

2.8. COMPONENTES DEL SECADOR SOLAR TÉRMICO DE TIPO MIXTO

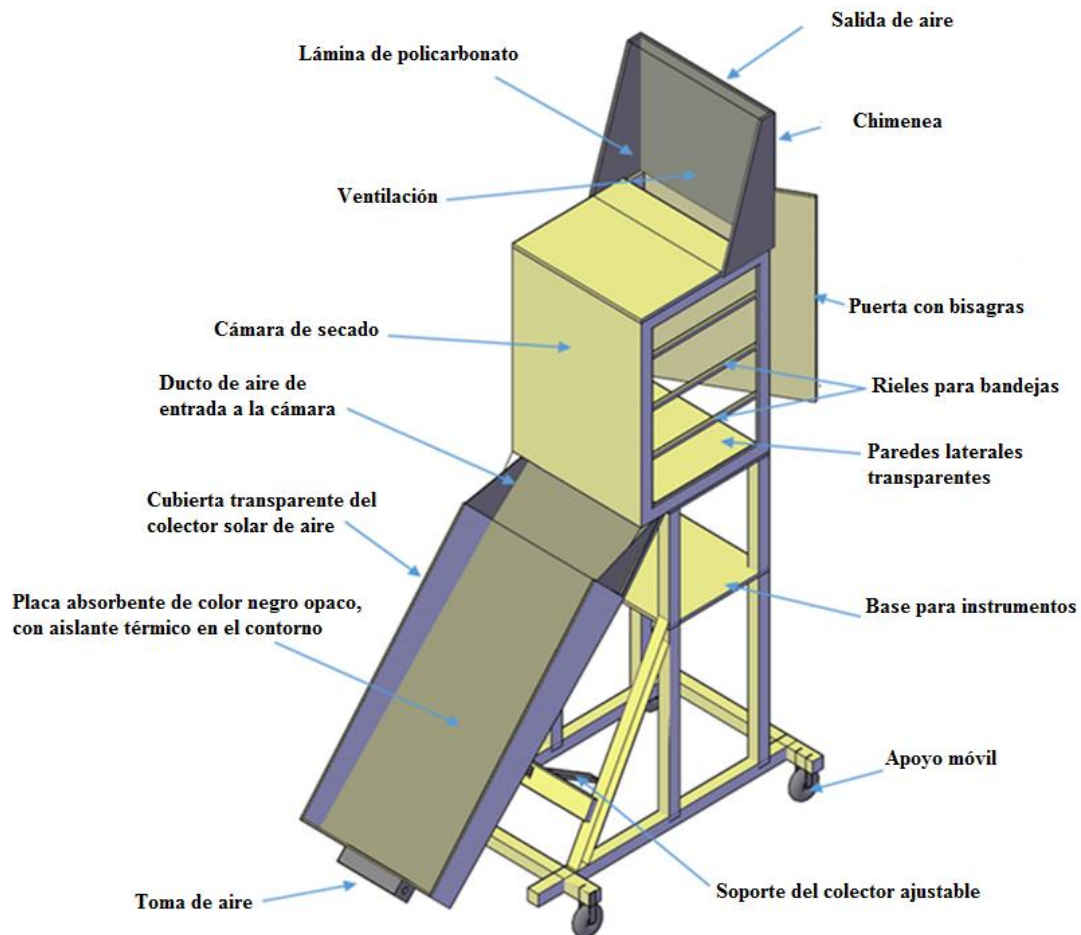


Figura 2-13. Componentes de un secador solar de tipo mixto.

Fuente: pubs.sciepub.com/ajer/5/1/2/figure/2

Los dos elementos básicos de un secador solar son el colector donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado donde el producto es deshidratado por el aire que circula. Estos elementos pueden diseñarse para que se integren al equipo en distintas formas.

El secador solar térmico está compuesto de los siguientes elementos:

- Área de entrada de aire: Es el punto por donde ingresa el flujo de aire con la humedad relativa del ambiente e inicia su circulación por equipo de secado.
- Colector solar o área de captación: Es el dispositivo captador de radiación solar, que mediante calor aumenta la temperatura del flujo del aire. Proceso de transferencia de calor en el cual la convección natural del aire disminuye la humedad contenida, debido al aumento de temperatura de la masa de aire.

- Cámara o área de desecado: Es el espacio aislado en el cual se produce el proceso de deshidratado del producto.
- Bandejas de desecado: Elemento en el cual el producto es depositado para el proceso de deshidratado, este debe facilitar la circulación del aire a través de los productos, idealmente se utiliza una malla metálica de color oscuro.
- Chimenea: Para facilitar la circulación del aire al interior del secador solar, evitar la condensación del aire y la posterior formación de hongos al interior de la cámara de deshidratado se instala un escape de aire en la parte más alta de este.

2.8.1. Circulación del aire

El aire circula por el secador con el fin de eliminar la humedad evaporada por el producto. Esta circulación se logra por diversos métodos:

- Circulación forzada: El aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica.
- Circulación por convección natural: El aire es movido por las diferencias de temperaturas entre las distintas partes del equipo. No se necesita energía mecánica externa. El uso de chimeneas constituye un caso particular de convección natural.

Ventajas y desventajas de estas alternativas:

- Circulación natural: La circulación por convección natural permite el funcionamiento del equipo en zonas sin suministro local de energía eléctrica. La circulación por acción del viento está limitada a lugares con recursos eólicos suficientes. Para que sea viable, deben existir vientos constantes durante las horas diurnas de a lo menos 1 a 2 m/s. La circulación por acción natural se hace más difícil incorporar cuando el equipo crece en tamaño. Para equipos pequeños o medianos se puede lograr velocidades de aire de 0,4 a 1 m/s al interior de la cámara, pero en equipos grandes esta velocidad no sobrepasa los 0,1 a 0,3 m/s.
- Circulación forzada: La circulación forzada facilita el diseño en el caso de los equipos de mayor tamaño. Este tipo de circulación también facilita el control del proceso de secado. La circulación forzada permite mayor libertad en la colocación de los diversos elementos que integran el equipo. Usando este tipo de circulación se logran las siguientes ventajas de operación:

- Se puede obtener velocidades de circulación de aire entre 0,5 a 1 m/s. Lo cual facilita el proceso de secado.
- En equipos de tamaños mayores no hay problema de circulación de aire.
- Se puede usar ventilación forzada durante las 24 horas. Esto puede ser ventajoso en las primeras etapas de secado para eliminar la humedad libre del producto.

2.8.2. Forma de operación

La forma de operar un secador da lugar a dos alternativas:

- Secado en tandas: El producto es cargado en una sola tanda y la misma no se retira hasta que esté completamente seca. Todo el producto dentro del secador va pasando de un estado húmedo a un estado seco en forma paulatina.
- Secado continuo: El proceso se va cargando y descargando en tandas parciales. Dentro del mismo secadero se encuentra una parte del producto húmedo y otra casi seca. El periodo entre las cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño. En algunos casos la carga y descarga parcial se realiza una vez por día. En otros casos se puede llevar al cabo de varias veces en el mismo día.

Ventajas y desventajas de estas alternativas:

- Secado en tandas: Permite un diseño más sencillo del proceso de carga y movimiento del producto dentro del equipo, por lo que resulta más apropiado en secadores pequeños o medianos.
- Secado continuo: Aprovecha en forma más uniforme la radiación que le llega todos los días, por lo que su eficiencia es mayor. Esto es particular así en sistemas mixtos. Puede darse el caso que la mitad del secador que esté con producto casi seco opere como colector, mientras que la otra mitad con producto fresco opere como cámara de secado.

2.8.3. Capacidad de producción

La capacidad de producción se define en la relación al peso de producto fresco total que se carga. Además se considera la cantidad media diaria, expresada en kilos de productos frescos cargados por día. En el caso de equipos que trabajen por tandas se debe dividir el peso de la tanda por el número de días que se tarda en secar la misma.

En general, cada tipo de secador solar tiene un funcionamiento más apropiado en cierto rango de capacidad de producción, por lo que resulta importante especificar este parámetro. Con fines comparativos se aceptara la división de rangos de capacidades indicada en la siguiente tabla.

- Clasificación según la capacidad producción.

Clasificación	Capacidad en (Kg./día)
Pequeña capacidad	20
Baja capacidad	20-50
Mediana capacidad	50-500
Alta capacidad	Sobre 500

Capacidad de producción	Modo de calentamiento	Circulación de aire	Forma de operación
Pequeña o baja	Directo	Convección natural	En tanda
Baja o media	Directo	Acción del viento	En tanda
		Convección natural	En tanda
	Indirecto	Convección natural	En tanda
Media a alta	Indirecto	Forzada	En tanda
	Mixto o indirecto	Convección natural	Continua

Tabla 2-5. Clasificación por capacidad de carga.
Fuente: Manual de Ingeniería del Secado Solar

2.8.4. Nivel tecnológico

El diseño de un secador solar puede requerir distintos niveles en cuanto a las herramientas y los conocimientos técnicos necesarios para la construcción o montaje y el entrenamiento necesario para su operación.

Un buen sistema de clasificación depende del nivel tecnológico necesario para implementarlo. Esta clasificación permite decidir qué tipo de secador es más adecuado para la aplicación prevista.

Esta información resulta de particular importancia para tomar una decisión sobre la posibilidad de que el propio objetivo pueda encarar su construcción, requiera ayuda técnica o deba considerar la posibilidad de adquirir el equipo ya construido.

En lo que sigue se adoptara la siguiente escala:

- Equipo rústico: La construcción y montaje solo requiere herramientas sencillas de manejo no especializado. La operación solo requiere un entrenamiento mínimo y presencia humana eventual.
- Equipo artesanal: La construcción y montaje requiere un operario entrenado y herramientas de banco. La operación solo requiere un entrenamiento mínimo y presencia humana eventual.
- Equipo tecnificado: La construcción requiere un taller metalmecánico con equipamiento normal. El montaje requiere de personal calificado. La operación requiere de un entrenamiento adecuado y una presencia humana indispensable o eventual.
- Equipo sofisticado: El equipo requiere construcción en fábrica y el montaje necesita de operarios especializados. La operación requiere de un entrenamiento adecuado y presencia humana indispensable. [25]

2.9. FORMA DE LA CÁMARA DE SECADO

La cámara de secado es el lugar en donde se lleva a cabo el proceso de transferencia de calor y masa para la obtención del producto seco. Su diseño varía de acuerdo al volumen de producción, el sentido del flujo de aire y la forma de calentamiento solar.

Los componentes principales de la cámara de secado y su función se describen a continuación:

- Carcasa de la cámara de secado: Es la estructura externa que le otorga rigidez a la cámara, por tal motivo se debe emplear un material que soporte las condiciones a la intemperie y posea resistencia para soportar las cargas.
- Cámara interna: Está sometida a cambios de temperatura y presión, se encuentra en contacto directo con los alimentos a deshidratar. Por esta razón se debe seleccionar un material que posea resistencia a la corrosión.
- Aislamiento de la cámara de secado: Es el material que reduce en parte las pérdidas térmicas por conducción y debe recubrir las paredes de la cámara, necesariamente el aislante debe poseer baja conductividad y degradación.
- Bandejas: Son los elementos de soporte de los alimentos, cuya cantidad varía de acuerdo a la capacidad de la cámara y a su dimensionamiento. El material empleado debe poseer resistencia a altas cargas y a la corrosión, ya que se encuentra en contacto directo con los alimentos; además, debe permitir el contacto entre el aire caliente y el producto a secar.

2.10. DIMENSIONAMIENTO DEL SECADOR SOLAR

El secado de alimentos es un proceso psicrométrico, en el que se requiere establecer las propiedades ambientales donde va a funcionar el equipo. Aquí se aplican los datos recopilados y estimados de temperatura del aire, humedad y radiación.

Para el dimensionamiento del secador solar se calcula el aporte de calor necesario para cubrir las cargas térmicas y el rendimiento del equipo. Normalmente para el dimensionamiento se utilizan modelos matemáticos en base a la obtención de datos a partir de mediciones en terreno y de la carta psicrométrica, como por ejemplo, punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo, volumen de aire seco y entalpía de saturación.

En el desarrollo por lo general se realizan curvas de rendimiento basadas en mediciones obtenidas durante la ejecución del secado, lo cual entrega información precisa sobre la predicción de la duración del proceso.

2.11. CÁLCULO DEL EQUIPO SOLAR TERMICO DE TIPO MIXTO

Para determinar las dimensiones de los componentes del equipo se deben realizar los cálculos en base al aporte solar y el volumen producto que se desea obtener.

- Cálculo del volumen del producto a secar.
- Cálculo del área de captación del colector solar de aire.
- Cálculo del calor aportado por el aire

2.11.1. Cálculo del volumen del producto a secar

Con el objetivo de evitar el aplastamiento del producto y facilitar la transferencia de calor y masa entre el flujo de aire y el sólido se debe considerar un espacio adecuado en la distribución del producto en cada bandeja.

$$V_{tp} = \frac{M_t}{\rho_{ap}}$$

Ecuación 2-8. Volumen de producto a secar.

Fuente: Manual de secado solar.

Para la ecuación: Vtp: Volumen del producto.
 Mt: Masa total del producto.
 Pap: Densidad aparente del producto a secar.

2.11.3. Cálculo del calor aportado por el aire

Para efectos de la estimación del rendimiento del equipo es necesario conocer la cantidad de energía transferida al fluido.

$$Q_{\text{útil}} = \dot{m}_{\text{colector}} * C_{p_{\text{fluido}}} * (T_{s_{\text{colector}}} - T_{i_{\text{colector}}})$$

Ecuación 2-9. Calor aportado por el aire

Fuente: Manual de secado solar.

Dónde: M colector: Flujo másico de aire que circula por el colector.
 Cp del fluido: Calor específico.
 Ts-Ti: Diferencia de temperatura salida – entrada al colector.

2.12. CALOR NECESARIO PARA EL PROCESO DE SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS

El proceso de secado de productos agrícolas consiste en la eliminación del agua contenida en estructura interna. El secado reduce la actividad del agua protegiendo el alimento del desarrollo de hongos y microorganismos, lo que se traduce en un método efectivo de conservación.

Básicamente el proceso requiere de un flujo de aire con bajo contenido de humedad que inicialmente circula al interior de la cámara de secado y que por medio de la transferencia de calor por convección el agua se evapora en la superficie del alimento que la contiene.

La reducción de la humedad contenida en el aire se produce mediante el aporte de energía térmica. La energía térmica necesaria para obtener cierto volumen de producto vegetal seco puede ser dividida en los siguientes conceptos:

- Calor necesario para elevar la temperatura del producto hasta la temperatura inicial de secado.

- Calor necesario para calentar el aire húmedo al interior del secador.
- Calor absorbido para el incremento de temperatura del agua contenida en el producto.
- Calor necesario para deslizar el agua contenida en la estructura interna del producto, es decir el calor diferencial de sorción.
- Calor necesario para compensar las pérdidas térmicas por fugas de aire.

2.12.1. Calor necesario para elevar la temperatura del producto hasta la temperatura inicial de secado

El calor absorbido por el alimento para el calentamiento desde la temperatura (T_{i-1}) hasta la temperatura de operación (T_i) a la humedad inicial de la etapa (X^*_{i-1}) se calcula por la ecuación 3-1.

$$Q = V_m \cdot \rho_m \cdot cp_{my} \cdot \Delta T = [kJ]$$

Ecuación 2-10. Calor absorbido por el producto.

Fuente: scielo.sld.cu/pdf/rtq/v36n1/rtq02116.pdf

Dónde:

Q : Calor absorbido. $[kJ]$

V_m : Volumen inicial. $[m^3]$

ρ_m : Densidad. $[\frac{kg}{m^3}]$

cp_{my} : Calor específico en base húmeda. $[\frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ K]$

ΔT : Diferencia de temperatura. $[^\circ K]$

2.12.2. Calor necesario para calentar el aire húmedo al interior del secador

El calor absorbido por el aire húmedo en el secador se calcula utilizando la entalpía específica del aire húmedo.

$$Q_{aire} = \frac{V_{ai}}{V_H} \cdot (H_{ai} - H_{ai-1}) = [kJ]$$

Ecuación 2-11. Calor absorbido por el aire húmedo.

Fuente: scielo.sld.cu/pdf/rtq/v36n1/rtq02116.pdf

Dónde:

V_{ai} : Volumen de aire húmedo. $[m^3]$

H_{ai} : Entalpía del aire a Temperatura de bulbo seco. $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

V_H : Volumen de agua en el aire. $[m^3/kg]$

H_{ai-1} : Entalpía del aire a temperatura ambiente. $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

2.12.3. Calor absorbido para el incremento de temperatura del agua contenida en el producto

$$Q_{abs} = V_m \cdot \rho_m \cdot \frac{X_i}{100} \cdot cp_{agua} \cdot \Delta T = [kJ]$$

Ecuación 2-12. Calor absorbido por el agua.

Fuente: scielo.sld.cu/pdf/rtq/v36n1/rtq02116.pdf

Dónde:

X_i : Contenido inicial de humedad. [%]

cp_{agua} : Calor específico del agua. $[kJ/kg^\circ K]$

ΔT : Diferencia de temperatura. $[^\circ K]$

2.13. ORIENTACIÓN Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN

Es importante considerar la orientación del colector solar para obtener un mayor grado de aprovechamiento en la captación de la radiación solar. La orientación está asociada a la ubicación geográfica donde se encuentra el colector con respecto al sol, por ejemplo, si se ubica un colector solar en el hemisferio norte, deberá estar orientado hacia el sur, y lo contrario ocurrirá si se ubica en el hemisferio sur, el panel deberá tener una orientación hacia el norte.

Un colector solar alcanza la mayor eficiencia al mediodía solar, que es cuando los rayos del sol inciden perpendicularmente sobre la superficie de captación. Además es de considerar que el colector solar debe estar ubicado en un lugar despejado libre de sombras. [26]

El ángulo de inclinación del colector varía según la zona geográfica en la que se encuentre el colector solar. La provincia de Concepción está a latitud 37° y dependiendo de la latitud se suman grados de inclinación para obtener una captación óptima de energía solar. Según las normas establecidas los ángulos de inclinación respecto a la latitud son los siguientes:

0° a 15° : ángulo de inclinación es de 15° .

15° a 25° : ángulo de inclinación es igual a la latitud.

25° a 30° : latitud más 5° .

30° a 35° : latitud más 10° .

35° a 40° : latitud más 15° .

$<40^\circ$: latitud más 20° .

La inclinación y dirección para el colector es:

Provincia de Concepción = Latitud 37°

Ángulo de inclinación = $37^\circ + 15 = 52^\circ$, dirección norte.

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

3.1. ¿POR QUÉ UN SECADOR SOLAR TÉRMICO?

- Utiliza una fuente de energía limpia, inagotable y gratuita como lo es la energía solar, que contribuye al cuidado del medioambiente.
- Es un sistema de construcción sencilla, económico y no requiere de mayor mantenimiento.
- Es un aporte a la innovación de tecnologías solares expandiendo las aplicaciones de la energía solar térmica.
- Es un método de estabilización de alimentos que se basa en la reducción de la actividad del agua (aw) para ralentizar los procesos de deterioro a lo que se ve sometido un alimento.

3.2. CALOR NECESARIO PARA INCREMENTAR LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADOR SOLAR

En el proceso de secado de alimentos el elemento transportador del calor es el aire, por lo que se requiere que bajo condiciones normales de temperatura y humedad este tenga la capacidad de almacenar calor para el aumento de la temperatura al interior de la cámara de secado hasta la temperatura de operación.

Para el diseño del equipo de secado de alimentos con energía solar es necesaria la medición de las propiedades del aire en el lugar que se desea instalar el equipo. Para este caso se tomaron los registros mensuales del aire para la instalación del secador solar en la comuna de Talcahuano.

3.2.1. Propiedades del aire en Talcahuano

MES (2017)	HUMEDAD (%)	VELOCIDAD (m/s)	T. AIRE (°C)
Enero	66	3.8	18,2
Febrero	74.5	2.7	17
Marzo	76	2.3	15,3
Abril	79.5	2.2	14
Mayo	76	3.2	10,7
Junio	80	3.9	9,3
Julio	79	3	8,8
Agosto	80	3.7	8,6
Septiembre	77	2.9	9,9
Octubre	77.4	4	11,3
Noviembre	74	3.4	13,9
Diciembre	74	3.1	15,2

Tabla 3-1. Registro mensual de mediciones del viento.

Fuente: agromet.inia.cl/estaciones.php

3.2.2. Cálculo de la energía necesaria para cubrir el salto térmico

Bajo condiciones ideales de humedad y presión se calcula el calor necesario que se le debe añadir a un flujo de aire de 1[m3/s] para alcanzar la temperatura de operación de secado que es de 45[°C]. Donde la masa específica del aire es 1.2 [kg/m3], y el calor específico del aire: 1005 [J/kg°C].

El calor que se le debe aportar al aire para elevar su temperatura se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_a = V_a \cdot \rho \cdot cp_a \cdot (T_s - T_E) = \left[\frac{kJ}{s} \right]$$

Ecuación 3-1. Calor necesario para el incremento de temperatura del aire

Fuente: scielo.sld.cu/pdf/rtq/v36n1/rtq02116.pdf

Mes	Temperatura media mensual	Salto térmico	Densidad	Calor específico	Potencia térmica
	[°C]	[°C] ó [°K]	[kg/m3]	[kJ/kg°C]	[kw x m3]
Enero	18.2	26.8	1.2	1.005	32.32
Febrero	17	28	1.2	1.005	33.77
Marzo	15.3	29.7	1.2	1.005	35.82
Abril	14	31	1.2	1.005	37.39
Mayo	10.7	34.3	1.2	1.005	41.37
Junio	9.3	35.7	1.2	1.005	43.05
Julio	8.8	36.2	1.2	1.005	43.66
Agosto	8.6	36.4	1.2	1.005	43.90
Septiembre	9.9	35.1	1.2	1.005	42.33
Octubre	11.3	33.7	1.2	1.005	40.64
Noviembre	13.9	31.1	1.2	1.005	37.51
Diciembre	15.2	29.8	1.2	1.005	35.94

Tabla 3-2. Calor necesario para cubrir el salto térmico.
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

3.3. CANTIDAD DE AGUA A EVAPORAR

Para calcular la cantidad de agua a evaporar se debe conocer la humedad inicial del producto, la humedad final y la cantidad de producto.

Mediante la siguiente ecuación se calcula el porcentaje de agua que debe ser evaporada.

$$\frac{(\phi_i - \phi_f) \cdot 100}{100 - \phi_f} \text{ [%]}$$

Ecuación 3-2. Proporción de agua a evaporar contenida en el alimento
Fuente: Technology of Solar Drying

PRODUCTO	CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL [%]	CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL [%]	HUMEDAD A EVAPORAR [%]	MASA DE AGUA A EVAPORAR [kg]
Aji	80	5	79	0.79
Ajo	80	4	79	0.79
Cebolla	80	4	79	0.79
Coliflor	80	6	78.7	0.787
Camote	75	7	73	0.73
Damasco	85	18	81.7	0.817
Durazno	85	18	81.7	0.817
Maiz	24	14	11.6	0.116
Manzana	80	24	73.7	0.737
Papa	75	13	71	0.71
Platano	80	15	76.5	0.765
Uva	80	20	75	0.75
Zanahoria	70	5	68.4	0.684

Tabla 3-3. Cantidad de agua a evaporar en cada producto.
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

3.4. CÁLCULO DE LA IRRADIANCIA

3.4.1. Irradiación diaria media mensual sobre superficie horizontal para Talcahuano

MES	[MJ/m2]
Enero	799.6
Febrero	605.7
Marzo	538.2
Abril	354.42
Mayo	208.5
Junio	162.7
Julio	180.7
Agosto	278
Septiembre	408.4
Octubre	594.7
Noviembre	692.8
Diciembre	778.3
MEDIA DIARIA	15.34

Tabla 3-4. Registro mensual de irradiación diaria media en Talcahuano.
Fuente: agromet.inia.cl/estaciones.php

3.4.2. Irradiación diaria media mensual efectiva sobre superficie horizontal (He)

Aplicación de coeficientes por suciedad, envejecimiento y no perpendicularidad.

MES	Factor de corrección		Irradiación solar bruta	Irradiación solar efectiva
	Suciedad y envejecimiento	No perpendicularidad		
			[MJ/M2]	
Enero	0.97	0.97	799.6	752.3
Febrero	0.97	0.97	605.7	569.9
Marzo	0.97	0.97	538.02	506.2
Abril	0.97	0.97	354.42	333.5
Mayo	0.97	0.97	208.5	196.2
Junio	0.97	0.97	162.7	153.1
Julio	0.97	0.97	180.7	170.0
Agosto	0.97	0.97	277.9	261.5
Septiembre	0.97	0.97	408.4	384.3
Octubre	0.97	0.97	594.7	559.6
Noviembre	0.97	0.97	692.8	651.9
Diciembre	0.97	0.97	778.3	732.3
		Media diaria anual	15.3	14.4

Tabla 3-5. Cálculo de la irradiación efectiva sobre superficie horizontal.
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

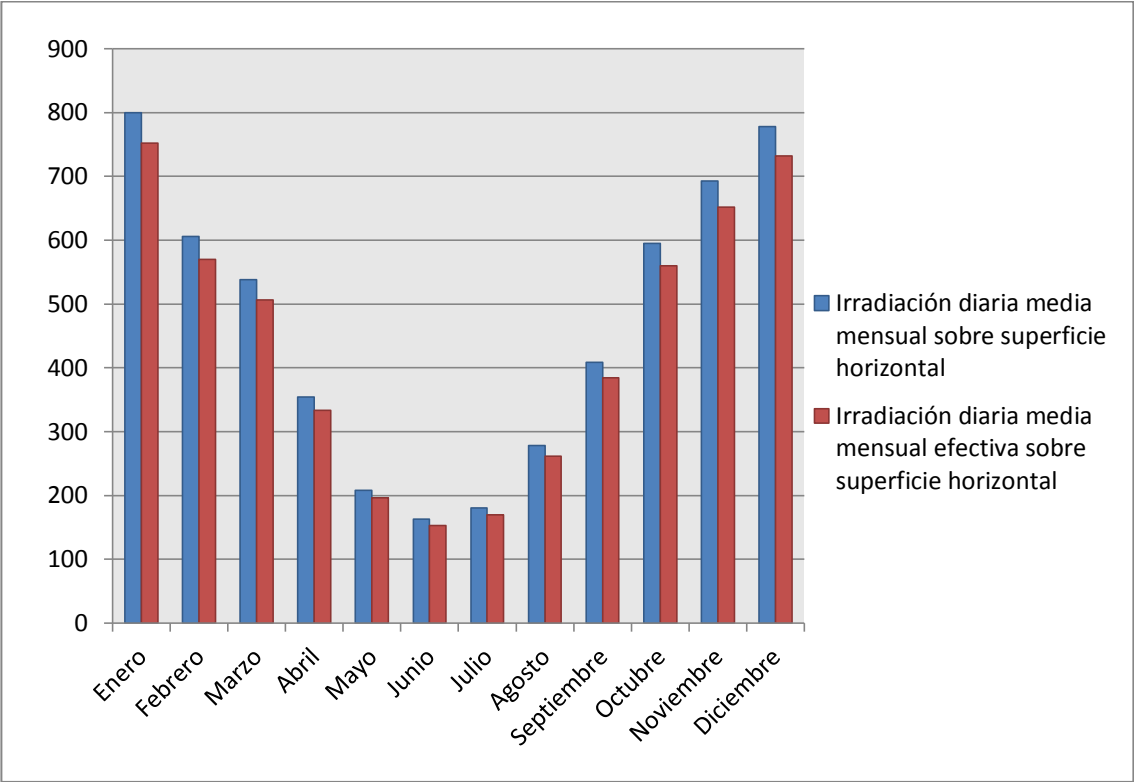


Gráfico 3-1. Variación mensual entre Irradiación diaria media normal y efectiva.
Fuente: Elaboración propia a partir de Word 2010

3.4.3. Determinación de la inclinación del colector solar

El ángulo formado entre el plano horizontal y el panel solar se denomina ángulo de inclinación. En el hemisferio sur el colector solar debe estar orientado hacia el norte geográfico, pudiéndose admitir desviaciones nos mayores que 25[°] con respecto a dicha orientación.

La inclinación del colector sobre un plano horizontal se determina en función de la latitud geográfica [β] y del periodo de utilización de la instalación, de acuerdo con el siguiente criterio.

Periodo de utilización	Inclinación del colector
Anual con consumo constante	= Latitud geográfica [β]
Preferentemente en invierno	Latitud geográfica [β]+10°
Preferentemente en verano	Latitud geográfica [β]-10°

Se admite una desviación de $\pm 10^\circ$ como máximo en cualquiera de los 3 casos.

De acuerdo para la latitud de 37° la inclinación debe ser: Latitud geográfica [β] +15°. Según criterios de diseño los colectores solares de aire deben facilitar la entrada de aire para el secado. Por ello la inclinación óptima del colector solar de aire es de 30°.

3.4.4. Determinación de horas útiles de sol en un día medio de cada mes

Para efectos del dimensionado de un colector solar es necesario determinar la intensidad con que la radiación incide en la superficie del colector, para ello se determinan las horas útiles de sol en un día.

Mes	N° de horas útiles de sol en un dia medio para cada mes: latitud entre 25° a 45°
Enero	9.5
Febrero	9.5
Marzo	9
Abril	9
Mayo	8
Junio	7.5
Julio	8
Agosto	9
Septiembre	9
Octubre	9.5
Noviembre	9.5
Diciembre	9.5

Tabla 3-6. Horas útiles de sol en un día medio de cada mes.

Fuente: calculationsolar.com/blog/?p=6

3.4.5. Aplicación del factor de inclinación (k)

Este factor corrige la irradiación efectiva en una superficie horizontal para un ángulo de inclinación entre 0° y 90°. Para un colector solar orientado hacia el norte el factor (k) presenta un incremento en los meses de invierno del hemisferio sur.

MES	Factor de inclinación [k] a 30°	Radiación en superficie horizontal [MJ/m2]	Radiación superficie inclinada a 30° [MJ/m2]
Enero	0.94	752.3	707.2
Febrero	1.00	569.9	569.9
Marzo	1.1	506.2	556.8
Abril	1.2	333.5	400.2
Mayo	1.31	196.2	257.0
Junio	1.34	153.1	205.2
Julio	1.38	170	234.6
Agosto	1.27	261.5	332.1
Septiembre	1.12	384.3	430.4
Octubre	1.02	559.6	570.8
Noviembre	0.95	651.9	619.3
Diciembre	0.92	732.3	673.7

Tabla 3-7. Cálculo del factor de inclinación “k”.

Fuente: agromet.inia.cl/estaciones.php

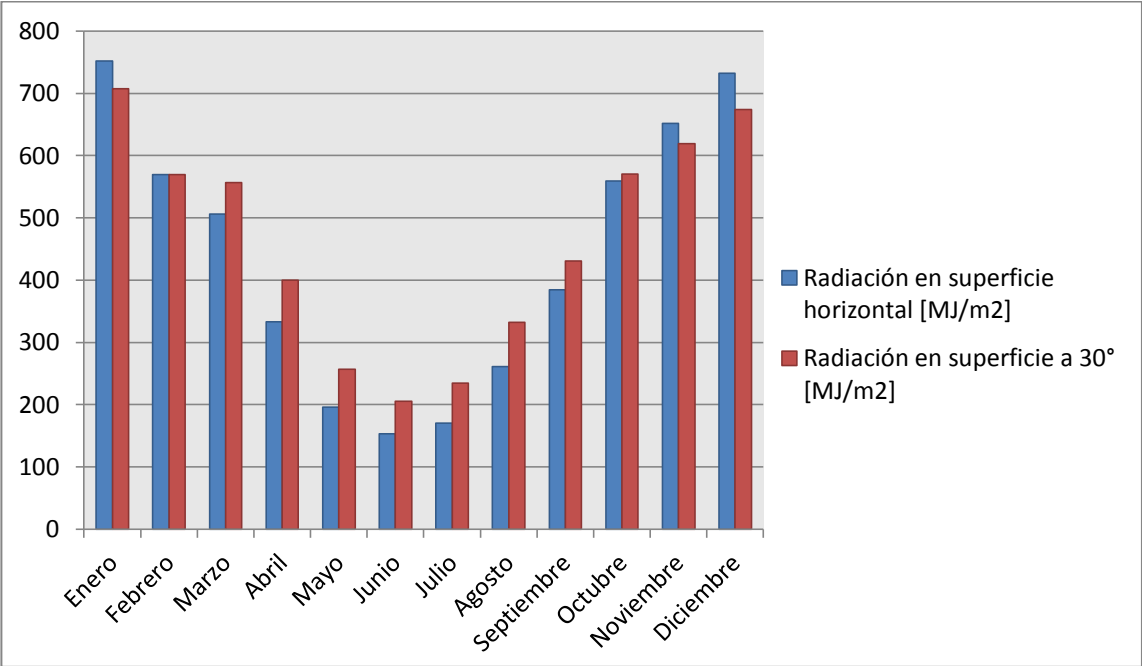


Gráfico 3-2. Comparación entre radiación horizontal e inclinada

Fuente: Elaboración propia a partir de Word 2010

3.4.6. Irradiancia solar para una inclinación de 30°

La intensidad incidente en un día medio varía a lo largo del día, y depende de las horas de sol útiles.

Mes	Día	Radiación en superficie inclinada 30°	Nº de horas de sol	Intensidad a 30° [W/m2]
Enero	31	22.81	9.5	667
Febrero	28	20.35	9.5	595.13
Marzo	31	17.96	9	554.36
Abril	30	13.34	9	411.72
Mayo	31	8.29	8	287.85
Junio	30	6.84	7.5	253.33
Julio	31	7.56	8	262.76
Agosto	30	11.07	9	341.66
Septiembre	30	14.34	9	442.8
Octubre	31	18.41	9.5	538.38
Noviembre	30	20.64	9.5	603.6
Diciembre	31	21.73	9.5	635.44
Media diaria				490.59

Tabla 3-8. Cálculo de la irradiancia solar en plano inclinado a 30°.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

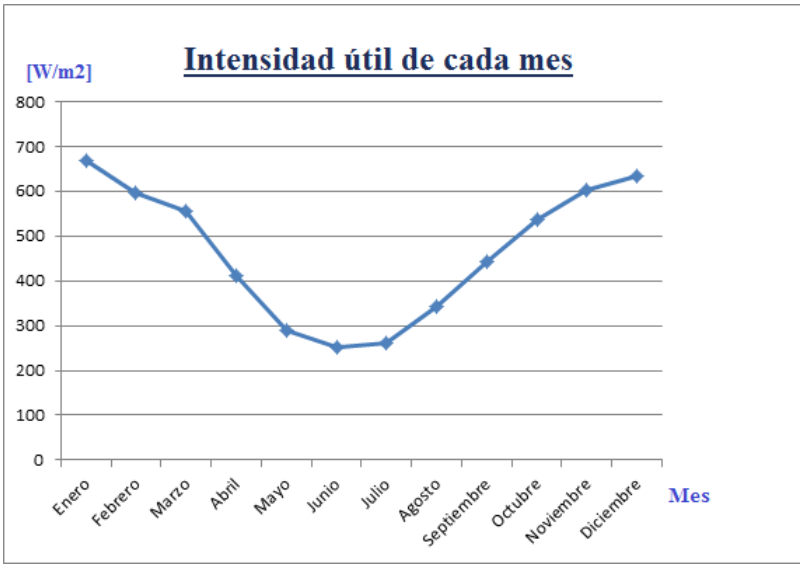


Gráfico 3-3. Curva de Irradiancia solar en un año para Talcahuano
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

3.5. DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE

El colector solar de placa corrugada en “v” es parte de los sistemas solares térmicos de baja temperatura, el cual se caracteriza por la captación de energía electromagnética para transformarla en calor. Su uso principal es el calentamiento de aire para el deshidratado de madera y frutos, además de aplicaciones para el acondicionamiento del aire en recintos o edificios.

El diseño propuesto está conformado por una cubierta de acrílico de 3 [mm] de espesor, la cual es sujeta por las ranuras en las paredes laterales del colector. La estructura del colector es de madera de 2 pulgadas de espesor y soportada por una base de madera con ruedas de 200[mm] de diámetro en los extremos para facilitar el desplazamiento.

La captación es por medio de dos placas onduladas de aleación de aluminio, pintadas de color negro mate y con circulación de aire por ambas caras en las dos placas, con el propósito de extender el área de captación de la radiación y facilitar la circulación del aire al interior del colector.

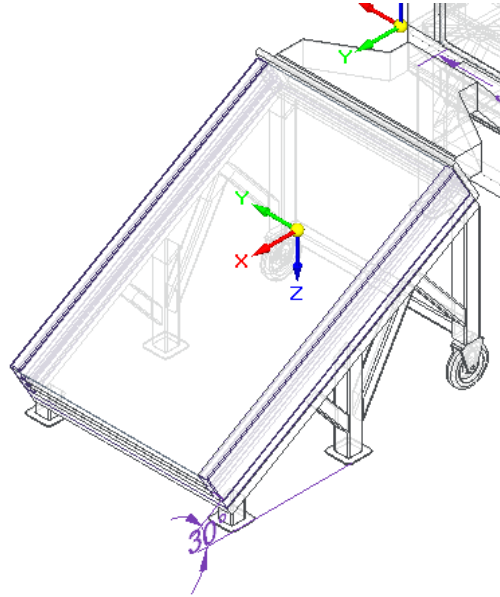


Figura 3-1. Diseño del colector de aire (escala 1:10).

Fuente: Elaboración propia a partir de Solid Edge ST7

3.5.1. Componentes básicos de un colector solar de aire

La durabilidad del equipo está asociada a la calidad de los elementos que lo componen y la fabricación del colector, para ello se evalúan las condiciones climatológicas y las solicitaciones mecánicas a las que está sometido el colector solar.

El colector solar de aire se compone de cuatro elementos principales: Bastidor, cubierta de material transparente, placa captadora y aislamiento térmico.

1. Cubrejuntas.
2. Cubierta de policarbonato.
3. Chapa de zinc-alum corrugada en “v”.
4. Aislante.
5. Bastidor.
6. Malla mosquitero.
7. Ducto de aire.

3.5.2. Cubierta transparente

Es el elemento que capta la radiación y produce el efecto invernadero, reduce las pérdidas por convección y asegura la estanqueidad del flujo de aire que circula internamente por las dos superficies.

El efecto invernadero logrado por la cubierta consiste en que una parte de la radiación captada por el absorbente negro es reflejada hacia el exterior pero la cubierta transparente lo impide, debido a la longitud de onda reflejada que es mayor.

Las características de la cubierta son:

- Alto coeficiente de transmisión o transmisividad (α) de la radiación solar, en la banda de 0,3 a 3[μ].
- Bajo coeficiente de transmisividad de ondas largas, superiores a 0,3[μ]
- Bajo coeficiente de conductividad térmica, que dificulte el paso de calor desde la superficie interior hacia la exterior, minimizando así las pérdidas.
- Alto coeficiente de reflexión para la longitud de onda larga de la radiación reflejada por la placa captadora, a fin de que esta retorne a la placa.

Debido a las diferencias de temperatura entre la cara interna y externa la cubierta experimenta una dilatación, lo que conlleva riesgo de rotura o deformación debido al bajo coeficiente de dilatación del material, para minimizar el factor de fatiga la cubierta seleccionada debe poseer un coeficiente de dilatación bajo.

La cubierta transparente debe ser doble para aumentar su espesor y reducir en parte las pérdidas por convección, le entrega resistencia ante impactos y se reduce el riesgo de astillamiento por dilatación. Pero presenta el inconveniente que produce una disminución de la absorptividad de la radiación solar incidente, afectando levemente el rendimiento térmico del colector solar.

3.5.3. Materiales para cubiertas de colectores solares

3.5.3.1. Materiales plásticos

Se caracterizan por su resistencia a impactos debido a su elasticidad, se presentan bajo la forma de láminas flexibles de espesor bajo o en forma de placa rígida de mayor grosor.

3.5.4. Placa de captación de la irradiación solar incidente

Esta debe poseer un coeficiente de absorción alto debido a que es donde se recibe la irradiación solar directamente (a través de la cubierta) y se transforma en energía térmica, la cual se transfiere al fluido que circula en el interior del colector solar.

3.5.5. Aislamiento térmico

La placa captadora del colector solar está protegida en su parte posterior y lateral por medio de un aislante térmico, con el propósito de minimizar las pérdidas de calor hacia el exterior. Para la elección de un material aislante se debe considerar que sus características deben de ser:

- No desprender vapores producto de la temperatura, lo que conlleva un inminente riesgo para la salud de las personas.
- Soportar la humedad que se pueda producir en ducto debido a la condensación del aire producto del enfriamiento.
- No degradarse por el envejecimiento u otro fenómeno a la temperatura habitual de trabajo.
- Resistir las condiciones climatológicas debido a la intemperie.

Los materiales usados comúnmente son fibra de vidrio, espuma rígida de poliuretano y el poliestireno expandido.

3.5.6. Bastidor

Es el elemento encargado de proteger y soportar los elementos que constituyen el colector solar de aire.

El bastidor debe cumplir con estas características

- Rigidez y resistencia estructural que asegure la estabilidad, lo cual es de gran importancia ante la presión del viento.
- Resistencia a la intemperie y ante los efectos corrosivos de la atmósfera.
- Caudal de aire y aireación del interior del colector para evitar la condensación del agua.

- Evitar geometrías que faciliten la acumulación de agua en el exterior del colector.
- Facilitar el desmontaje de la cubierta para el mantenimiento.

3.6. CÁLCULO DEL CALOR ABSORBIDO POR EL COLECTOR SOLAR

En el cálculo de un colector solar para el calentamiento de aire entran como parámetros de diseño y operación, la intensidad de la radiación solar, la velocidad del viento, la temperatura del aire ambiente, la forma del colector, las propiedades de los materiales usados y del fluido transportador de energía.

El flujo de calor absorbido por el colector depende de la radiación que llega a él y de ciertas propiedades de los materiales y características del colector, tales como la transmisividad y reflectancia de la cubierta transparente y la absorptividad de la placa de captación. Lo que se define en la siguiente ecuación.

$$Q_{abs} = H_T \cdot A_C \cdot (r\alpha)$$

Ecuación 3-3. Calor absorbido por la placa del colector solar.

Fuente: cubasolar.cu

El valor de $(r\alpha)$ corresponde al producto de los coeficientes de transmitancia efectiva de la cubierta y la absorptancia de la superficie captadora.

- Transmitancia de la cubierta de policarbonato = 0.15
- Absortancia de la superficie captadora = 0.9

$$(\tau\alpha) = \frac{r \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_d} = \frac{0.15 \cdot 0.9}{1 - (1 - 0.9) \cdot 0.2}$$

$$(\tau\alpha) = 0.75$$

Ecuación 3-4. Coeficiente de transmitancia y absorptancia.

Fuente: cubasolar.cu

En la tabla 3-9. se indican los valores del calor absorbido por la placa en un día medio de cada mes por la placa de captación.

MES	Ht	Coef. Abs.	Área	Qa Placa
	[w/m2]	[t*a]	[m2]	[w/m2]
Enero	667	0.75	1.86	930
Febrero	595.13	0.75	1.86	830
Marzo	554.36	0.75	1.86	773
Abril	411.72	0.75	1.86	574
Mayo	287.85	0.75	1.86	402
Junio	253.33	0.75	1.86	353
Julio	262.76	0.75	1.86	367
Agosto	341.66	0.75	1.86	477
Septiembre	442.8	0.75	1.86	618
Octubre	538.38	0.75	1.86	751
Noviembre	603.6	0.75	1.86	842
Diciembre	635.44	0.75	1.86	886

Tabla 3-9. Calor absorbido por la placa en un día medio de cada mes.
Fuente: MS Excel 2010

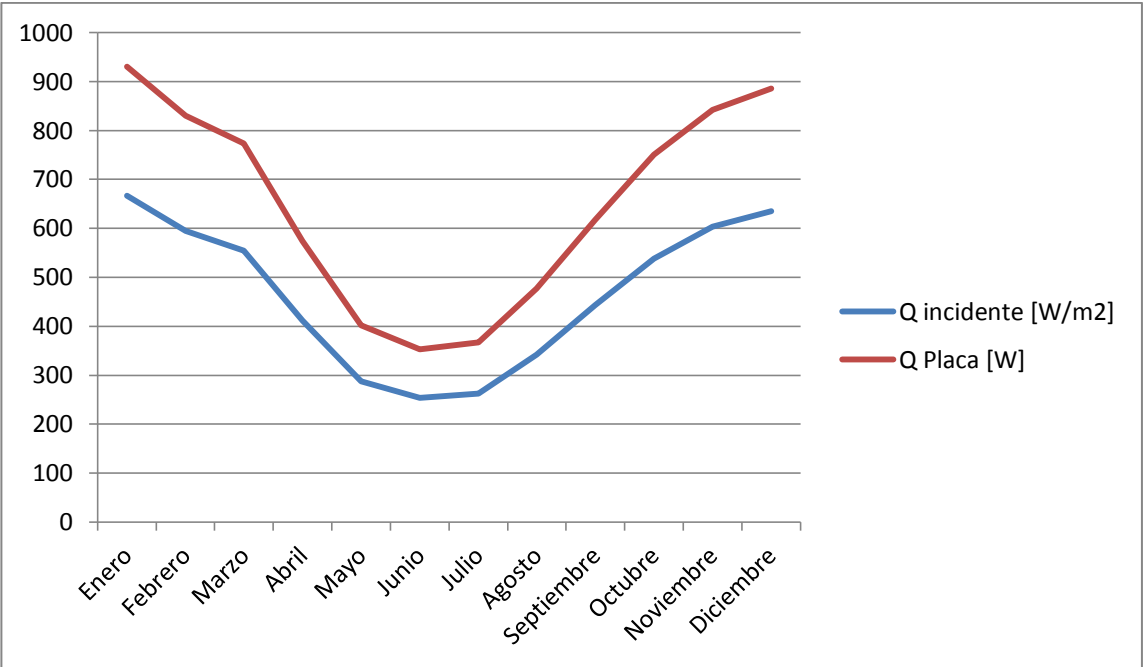


Gráfico 3-4. Variación de la radiación captada por el colector en un año
Fuente: Ms Excel 2010

3.7. DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO

La cámara de secado es del tipo mixto, que se caracteriza por permitir el ingreso de radiación al interior de la cámara de secado mediante ventanillas situadas en las paredes laterales. Con ello se consigue el aumento de la temperatura al interior de la cámara de secado permitiendo reducir el tiempo de obtención de producto seco.

El producto es colocado sobre tres bandejas, las cuales son de malla metálica galvanizada y soportadas por rieles con el objetivo de facilitar el contacto del aire con el producto y evitar la contaminación del alimento.

El aire ingresa a la cámara desde la base y circula en forma ascendente, las paredes están provistas de aislante con el objetivo de reducir las pérdidas térmicas por convección y por conducción producto del contacto de las bandejas con las paredes. En la parte superior se encuentra una chimenea que posee un diseño que facilita la salida del aire debido al área de salida y evita la entrada del agua.

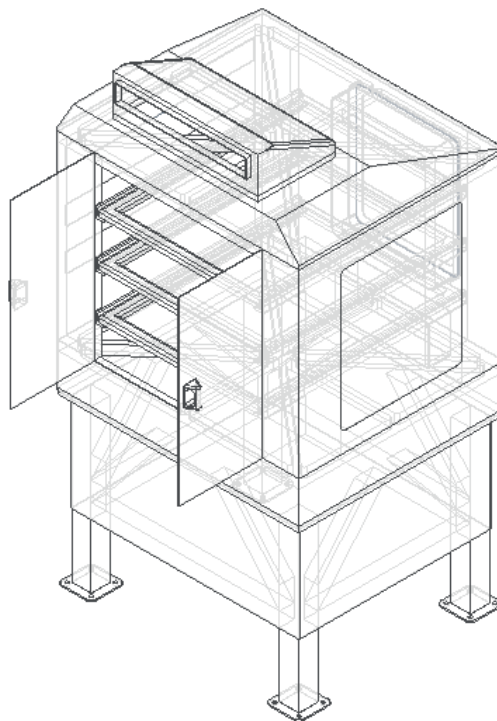


Figura 3-2. Diseño de la cámara de secado.

Fuente: Elaboración propia a partir de Solid Edge ST7

3.7.1. Bandejas

Las bandejas deben ser diseñadas bajo tres parámetros básicos:

- Las características del producto a secar.
- La capacidad del horno.
- La facilidad de manejo para el operador con un diseño ergonómico que le permita levantar sin mayor esfuerzo la bandeja.

Las bandejas diseñadas para este caso son:

Largo [cm]	Ancho [cm]	Altura [cm]
58	76	3

La colocación de producto en las bandejas se da con un factor de carga para cada fruta. El mismo que no debe ser muy alto para obtener uniformidad en el secado y no exceder en los tiempos estimados para la deshidratación.

3.8. DISEÑO DEL MURO TROMBE

El calor aportado por el colector solar de aire produce un incremento de la temperatura media del aire al interior de la cámara de secado de $\pm 10[^\circ\text{C}]$ con respecto a la temperatura ambiente.

Con el objetivo de incrementar la temperatura del aire para el proceso de secado se diseña un muro trombe, que consiste en hacer circular el aire a través de una pared hermética y expuesta a la radiación directa del sol, que por convección calienta el aire al entrar en contacto con las paredes.

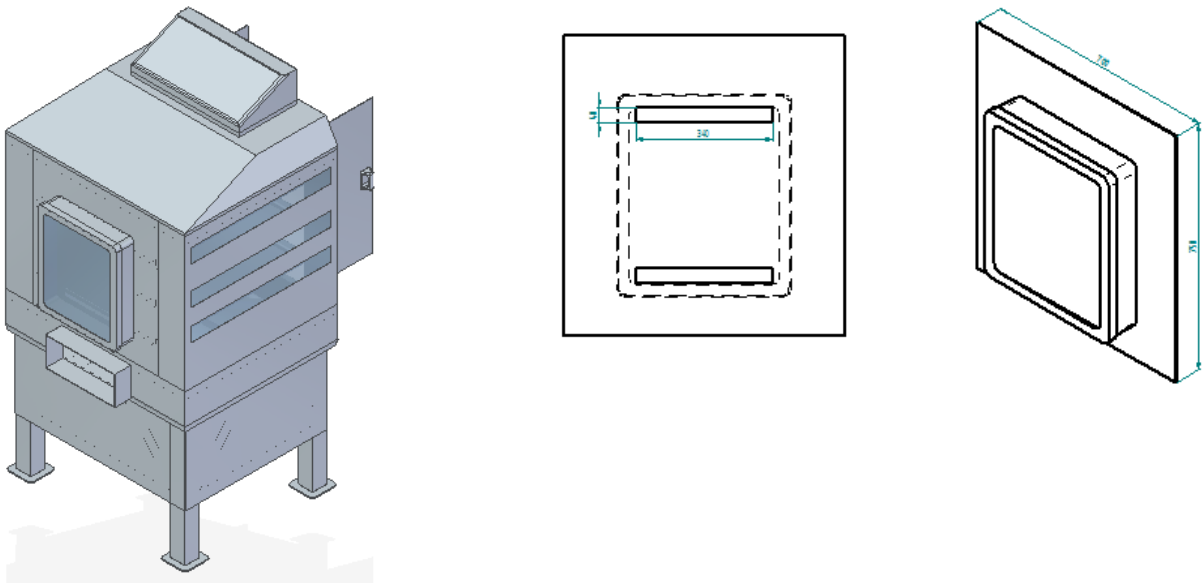


Figura 3-3. Diseño del muro trombe.
Fuente: Elaboración propia a partir de Solid Edge ST7

3.9. TRATAMIENTO DE ALIMENTOS PREVIOS AL SECADO

El proceso de secado de alimentos no solo consiste en extraer agua de los mismos, previo al secado hay que realizar la preparación del producto con el propósito de secar el producto en el menor tiempo posible y garantizar su frescura y calidad. Estos pasos se describen de forma general en la tabla 3.10.

Primera selección	Descartar los productos en mal estado, con manchas o muy maduros.
Primer lavado	Limpiar la suciedad de la superficie de los productos utilizando agua limpia.
Segunda selección	Cortar las partes inservibles del producto: cáscaras, tallo, semillas, resto de raíz, etc.
Cortar	Cortar según producto y presentación. Para favorecer el secado el tamaño no debe ser mayor a 1[cm].
Segundo lavado	Eliminar cualquier suciedad que pueda quedar.
Pretratar	Según el tipo de producto aplicar pretratamiento como: blanqueado, baño en jugo de limón o aplicar sal.
Secar	El producto debe ser cortado en láminas delgadas y regulares. Se debe controlar regularmente el secado.
Control de calidad del producto	Separar el producto que este dañado.
Envasar	Envasar el producto utilizando recipientes plásticos, sellar y etiquetar adecuadamente.
Almacenar	Almacenar en lugar fresco y seco,proteger el producto de la luz directa.

Tabla 3-10. Procedimiento para el secado de alimentos.
Fuente: Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunas rurales

3.9.1. Tratamientos para el secado

Para asegurar la calidad del secado, se deben realizar diversos pre-tratamientos físicos y/o químicos a los productos, con el fin de evitar o reducir el deterioro del producto durante y después del secado. Estos pre-tratamientos son:

- Escaldado.
- Sulfitado.
- Tratamiento con ácidos orgánicos.
- Uso de bicarbonato de sodio.
- Salado.
- Almibarado.

3.9.1.1. Escaldado

En el proceso de escaldado el producto es sumergido en agua a 95[°C] durante un tiempo determinado, con el propósito de inactivar la acción de bacterias y enzimas que deterioran el producto. La duración del escaldo varía según el tipo de producto a tratar, la madurez y el tamaño.

El escaldado tiene como objetivos:

- Inactivar las enzimas.
- Ablandar el producto.
- Eliminar parcialmente el contenido de agua en los tejidos.
- Evitar el desarrollo de pigmentos oscuros.
- Desarrollar el color y sabor característico.
- Reducir parcialmente los microorganismos presentes.

3.9.1.2. Sulfitado

Consiste en añadir sulfitos al producto, con el objetivo de inhibir la actividad del azúcar que produce el pardeamiento que afecta el color del producto. El sulfitado se usa principalmente en el procesado de la uva.

El proceso de sulfitado consiste en sumergir el producto en una solución acuosa de metabisulfito de sodio o potasio a razón de 5-10[gr] por litro, durante 5 a 10 minutos a temperatura ambiente.

Los principales efectos sobre el producto son:

- Efecto antioxidante, evita por el oxígeno.
- Efecto antioxidático, por su capacidad de inhibir las polifenoloxidasas.
- Efecto antiséptico, principalmente frente a bacterias.

El proceso se debe realizar en recipientes que no sean susceptibles a la corrosión, como pueden ser, recipientes de acero inoxidable o vidrio. A raíz de que el azufre es un elemento peligroso para la salud, la Organización Mundial de la Salud ha establecido que el contenido de azufre máximo es de 0,05[%] en el producto deshidratado.

3.9.1.3. Acidificado

Algunas frutas como manzanas, damascos, peras y plátanos al entrar en contacto con el aire tienen reacciones enzimáticas que generan un color pardo en la superficie. La manera de evitar que esto suceda es mediante el acidificado. El acidificado consiste en la reducción del pH del alimento con el objetivo de impedir el desarrollo de microorganismos y la proliferación de bacterias.

3.9.1.4. Bicarbonato de sodio

Ayuda al fortalecimiento de la clorofila en vegetales de color verde, debido a que la radiación deteriora su color. Además produce ablandamiento de las capas del alimento, facilitando la extracción del agua de los alimentos cuya capa exterior se haya endurecido.

3.9.1.5. Salado

El salado consiste en añadir cloruro de sodio (sal común) al producto con el objetivo de modificar el sabor, además la sal inhibe el desarrollo microbiano.

3.9.1.6. Almibarado

El almibarado consiste en añadir sacarosa (azúcar común) al producto con el objetivo de modificar su sabor. El almibarado inhibe el desarrollo microbiano.

3.9.2. Efectos del pre-tratamiento en los alimentos

Pretratamiento	Desarrollo microbiológico	Oxidación de lípidos	Reacción de Maillard	Ennegrecimiento enzimático	Otros efectos	Dirigido a
Escaldado	Limita bacterias, moho y levadura	No influye	No influye	No influye	Acelera la deshidratación	Hortalizas
Sulfitado	Limita bacterias y moho	Limita fuerte	Limita fuerte	Limita poco	Acelerante, fija el color, vitaminas, mayor humedad final	Hortalizas y frutas
Bicarbonato sódico					Fijador del color	Hortalizas y legumbres verdes
Ácido cítrico	Limita poco	Limita poco	Limita fuerte	Limita fuerte	Disminuye el PH	Frutas, carnes rojas, hortalizas
Ácido ascórbico	Limita moho y levadura	Limita poco	Limita fuerte	Limita fuerte	Disminuye el PH	Frutas
Baño en salmuera	Limita bacterias y moho, limita levadura	Favorece	Limita poco	Limita poco	Deshidratación parcial	Carne, hortalizas
Baño en almíbar	Limita bacterias, moho y levadura	No influye	No influye	No influye	Deshidratación parcial	Frutas
Ahumado	Limita bacterias, moho y levadura	Limita fuerte	No influye	No influye	Cambia el sabor	Carne

Tabla 3-11. Efectos del pre-tratamiento en los alimentos.
Fuente: Elaboración propia a partir de Guía del secado solar

3.10. MANTENIMIENTO

El mantenimiento del secador solar es sencillo y requiere bajo nivel técnico. El principal problema que presenta el equipo es que al estar expuesto al sol constantemente, los materiales se degradarán con mucha facilidad, teniendo que reemplazarlos cuando proceda. Por otro lado, como opera con alimentos, hay que asegurar condiciones higiénicas en el interior de la cámara de secado y la especial higiene de las bandejas.

A continuación se proponen tareas de mantenimiento, a realizar en cada uso y de forma esporádica.

3.10.1. Programa de mantenimiento

Con el objetivo de asegurar el correcto funcionamiento del secador solar, aumentar la fiabilidad y prolongar la vida útil resulta necesario el diseño de un programa de mantenimiento. El programa consiste en:

- 1. Vigilancia.
- 2. Mantenimiento preventivo.

3.10.1.1. Plan de vigilancia

El plan de vigilancia se realiza para asegurar que los productos no sufran alteraciones durante el secado, como por ejemplo: presencia de humedad, insectos, roedores, hojas o cualquier elemento que sea perjudicial para el proceso de secado.

COMPONENTE	OPERACIÓN	FRECUENCIA	DESCRIPCIÓN
COLECTOR SOLAR	Limpieza	Semanal	Con agua y productos adecuados
	Cubierta	Mensual	Inspección visual, condensación
	Aislación térmica	Mensual	Inspección visual, verificar estanqueidad
	Juntas	Mensual	Agrietamientos
	Placa de captación	Mensual	Corrosión, limpieza
	Bastidor	Mensual	Inspección visual
CÁMARA DE SECADO	Limpieza Bandejas	Diario	Desinfectar bandejas
	Camara interna	Diario	Secar humedad en paredes
	Verificar tiraje	Diario	Revisar que no se obstruya la chimenea
	Juntas	Mensual	Agrietamientos
	Muro trombe	Mensual	limpieza
ESTRUCTURA DE SOPORTE	Base de la cámara	Cada 3 meses	Inspección visual, uniones soldadas
	Base del colector	Cada 3 meses	Inspección visual , uniones soldadas
	Apoyo móvil	Cada 3 meses	Lubricar ruedas

Tabla 3-12. Plan de vigilancia.
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

3.10.1.2. Plan de mantenimiento preventivo

Son operaciones de inspección visual que aplicadas al equipo deben permitir mantener dentro de límites aceptables las condiciones de funcionamiento, prestaciones, protección y durabilidad del mismo.

El mantenimiento preventivo implicará, como mínimo, una revisión anual de cada uno de los componentes del equipo de secado. El plan de mantenimiento puede ser realizado por cualquier persona ya no requiere de gran nivel técnico.

El mantenimiento preventivo ha de incluir todas las operaciones de mantenimiento y sustitución de elementos degradados por la exposición a la intemperie o desgastados por el uso, necesarias para asegurar de que el equipo de secado funcione correctamente durante su vida útil.

PARTES	FRECUENCIA	DESCRIPCIÓN
Cubierta transparente	6 meses	Inspección visual, degradación, limpieza general
Placa de captación	anual	Inspección visual, corrosión, pintura
Aislación térmica	6 meses	Verificar que no este dañada, humeda
Bastidor	6 meses	Inspección visual (deformación, agrietamientos)
Soporte del colector	anual	Inspección visual (tintas penetrantes)
Apoyo	6 meses	Inspección visual, Lubricación
Cámara de secado	anual	Deformación, suciedad, fugas
Bandejas	6 meses	Desinfección, reemplazo ante deformación
Chimenea	6 meses	Inspección visual, limpieza, revisar
Muro trombe	6 meses	Limpieza, Inspección visual
Puertas	6 meses	Lubricar bisagras
Base de la cámara	6 meses	Inspección visual (tintas penetrantes)
Apoyo	6 meses	Inspección visual (tintas penetrantes)

Tabla 3-13. Plan de mantenimiento preventivo
Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

4.1. ACTUALES MÉTODOS PARA EL SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS

4.1.1. Deshidratado en horno a gas licuado

Para la producción de vegetales deshidratados a mediana escala existen en el mercado equipos tecnificados, con sistema de ventilación forzada para permitir que el aire circule uniformemente por todo el interior del horno, lo que permite mayor eficiencia de los tiempos de deshidratado. Cuentan con un sistema de seguridad en el quemador, lo que garantiza que el horno funcione solo cuando hay llama.

El deshidratador cuenta con controlador de temperatura y está provisto de aislación térmica de lana de vidrio. El consumo nominal de gas licuado es de 0.695[kg/h].



Figura 4-1. Deshidratador de alimentos a gas licuado.

Fuente: hornosfelix.com/deshidratadores/

4.1.2. Deshidratadores eléctricos

Son equipos para uso doméstico, los cuales están provistos de un sistema de calentamiento y ventilación forzada, que producen un flujo de aire caliente que al circular a través de las bandejas perforadas eliminando la humedad contenida en los alimentos. El dispositivo cuenta con temporizador y un control de temperatura de gran precisión. Poseen una potencia de 600 a 800 [W].

4.2. CALOR NECESARIO Y DURACIÓN DEL PROCESO DE SECADO

4.2.1 Calor necesario para el proceso de secado

El proceso de secado de un alimento se compone de dos etapas. Primero se debe aportar calor para incrementar la temperatura del alimento desde la temperatura inicial hasta la temperatura de secado, lo cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q_s = M_s \cdot c_p \cdot (T_f - T_i)$$

Ecuación 4.1. Calor necesario para alcanzar la temperatura de secado.

Fuente: Technology of Solar Drying

El calor específico varía según el tipo de producto, por ejemplo el calor específico de la uva blanca es de 3.67 [kJ/kg °C]. Para lo cual el calor necesario para incrementar la temperatura de una masa de 1 [kg] de alimento hasta la temperatura de secado es de:

$$Q_s = 1[kg] \cdot 3.67 \left[\frac{kJ}{kg} \text{ } ^\circ C \right] \cdot (45 - 14)[^\circ C]$$

$$Q_s = 113.77 [kJ] \text{ por kilogramo de uva blanca}$$

La segunda etapa es la evaporación del agua contenida en el producto, como el agua se comienza a evaporar una vez alcanzada la temperatura de secado el calor necesario para la evaporación es:

$$Q_e = M_a \cdot L_v = [kJ]$$

Ecuación 4.2. Calor necesario para la evaporación del agua contenida.

Fuente: Technology of Solar Drying

Dónde L_v representa el calor latente de vaporización. Los valores para h_g (entalpía del agua como vapor) y h_f (entalpía del agua líquida) en la temperatura de secado se obtienen de la tabla de vapor adjunta en el anexo A.

Para una temperatura de secado de 45°C la entalpía h_g es de 2583 [kJ/kg] y la entalpía h_f es de 188 [kJ/kg].

$$Q_v = 0.75[kg] \cdot (2583 - 188) \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 1796.25[kJ]$$

La energía que se debe entregar para evaporar 0.75 [kg] de agua para deshidratar 1[kg] de producto fresco resulta ser:

$$Q_e + Q_v = 113.77[kJ] + 1796.25[kJ] = 1910[kJ]$$

4.2.2. Duración del proceso de secado

El diseño de la cámara de secado permite una capacidad de 10[kg] de producto fresco, para lo que se recomienda realizar un pre-tratamiento del producto señalado en el capítulo 3.9. con el objetivo de reducir el tiempo de secado, reducir la actividad del agua, evitar el desarrollo de microorganismos y mejorar el aspecto final del producto.

El tiempo de secado de un producto varía según el contenido de agua del mismo, la capacidad del producto para liberar la humedad contenida y su capacidad para almacenar calor.

Para la evaporación de 0.75 [kg] de agua contenida en 1[kg] de uva blanca se requiere el equivalente a 1910 [kJ]. La capacidad del secador solar térmico de aire permite evaporar el equivalente a 7.5 [kg] de agua por cada tanda de secado.

MES	Radiación solar media diaria [MJ/m2]	Radiación útil en el colector [MJ]	Q evaporación de 10 [kg] de uva [MJ]	Duración del secado [días]
Enero	22.81	31.82	19.1	0.6
Febrero	20.35	28.39	19.1	0.7
Marzo	17.96	25.05	19.1	0.8
Abril	13.34	18.61	19.1	1.0
Mayo	8.29	11.56	19.1	1.7
Junio	6.84	9.54	19.1	2.0
Julio	7.56	10.55	19.1	1.8
Agosto	11.07	15.44	19.1	1.2
Septiembre	14.34	20.00	19.1	1.0
Octubre	18.41	25.68	19.1	0.7
Noviembre	20.64	28.79	19.1	0.7
Diciembre	21.73	30.31	19.1	0.6

Tabla 4-1. Duración del secado en un día medio de cada mes.

Fuente: Elaboración propia a partir de Excel 2010

4.3. PÉRDIDAS DE CALOR EN EL COLECTOR

La energía útil ganada por el colector depende de la radiación recibida, del tipo de colector, su diseño y materiales utilizados, del área que tiene la superficie de absorción, la temperatura de trabajo y la del entorno.

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

Ecuación 4.3. Calor útil ganado por el colector solar en una hora.

Fuente: docplayer.es/3731577

Dónde:

S: Radiación total absorbida por el colector en la unidad de área en una hora

UL: Coeficiente total de pérdidas del colector

Tpm: Temperatura media de la placa absorbidora

Ta: Temperatura media del aire

El coeficiente total de pérdidas U_L representa el calor perdido por las paredes del colector solar, que influye directamente en la eficiencia del colector solar y debe ser calculado para determinar la cantidad de calor aprovechado por el proceso de secado.

$$U_L = U_T + U_b + U_e$$

Ecuación 4.4. Coeficiente total de pérdidas térmicas del colector.

Fuente: docplayer.es/3731577

Dónde:

UL: Coeficiente de pérdidas por la cubierta del colector.

Ub: Coeficiente de pérdidas por el fondo.

Ue: Coeficiente reducido de pérdidas laterales.

Ley de enfriamiento de Newton

$$Q = hA\Delta T$$

Ecuación 4.5. Flujo de calor a través de una pared

Fuente: Manual de calentadores solares

4.3.1. Perdida de calor por las paredes del colector

Perdidas por la base del colector solar

$$RT1 = \frac{1}{hA} = \frac{1}{0.12 \cdot 0.28} + \frac{1}{0.033 \cdot 0.28} = 137.98[W]$$

$$Q = 137.98[W]$$

Perdidas por las paredes laterales

$$\text{Madera conifera; } RT2 = kA \frac{\Delta T}{L} = 0.12 \cdot 0.28 \cdot \frac{13}{0.025} = 17.47[W]$$

$$\text{Poliestireno expandido } RT3 = kA \frac{\Delta T}{L} = 0.033 \cdot 0.28 \cdot \frac{13}{0.05} = 2.4[W]$$

$$Q = (17.47 + 2.4) \cdot 2 = 39.74[W]$$

$$U_T = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)^e}{(N + f)} \right]} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} - T_a)(T_{pm}^2 - T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\epsilon_p}{\epsilon_g} - N}$$

Ecuación 4.5. Coeficiente de pérdidas por la cubierta

Fuente: Manual de calentadores solares

$$U_T = \left\{ \frac{1}{\frac{496}{30} \left[\frac{30 - 17}{(2 + 1.704)} \right]^{-1}} + \frac{1}{12.96} \right\}^{-1} + \frac{5.67 \times 10^{-8} (30 - 17)(30^2 - 17^2)}{(0.2 + 0.00591 \cdot 2 \cdot 12.96)^{-1} + \frac{2 + 1.704 - 1 + 0.133 \cdot 0.88}{0.88} - 1}$$

$$U_T = 3.76[kJ/m^2 \cdot ^\circ K]$$

Para el cálculo del coeficiente de pérdidas por el fondo del colector solar U_b se asume que todo el calor que pasa a través del aislante es perdido y que el área del fondo es similar al de la cubierta, por lo tanto la ecuación para determinar las pérdidas es:

$$U_b = k_{aisl}/L_{aisl}$$

Ecuación 4.6. Coeficiente de pérdidas por la base del colector

Fuente: Manual de calentadores solares

Donde k representa la conductividad térmica del aislante para:

- Poliestireno expandido 0.033[W/m°K]
- Espesor = 0.05 [m]

$$U_b = 0.66 \left[\frac{kCal}{m^2} \cdot ^\circ K \cdot hora \right]$$

El coeficiente reducido de pérdidas laterales U_e es el coeficiente de pérdidas laterales referido al área de captación del colector; o sea:

$$U_e = k_e A_e / L_e A_c$$

Ecuación 4.7. Coeficiente de pérdidas laterales

Fuente: Manual de calentadores solares

Dónde:

L_e : Espesor del aislante lateral.

k_e : Conductividad térmica del aislante.

A_e : Área lateral.

A_c : Área de la cubierta.

$$U_e = \frac{0.033 \left[\frac{W}{m} \cdot ^\circ K \right] \cdot 0.28[m^2]}{0.03[m] \cdot 1.68[m^2]} = 0.183 \left[\frac{kCal}{m^2} \cdot ^\circ K \cdot hora \right]$$

Uno de los parámetros que más afecta al valor del coeficiente total de pérdidas es el número de planchas en la cubierta. Mientras mayor sea su número, menores serán las pérdidas pero, por otro lado, disminuirá la radiación que llegue al plato de absorción, ya que también se afecta el factor $(\tau\alpha)$ por esto, el valor N óptimo ha de fijarse con el objetivo de una eficiencia máxima en el colector.

4.3.2. Rendimiento del colector solar

La energía útil ganada por la placa de captación viene dada por el área donde incide la radiación y la diferencia de temperatura del aire con la del interior del colector.

La ecuación para determinar el calor ganado por la placa viene dado por:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)]$$

La suma de las pérdidas U_L es el calor que se pierde por las paredes del colector:

$$U_L = 3.76 + 0.66 + 0.183 = 4.6 [W] \quad n = Q_u / A_c \Delta T$$

- Calor útil

$$Q_u = 1.68 [m^2] \cdot [490 - 4.6 \cdot (30 - 17)]$$

$$Q_u = 722.73 [W]$$

Rendimiento del colector solar propuesto

$$\eta = \frac{722.73 [W]}{490.59 \left[\frac{W}{m^2} \right] \cdot 1.68 [m^2]} = 87.6 [\%]$$

4.4. AHORRO DE GAS LICUADO AL UTILIZAR EL SECADOR SOLAR

La utilización de fuentes limpias de energía no solo significa el cuidado al medioambiente, sino también reduce los costos de energía asociados al proceso de secado.

En el caso de un horno a base de gas licuado de petróleo, el poder calorífico del gas es de 12100 [kcal/kg] y para evaporar 7.5 [l] de agua se requiere de 19100[kj] de energía. La cantidad de gas necesario se expresa en la ecuación 4.8.

$$m = \frac{Q}{\eta \cdot PC} = [kg]$$

Ecuación 4.8. Cantidad de gas licuado necesario para el secado.

Fuente: drtoro.cl/ACHEE/documentos/recursos/DireccionAnexo2.pdf

Donde:

Q – El calor necesario para evaporar 7.5 [kg] de agua

m – La masa de gas licuado necesario

PC – El poder calorífico del combustible

η – El rendimiento de la combustión del horno

Para generar el equivalente de energía para el proceso de secado mediante el calentamiento con gas licuado de petróleo se requiere una masa de combustible de:

$$m = \frac{4565[kcal]}{0.85 \cdot 12100 \left[\frac{kcal}{kg} \right]} = 0.443[kg] = 0.82 \text{ litros de GLP}$$

En la conversión de unidades 19100 [kJ] equivalen a 4565 [kcal], que es la energía necesaria para la evaporación de 7.5[l] de agua. La densidad del GLP a temperatura ambiente es de 0.54[kg/l], siendo necesario 0.82[l] de gas licuado de petróleo para cada tanda de secado.

4.5. PROPUESTA DE SECADOR SOLAR TÉRMICO DE TIPO MIXTO

La orientación que tendrá el secador será hacia el norte, ya que es la óptima para el hemisferio sur. Al evaluar que el proceso de secado se realiza en épocas de cosecha, entre los meses de octubre a marzo se recomienda una inclinación del panel solar de 30° debido a la posición del sol con respecto al plano de captación.

Otro factor importante a considerar en el diseño del equipo de secado es que la circulación del aire al interior de la cámara es de forma ascendente. Por tal motivo, la inclinación del panel influye en la altura total de la cámara de secado debido a la conexión con el colector solar de aire.

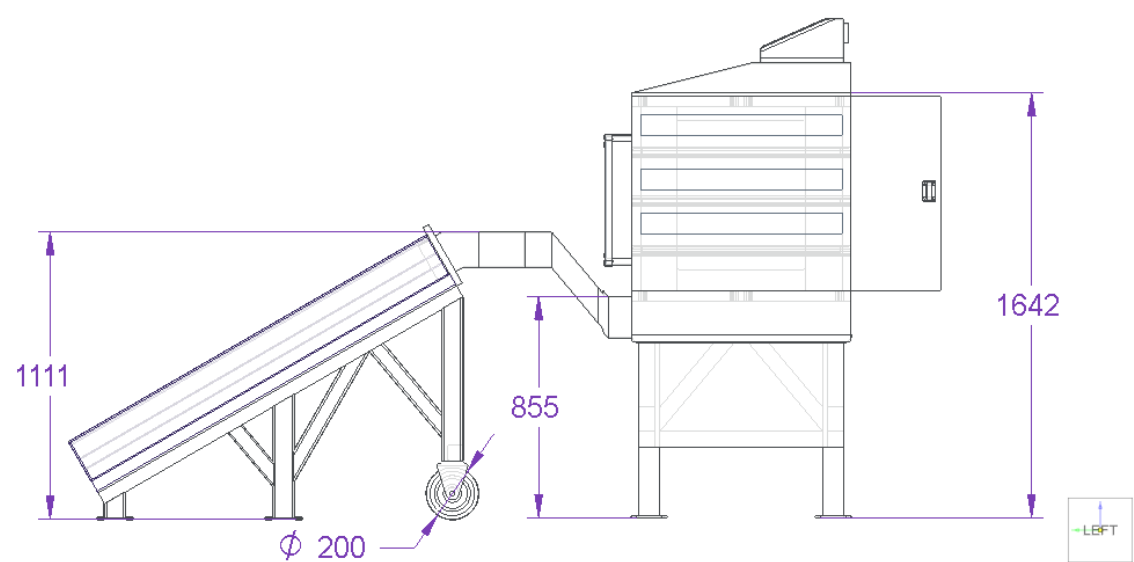


Figura 4-2. Dimensiones del secador solar térmico de tipo mixto.

Fuente: Elaboración propia a partir de Solid Edge ST7

4.5.1. Características principales del diseño tipo mixto

El colector solar y la cámara de secado forman el sistema de secado solar térmico, la captación de la energía solar es mediante una placa ondulada de zinc-alum, la cual es de color negro mate, la ondulación incrementa el área efectiva de captación de la radiación.

Bajo la placa ondulada se encuentra un espacio de aire de 80[mm] y luego una segunda placa ondulada cuya función es la de mantener la temperatura y canalizar el flujo de aire hacia el ducto de salida, la placa inferior está separada del aislante térmico y esta a su vez está unida a la base del colector.

Las paredes de la cámara de secado tienen ventanillas laterales de policarbonato, lo que produce un incremento de la temperatura en el interior de la cámara de secado. Además cuenta con un muro trombe, con el objetivo de que el aire circule entre dos paredes, una de ellas expuesta a una lámina transparente de policarbonato lo que incrementa la temperatura del aire.

4.5.2. Exposición del equipo a la intemperie

La exposición del secador solar térmico a la intemperie significa contar con agentes que afectan la integridad del equipo y la eficiencia del secado. Como por ejemplo; animales, aves, insectos, sombras y las condiciones climáticas de la temporada.

Siendo la geometría del secador solar térmico un factor clave para mermar el deterioro acelerado del equipo. Para ello la cámara está diseñada para evitar la acumulación e ingreso de agua por la chimenea.

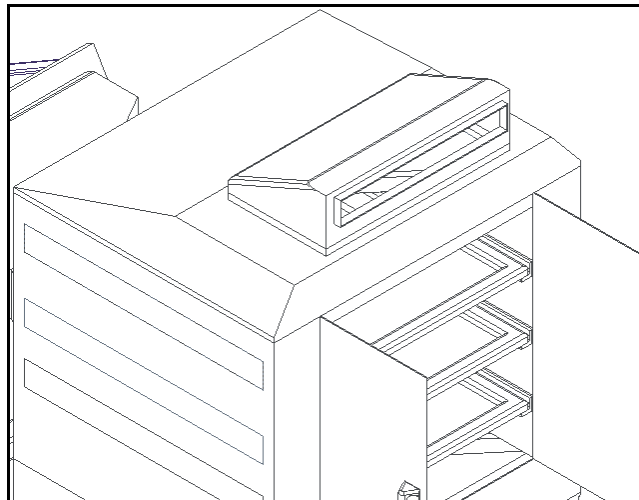


Figura 4-3. Detalle del techo y salida de aire.

Fuente: Elaboración propia a partir de Solid Edge ST7

4.5.3. Resistencia a la acción del viento

La pared exterior de la cámara de secado es de material acero galvanizado de 0.5 [mm] de espesor, lo que potencia la firmeza, protege ante la corrosión, humedad, oxidación y en general de las condiciones adversas propias de su funcionalidad.

La estructura de la cámara de secado está diseñada para resistir ráfagas de viento, al interior las paredes están unidas a vigas de madera en la parte superior e inferior, para soportar la fuerza ejercida por el viento sobre el área expuesta de la cámara de secado.

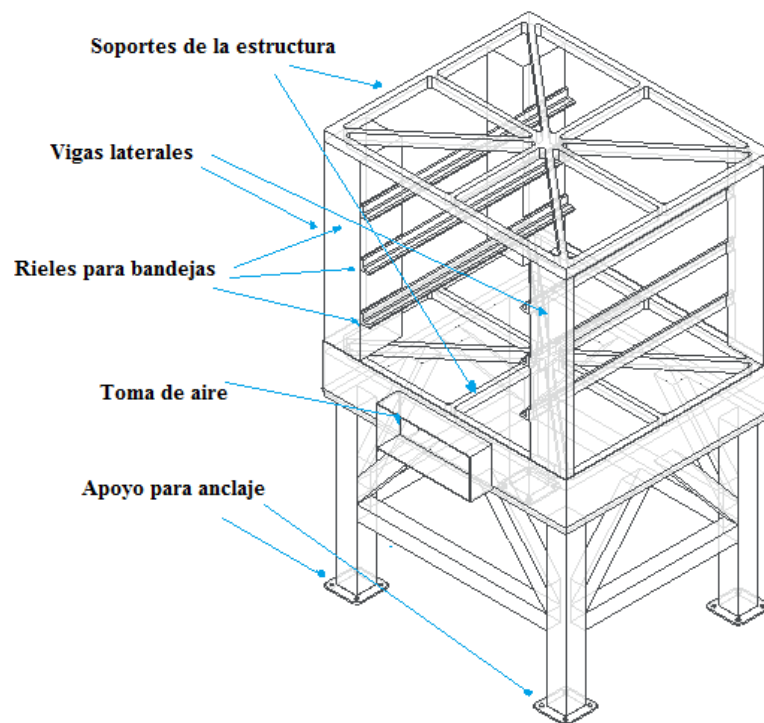


Figura 4-4. Estructura de la cámara de secado.

Fuente: Elaboración propia a partir de Solid Edge ST7

4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

4.6.1. Costos de inversión

Los costos de inversión son todos aquellos gastos que se realizan para la construcción del secador solar térmico de tipo mixto y la preparación del pre-tratamiento de alimentos para realizar el proceso de secado. En este caso se considerará el costo de los materiales de construcción de la cámara de secado y del colector solar de aire. A continuación se detallan en la siguiente tabla, los costos de la inversión del secador solar térmico propuesto:

4.6.2. Costos de materiales del secador solar

INVERSIÓN EN EL SECADOR SOLAR TÉRMICO					
ITEM	SUMINISTRO	PROVEEDOR	DIMENSIONES	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE SECADO				
	Plancha galvanizada lisa	Sodimac	0.5x1000x2000	8390	25170
	Policarbonato compacto transparente	DVP	5X2050X1050	72590	72590
	Poliestireno expadido blanco	Aislapol	50x2000x1000	2930	8790
	Viga estructural	Easy	20x80x4000	13990	13990
	Tornillo madera screw	Easy	4.5x50	7990	7990
	Viga pino seco radiata	Easy	2"x3"x3200	2390	4780
	Perfil cuadrado	Cintac	50x50x1.5x6000	11590	11590
	Plancha acero lisa laminada	Cintac	1000x200x3	14990	29980
	Perno coche+tuerca+golilla	Easy	3/8x2"	10990	10990
	Manilla de acero inoxidable	Sodimac	96x32	950	1900
	Viga pino oregón	Sodimac	1"x2"x1200	540	4860
	Perfil ángulo doblado	Sodimac	30x30x3x6000	5990	5990
	Malla n°6 harnero soldada galvanizada	Sodimac	0.6x1500x600	6980	6980
2	CONSTRUCCIÓN DEL COLECTOR SOLAR DE AIRE				
	Policarbonato compacto transparente	DVP	5X2050X1050	72590	72590
	Poliestireno expadido blanco	Aislapol	50x2000x1000	2930	2930
	Plancha zincalum gris acanalada onda	Sodimac	0.4x851x2000	6790	13580
	Panel pino radiata finger	Sodimac	30x1020x2440	65090	65090
	Viga pino oregón	Sodimac	2"x8"x4000	22430	22430
	Clavo corriente	Sodimac	4" bolsa 2 kg	2560	2560
	Plancha zinc galvanizada lisa	Sodimac	0.4x950x2000	4990	4990
	Pilar pino oregón	Sodimac	4"x4"x3200	14990	14990
	Rueda direccionable <185 kg	ROIAN Store	Ø200 mm	14500	29000
	Panel pino oregón	Sodimac	18x1200x2400	47990	47990
				TOTAL+IVA. =	\$481750

Tabla 4-2. Costo de los materiales del secador solar propuesto

Fuente: Elaboración propia a partir de información en línea

4.6.3. Costos de fabricación de la estructura del colector y cámara de secado

ÍTEM	CANTIDAD	HH (c/u)	VALOR HH	TOTAL
Maestro en estructuras	1	27	\$5,000	\$135,000
Maestro en carpintería	1	24	\$5,000	\$120,000
Maestro soldador	1	4	\$7,000	\$28,000
Total materiales y herramientas				\$90,000
			Valor neto	\$373,000
			IVA	\$70,870
			Total	\$443,870

Tabla 4-3. Costos de fabricación del colector solar y la cámara de secado

Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea

El total de la inversión se estima en \$925.620 (IVA incluido)

4.6.4. Costos de producción

Los costos de producción en el proceso de secado solar son aquellos costos en insumos para realizar el pre-tratamiento del producto antes del secado. El diseño propuesto no involucra costos en energía debido a que el proceso de secado se realizará únicamente utilizando energía solar. Los costos del pre-tratamiento para cada tanda de secado según el tipo de alimento a secar son los siguientes:

TRATAMIENTO	COSTO
Escaldado	\$300
Sulfitado	\$103
Acidos organicos	\$93
Bicarbonato de sodio	\$109
Salado	\$40
Almibarado	\$340
TOTAL	\$985

Tabla 4-4. Costo del pre-tratamiento según el tipo de producto

Fuente: Elaboración propia a partir de datos en línea

4.6.5. Costo de mantenimiento

El secador solar térmico requiere de mantenimiento mínimo, se debe realizar una limpieza periódica de la cámara de secado para evitar la contaminación del producto y evitar el contacto de agentes externos.

Los costos del mantenimiento son mínimos, por lo tanto no son relevantes a la hora de evaluarlos. Se recomienda realizar periódicamente una inspección visual del colector solar y cada cierto tiempo la limpieza de la cubierta y de la placa de captación.

CONCLUSIÓN

En el presente la energía solar es un tema de interés en el país, cada día más personas se interesan por utilizar la energía solar como una fuente de energía alternativa. Pues gran parte de la oferta inmobiliaria ofrece sistemas solares térmicos para calefacción y calentamiento de agua. Cualquiera sea la necesidad, la energía solar cada vez resulta una alternativa más económica y al alcance de las personas, ya sea debido a su bajo costo o por proyectos financiados por el gobierno.

Sin embargo Chile es un país privilegiado, ya que dispone de niveles de radiación suficientes para cubrir gran parte de la demanda energética, es por ello que se debe innovar en tecnologías solares que signifiquen el aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones como el secado de alimentos.

El desarrollo y aplicación de sistemas que signifiquen el aprovechamiento de la energía solar en el ámbito cotidiano fortalece la independencia y el ahorro energético reduciendo el impacto ambiental y los costos de generación de las energías convencionales no renovables.

El secado solar es una alternativa económica para entregar valor agregado al producto, así como también reducir las pérdidas debido a la actividad del agua y el desarrollo de microorganismos que deterioran exponencialmente los alimentos.

El secador solar de tipo mixto presenta un mejor costo beneficio, comparado con los deshidratadores a base de GLP, considerando las constantes fluctuaciones en el precio de los combustibles. Un secador convencional para una tanda de secado requiere 0.82 litros de GLP y que el secador solar propuesto utiliza únicamente la energía solar para el proceso de secado.

BIBLIOGRAFÍA

- [25] CORVALAN, R., Ingeniería del secado solar, Primera Edición Subprograma VI: Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía: Santiago de Chile, Editorial Cyted-D 1992 p. 555.1992

LINKOGRAFÍA

- [1] ENDESA CHILE Introducción a las ERNC [en línea]
<[http://www.enelgeneracion.cl/ES/NUESTROCOMPROMISO/PUBLICACION ESEINFORMES/Documents/Libro%20ERNC%20versi%C3%B3n%20de%20impresión.pdf](http://www.enelgeneracion.cl/ES/NUESTROCOMPROMISO/PUBLICACION%20ESEINFORMES/Documents/Libro%20ERNC%20versi%C3%B3n%20de%20impresión.pdf)> [Consulta: 20 agosto 2018].
- [2] ODEPA Fuentes de energías [en línea]
<[www.odepa.gob.cl/temas transversales/agricultura-sustentable/energías renovables-no-convencionales](http://www.odepa.gob.cl/temas%20transversales/agricultura-sustentable/energias-renovables-no-convencionales)> [Consulta: 20 agosto 2018].
- [3] CUBASOLAR. Introducción al secado solar [en línea]
<<http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Ecosolar/Ecosolar28/HTML/articulo03.htm>> [Consulta: 20 agosto 2018].
- [4] LIBERONA, Flavia. La matriz energética en Chile [en línea]
<[http://www.terram.cl/descargar/energia/electricidad/ppt_presentacion_power_p oint/PPT-La-matriz-energetica-en-Chile.pdf](http://www.terram.cl/descargar/energia/electricidad/ppt_presentacion_power_point/PPT-La-matriz-energetica-en-Chile.pdf)> [Consulta: 20 agosto 2018].
- [5] ACER. Fuentes renovables de energía [en línea]
<<https://www.asorenovables.com/que-son-las-energias-renovables/>> [Consulta: 20 agosto 2018].
- [6] ISOLARI. Energía solar [en línea] <<http://www.isolari.es/energias-renovables>> [Consulta: 21 agosto 2018].

- [7] MUJUMBAR A.S. Solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations. [en línea]
<https://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/Solar%20Drying_Fundamentals_Applications_and_Innovations.pdf> [Consulta: 21 agosto 2018].
- [8] AL-JUMAAH. Design and construction of a solar drying system for food preservation. [en línea]
<http://colleges.jazanu.edu.sa/sites/en/eng/Projects/Projects_Mech_35_36_4.pdf> [Consulta: 23 agosto 2018].
- [9] OM PRAKASH, Anil Kumar. Solar drying technology. [en línea]
<https://play.google.com/store/books/details/Solar_Drying_Technology_Concept_Design_Testing_Mod?id=FkwzDwAAQBAJ&hl=en_US>
[Consulta: 25 agosto 2018].
- [10] AGREGA.EDUCACION.ES, Fuentes de energía. [en línea]
<http://agrega.educacion.es/repositorio/03122014/bb/es_2014120312_9220433/fuentes_de_energa.html> [Consulta: 26 agosto 2018].
- [11] CNICE.MEC.ES, Energía solar; ventajas e inconvenientes. [en línea]
<http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/solar.htm>
[Consulta: 26 agosto 2018].
- [12] CNICE.MEC.ES, Fuentes de energía no renovables. [en línea]
http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/no_renovables.htm?4&2 [Consulta: 26 agosto 2018].
- [13] JARAMILLO, Juan Antonio, Conceptos de transferencia de calor. [en línea]
<<https://books.google.cl/books?id=1LaRKHdRsxIC&pg=PA164&lpg=PA164&dq#v=onepage&q&f=false>> [Consulta: 27 agosto 2018].
- [14] ECURED, Transferencia de calor. [en línea]
<https://www.ecured.cu/Transferencia_de_calor> [Consulta: 28 agosto 2018].
- [15] EXERGIA.NET, Introducción a la energía solar. [en línea]
<<https://enerxia.wordpress.com/energias-renovables-introduccion/energia-solar-introduccion/>> [Consulta: 29 agosto 2018].

- [16] PASTEN Cesar, Chile, energía y desarrollo. [en línea]
<<https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n11/art03.pdf>> [Consulta: 29 agosto 2018].
- [17] UCHILE, Estadísticas energía solar en Chile. [en línea]
< ingenieria.uchile.cl/documentos/estadisticas-de-energia-solar-en-chile_139557_1_1311.pdf> [Consulta: 29 agosto 2018].
- [18] CIV, Aplicaciones en Chile de la energía solar. [en línea]
<<http://www.civ.cl/academico/aedil/asignaturas/sistemaseconomicos/Trabajos/Energia/esolar.htm>> [Consulta: 1 septiembre 2018].
- [19] AGROCLIMA Niveles de radiación en Talcahuano. [en línea]
< <http://www.agroclima.cl/InformesRegionales/Radiacion.aspx?IdReg=7>>
[Consulta: 1 septiembre 2018].
- [20] CASTELLS, Xavier. Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad. [en línea]
<<https://books.google.cl/books?isbn=8499691250>>
[Consulta: 2 septiembre 2018].
- [21] ECURED. Tipos de radiación solar. [en línea]
<https://www.ecured.cu/Radiaci%C3%B3n_solar>
[Consulta: 2 septiembre 2018].
- [22] DGF. Explorador del recurso solar en Chile. Variaciones estacionales de la radiación solar. [en línea]
<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/info/Documentacion_Explorador_Solar.pdf> [Consulta: 3 septiembre 2018].
- [23] AEE INTEC. Solar drying, diseño de secadores solares. [en línea]
<<https://www.aee-intec.at/0uploads/dateien553.pdf>> [Consulta: 5 septiembre 2018].
- [24] ASADES Ensayos normalizados de colectores solares y sistemas de calentamiento de agua. [en línea]
<www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2010/2010-t003-a020.pdf>
Consulta: 7 septiembre 2018].
- [26] MINENERGIA Orientación y ángulo de inclinación de paneles solares.
<http://www.minenergia.cl/sst/wpcontent/uploads/2016/05/manual_tecnico_solar_2013-1_v2.pdf> [Consulta: 8 septiembre 2018].

ANEXO A: TABLAS DE DATOS

Propiedades del aire seco a presión atmosférica.

T (°C)	ρ (kg/m³)	c _p (kJ/kg·K)	μ · 10 ⁶ (N·s/m²)	ν · 10 ⁶ (m²/s)	k · 10 ³ (W/m·K)	α · 10 ⁶ (m²/s)	Pr
-150	2.867	0.982	8.64	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.965	11.90	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.975	12.49	6.482	16.62	8.842	0.7330
-80	1.828	0.983	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.990	13.64	7.850	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.995	14.20	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.7440
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.30	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.80	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.80	0.7350
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.40	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.110	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.060	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.30	19.45	28.45	27.05	0.7190
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.999	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.986	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.972	1.008	21.39	22.00	30.24	30.85	0.7132
95	0.959	1.009	21.60	22.52	30.60	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.921	1.010	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.898	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.876	1.012	23.05	26.32	33.05	37.30	0.7057
140	0.854	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.834	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027
160	0.815	1.016	24.24	29.74	35.11	42.40	0.7014
170	0.797	1.017	24.63	30.92	35.79	44.15	0.7003
180	0.779	1.019	25.01	32.11	36.46	45.92	0.6992
190	0.762	1.021	25.39	33.32	37.13	47.71	0.6983
200	0.746	1.023	25.77	34.54	37.79	49.53	0.6974
210	0.7306	1.025	26.14	35.78	38.45	51.36	0.6967
220	0.7158	1.027	26.51	37.04	39.10	53.21	0.6960
230	0.7016	1.029	26.88	38.31	39.75	55.08	0.6955
240	0.6879	1.031	27.24	39.60	40.40	56.97	0.6950
250	0.6748	1.033	27.60	40.90	41.04	58.88	0.6946
260	0.6621	1.035	27.95	42.22	41.67	60.81	0.6942
270	0.6499	1.037	28.30	43.55	42.31	62.75	0.6940
280	0.6382	1.040	28.65	44.90	42.93	64.72	0.6938
290	0.6269	1.042	29.00	46.26	43.56	66.69	0.6936
300	0.6159	1.044	29.34	47.64	44.18	68.69	0.6935

Fuente: Fundamentos de transferencia de calor, Prentice Hall 4º edición.

Calor específico de la uva de mesa

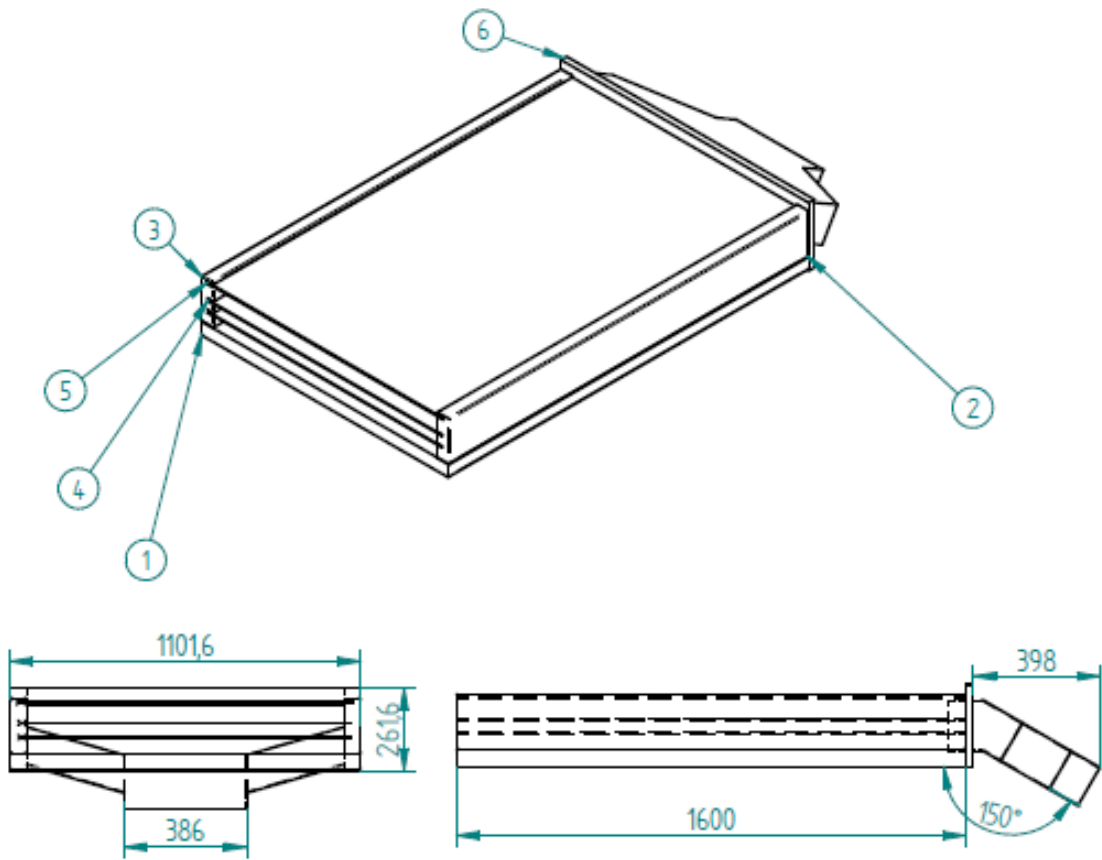
Frutas	ρ (kg/m³)	Cp (J/kg·K)	k (W/m·K)
Durazno	1038.60	3893.75	0.570
Cereza	1064.11	3753.43	0.559
Uva	1070.16	3671.66	0.546

Fuente: revistas.unal.edu.co/index.php/

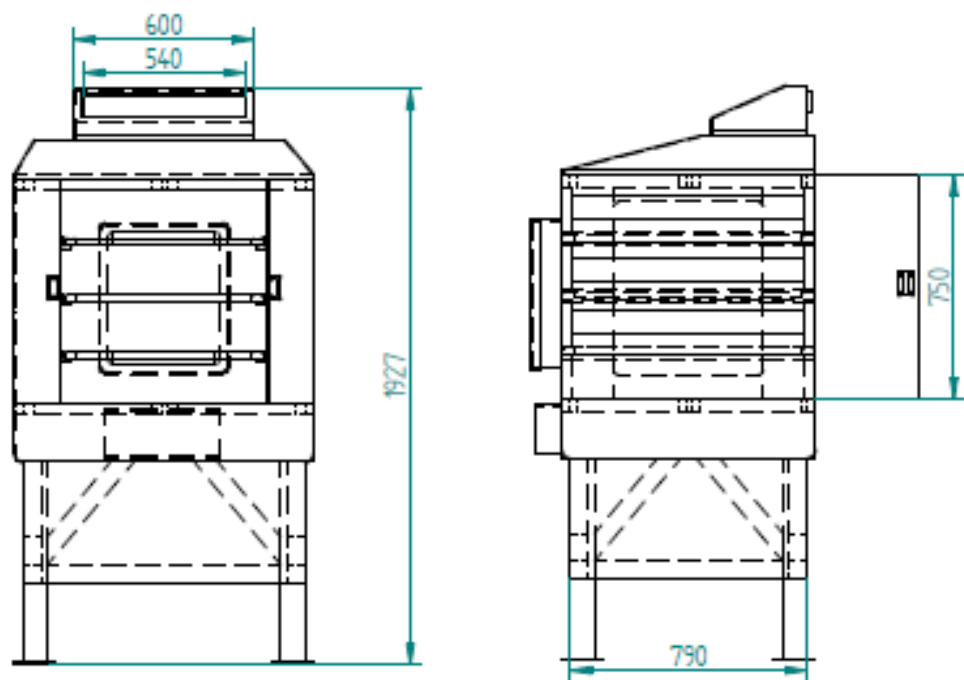
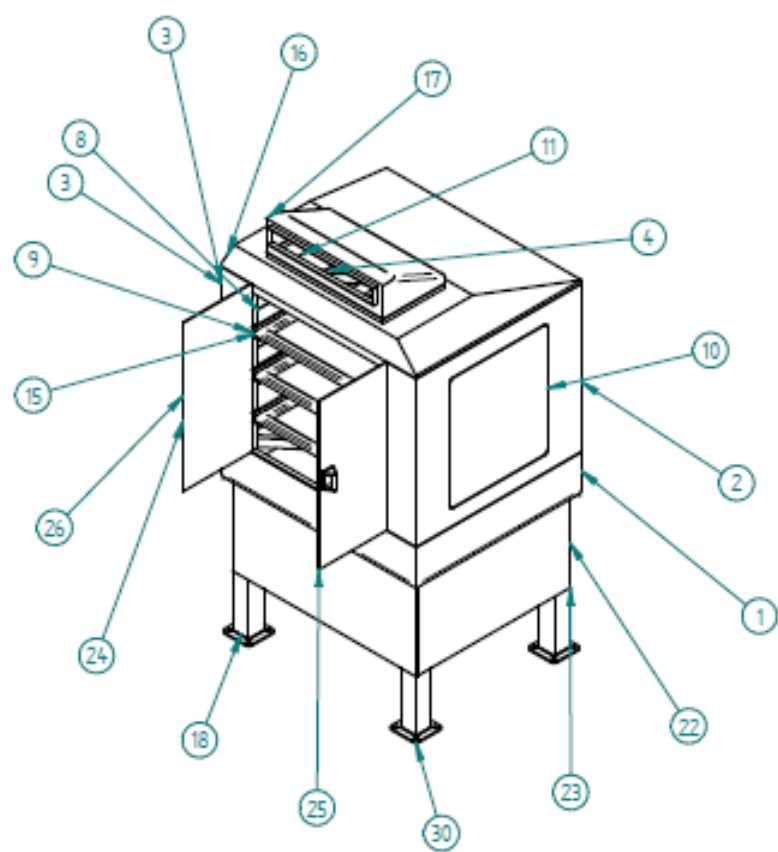
ANEXO B: DISEÑO DEL SECADOR SOLAR DE AIRE

Diseño del colector solar de aire

Número de Item	Descripción	Cantidad
1	Base del colector	1
2	Lateral derecho del colector	1
3	Lateral izquierdo del colector	1
4	Placa de captación	2
5	Cubierta	1
6	Rediseño ducto salida	1



Diseño de la cámara de secado



Componentes de la cámara de secado

Número de Ítem	Descripción	Cantidad	Número de Ítem	Descripción	Cantidad
1	Base de la cámara	1	22	Pared externa cámara	2
2	Pared lado derecho	1	23	Pared exterior ancha cámara	2
3	Pared lado izquierdo	1	24	Puerta lado izquierdo cámara	1
4	Soporte interno cámara	2	25	Puerta lado derecho cámara	1
5*	Aislante cámara derecho A	1	26	Manillas puerta cámara de secado	2
6*	Aislante cámara pared izquierda A	1	30	Placa apoyo	4
7*	Aislante lado derecho cámara	1			
8	Aislante cámara pared izquierda	1			
9	Riel porta-bandeja	6			
10	Pared transparente	1			
11	Ventanilla	3			
12*	Base muro trombe	1			
13*	Captador trombe	1			
14*	Protección antifugas	1			
15	Bandeja	3			
16	Techo	1			
17	Chimenea	1			
18	Pilar base cámara de secado	4			
19*	Angulo base cámara	8			
20*	transversal base cámara de secado	2			
21*	Lateral base cámara de secado	2			