



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESHIDRATADOR DE TOMATES UTILIZANDO  
ENERGÍA GEOTÉRMICA PARA ENSENADA B.C.

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

*Baeza Zamora Alejandro*

DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Gerardo Hiriart Le Bert



*Ciudad Universitaria, México D.F, Octubre de 2009*



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## RESUMEN.

*En México la energía geotérmica de baja temperatura presenta amplias oportunidades de desarrollo tanto en la generación eléctrica como en los procesos industriales.*

*La deshidratación es un proceso que permite conservar los frutos por más tiempo dándoles un valor agregado en el mercado, el uso de energía geotérmica para la deshidratación es factible técnica y económicamente.*

*Se realizó el proyecto de un deshidratador de tomates que trabaje con energía geotérmica para Ensenada, Baja California, lugar con cercanía al valle del Maneadero, zona altamente productora de esta fruta tan importante en la economía nacional.*

*Se construyó un prototipo experimental del deshidratador, en el cual se evaluó su desempeño y se demostró su factibilidad técnica y se estimó favorablemente su factibilidad económica.*

*El proyecto muestra además las amplias posibilidades de aprovechamiento de la geotermia tan vasta en México para procesos industriales.*

*El tomate deshidratado obtenido fue de buena calidad y presenta un alto valor agregado lo cual abre posibilidades de desarrollo y negocios en el lugar y la posible aplicación del deshidratador para otros frutos y lugares.*

# ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN

## CAPITULO I ENERGIA GEOTÉRMICA

- 1.1 Historia
- 1.2 Estructura de la tierra
- 1.3 Gradiente de temperatura en la tierra
  - 1.3.1 Flujo de calor
- 1.4 Recursos Geotérmicos
  - 1.4.1 Sistemas hidrotermales
  - 1.4.2 Roca seca caliente
  - 1.4.3 Sistemas marinos
  - 1.4.4 Sistemas magmáticos
  - 1.4.5 Sistemas geopresurizados
  - 1.4.6 Evaluación del recurso
- 1.5 Usos Eléctricos de la energía Geotérmica
  - 1.5.1 Ciclo de potencia con condensador
  - 1.5.2 Ciclo de potencia a contrapresión
  - 1.5.3 Ciclo binario
    - 1.5.3.1 Ciclo de la PWG*
  - 1.5.4 Generadoras geotermoeléctricas en el mundo
- 1.6 Usos no eléctricos de la energía Geotérmica
  - 1.6.1 Bombas de calor geotérmicas
- 1.7 México y su potencial geotérmico.
- 1.8 Aspectos ambientales
- 1.9 Aspectos económicos
- 1.10 Geotermia en Ensenada

## CAPITULO II. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

### 2.1 Historia

### 2.2 Deshidratación

### 2.3 Deshidratadores y técnicas de deshidratación

#### 2.3.1 Materiales de construcción

#### 2.3.2 Clasificación

*2.3.2.1 Secadores continuos.*

*2.3.2.2 Secadores discontinuos.*

*2.3.2.3 Secadores por conducción*

*2.3.2.4 Secadores por convección*

*2.3.2.4.1 Secado con bomba de calor*

*2.3.2.5 Secadores por radiación*

*2.3.2.6 Deshidratador de estufa*

*2.3.2.7 Deshidratador de bandejas*

*2.3.2.8 Deshidratador de túnel*

*2.3.2.9 Deshidratador de lecho fluido*

*2.3.2.10 Deshidratador de tambor rotatorio*

*2.3.2.11 Deshidratadores por aspersión*

*2.3.2.12 Deshidratadores rotatorios*

*2.3.2.13 Deshidratadores al vacío*

#### 2.3.3 Otros tipos de deshidratación

*2.3.3.1 Liofilización*

*2.3.3.2 Deshidratación osmótica*

## 2.4 Teoría de la deshidratación.

### 2.4.1 Conceptos fundamentales

*2.4.1.1 Aire atmosférico*

*2.4.1.2 Humedad absoluta y relativa*

*2.4.1.3 Aire saturado*

*2.4.1.4 Temperatura de rocío*

*2.4.1.5 Presión de vapor*

*2.4.1.6 Proceso de saturación adiabática*

*2.4.1.7 Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo*

*2.4.1.8 Entalpia del aire atmosférico*

*2.4.1.9 Carta psicométrica*

*2.4.1.10 Humedad del alimento*

*2.4.1.11 Humedad libre*

*2.4.1.12 Humedad ligada*

*2.4.1.13 Humedad de equilibrio*

*2.4.1.14 Actividad de agua*

*2.4.1.15 Isotermas de sorción*

*2.4.1.16 Velocidad de secado*

*2.4.1.17 Humedad critica*

*2.4.2.18 Procesos de transferencia de calor y masa*

*2.4.2.19 Transferencia de calor*

*2.4.2.20 Transferencia de masa*

### 2.4.3 Proceso de deshidratación

*2.4.3.1 Primera Curva de secado*

*2.4.3.2 Segunda curva de secado*

*2.4.3.3 Factores que afectan el proceso de secado*

*2.4.3.4 Tiempo de deshidratación*

## 2.5 Deshidratador de bandejas

### 2.5.1 Equipos

*2.5.1.1 Gabinete*

*2.5.1.2 Bandejas*

*2.5.1.3 Ventilador*

*2.5.1.4 Intercambiador de calor*

*2.5.1.5 Sistema de tuberías*

*2.5.1.6 Chimenea*

*2.5.1.7 Sistema de control*

### 2.5.2 Clasificación

*2.5.2.1 Circulación natural*

*2.5.2.2 Circulación forzada de lado a lado*

*2.5.2.3 Circulación forzada de atrás a hacia adelante*

*2.5.2.3 Circulación forzada a través de bandejas perforadas*

## 2.6 Condiciones prácticas de deshidratación.

## CAPITULO III. EL TOMATE

### 3.1 Historia

### 3.2 Características

### 3.3 Variedades del tomate

### 3.4 El tomate en el mundo

3.4.1 Productores

3.4.2 Exportadores

3.4.3 Importadores

### 3.5 El tomate en México

#### 3.5.1 El tomate en Baja California

### 3.6 Tomates deshidratados

#### 3.6.1 El proceso de deshidratación

## CAPITULO IV. DISEÑO DEL DESHIDRATADOR

### 4.1 Descripción general del deshidratador

### 4.2 Dimensiones del deshidratador.

### 4.3 Condiciones de operación

### 4.4 Flujo de aire.

### 4.5 Transferencia de calor

### 4.6 Transferencia de calor

### 4.7 Flujo de agua geotérmica

### 4.8 Tiempo de secado.

## CAPITULO V. CONSTRUCCION DEL DESHIDRATADOR.

### 5.1 Gabinete y charolas.

### 5.2 Túnel de calefacción, ventilador e intercambiador de calor.

### 5.3 Bomba de recirculación y circuito de agua caliente.

### 5.4 Resultados experimentales.



## CAPITULO VI. ANALISIS PRELIMINAR DE FACTIBILIDAD ECONOMICA.

6.1 Producción

6.2 Ahorro de energía al usar energía geotérmica.

6.3 Costo de inversión y operación.

6.4 Análisis económico de primer nivel.

CONCLUSIONES

BLBLIOGRAFIA

ANEXOS

Anexo 1: Simbología.

Anexo2: Memoria de cálculo.

Anexo 3: Planos del deshidratador

# INTRODUCCION

El calentamiento global de nuestro planeta y el incremento de los precios del petróleo obligan a virar hacia el uso de las energías renovables. México tiene un enorme potencial en el desarrollo de energías alternativas en diferentes zonas del país; por mencionar algunas, en las costa de Oaxaca y del Golfo se tiene un alto potencial eólico; el país con sus dos litorales y sus vastos ríos, es propicio para el desarrollo de embalses para energía mareomotriz e hidráulica, al igual que para el aprovechamiento del intenso oleaje; también toda la zona noroeste del país tiene un alta radiación solar que la hace optima para el desarrollo de plantas termosolares.

Particularmente México es un pionero en el desarrollo en la energía geotérmica, que es una excelente alternativa y que debe seguir aprovechándose; con cuatro campos geotermoeléctricos y otros más en proyecto, el país genera por energía geotérmica una potencia eléctrica considerable; pero se debe voltear a la energía geotérmica de más baja temperatura, en el cual se tienen registrados muchos campos con temperaturas adecuadas para ciclos binarios de generación y procesos industriales, y que actualmente están desaprovechados.

El proyecto IMPULSA IV presenta una alternativa de aprovechamiento de un recurso geotérmico encontrado y evaluado por el proyecto en las costas de Baja California en Ensenada, para generación eléctrica y otros procesos que requieran de la energía térmica del agua caliente que será extraída.

México tiene que seguir en el desarrollo de tecnología para aprovechar el potencial que estas fuentes hidrotermales presentan en la generación de energía y en los procesos industriales. Particularmente, aquellos que provean de valor agregado a la materia prima de exportación son opciones de crecimiento económico para la región. Los procesos de deshidratación de frutos presentan oportunidades de negocio entre agricultores e industriales para tener un producto de un mayor valor.

El proyecto de un deshidratador de tomates utilizando energía geotérmica, surge con el proyecto geotérmico del Proyecto IMPULSA IV, y busca vincular el recurso geotérmico con aplicaciones industriales que presenten oportunidades de desarrollo en el lugar; en este caso la cercanía del recurso con el valle del Maneadero, una de las principales zonas productoras de tomate, fueron el criterio para el proyecto de un deshidratador de jitomates; además del atractivo mercado que presenta actualmente esta fruta deshidratada.

## OBJETIVO Y METODOLOGIA.

El objetivo de esta tesis consiste en la evaluación, diseño y construcción de un prototipo de un deshidratador de jitomates que se alimente de energía geotérmica en Ensenada Baja California; con esto se busca demostrar el potencial que tienen las energías renovables, principalmente la geotermia, en su aplicación para procesos térmicos industriales, en este caso la deshidratación de jitomates.

Para esto se presentara el panorama que guarda en México la energía geotérmica y su posible relación con procesos industriales como la deshidratación (Capítulos I y II) ; después de tratara el tema del atractivo mercado del jitomate deshidratado en la región de análisis (capitulo III); ya con estos antecedentes se diseñara el prototipo de acuerdo con las condiciones operativas y de sitio (capitulo IV), para terminar con su construcción y pruebas (capitulo V), al final de realizara un análisis preliminar de factibilidad económica donde se espera demostrar y cumplir el objetivo propuesto (capitulo VI).



# CAPÍTULO I

## ENERGÍA GEOTÉRMICA.

La energía geotérmica es la energía térmica de la Tierra, producida por tener un núcleo a altas temperaturas que está transmitiendo calor hacia la superficie; esta energía es una energía limpia y bajo una explotación controlada renovable, provee un suministro de calor constante las 24 horas del día todo el año, lo que la hace muy confiable; es universal ya que existe en todo el mundo pero no en todos los lugares es fácil de explotar o tiene aplicaciones limitadas. México es un país con un amplio potencial geotérmico.

### 1.1 HISTORIA

El uso de la energía geotérmica se remonta a tiempos antiguos, donde era ocupada principalmente como aguas termales, en el imperio romano estos lugares eran muy frecuentados; las manifestaciones naturales termales eran utilizadas por el hombre, mas no se pensaba en explotarlas. Fue hasta los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas y se observó que la temperatura aumentaba con la profundidad. En el siglo XIX se instaló en Italia (en el lugar hoy llamado Larderello) una industria química, que desarrolló un sistema para extraer el boro de las aguas calientes del lugar, utilizando el propio calor de estas aguas.

La explotación del vapor natural para producir potencia mecánica comenzó en ese mismo tiempo y se utilizó después para las perforaciones y en las actividades industriales del lugar.

Entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión fue utilizado para calentar invernaderos y edificios en esta parte de Italia. En 1904 ahí se instaló el primer generador y en 1942 ya se alcanzaba en Italia una potencia geotermoeléctrica de 127 MW.

En 1892 entró en operaciones el primer sistema distrital de calefacción geotérmica, en Boise, Idaho. En 1928 Islandia, país pionero en la utilización de la energía geotérmica, utilizó esta energía para calefacción doméstica y actualmente la mayoría de la población tiene este sistema. En 1921 se perforan los pozos geotermales en Nueva Zelanda.

En México, el ingeniero Luis de Anda, de la CFE, en 1855 forma la Comisión de Energía Geotérmica. La explotación de la energía geotérmica en México se inició en Pathé, una localidad del estado de Hidalgo, y se instaló una planta piloto en 1959. En Pathé se perforaron 17 pozos, sin embargo, nunca fue posible obtener suficiente vapor para generar más de 600 kW. La planta se mantuvo generando hasta 1973.



*Antiguo campo geotérmico de Pathé Hidalgo [Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE]*

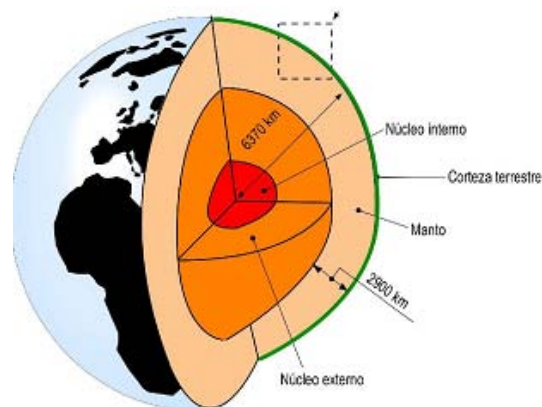
## 1.2 ESTRUCTURA DE LA TIERRA

La Tierra tiene 6370 km de radio, se compone de un núcleo sólido de 3470 km de radio a 4200 C y lo rodea un núcleo líquido de un diámetro del orden de 5200 km. Ambos núcleos se componen hierro (Fe) y níquel (Ni) y su densidad es del orden de 13 Ton/m<sup>3</sup>, con una presión alrededor de los 3,7 millones de bars.

Rodeando al núcleo líquido se encuentra el manto de 2900 km de espesor y 3000 C y a éste le envuelve la astenósfera que es una zona de 200 a 300 km de espesor con un comportamiento más plástico.

La envoltura más externa de la Tierra es la litosfera que corresponde a la corteza y al nivel superior del manto; su espesor varía de menos 80 km en las zonas oceánicas hasta más de 200 km en áreas continentales, se comporta como un sólido rígido.

La capa más externa de la litosfera es la corteza terrestre que alcanza un espesor de 10 a 17 Km y de 5 a 6 km en los océanos. La corteza está compuesta por placas que se mantienen rígidas y cuando se desplazan ocasionan grandes divisiones en la tectónica terrestre, las manifestaciones geotérmicas aparecen regularmente cerca de estos bordes.



*Corte representativo de las partes de la Tierra [Dickson y Fanelli, Geothermal Energy].*

Son seis las placas o áreas litosféricas en las que está dividida la corteza terrestre, además de varias otras placas más pequeñas. Debido a las grandes tensiones generadas bajo la litosfera, estas placas están cambiando continuamente de posición. Los márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo de calor terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Las áreas geotermales más importantes se ubican alrededor de los márgenes de placas. Las principales manifestaciones geotérmicas son los volcanes, los geiseros, las aguas termales y los volcanes de lodo.



*Lodos hirvientes y vapor [Geothermal Education Office]*



*Placas de la corteza terrestre [IIE]*

En la corteza se encuentran una gran cantidad de elementos rocas y minerales, con diferentes propiedades, como densidad, permeabilidad y conductividad. Estas propiedades van a ser importantes cuando se quiera explotar el recurso geotérmico.

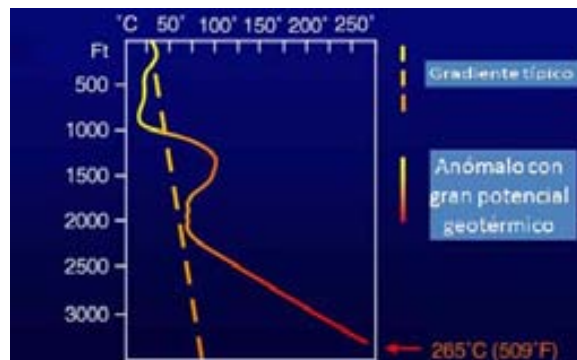
### 1.3 GRADIENTE DE TEMPERATURA EN LA TIERRA.

La energía geotérmica, es la energía que emana por las altas temperaturas del centro de la Tierra y que crea un gradiente de temperaturas entre la superficie y el núcleo; a partir de los 70m la radiación solar deja de influir en la temperatura de la corteza y la temperatura comienza a aumentar debido al calor transmitido desde el centro; típicamente aumenta 1 C cada 33m, aunque en regiones puede ser cada 19m o incluso cada 111m. En zonas normales para alcanzar 150°C se debe perforar 4km.

En zonas con amplio potencial geotérmico se alcanzan temperaturas entre 200°C y 300°C a profundidades entre 1500 metros y 2500 metros. En el campo geotérmico de Los Azufres se tiene un gradiente de 117C/km.

Entre los factores que influyen en el gradiente de temperatura en la corteza son:

- La conductividad térmica de las rocas, a mayor conductividad térmica de las rocas se pueden alcanzar temperaturas altas cerca de la superficie.
- La presencia y concentración de elementos radiactivos, que desprenden calor en su desintegración.
- La proximidad de cuerpos de magma enfriándose.
- Presencia de acuíferos que mejoran la conductividad



*Ejemplo de un gradiente de Temperatura [Adaptado de Geothermal Energy Association]*

#### 1.3.1 FLUJO DE CALOR

El flujo de calor geotérmico en la corteza es mayormente conductivo, los cuerpos de agua que transportan el calor por convección aumentan el potencial geotérmico de una zona. Si consideramos un gradiente de temperaturas constante de 33C/Km y una conductividad de roca impermeable de 2 W/mC, tenemos que el flujo conductivo (de calor esta dado por la ley de Fourier:

$$q = k \cdot \frac{dT}{dx}$$

Si tomamos a  $Q = q/A = 2 \cdot (33/1000) = 66 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$

Este valor comparado que comparado con el flujo de calor en el Cenit del Sol de  $10^3 \text{ W/m}^2$  es muchísimo menor, lo cual condiciona el uso de la energía geotérmica a gradientes de temperatura mucho mayores y/o con presencia de agua.



## 1.4 RECURSOS GEOTÉRMICOS.

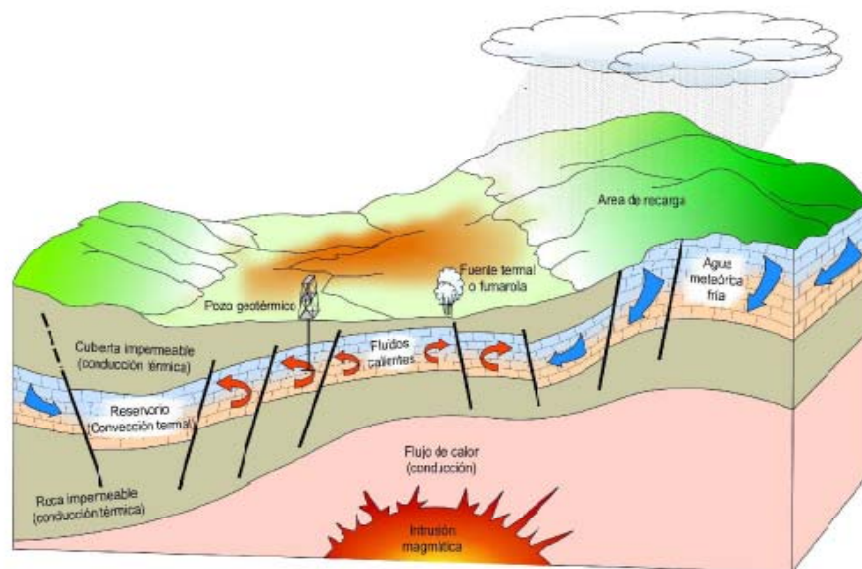
Los recursos geotérmicos, el agua caliente y/o roca caliente de los cuales es posible extraer energía se forman por la acumulación del calor en zonas llamadas sistemas geotérmicos a pocos kilómetros de profundidad en la corteza. Se pueden clasificar de de varias formas, dependiendo de su tipo o temperatura.

Los sistemas de acuerdo con su tipo se pueden clasificar en:

- Sistemas hidrotermales
- Sistemas de roca seca caliente
- Sistemas marinos
- Sistemas magmáticos
- Sistemas geopresurizados

### 1.4.1 SISTEMAS HIDROTÉRMICOS

Son conocidos como reservorios geotérmicos o yacimientos geotérmicos y son sistemas de agua muy caliente y/o vapor. Si las condiciones geológicas de la zona lo permiten se forma una intrusión de magma en la corteza terrestre que calienta las rocas aledañas; si agua subterránea pasa por estas rocas calientes se forma un acuífero de agua caliente o vapor a alta presión. Este reservorio se puede aprovechar perforando hasta llegar a él, se atraviesa la capa sello de rocas impermeables hasta llegar a las rocas permeables que forman el yacimiento, el agua entonces dependiendo de la temperatura y profundidad, saldrá a la superficie en forma de vapor, mezcla o agua caliente.



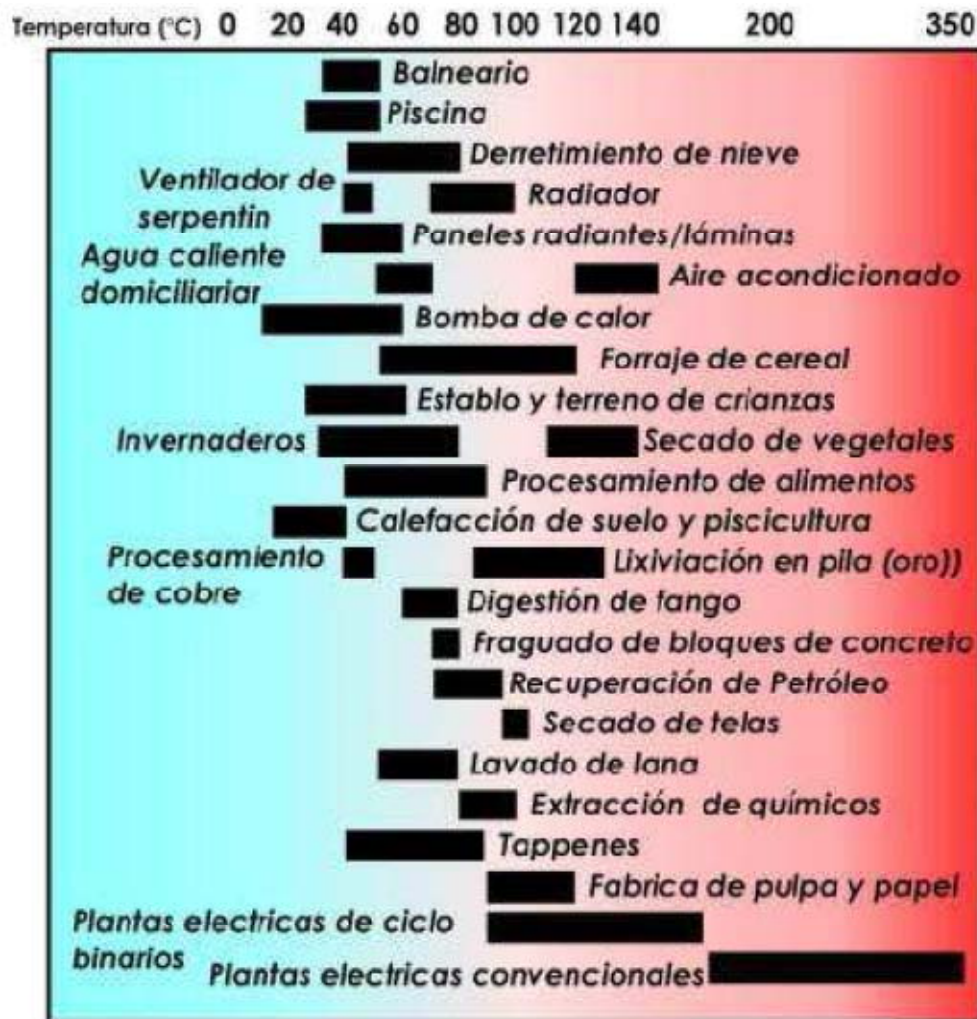
*Esquema de un reservorio geotérmico [Dickson y Fanelli, Geothermal Energy].*

A su vez estos se clasifican según su temperatura en:

- Recursos de alta temperatura  $T > 150\text{ C}$
- Recursos de media temperatura  $90 < T < 150$
- Recursos de baja temperatura  $T < 90$

Y dependiendo de la temperatura del agua caliente o vapor será la aplicación.

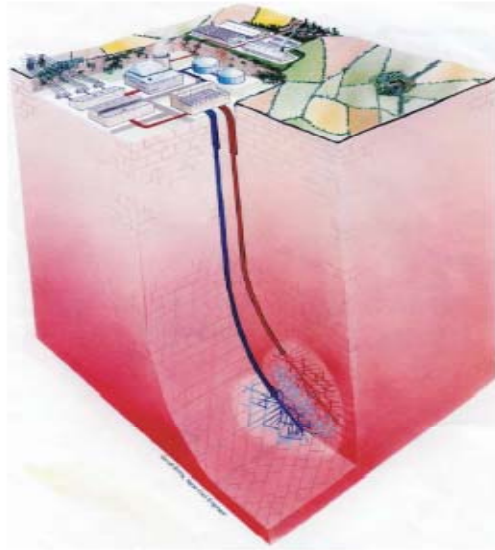
La industria en general puede beneficiarse de una fuente de calor económica, segura y limpia.



Esquema representativo de los usos de la energía geotérmica de sistemas hidrotermales [Trillo y Angulo, Guía de la Energía Geotérmica].

### 1.4.2 ROCA SECA CALIENTE (HOT DRY ROCK)

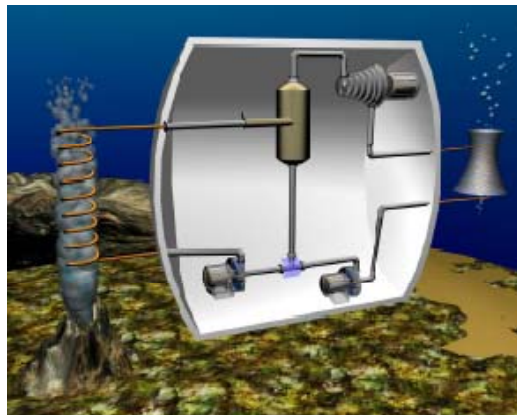
Para aprovechar un recurso de alta o media temperatura, se requiere agua que circule a través de las rocas calientes y forme el reservorio o yacimiento geotérmico que después se explotara. En ausencia de esta agua, un método utilizado para aprovechar este recurso es inyectar agua a alta presión hasta fracturar la roca y formar artificialmente el reservorio.



*Sistema de roca seca caliente [Trillo y Angulo, Guía de la Energía Geotérmica].*

### 1.4.3 SISTEMAS MARINOS.

En el fondo del océano se han encontrado fuentes de agua muy caliente, en el Golfo de California, se han identificado varios puntos de ventilas hidrotermales, se han hecho varias propuestas para el aprovechamiento de estos recursos como el generador submarino propuesto por el Proyecto IMPULSA IV.



*Sistema de generación propuesto para una ventila hidrotermal [IMPULSA 2007].*

#### **1.4.4 SISTEMAS MAGMATICOS.**

Son sistemas de roca fundida existentes en las cámaras magnaticos de los volcanes. El atractivo más importante son las altas temperaturas disponibles ( $T > 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Pero no se cuentan con materiales disponibles en la actualidad.



*Nevado de Colima* [Wikipedia, Colima]

#### **1.4.5 SISTEMAS GEOPRESURIZADOS.**

Los sistemas geopresurizados son depósitos de agua y vapor, junto con gas metano, almacenados a altas presiones, mayores a la presión hidrostática (700 atm).



*Representación de un sistema geopresurizado en Texas.* [Geothermal Energy Association]

#### **1.4.6 EVALUACION DEL RECURSO**

El aprovechamiento de los recursos requiere de todo un proceso de evaluación y exploración de los mismos y es una actividad multidisciplinaria que reúne geólogos, geofísicos e ingenieros. La exploración es una etapa crucial del proyecto con un gran porcentaje de inversión.

Entre los objetivos de la exploración se incluye en modelos conceptuales del yacimiento, para esto se requieren datos geológicos y geofísicos de la zona, la perforación de pozos de gradiente para estimar las temperaturas en el yacimiento este modelo permitirá estimar el tamaño del yacimiento y su energía, y así tener una mejor certidumbre al momento de iniciar los pozos exploratorios que son anteriores a los pozos de producción.

## 1.5 USOS ELECTRICOS DE LA ENERGIA GEOTÉRMICA.

Las centrales generadoras que funcionan con energía geotérmica se llaman plantas geotermoeléctricas y tienen varias ventajas respecto a las centrales termoeléctricas convencionales, tienen menos emisiones, son más económicas a largo plazo, tienen altos factores de planta, etc.

Estas plantas funcionan igual que una termoeléctrica convencional, con la diferencia que la energía térmica viene del recurso geotérmico.

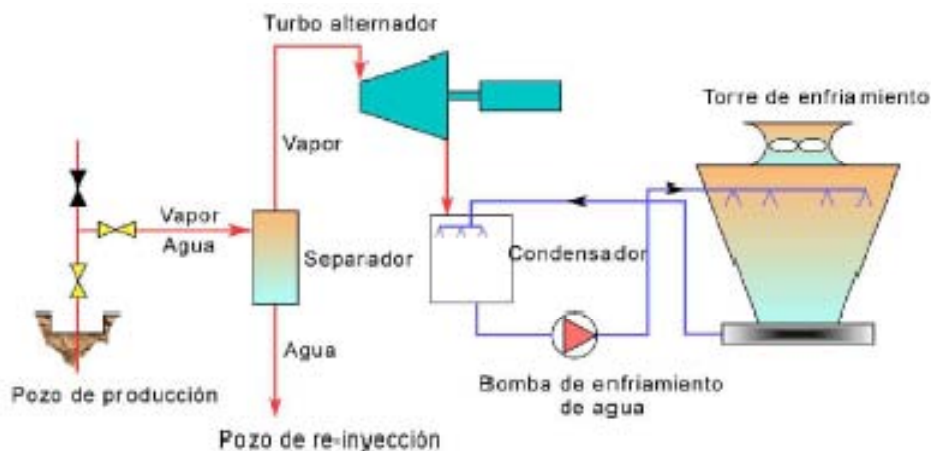
Las plantas pueden ser de tres tipos, de ciclo de potencia con turbina y condensador, de turbina de contrapresión y de turbina de ciclo binario.

### 1.5.1 CICLO DE POTENCIA CON CONDENSADOR.

Las centrales a condensación son las más grandes y las de más potencia al tener una expansión mayor en la turbina, pero incluyen el costo de un condensador y una torre de enfriamiento.

El vapor o mezcla extraído del pozo es llevado a un separador y un secador frecuentemente centrífugo donde se le retira la humedad (son pocos los pozos que extraen vapor seco como el de los Geysers en EU) y ya seco el vapor es expandido en una turbina para generar electricidad.

El vacío es generado por eyectores de vapor principal o por bombas de vacío, con su circuito de agua de enfriamiento acoplado a una torre de refrigeración.



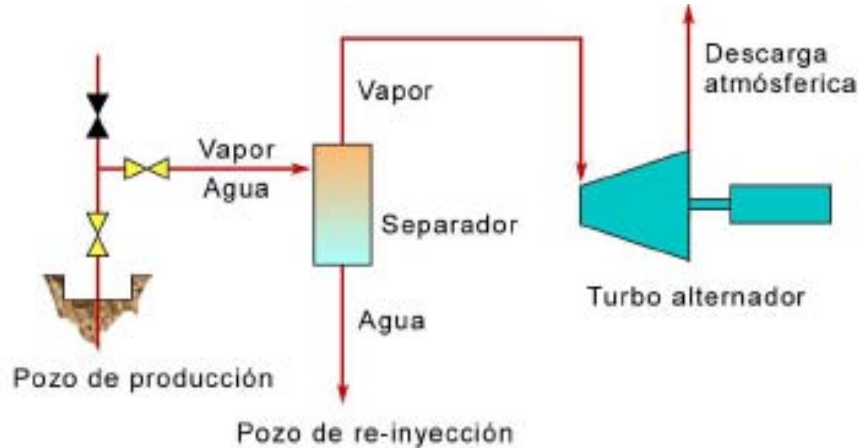
*Diagrama de una unidad a condensación [Dickson y Fanelli, Geothermal Energy].*

La salmuera residual es reinyectada a la tierra mediante un pozo de inyección para evitar el abatimiento del acuífero, o llevada a una laguna de evaporación.

La planta más grande se encuentra en los Geysers EUA (135 MW).

### 1.5.2 CICLO DE TURBINA A CONTRAPRESIÓN.

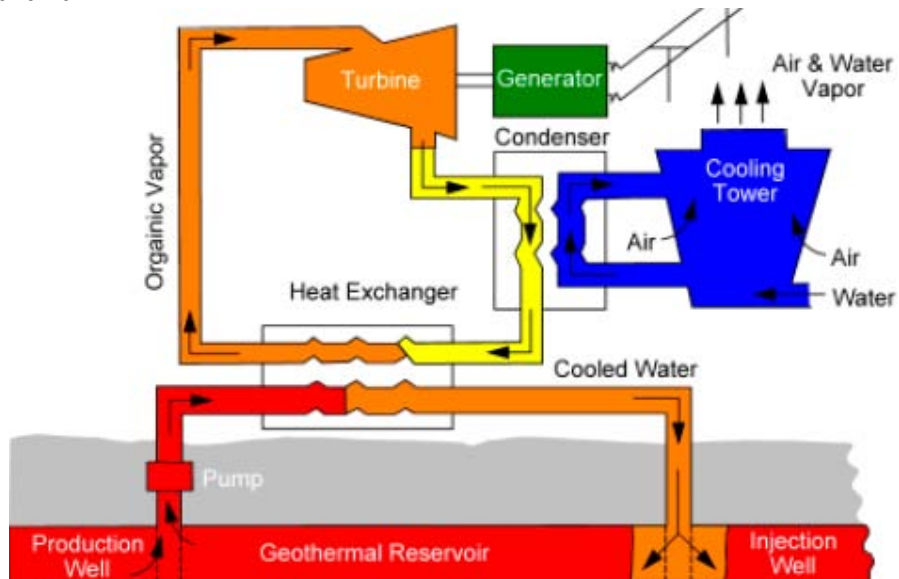
Las centrales a contrapresión son más ligeras, y más sencillas, el vapor extraído del pozo después de ser secado se expande en la turbina y descargado directamente a la atmosfera, lo que lleva a una menor generación.



*Diagrama de una unidad a contrapresión [Dickson y Fanelli, Geothermal Energy].*

### 1.5.3 CICLO BINARIO

Las turbinas de ciclo binario utilizan un fluido de menor punto de ebullición como fluido auxiliar, se utiliza cuando se tenga una temperatura del recurso baja; este fluido es evaporado por el fluido geotérmico y posteriormente va a un ciclo cerrado de generación, en el cual este fluido de trabajo, regularmente un iso-pentano, se expande en la turbina.



*Ciclo binario [Geo-Heat Center, geoheat.oit.edu]*



*Central de ciclo binario, East Mesa, California 2009. [El autor]*

### **1.5.3.1 Ciclo de la PWG**

Una variante a este ciclo fue desarrollada por el proyecto IMPULSA y significa “pressure water generation”. Comúnmente se presentan varios problemas al evaporar el fluido secundario en el intercambiador de calor con la salmuera geotérmica; una variante desarrollada es sustituir el evaporador por un intercambiador de placas liquido-liquido, en el cual el fluido secundario eleva su temperatura a casi la de saturación, para después ser llevado a una cámara flash donde parte del flujo se iba a convertir en vapor y ser llevado a la turbina, esta turbina debe de ser de alta velocidad.

*Esquema de la PWG, [IMPULSA IV 2007]*

### 1.5.4 GENERADORAS GEOTERMOELÉCTRICAS EN EL MUNDO.

| País          | Capacidad instalada MW | Capacidad en operación MW | Energía anual producida GWh/año | Factor de planta | Unidades operando |
|---------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------|
| EUA           | 2534                   | 2133                      | 17840                           | .95              | 209               |
| Filipinas     | 1930                   | 1838                      | 9253                            | .57              | 57                |
| México        | 953                    | 953                       | 6282                            | .75              | 36                |
| Indonesia     | 797                    | 838                       | 6085                            | .83              | 15                |
| Italia        | 791                    | 699                       | 5340                            | .87              | 32                |
| Japón         | 535                    | 530                       | 3467                            | .75              | 19                |
| Nueva Zelanda | 435                    | 403                       | 2774                            | .79              | 33                |
| Islandia      | 202                    | 202                       | 1483                            | .84              | 19                |
| Costa Rica    | 163                    | 163                       | 1145                            | .80              | 5                 |
| El Salvador   | 151                    | 119                       | 967                             | .93              | 5                 |

La electricidad generada a partir de energía geotérmica se ha mostrado atractiva hacia los países en vías desarrollo, por lo económico que resulta si se cuenta con el recurso, y juega un papel importante en el esquema energético de varios países, por ejemplo, en 2001 la energía eléctrica producida por geotermia en Filipinas fue el 27% de la electricidad total generada, del 12,4% en Kenya, del 11,4% en Costa Rica y del 4,3% en el Salvador.

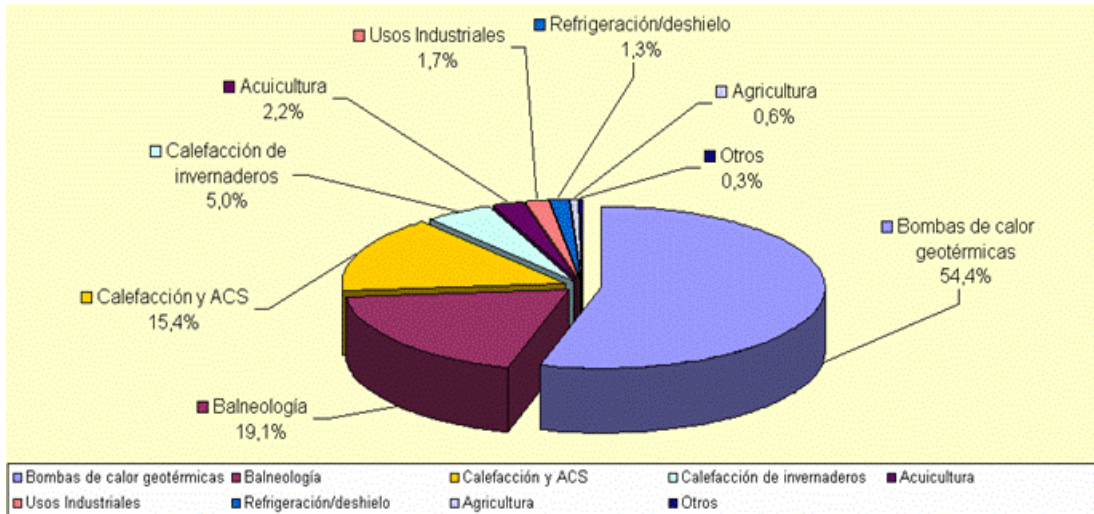


Mapa representativo de la potencia geotermoeléctrica instalada. [Trillo y Angulo Guía de la Energía Geotérmica].

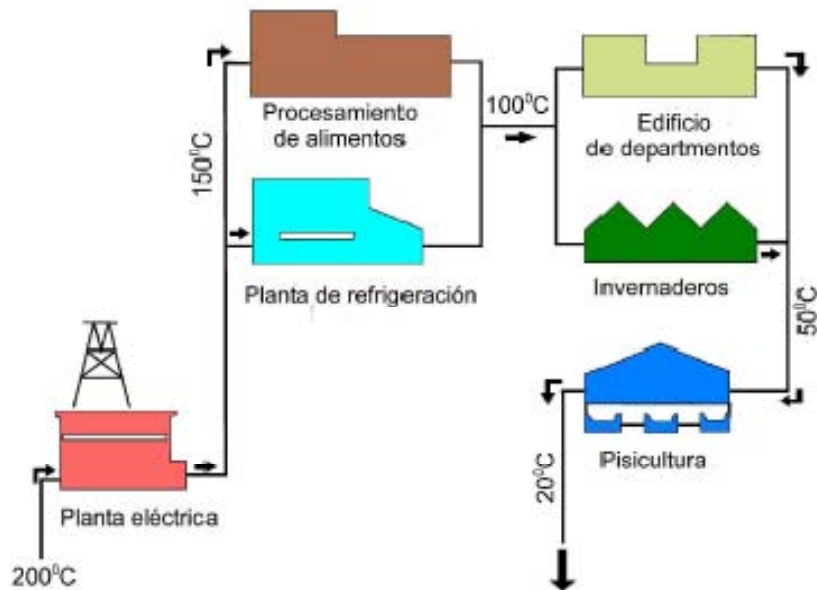


## 1.6 USOS NO ELECTRICOS DE LA ENERGIA GEOTERMICA.

A veces la temperatura del recurso hace que la generación de electricidad sea poco rentable, pero la industria en general requiere tanto energía térmica como eléctrica, y la energía de recursos geotérmicos puede utilizarse en todas las industrias que requieran una fuente constante de calor. El uso no eléctrico se viene incrementando actualmente, y se espera que siga creciendo y diversificándose tanto en usos directos como en cogeneración.



Comparación en usos directos de la energía geotérmica. [Trillo y Angulo Guía de la Energía Geotérmica].



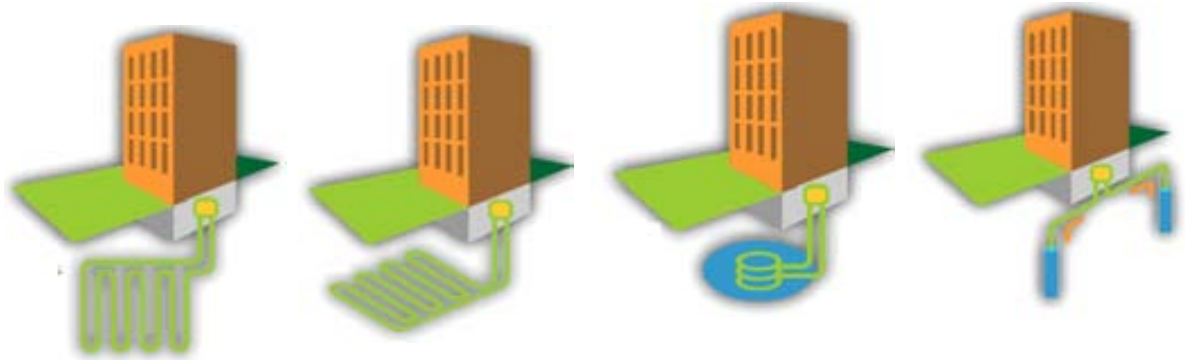
Sistema de cogeneración con energía geotérmica [Geo-Heat Center].

### 1.6.1 BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS.

Hay quienes consideran a la temperatura del suelo o de acuíferos superficiales que está a menos de 30 C como un recurso geotérmico de muy baja temperatura, esto es comprensible en los países de inviernos muy fríos donde la temperatura de la Tierra a 30 C o menos representa una fuente de calor comparado con las temperaturas de la superficie cercanas a los 0 C.

Para poder aprovechar este recurso se utiliza una bomba de calor que es una maquina térmica que permite extraer el poco calor de un punto y llevarlo a través de la compresión de un fluido de trabajo a otro. Una bomba de calor geotérmica extrae el calor del suelo o de un acuífero superficial. La bomba de calor puede tener un intercambiador de calor y acoplarse a la tierra o al acuífero o extraer el agua del acuífero y llevarla directamente al equipo

Entonces las bombas de calor geotérmicas se pueden clasificar en de intercambiador cerrado o abiertas, el intercambiador puede ser vertical u horizontal, siendo los primeros mas caros pero de mejor rendimiento; los que extraen agua del acuífero, pueden tener una bomba sumergible y uno o varios pozos.

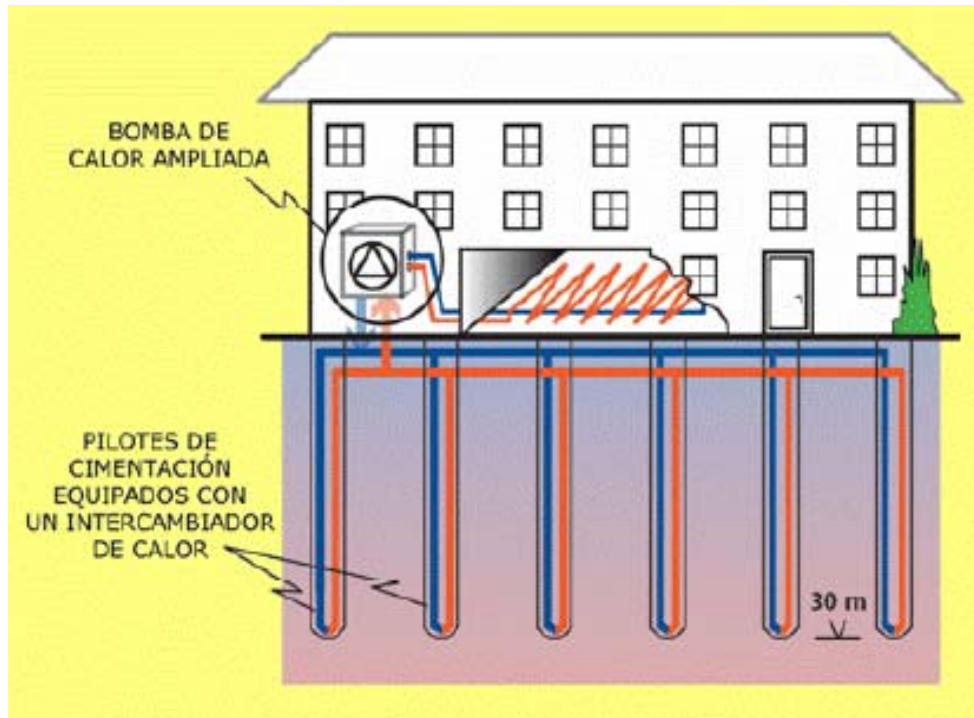


*Arreglos de bombas de calor geotérmicas.*

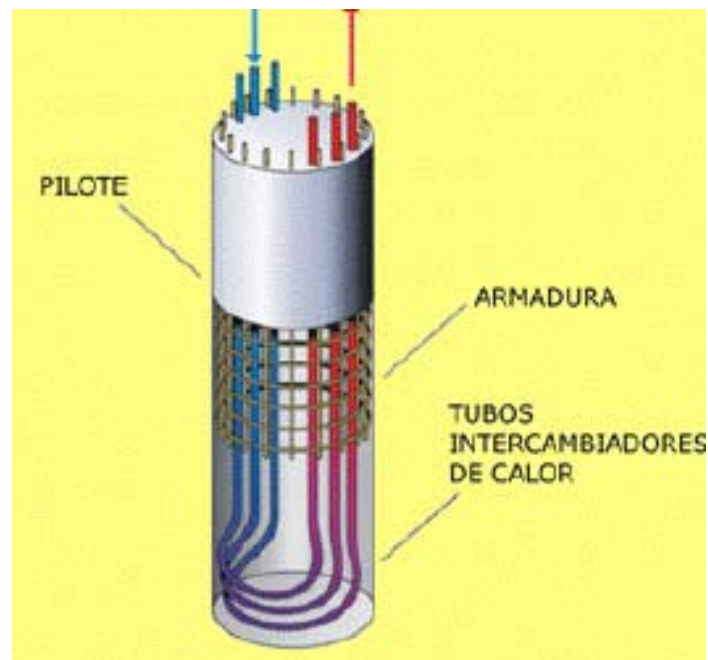
*De intercambiadores verticales, horizontales, en un lago y tomando el agua de un pozo.*  
[Geothermal Education Office]

La bomba de calor, con una sistemas de válvulas de 4 vías, puede funcionar en sentido inverso y actuar como un refrigerador, esto le da una cualidad mas a las bombas de calor geotérmicas, ya que si en invierno se puede ocupar el recurso geotérmico, en verano, la tierra puede servir como almacén de energía térmica, esto permite hacer mucho más eficientes los sistemas de aire acondicionado, ya que se consume mucho menos energía en tirar el calor que el refrigerante ha extraído de la vivienda a la tierra a unos 20 C que al aire ambiente a mas de 30 C.

Una integración de las bombas de calor a las viviendas, es hacer las edificaciones con pilotes con intercambiadores de calor, estos al enterrarse servirán como el sistema de aire acondicionado y calefacción dependiendo de la época del año.



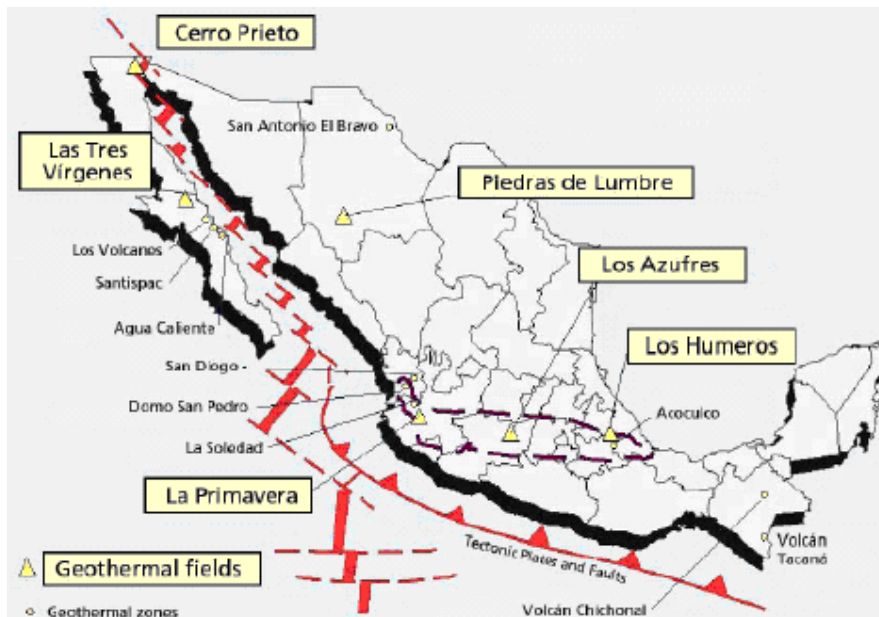
*Edificio con intercambiadores en los pilotes e intercambiadores en el suelo interior de la vivienda (suelo radiante). [Trillo y Angulo Guía de la Energía Geotérmica]*



*Esquema de un pilote como intercambiador de calor. [Clauser, Geothermal Energy 2006]*

## 1.7 MEXICO Y SU POTENCIAL GEOTERMICO.

México forma parte del llamado cinturón de fuego del Pacífico, y por el centro del país corre el eje volcánico transversal, esto lo convierte en uno de los países con mayor potencial geotérmico, la CFE ha reportado mas de 300 manifestaciones termales y existen 4 grandes campos explotados para fines eléctricos, Cerro Prieto, Los Azufres, Los Humeros y Tres Vírgenes; se tienen también varios proyectos de explotación en campos ya identificados como el de la Primavera en Jalisco.

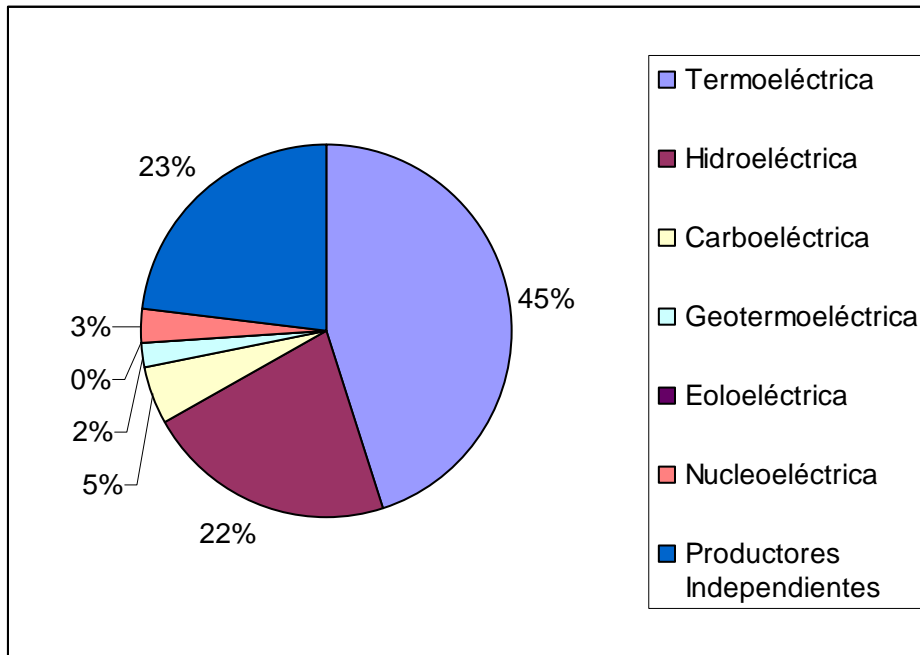


*Campos y zonas geotérmicas [Comisión Federal de Electricidad CFE 2000]*

México ocupa el 3er lugar en generación geotermoeléctrica con 965 MW, que representan el 2% de la capacidad instalada total.

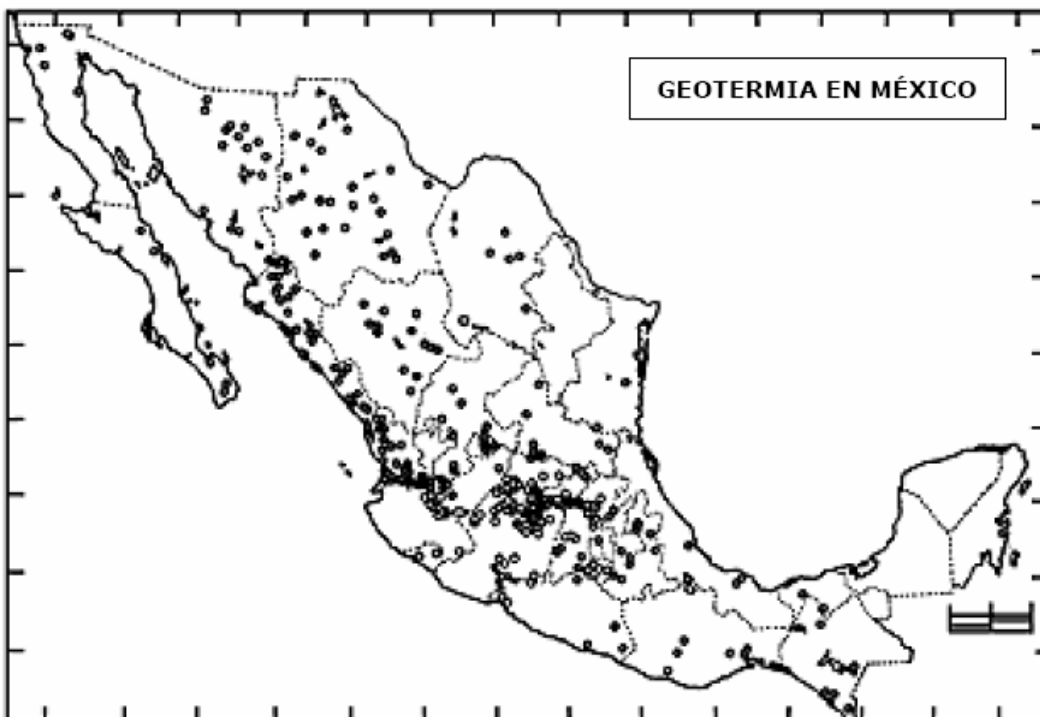
| Central          | Unidades | Capacidad instalada (MW) | Ubicación                   |
|------------------|----------|--------------------------|-----------------------------|
| Cerro Prieto I   | 5        | 180                      | Mexicali, Baja California   |
| Cerro Prieto II  | 2        | 220                      | Mexicali, Baja California   |
| Cerro Prieto III | 2        | 220                      | Mexicali, Baja California   |
| Cerro Prieto IV  | 4        | 100                      | Mexicali, Baja California   |
| Los Humeros      | 8        | 40                       | Humeros, Puebla             |
| Los Azufres      | 15       | 195                      | Cd. Hidalgo, Michoacán      |
| Tres Vírgenes    | 2        | 10                       | Mulege, Baja California Sur |

*Centrales geotermoelectricas [CFE 2006]*



*Porcentaje de Generación en México, [CFE 2006].*

La proyección futura del país en desarrollo geotérmico es muy prometedora debido a la gran cantidad de fuentes termales que se tienen identificadas, tanto para usos eléctricos, como para usos no eléctricos.



*Muestreo de manifestaciones hidrotermales, [CFE 1990].*



*Campo geotérmico “Los Azufres” [El autor]*



*Campo geotérmico “Cerro Prieto” [El autor]*



*Campo geotérmico “Los Humeros” [IMPULSA 2006]*



*Campo geotérmico “Tres Vírgenes” [IMPULSA 2006]*

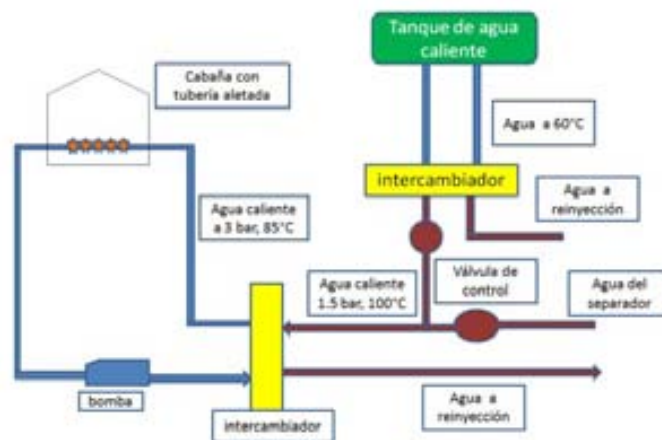
En México se tiene un conflicto de origen constitucional para utilizar recursos geotérmicos con fines no eléctricos en forma comercial, es decir el fluido extraído del pozo de producción solo puede ser utilizado para generar electricidad. Aun así se han desarrollado proyectos pilotos de refrigeración, calefacción, secado de madera, deshidratación de frutas, cultivo de hongos, y una bomba de calor para purificación de efluentes en Los Azufres.



*Intercambiadores de calor en la estufa de secado de madera y tubería de calefacción geotérmica en los Azufres Michoacán [El autor]*



*Deshidratador de frutas y tanque de agua caliente en Los Azufres, Michoacán [El autor]*



*Esquema de la calefacción en Los Azufres [El autor]*



## 1.8 ASPECTOS AMBIENTALES

La energía geotérmica al ser una energía limpia y renovable ofrece diversas ventajas ambientales en comparación con la generación tradicional, aun así, no está libre de afectar el entorno en el que se explote, pero aun así, es de más limpias comparada con otras, inclusive también renovables, entre los impactos que se pueden tener están:

- Contaminación por ruido

Estos ruidos se asocian fuera de la casa de maquinas con los pozos productores a los cuales se les debe de adaptar un silenciador, aunque también el ruido de baja frecuencia proveniente de la casa de maquinas puede llegar a ser molesto

- Contaminación térmica

Un incremento de 2 a 3°C en la temperatura de evacuación del agua de deshecho de una planta puede dañar su ecosistema, de forma que las plantas y organismos sensibles a las variaciones de temperaturas podrían desaparecer.

- Contaminación de agua.

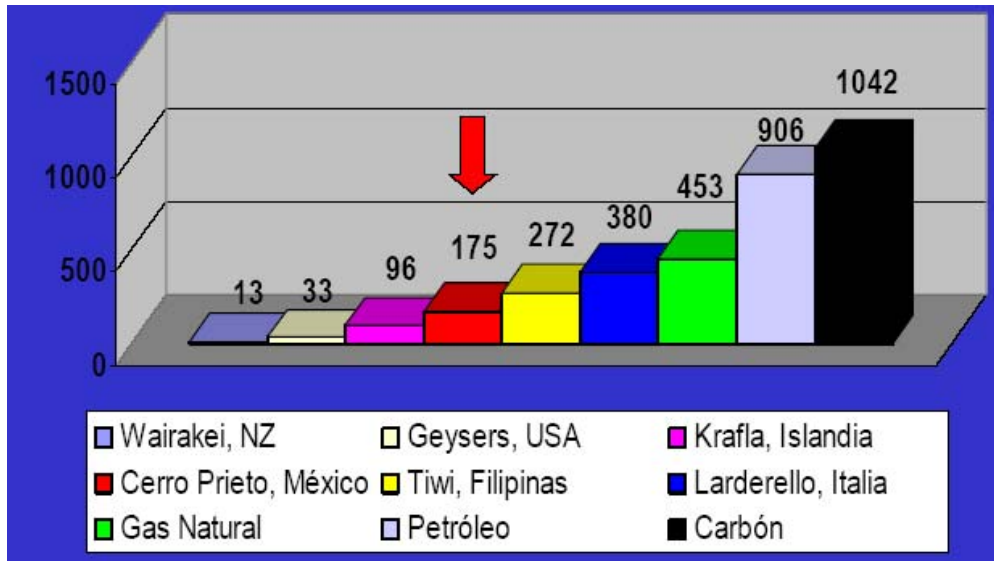
Una mala perforación puede provocar la comunicación entre acuíferos de agua geotérmica y acuíferos superficiales, así como una tubería mal colectada puede contaminar los acuíferos con elementos como el Boro; también el rompimiento de un pozo puede ser muy perjudicial.

- Contaminación del aire

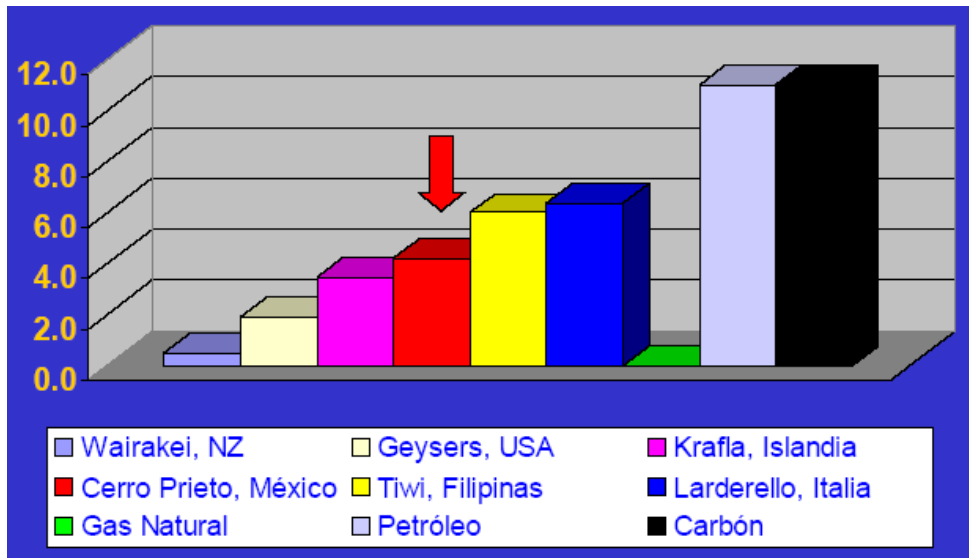
Aun que son mínimos comparados con otras centrales se tienen emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoniaco (NH<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) por los fluidos hidrotermales. Aun así, las plantas geotermoeléctricas generan aproximadamente un sexto del CO<sub>2</sub> que producen las plantas termoeléctricas convencionales. El umbral de olor para el azufre en el aire es del orden de 5 partes por billón volumen; concentraciones ligeramente superiores pueden causar ciertos efectos fisiológicos leves.



*Esquema de las principales afectaciones ambientales [IMPULSA 2005]*



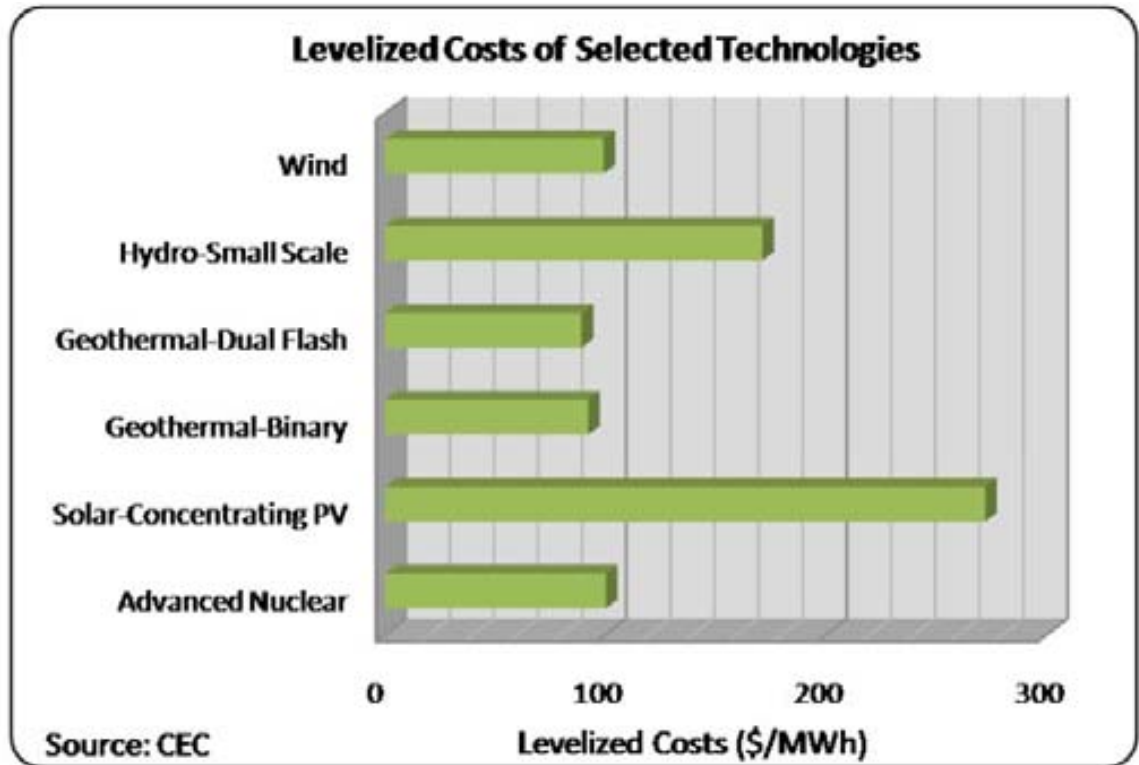
*Emisiones de CO2 en g/kWh de diferentes centrales eléctricas [Santoyo, Centro de Investigación en Energía CIE UNAM, 2007]*



*Emisiones de sulfuro de centrales g/kWh, [Santoyo, CIE UNAM 2007]*

## 1.9 ASPECTOS ECONOMICOS

Una planta geotérmica económicamente competitiva debe costar menos de 3400 dólares por KW instalado, aunque el costo de inversión puede llegar a ser más alto que otras centrales, a la larga el costo nivelado de la geotermia se convierte en de los más bajos, esto es debido a que la inversión inicial tanto para usos directos como eléctricos representa una gran parte del costo total.



*Costo nivelado de diferentes centrales eléctricas renovables [Geothermal Energy Association]*

El costo nivelado de una planta de ciclo combinado de gas natural esta en promedio en 60 \$/MWh, y no se observa una diferencia considerable, lo cual concluye que con el futuro incremento de los precios de los combustibles, las plantas geotérmicas serán una opción muy rentable.

## 1.10 GEOTERMIA EN ENSENADA BAJA CALIFORNIA

El proyecto IMPULSA IV ha detectado diversas manifestaciones geotérmicas a lo largo de la península de Baja California, esta península se encuentra entre las placa de Cocos y la Placa Norteamericana, lo cual la hace susceptible a manifestaciones geotérmicas.



*Manifestaciones geotérmicas en Baja California [IMPULSA 2005]*



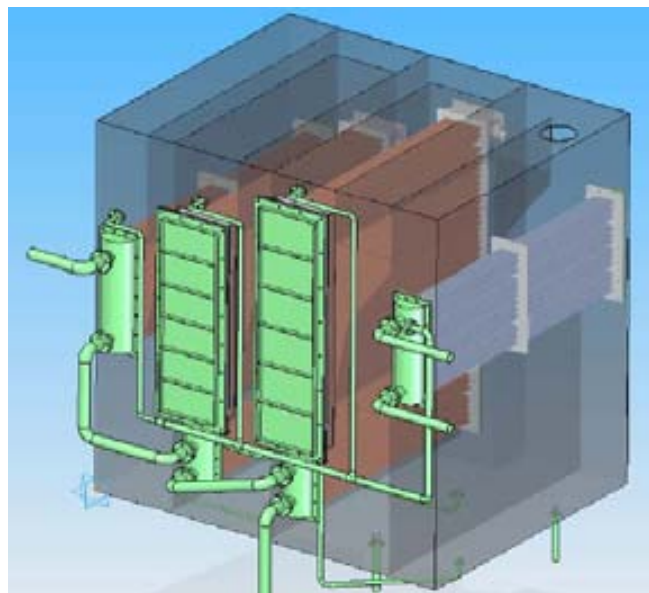
*Fumarolas a la orilla de la Playa en las costas cerca de Ensenada BC. [IMPULSA 2006]*

Particularmente en el área de la Joya en Punta Banda, se han encontrado temperaturas de 98C a la orilla de la playa en pozos someros



*Termómetro en un pozo somero en La Joya [IMPULSA 2006]*

En esta zona el Proyecto IMPULSA IV tiene planteados diversos proyectos para utilizar este recurso, entre ellos un sistema de desalación térmica que utilizara el agua caliente en un proceso parecido a la destilación multiefecto; también se tiene el proyecto de la generación PWG, y otros más entre ellos el deshidratador que es objeto de esta tesis.



*Esquema de un sistema de desalación utilizando energía geotérmica [IMPULSA 2008]*

## CAPITULO II

# DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

La deshidratación es un proceso de preservación de alimentos mediante el cual se remueve la humedad contenida en los mismos para evitar la proliferación de microorganismos o reacciones químicas indeseables a causa del agua contenida en ellos.

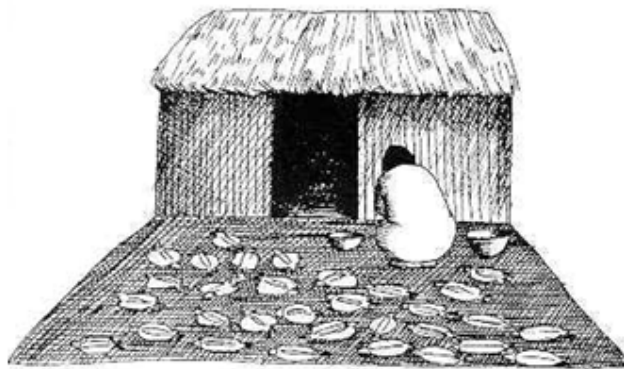
La deshidratación permite tener frutos, granos, vegetales, etc., en el mercado aun cuando no sea la temporada, además de que en algunos casos les proporciona un valor agregado. También proporciona ingredientes especiales para diversos platillos.

Así como todos los procesos industriales que requieren una fuente de calor, últimamente la deshidratación se ha tenido que adecuar al uso de energías renovables y al uso eficiente de la energía; se han propuesto diversos diseños de secadores para obtener el máximo rendimiento al combustible requerido y los secadores solares han tenido mucho auge en México y el mundo.

### 2.1 HISTORIA

La deshidratación es una actividad que ha sido utilizada desde la antigüedad, en múltiples formas y métodos, siendo los secaderos al sol de los mas comunes.

Cuando se observo que, cuando el alimento requería mucho tiempo para deshidratarse, empezaba a descomponerse, para lo cual uso la sal como complemento al secado.



*Secado de pescado* [documentos de la FAO]

Los secaderos al sol son muy antiguos y son utilizados todavía en la actualidad por lo económico que representa deshidratar así; pero este método siempre estuvo sujeto a fuerzas externas que no se podían controlar; lo cual no producía un secado de calidad, al agua no podía ser removida a menos del 15% y eran susceptibles a la contaminación.



*Tomate secado al Sol en Sicilia* [documentos de la FAO]

A fines del siglo XVIII se empiezan a desarrollar en EU, los secaderos artificiales que vienen a sustituir a los secadores solares. Así como muchos avances tecnológicos de la humanidad han sido promovidos por los conflictos bélicos, el secado se promovió de forma industrial con la necesidad de tener alimentos almacenados por mas tiempo para las tropas en el frente; los británicos durante la guerra de Crimea produjeron verduras secas, los norteamericanos secaron repollos, zanahorias, apios, papas, maíz y nabos para la primera y segunda guerra mundial.

En ciertos países también, el secado se realizo y realiza en hornos de ahumado. En una parrilla se coloca el alimento sobre un fuego suave. La acción del calor y el humo seca y preserva el alimento; aunque las cenizas pueden llegar a ser perjudiciales



*Secador solar domestico*, [CIE UNAM]

Actualmente el mercado de los alimentos deshidratados es vasto e incluye un sin numero de alimentos y tecnologías de deshidratación.

## **2.2 DESHIDRATACION**

La deshidratación consiste en la remoción del agua contenida en el alimento, hasta un valor en el cual los microorganismos no se proliferen y el alimento se conserve por más tiempo. El alimento deshidratado debe conservar todas o la mayoría de sus propiedades anteriores a la deshidratación.

El secado y la deshidratación se usan como sinónimos frecuentemente pero se define al secado de alimentos el removerle la humedad al 15-20% y la deshidratación removerla al 3-5%, aquí usaremos los términos indistintamente.

Además de la conservación del alimento por mas tiempo, la deshidratación presenta diversas ventajas para su embalaje, transporte, y almacenamiento, ya que el producto deshidratado reduce su peso y volumen al habersele retirado el agua contenida.

La deshidratación no es un proceso industrial simple, de hecho la teoría que gobierna los procesos de deshidratación es compleja y muchas veces es preferible desarrollar los diseños en base a estudios experimentales en lugar de intentar desarrollar un diseño meramente teórico que estará sujeto a tantas variables y simplificaciones que sus resultados pueden no ser tan confiables en la realidad.

El proceso debe asegurar que en el objetivo principal que es la remoción de agua, no se afecten las propiedades nutritivas y organolépticas del alimento.

## **2.3 DESHIDRATADORES Y TECNICAS DE DESHIDRATACION.**

Las tecnologías de deshidratación son variadas y el tipo de deshidratador adecuado va a estar en función de diversos parámetros como lo son, el tipo de alimento, su consistencia, su contenido de humedad, etc.

La combinación de métodos, puede combinar las ventajas de uno u otro método haciendo mejor el proceso de deshidratación. El numero de combinaciones posibles es vasto y esta limitado por el avance de la tecnología. En muchos alimentos, se prefiere un proceso no térmico para deshidratarlos o una combinación de estos para reducir los costos, también se incluyen pre-tratamientos que mejoren la deshidratación.

En la evaluación para el diseño de un proceso de deshidratación, se deben definir los parámetros como la producción en kilogramos de producto, los contenidos de humedad iniciales y finales, temperatura de secado y propiedades del alimento.

El proceso de deshidratación debe ser económicamente rentable y debe preservar o incrementar la calidad del alimento, se debe poner especial atención en la seguridad, calidad nutricional y propiedades organolépticas para que pueda ser un producto aceptado por el consumidor.



Los deshidratadores son los equipos o lugares en los cuales se van a deshidratar los alimentos y deben cubrir ciertas características:

- Resistentes a la corrosión.
- Limpiarse fácilmente y no contaminar el alimento.
- Construirse y repararse fácilmente
- De una operación segura para el trabajador.
- De una operación eficiente que haga económicamente factible el proceso.

### **2.3.1 MATERIALES DE CONSTRUCCION.**

Los materiales pueden ser variados, se usan los metales, plásticos, cerámicas, recientemente se desarrollan metales que tengan componentes anti-microbianos.

El acero inoxidable es el principal material usado para estar en contacto directo con el alimento. El hierro fundido es el principal material de soporte.

El aluminio es otro material ampliamente usado en contacto directo con el alimento, y presenta la ventaja su alta relación resistencia/peso.

Los plásticos termoplásticos como el polietileno de baja densidad pueden ser utilizados a altas temperaturas.

La madera es una opción barata e higiénica para sustituir diversas partes metálicas.

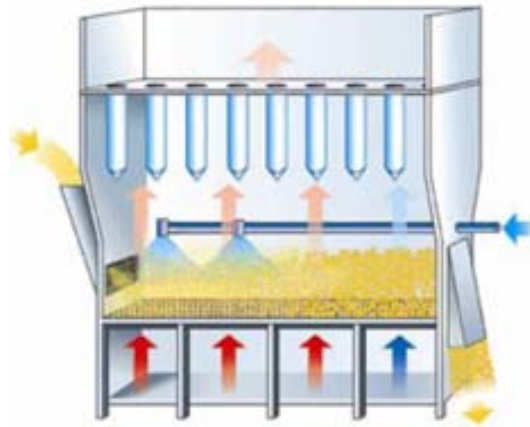
### **2.3.2 CLASIFICACIÓN**

Una primera clasificación muy general es en el modo de operación del secador, el cual puede ser:

- Continuo
- Discontinuo

#### ***2.3.2.1 Secadores Continúos:***

En el secado continuo el producto a secar va entrando en una tasa de alimentación, es decir kg/h o kg /día y se tiene una gran producción, pero también un costo mas alto.



*Secador de producción continua de lecho fluido. [Arévalo Fernández, El Secado 2001]*

### **2.3.2.2 Secadores Discontinuos.**

En los secadores discontinuos, se tiene un lote de alimento a secar, el cual se ingresa un tiempo determinado al secador, permitiendo un mayor control del producto pero una menor producción.



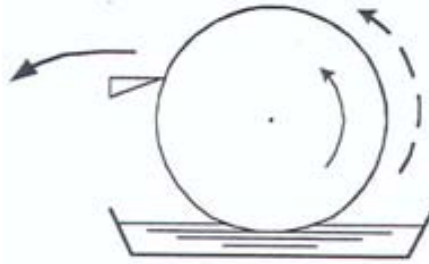
*Deshidratador marca Excalibur, trabaja por lotes de fruta.*

Una segunda clasificación es en base a la energía térmica que ocupan para trabajar.

- Directo o por conducción
- Indirecto o por convección
- Por radiación

### **2.3.2.3 Secadores por Conducción.**

El calor se trasmite en forma directa, colocando el producto sobre superficies metálicas calientes, estos secadores tienen aplicación en alimentos que no admiten el contacto con un medio como el aire caliente. Son más sencillos de construir pero no se obtiene una uniformidad óptima en el proceso.



*Diagrama de un secador de tambor, la superficie caliente del tambor le transmite el calor al alimento [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]*

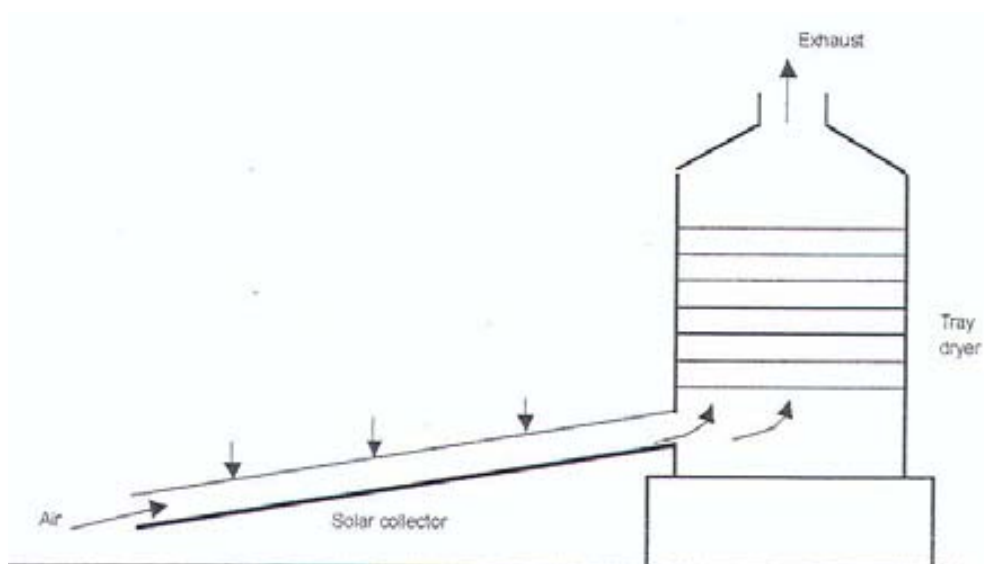
#### **2.3.2.4 Secadores por Convección.**

Los secadores de convección de aire tienen un recinto aislado en el cual son colocados los alimentos a deshidratar y el aire caliente fluye a través de ellos, deshidratándolos, el aire se lleva su humedad gracias a su cualidad de higroscópica, que atrae la humedad, mas adelante explicaremos este fenómeno.

La mayoría tiene diversos instrumentos de control de la temperatura, humedad y velocidad del aire dentro de la cámara. Algunos tienen deshumidificadores de aire, para que entre lo más seco posible y pueda llevarse mas humedad del alimento.

El flujo de aire es controlado mediante ventiladores, fuelles y desviadores. El aire puede ser calentado por métodos directos o indirectos.

Estos deshidratadores tienen producen mejores uniformidades en el secado.



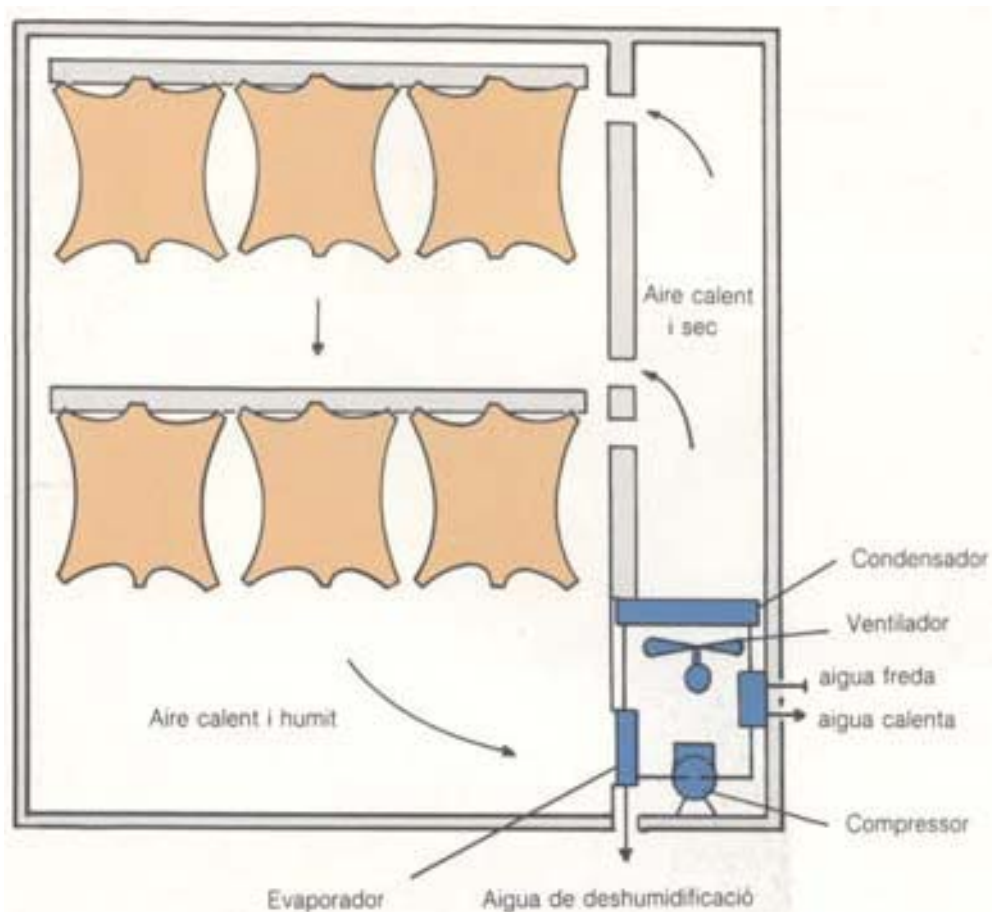
*Secador que funciona con aire calentado con colectores solares [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]*

### 2.3.2.4.1 Secado con bomba de calor.

Este es un tipo especial de deshidratador por convección a temperaturas bajas, consiste en una cámara para secado convencional al cual se le ha agregado circuito de refrigeración-calefacción, un ciclo de bomba de calor por compresión mecánica.

El aire se deshumidifica al pasar por los serpentines fríos, y ya mas seco se calienta en los serpentines calientes, este proceso reduce el tiempo de secado del producto a la vez que se tiene un consumo menor de energía.

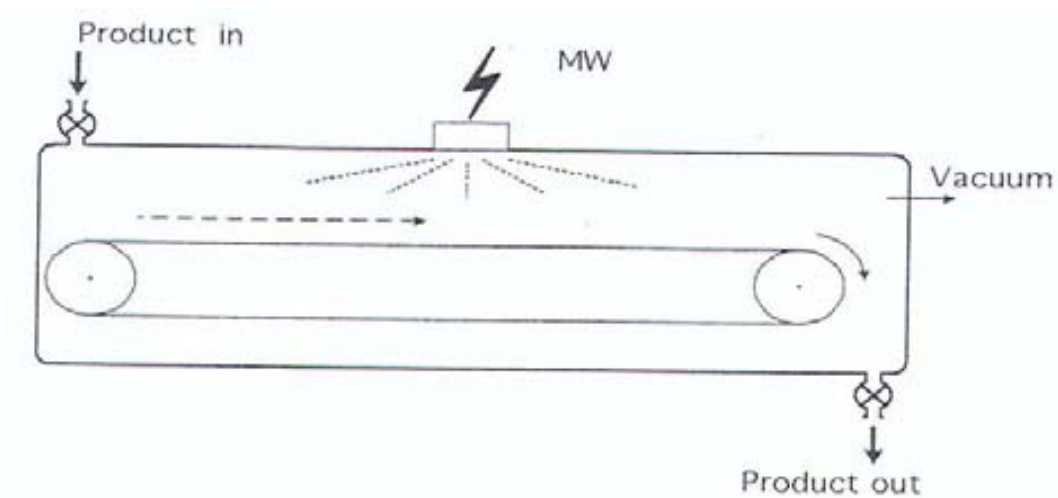
El rendimiento de un secador bomba de calor se expresa en la cantidad de agua que puede remover por Kwh, (SMER specific moisture extraction rate) y se tienen valores entre 1 y 4 con promedio de 2.5.



*Secado de pieles con bomba de calor* [Departament d'Indústria, Comerç i Turisme Institut Català d'Energia]

### 2.3.2.5 Secadores por radiación.

El método más simple de secado por radiación, es el dejar expuestos los alimentos a la radiación directa del sol; métodos más avanzados se han desarrollado como el secado en microondas, en el cual el alimento es deshidratado por la acción de la onda de muy alta frecuencia que penetra en el, este tipo de deshidratación permite un secado rápido a relativamente bajas temperaturas, lo cual es benéfico para muchos alimentos que se dañan con temperaturas altas, aunque se tiene una menor producción.



*Diagrama de un deshidratador con microondas a vacío* [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]

Evidentemente en cualquiera de los tres casos las tres formas de transferencia de calor estarán presentes en mayor o menor medida para cada uno de los casos.

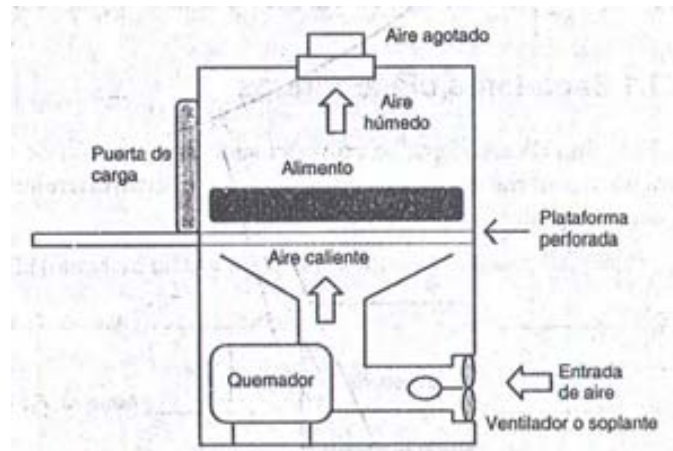
Una tercera clasificación es en base al recipiente en el cual se seca.

- Deshidratador de estufa
- Deshidratador de bandejas
- Deshidratador de túnel
- Deshidratador de lecho fluido
- Deshidratador de tambor
- Deshidratación de Rotación

### 2.3.2.6 Deshidratador de estufa:

Uno de los tipos más sencillos de secador por convección es el secador de estufa, las construcciones más antiguas solían ser de dos pisos, en el piso inferior un hogar u horno calentaba el aire que subía al segundo piso donde era depositado el alimento a

deshidratar. Se emplea aun para rebanadas de manzana, aunque es difícil retirar la humedad a menos del 10% del valor inicial.

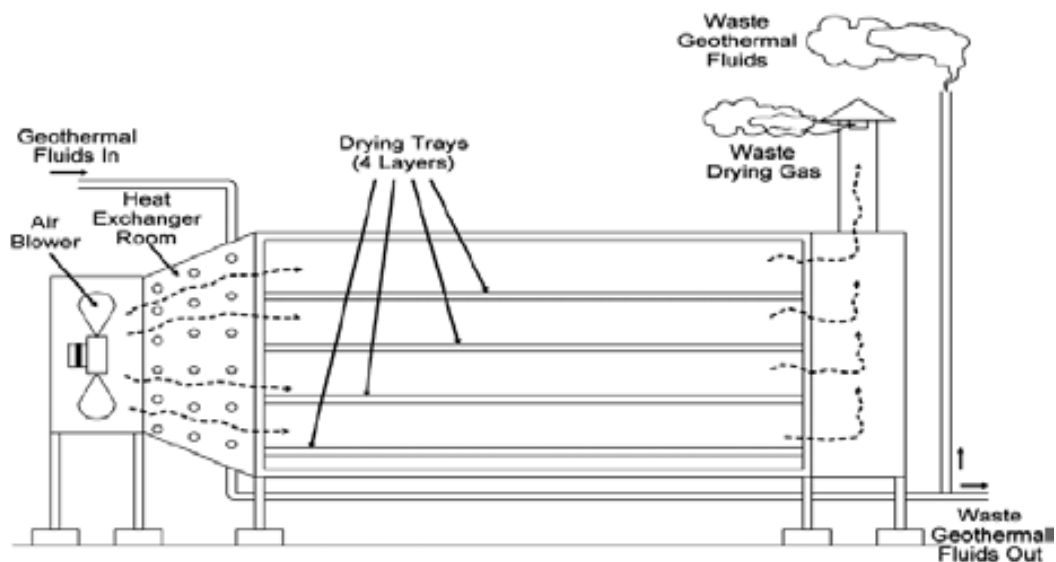


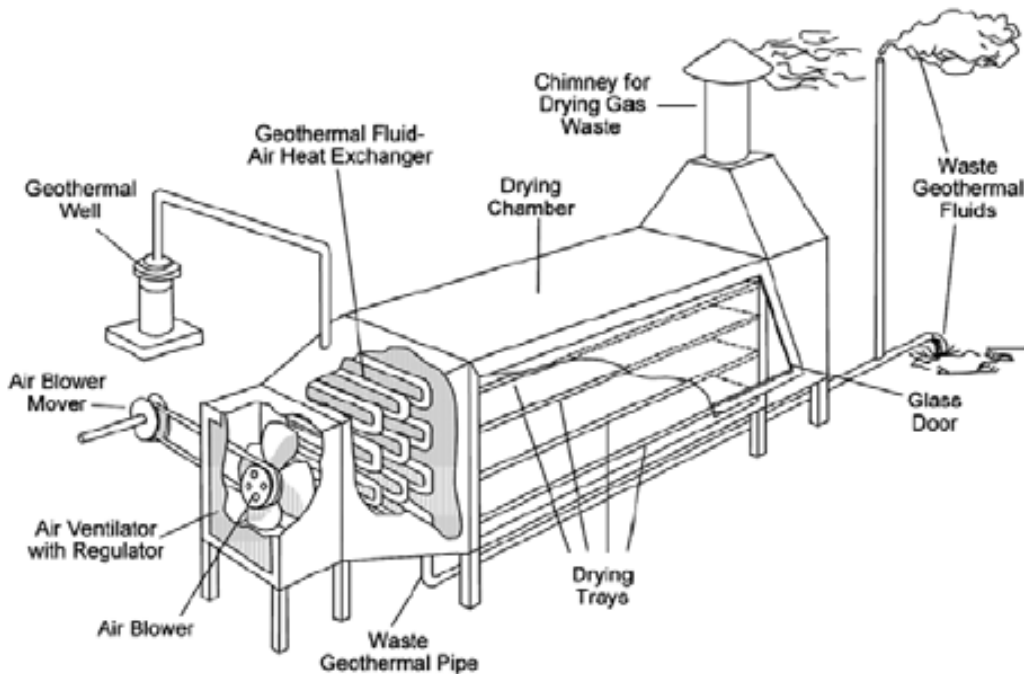
Configuración de un secadero de horno o estufa [Potter, La ciencia de los alimentos, 1978]

### 2.3.2.7 Deshidratador de bandejas

Los alimentos son acomodados en unas charolas o bandejas, y estas se apilan dentro de la cámara de secado en uno o varios bastidores; el aire caliente será ingresado y pasará a través de los alimentos deshidratándolos y siendo expulsado naturalmente o forzado mediante un ventilador. El aire es calentado en serpentines de vapor, de gas, en resistencias eléctricas o por contacto directo donde puede ser filtrado para reducir sus partículas contaminantes derivadas de la combustión.

Son óptimos para secar cualquier producto, pero son de producción baja y se requiere cambiar cada ciclo las bandejas. El problema principal con estos deshidratadores es que es difícil alcanzar un secado uniforme dentro de las bandejas.





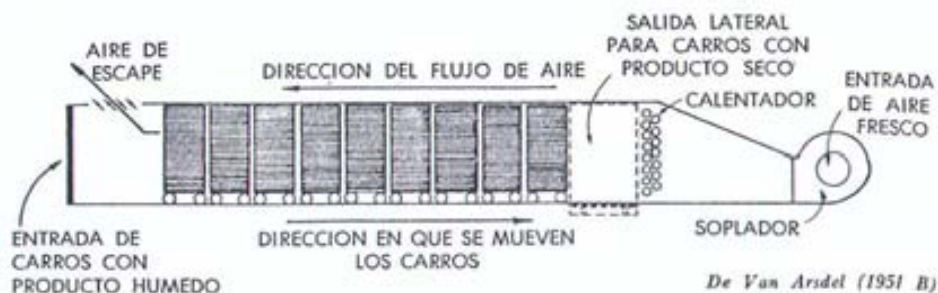
*Configuración de un secador de bandejas que funciona con energía geotérmica, [Sumartato Untung, Design of a geothermal energy dryer for beans and grains in Kamojan geothermal field, Indonesia, 2000]*

### **2.3.2.8 Deshidratador de túnel.**

La alimentación del material se efectúa por una banda sin fin, que lo lleva a través el túnel de deshidratación donde entrará en contacto con el aire caliente.

Este secador debe diseñarse para que si el tiempo de secado es de 10 hrs, el producto tarde 10 hrs en atravesar el túnel, cuando una charola ha atravesado el túnel, deja un lugar vacío que debe ser llenado con una charola nueva.

El aire pasa a contracorriente con el principio de que es mas difícil retirar la ultima agua que esta en el alimento y es preferible que entre en contacto con la parte mas caliente y seca del aire, además de que disminuyen al máximo los cambios bruscos de temperatura a la entrada del túnel.

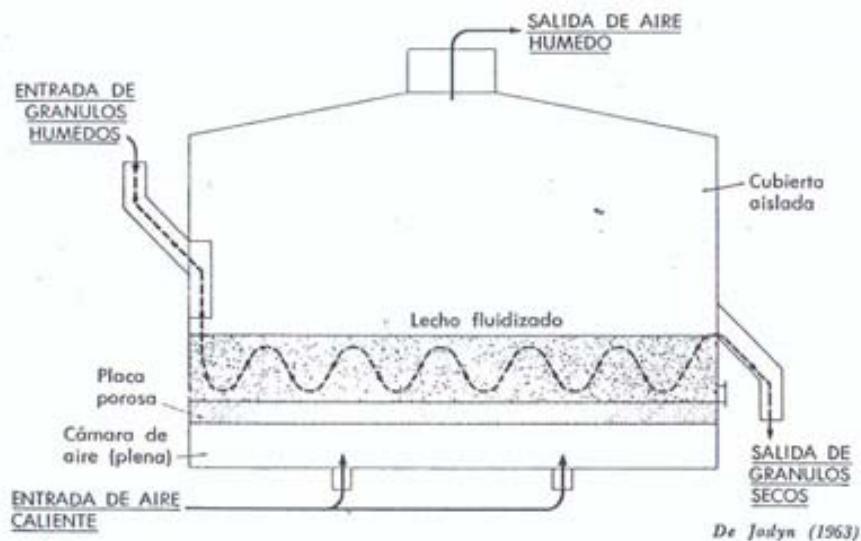


*Configuración de un secador de túnel [Potter, La ciencia de los alimentos, 1978]*

### 2.3.2.9 Deshidratador de lecho fluido

En los secadores de este tipo se impulsa aire de la parte de abajo para mantener fluidizado el alimento, es decir suspendido en el aire. La entrada del alimento es en forma de partículas y se hace por la parte de arriba; el producto ya seco es colectado por un conducto en el otro extremo de la entrada. El aire húmedo, que ya ha recogido la humedad de los alimentos, es descargado por la parte superior del secador, haciendo el proceso continuo. Estos secadores son ideales para alimentos en forma de partículas como chícharos, granos, etc.

Los sistemas fluidizados reducen los tiempos de secado, un movimiento vibratorio en el producto permite un mejor contacto con el aire lo q disminuye el tiempo de secado.



Esquema de un secador de lecho fluido [Potter, La ciencia de los alimentos, 1978]

### 2.3.2.10 Deshidratador de tambor rotatorio

Este secador consiste en un tambor giratorio o rodillo metálico, el cual es calentado desde el interior del mismo, generalmente por vapor.

Sobre la superficie de estos rodillos, los alimentos en forma de pastas, líquidos o triturados se aplican en capas delgadas. El alimento queda confinado en la parte superior de los dos rodillos y limitado por placas estacionarias. La solución concentrada desciende formando una capa viscosa que recubre el resto de la superficie de los tambores, el alimento seco es retirado con cuchillas.



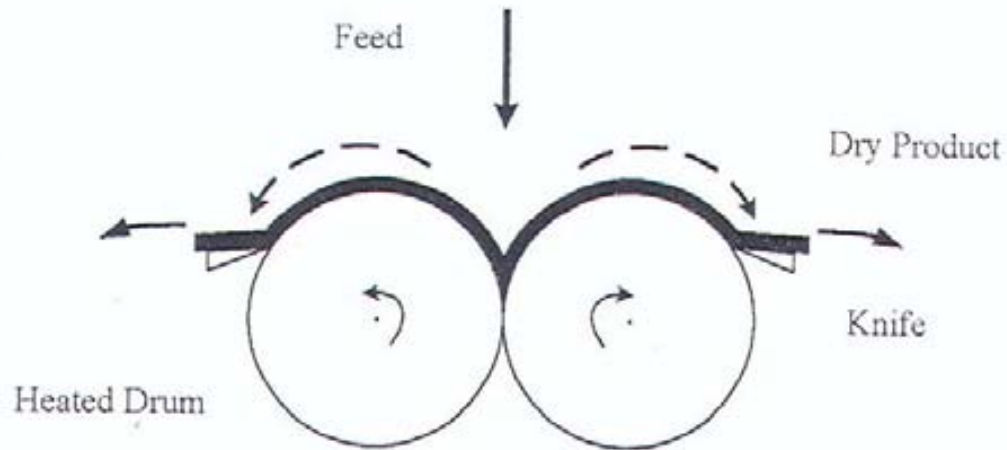


Diagrama de un secador con doble tambor [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]

### 2.3.2.11 Deshidratadores por aspersión

En los secadores por aspersión el alimento debe de ser líquido o un sólido poco viscoso, como la leche o los purés, ya que este será asperjado dentro de la cámara, es decir en forma de rocío o llovizna. Estas gotitas al entrar en contacto con el aire caliente se secan instantáneamente y se convierten en partículas secas.

El flujo de aire forzado por un ventilador es expulsado, haciendo el proceso continuo. El flujo puede ser en contracorriente-paralelo o una combinación de ambos.

Este tipo de secador produce mas masa de alimento seco que todos los demás juntos pero esta limitado a que el alimento pueda ingresar en el aspersor.

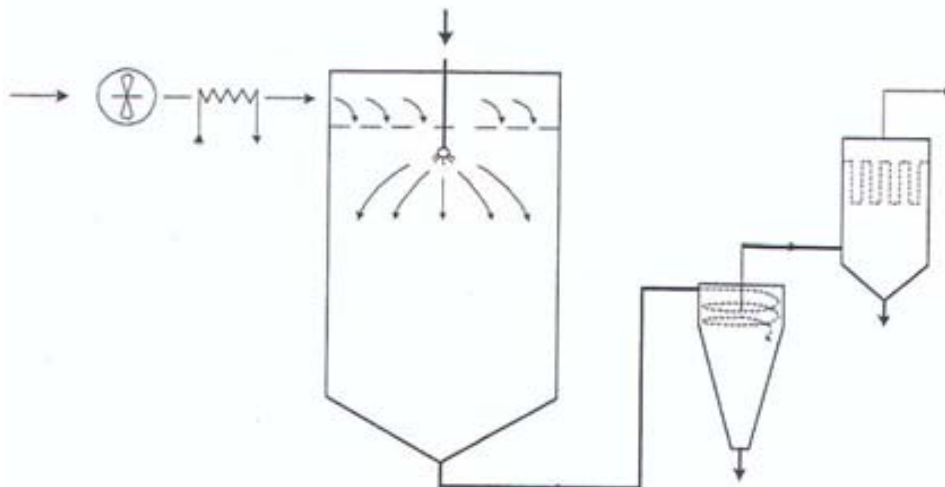


Diagrama de un secador por aspersión [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]

### 2.3.2.12 Deshidratadores rotatorios

Consisten en una carcasa cilíndrica giratoria, dispuesta horizontalmente o ligeramente inclinada hacia la salida. Al girar la carcasa, se levantan los alimentos para caer después en forma de lluvia a través del interior de la carcasa. La alimentación entra por un extremo del cilindro y el producto seco descarga por el otro, se calientan por contacto directo del aire con el alimento.

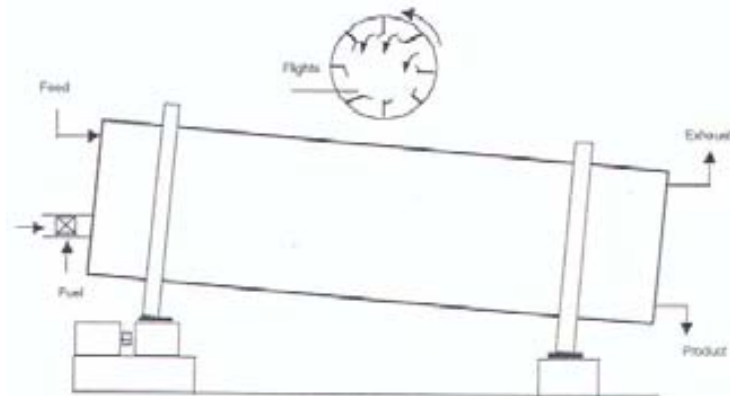
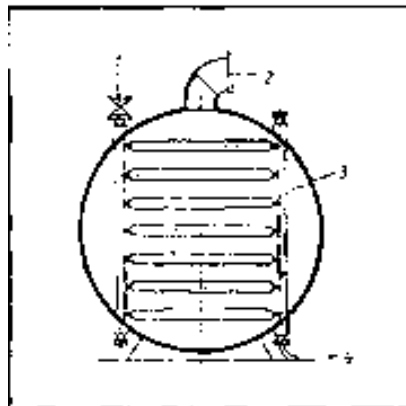


Diagrama de un secador rotatorio [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]

### 2.3.2.13 Deshidratadores al vacío.

Este tipo de deshidratadores produce la mejor calidad de deshidratados, pero es la de más alto costo. La deshidratación ocurre a temperaturas bajas lo cual produce un deshidratado de alta calidad; la velocidad con la que se extrae la humedad de los alimentos puede ser regulada con el grado de vacío y la intensidad de calor ingresado.

Todos los secadores a vacío deben contener una cámara de construcción fuerte que resista la presión exterior y un sistema de extracción de humedad del interior de la cámara.

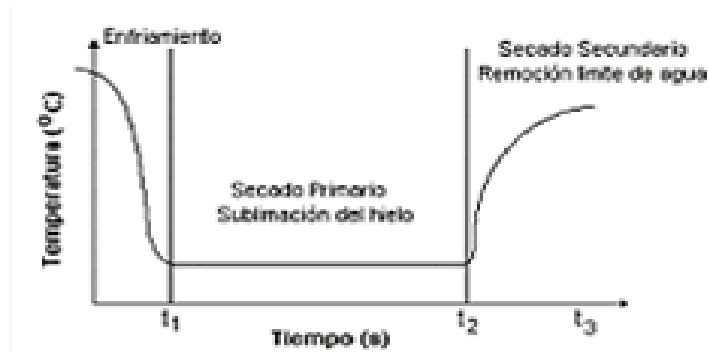


Deshidratador al vacío, se condensa la línea de vapor 1-4, en 3 se encuentra el producto y en 2 se tiene el sistema de extracción de gases que genera el vacío. [Documentos de la FAO]

## 2.3.3 OTROS TIPOS DE DESHIDRATACIÓN.

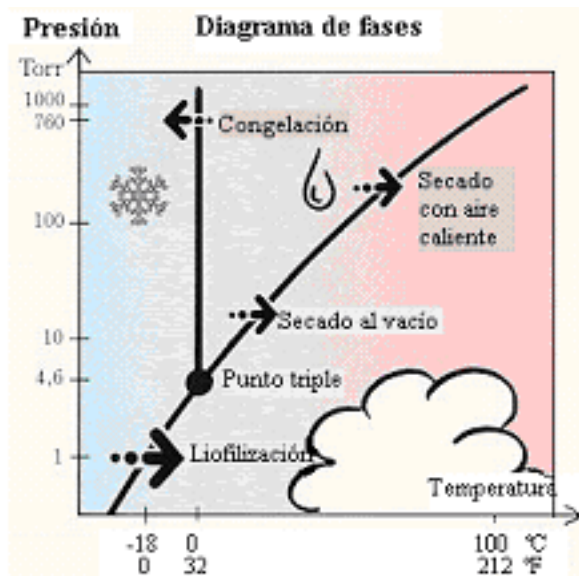
### 2.3.3.1 Liofilización

La liofilización es otra técnica de deshidratación de alimentos que consiste someterlos en un ambiente de baja presión a muy bajas temperaturas para provocar la sublimación del hielo; usando esta técnica, la industria de alimentos prepara café instantáneo, leche en polvo, leche condensada y otros alimentos deshidratados.



*Pasos en la liofilización [Documentos de la FAO]*

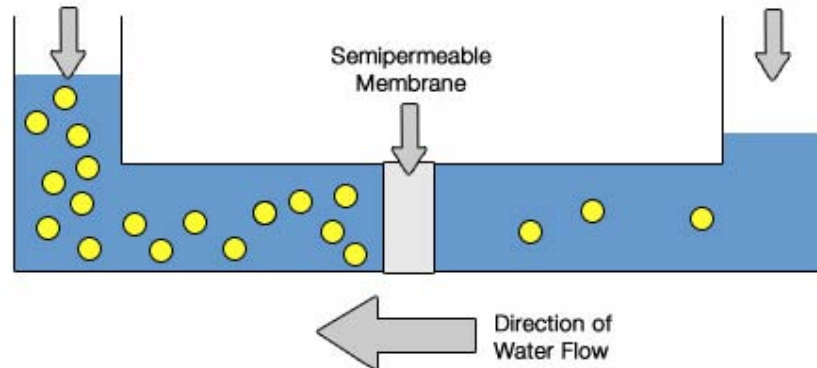
Los incas que habitaban en la alta cordillera de los andes emplearon la liofilización para deshidratar papas. En esas regiones de la cordillera, la presión atmosférica y la temperatura ambiente son tan bajas que la liofilización se produce naturalmente.



*Condiciones de presión y temperatura en las cuales se lleva cabo la liofilización [Universidad Nacional de Colombia UNAL]*

### 2.3.3.2 Deshidratación osmótica

La deshidratación osmótica se basa en el proceso de difusión del agua en un membrana permeable como puede ser la pulpa de diversas frutas, esta difusión es inducida al sumergir la fruta en una solución de mayor concentración de azúcares por ejemplo que el que contenga la fruta; este método por no conserva muchos de los nutrientes de la fruta, y tiene un tiempo muy largo de deshidratación, pero al ser un método que deshidrata sin temperatura es de los más eficientes energéticamente.



*Esquema de la osmosis, el flujo de agua va en la dirección de la mayor concentración*  
[www.islandnet.com]

## 2.4 TEORIA DE DESHIDRATACION.

El proceso de deshidratación se basa en una teoría compleja de transferencia de calor y masa, difícilmente se usa el diseño meramente teórico para el diseño de un proceso de deshidratación, debido a la dependencia y singularidad de las propiedades de cada muestra de alimento. En esta parte se describirán la mayoría de los parámetros involucrados en el proceso de deshidratación con aire caliente y su relación entre ellos.

### 2.4.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

#### 2.4.1.1 Aire atmosférico:

El aire ambiente es una mezcla de aire seco y vapor de agua, es necesario estudiar las relaciones que guardan estos dos componentes

#### 2.4.1.2 Humedad absoluta y humedad relativa.

El cociente entre la masa del vapor de agua contenido en el aire entre la masa de aire seco se conoce como humedad absoluta; el aire atmosférico puede contener solo una

máxima cantidad de vapor de agua, la humedad relativa es el cociente entre la masa de vapor de agua contenida entre la máxima que puede contener.

El valor de humedad relativa en el aire es un parámetro de la deshidratación, y va a depender de la temperatura del aire, mientras mayor sea la temperatura menor será la humedad relativa, es decir el aire puede absorber mas humedad.

*HR: humedad relativa (%)*

*$\omega$ : humedad absoluta (kg vapor/kg aire seco)*

### **2.4.1.3 Aire saturado.**

Cuando el aire esta en la condición de 100% de humedad relativa, se conoce como aire saturado y no puede absorber mas humedad a una determinada temperatura.

### **2.4.1.4 Temperatura de rocío.**

Si disminuye la temperatura del aire atmosférico aumenta su humedad relativa, cuando la temperatura disminuye hasta alcanzar el 100% de humedad relativa, cualquier decremento en la temperatura ocasionara una condensación de vapor de agua para mantener la condición de aire saturado a esa temperatura; esta ultima se conoce como temperatura de rocío. Esta es igual a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de vapor.

### **2.4.1.5 Presión de vapor.**

El aire atmosférico puede considerarse como un gas ideal, y por tanto la presión total en el aire puede considerarse como la suma de la presión ejercida por el aire seco más la presión de la masa de vapor.

La presión de vapor es importante para entender el proceso de deshidratación; cuando aire atmosférico a una determinada humedad relativa esta en contacto con una superficie húmeda, existe una tendencia a el equilibrio entre la superficie húmeda y el aire, es decir parte del agua en la superficie se evapora para igualar la presión de vapor que ejerce el aire con las que ejerce la superficie húmeda. Cuando el aire en contacto con la superficie se vuelve saturado al absorber la humedad evaporada se ha igualado la presión de vapor con la presión de la superficie.

La presión de vapor que ejerce el aire atmosférico es igual a la humedad relativa del aire por la presión de saturación del agua a la temperatura del aire

$$P_v = (HR)(P_{sat} T)$$

Considerando el aire atmosférico como un gas ideal, se tienen las relaciones para la humedad relativa y absoluta en términos de la presión de vapor.

$$\omega = .622 P_v / (P_{atm} - P_v)$$

$$HR = \omega P_{atm} / (.622 + \omega) P_g T$$

$P_{atm}$ : presión atmosférica (Pa)

$$HR = P_v / P_g$$

$P_g T$ : presión de saturación a la temperatura del aire (Pa)

#### **2.4.1.6 Proceso de saturación adiabática.**

Este proceso consiste en hacer pasar aire atmosférico a determinada temperatura y determinada humedad a través de una superficie de agua contenida en un canal; el aire atmosférico va absorber la humedad evaporada por la diferencia entre la presión de vapor y la presión de la superficie; la evaporación del agua es un proceso que consume energía, calor latente de evaporación, y que la va a tomar del calor sensible de la superficie del agua (esto explica el porque el agua tiene una temperatura ligeramente menor a la ambiente) y del calor sensible del aire, haciéndolo que también disminuya su temperatura.

Si consideramos un canal lo suficientemente largo para que el aire salga de el saturado, la temperatura de salida corresponde a la temperatura de saturación adiabática, con esta temperatura se puede conocer la humedad relativa del aire.

#### **2.4.1.7 Temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo.**

La temperatura de bulbo seco se conoce a la temperatura del aire atmosférico real, medido con un termómetro.

$T$ : temperatura de bulbo seco (C)

La temperatura de bulbo húmedo, es muy parecida a la de saturación adiabática descrita anteriormente, y se mide con un termómetro con la mecha húmeda girado suavemente tratando de reproducir el proceso de saturación adiabática. En términos mas precisos la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura a la cual el agua, por evaporación de aire a una temperatura y humedad relativa, puede llevar adiabáticamente el aire al estado de de saturación manteniendo una presión constante. El calor latente de la evaporación será suministrado a expensas del calor sensible del líquido y por lo tanto la temperatura de este último disminuye, la temperatura de bulbo húmedo siempre será menor a la temperatura de bulbo seco.

Del balance de energía en el proceso de saturación adiabática y considerando la temperatura de bulbo húmedo como la temperatura de saturación adiabática.

$$\omega = (C_p * (T_w - T) + \omega' h_{fg}') / (h_g - h_f')$$

$C_p$ : Calor específico del aire. (kJ/kgC)

$T_w$ : temperatura de bulbo húmedo (C)

$\omega'$ : humedad absoluta en estado de saturación ( $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{aire seco}}$ )

$h_{fg}'$ : calor latente del agua a  $T_w$  (kJ/kg)

$h_g$ : Entalpía del vapor a  $T$  (kJ/kg)

$h_f'$ : Entalpía del líquido saturado a  $T_w$  (kJ/kg)

#### 2.4.1.8 Entalpía del aire atmosférico.

Con el objetivo de realizar los balances energéticos en los procesos que involucran evaporación de agua debida a la presión de vapor, se debe conocer la entalpía de aire atmosférico que es igual a la suma de la entalpía del aire seco más la entalpía del vapor de agua.

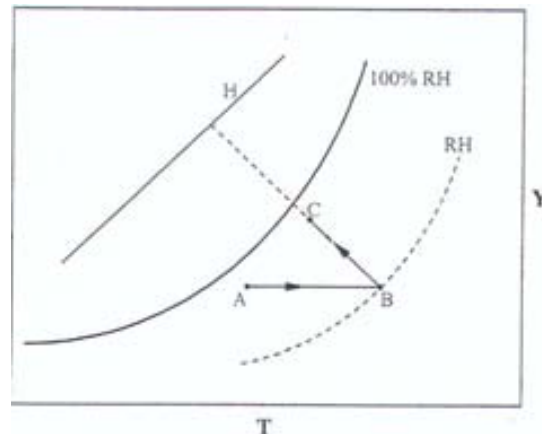
$$h = h_{as} + h_v \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_{as} = C_p T \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_v = h_g = 2500.9 + 1.82T \text{ (kJ/kg)}$$

#### 2.4.1.9 Carta psicométrica.

Todas las ecuaciones anteriores permiten conocer las propiedades del aire atmosférico conociendo algunos datos; la carta psicométrica relaciona todas las propiedades de forma grafica y relativamente sencilla.



Esquema del flujo de aire en un deshidratador adiabático en la carta psicométrica, de AB se observa un calentamiento a humedad constante, y de BC se observa una humidificación adiabática a temperatura de bulbo húmedo constante, y por tanto entalpía constante, RH significa humedad relativa. [Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, 2002]

#### **2.4.1.10 Humedad del alimento.**

La cantidad de agua en el alimento depende del tipo, la forma, y es muy propia de cada especie; puede ser expresada en base húmeda, o en base seca.

En el alimento se puede clasificar de dos formas, como humedad libre o humedad ligada.

*X: humedad del alimento*

#### **2.4.1.11 Humedad libre**

Esta es la cantidad de agua que es posible extraer del alimento se conoce como agua libre, esta se evapora al ejercer una presión sobre la atmosfera de aire de secado de menor presión de vapor. A veces también se define como la diferencia entre la humedad inicial y la humedad de equilibrio, es decir como la humedad que es posible extraer del alimento.

#### **2.4.1.12 Humedad ligada.**

La cantidad de agua en el alimento que se encuentra como adherida fuertemente al alimento, y su presión es menor q la presión de vapor del aire por lo tanto es muy difícil extraerla.

#### **2.4.1.13 Humedad de equilibrio**

Cuando el alimento alcanza este valor de humedad, ha dejado de ceder agua al aire secante, y se encuentra en equilibrio con el; este valor es particular de cada alimento pero también depende de la temperatura del aire se secado y de su humedad relativa. Si se pudiera disminuir la humedad del alimento mas allá de la humedad de equilibrio sería el aire el que le cedería humedad al alimento. En la práctica es difícil alcanzar este valor, el proceso de deshidratación termina cuando la humedad ha llegado a un valor cercano a este.

*X<sub>e</sub>: humedad de equilibrio*

#### **2.4.1.14 Actividad de agua.**

Es el cociente entre la presión de vapor del agua contenida en el alimento y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura, es decir es la humedad relativa de equilibrio de una atmosfera de aire que esta en contacto con el alimento. La actividad de agua es una buena mediada para definir las condiciones finales de deshidratación.

#### **2.4.1.15 Isotermas de sorción.**

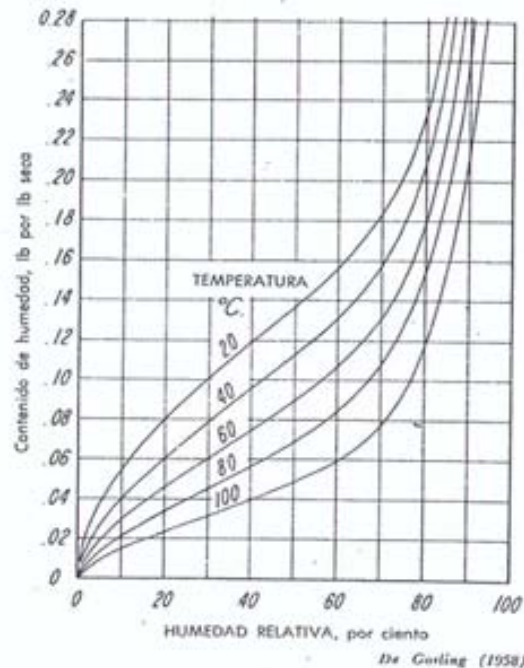
La humedad de equilibrio que se puede alcanzar para un alimento puede ser representada mediante las curvas de absorción o desorción, esta ultima es la que importa en el secado, es decir va cediendo humedad; en esta grafica se puede ver la



dependencia de la temperatura y humedad relativa del aire en la humedad de equilibrio que teóricamente se podría alcanzar.

Estas graficas relacionan la humedad relativa de equilibrio, en el alimento a diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa ambiente, y se obtienen secando el alimento a diferentes condiciones y pesando el producto. Tener isotermas de sorción para el alimento nos permite conocer dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad cual seria el valor de humedad de equilibrio que podríamos alcanzar, es decir hasta donde podríamos deshidratarlo.

También tiene su importancia en el almacén del alimento deshidratado, ya que si la atmosfera tiene una humedad de equilibrio superior a la de equilibrio del alimento, este empezara a absorber humedad, y a dañarse el producto.



Isotermas de sorción de agua en papas. [Potter, La ciencia de los alimentos, 1978]

#### 2.4.1.16 Velocidad de secado.

Es la razón a la cual se extrae el agua del alimento por el aire, es decir la razón a la cual disminuye la humedad del alimento, en un proceso de secado existen dos grandes periodos (realmente son mas), el secado a velocidad constante y el periodo a velocidad decreciente.

#### 2.4.1.17 Humedad crítica.

El valor de humedad donde aparece el periodo de velocidad decreciente es el periodo de humedad crítica.

$X_c$ : humedad crítica

## 2.4.2 PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA

### 2.4.2.1 Transferencia de calor

La teoría de la deshidratación se basa en la transferencia de calor del aire al alimento húmedo y la transferencia del agua evaporada del alimento al aire de deshidratación. La superficie de transferencia de calor y masa es un parámetro relevante, y debe de ser lo más grande posible.

La transferencia de calor de un fluido en movimiento, como el aire, se conoce como convección, y está en función del área de transferencia de calor, la diferencia de temperaturas entre la temperatura media del aire y la temperatura de la superficie; y un coeficiente de transferencia de calor, este último es el parámetro más complejo y es difícil de determinar, pero su principal dependencia está en la velocidad del aire. El calor transmitido por unidad de tiempo es entonces:

$$Q = h_c * A * (T - T_s)$$

*Q*: calor transmitido (kW)

*h<sub>c</sub>*: coeficiente de convección en (kW/m<sup>2</sup>K)

*A*: área de transferencia de calor (m<sup>2</sup>)

*T<sub>s</sub>*: temperatura de la superficie del alimento (C)

Para la *h<sub>c</sub>* se deben calcular los números adimensionales de Reynolds, Nusselt y Prandtl, pero existe una correlación desarrollada para aire fluyendo a lo largo de bandejas planas:

$$h_c = 0.0204 G^8$$

*G*: densidad de flujo de aire en (kg/m<sup>2</sup>hr)

### 2.4.2.2 Transferencia de masa

Para la transferencia de masa a través del alimento se utiliza la segunda ley de Fick, que relaciona el cambio de humedad en el tiempo del alimento con la distribución de la concentración de la humedad en el alimento

$$\partial C / \partial t = D * (\partial^2 C / \partial r^2 + (1/r) \partial C / \partial r)$$

*C*: concentración

*t*: tiempo

*r*: coordenada radial

*D*: difusividad

Para una placa plana, como una bandeja,  $j=0$ , también  $C=X$  y  $r$  se considera lineal al espesor como una  $z$

$$\partial W/\partial t = D*(\partial^2 W/\partial z^2)$$

Para las condiciones de humedad inicial y humedad final de equilibrio, y definiendo un espesor  $z=r$  y una temperatura constante, la solución es:

$$\sum_{n=1}^{\infty} 1/(2n-1)^2 e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D * t}{4z^2}}$$

Si el espesor  $z$  es muy pequeño y el tiempo es largo, todos los términos de la serie mayores a  $n=1$  se desprecian, y si además se considera a  $X_e=0$ .

$$\ln(X/X_o) = \ln(8/\pi^2) - \pi^2 D * t / z^2$$

Y se tiene una relación entre la humedad en el alimento y el tiempo de deshidratación,  $D$  se obtiene experimentalmente al graficar los valores de  $\ln(X/X_o)$  contra  $t$  o contra  $t^2/z$ , o en la literatura para el producto.

### 2.4.3 PROCESO DE DESHIDRATACION.

El proceso de deshidratación se basa en el uso de la energía térmica del aire para evaporar y extraer la humedad del alimento. El aire se calienta en un medio calefactor, como serpentines de vapor o agua caliente antes de entrar en contacto con el alimento, el aire recibe energía térmica y además al incrementar su temperatura, disminuye su humedad relativa, lo cual permite que pueda arrastrar más humedad.

El aire es impulsado por un ventilador para obligarlo a pasar a través del alimento, el aumento en la velocidad permite aumentar el coeficiente de transferencia de calor, el movimiento del aire permite el retirar el aire que se ha saturado y ha entrado en equilibrio con la superficie de alimento húmeda.

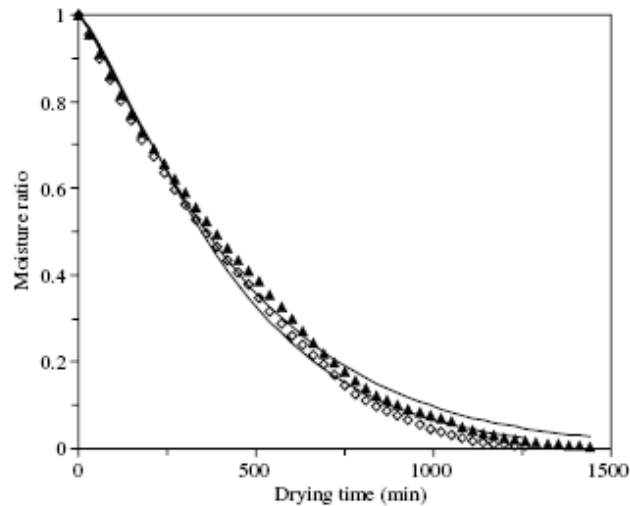
La humedad en el interior del alimento se mueve por difusión de vapor o agua o hidrodinámicamente por flujo capilar. El agua se va a ir retirando del alimento en varias etapas. Las dos principales son:

- Velocidad constante
- Velocidad decreciente

Cuando se secan los alimentos no pierden humedad a periodos constantes, y los tiempos no son los mismos, se puede llevar 4 horas para retirar el 90% la humedad de un alimento en el periodo de velocidad constante y otras 4 para remover el restante posible en el periodo de velocidad decreciente.

#### **2.4.3.1 Primera Curva de secado**

Esta curva es desarrollada frecuentemente experimentalmente midiendo el cambio de humedad en el alimento dentro del tiempo de deshidratación. En esta curva se pueden observar ya las dos etapas de deshidratación, una marcada por una casi recta y otra una parábola.



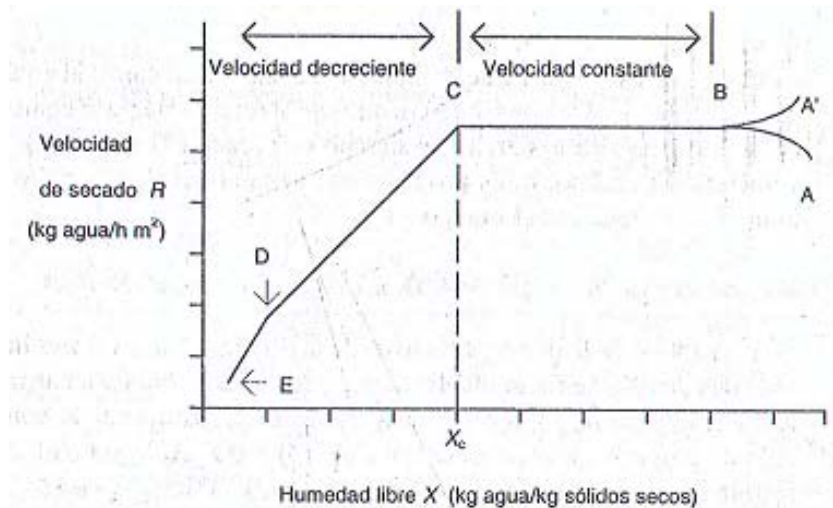
*Primera curva de secado desarrollada para diferentes tomates con un secador de bandejas [Ibrahim Doymaz, Air-drying characteristics of tomatoes 2005]*

Se debe notar que en la grafica anterior, las ordenadas están referidas al contenido de humedad libre o extraíble, si se hace sobre humedad total, se vería una asíntota y el valor de este límite en el infinito corresponde al valor de la humedad relativa de equilibrio, se ha visto que es muy difícil tener una humedad menor al 2% en los alimentos. Cuando se alcanza una humedad muy cercana a la humedad de equilibrio el proceso puede darse por terminado.

Esta gráfica va a depender de las condiciones de humedad y temperatura del aire de secado y del alimento.

#### **2.4.3.2 Segunda curva de secado**

Al derivar la curva anterior con respecto al tiempo se obtiene la velocidad de secado, los valores de estas velocidades cuando se grafican contra el contenido de humedad en el alimento originan la segunda curva de secado, en la cual es mas fácil apreciar el proceso de deshidratación.



*Diagrama de una típica segunda curva de secado [Potter, La ciencia de los alimentos, 1978]*

En **A-B** ocurre el calentamiento del alimento, es decir el alimento frío va a comenzar a elevar su temperatura hasta alcanzar la temperatura de saturación.

En **B-C** comienza el proceso de deshidratación a velocidad constante, donde el agua es evaporada, el calor que suministra el aire caliente es el necesario para evaporar la superficie mojada del alimento. Este periodo se va a mantener mientras el agua del interior del alimento fluya por capilaridad a la superficie de tal forma que siempre se tenga una superficie húmeda en el alimento, cuando esto no ocurre se alcanza la humedad crítica y el periodo termina. En este periodo se puede considerar a la temperatura del alimento como la de bulbo húmedo del aire.

En **C-D** comienza el primer periodo de velocidad decreciente, donde el mecanismo dominante de deshidratación es la transferencia de masa de agua del interior del alimento. La superficie de evaporación se traslada a capas inferiores en el alimento

El periodo **D-E** es el segundo de velocidad decreciente y es el más largo de todos, ya que la evaporación se hace más complicada, la superficie de evaporación se encuentra cada vez más dentro del sólido, el agua sale con mayor dificultad del interior del sólido. La temperatura del alimento se aproxima a la del aire secante.

### **2.4.3.3 Factores que afectan el proceso de secado**

- *Área de superficie:*

Es el área en la cual se colocara el alimento a secar, mientras mayor sea el área mayor será el área de transferencia de calor y masa, aumentando la velocidad del proceso.

Las rebanadas de alimento que se colocan sobre las bandejas deben ser lo más finas posible con el objetivo de que la humedad pueda migrar fácilmente del interior del alimento a la superficie.

- *Temperatura:*

Mientras mayor sea la diferencia entre el aire secante y el alimento mayor será la tasa de secado hasta cierto límite, debido a que si la temperatura es muy alta, puede existir un endurecimiento de la superficie del alimento lo que provocaría que la humedad interior no pudiera salir a la superficie.

- *Tiempo:*

Se debe llegar a un óptimo entre la velocidad máxima de secado y la calidad que el producto requiere, hay alimentos que conviene deshidratarlos lentamente por el daño que les produce estar expuestos a altas temperaturas durante cortos periodos.

- *Velocidad del aire:*

La humedad que se convierte en vapor por el calor agregado debe de ser retirada, de la superficie para que el proceso continúe, por eso es preciso que el aire este fluyendo a una velocidad a través del alimento. En estos términos el aire en movimiento es mucho más efectivo que al aire caliente para secar.

- *Humedad del aire.*

Cuando el aire este más seco más velocidad tendrá el proceso de secado. La humedad contenida en el aire va a definir hasta donde se puede secar un alimento, es decir su humedad de equilibrio.

- *Propiedades de los alimentos.*

Las propiedades de los alimentos son muy particulares e irregulares, es decir no tienen homogeneidad molecular y cada pieza es diferente de la otra, lo cual hace muy difícil determinar a priori el proceso de deshidratación

La porosidad permite un mejor flujo de agua del interior pero los cuerpos porosos disminuyen la transferencia de calor, el resultado neto depende de la influencia de la porosidad en estos dos parámetros.

Pueden existir reacciones químicas durante el proceso de deshidratación, como el encafecimiento, producido por la reacción de Maillard, que es la reacción de los grupos aldehído y amino de los azúcares y las proteínas; se propicia su desarrollo a altas temperaturas en un ambiente acuoso.

#### **2.4.3.4 Tiempo de deshidratación.**

El tiempo de secado es el parámetro más importante después de la calidad del producto, el tiempo va definir el consumo de energía y la producción de deshidratado. La tasa de secado del producto es usualmente determinada experimentalmente debido a la alta complejidad de los cálculos para predecir el balance de masa y energía en el alimento. Un cálculo apoyado en valores experimentales y desarrollo teórico es lo más óptimo para predecir el tiempo de secado.

El experimento para calcular los tiempos de secado consiste en construir un prototipo de secador, controlando los parámetros de humedad, temperatura y velocidad del aire. El peso y la temperatura de la muestra son medidas periódicamente hasta encontrar la primera curva de secado, derivándola esta última con respecto al tiempo se obtiene la segunda curva de secado que corresponde a la velocidad o tasa de deshidratación R y se define como:

$$R = M/A * dX/dt \dots\dots\dots (1)$$

$$M = \rho_s * z * A \dots\dots\dots (2)$$

$M_s$ : masa de alimento

$\rho_s$ : densidad del alimento

$z$ : espesor del alimento en la bandeja

$A$ : área expuesta

$X$ : humedad del alimento (kg agua/kg total)

El término  $dX/dt$  va ser constante en el periodo de velocidad constante y se puede resolver teóricamente, pero en el periodo de velocidad decreciente puede o no ser una función de X, lo cual hace muy difícil de determinar.

En el periodo de velocidad constante todo el calor del aire es usado para la evaporación de agua manteniéndose la temperatura del alimento como la de bulbo húmedo, se desprecia el calor sensible del tomate, entonces la velocidad en que el agua es evaporada es:

$$dX/dt = h_c * (T - T_w) / (\rho_s * z * h_{fg}') \dots\dots\dots (3)$$

El tiempo en el periodo constante simplemente consiste en integrar esta última ecuación desde  $X_0$  hasta  $X_c$

$$t = \rho_s * z * h_{fg}' * (X_0 - X_c) / (h_c * (T - T_w)) \dots \dots \dots (4)$$

El tiempo en el periodo de velocidad decreciente se puede estimar a partir de la segunda ley de Fick, haciendo todas las simplificaciones de la solución presentada anteriormente; pero aun así falta determinar el coeficiente de difusividad que está sujeta a muchas variables. Se ha desarrollado en su lugar entonces una relación empírica de la velocidad de secado con la  $dX/dt$  en el periodo constante.

$$dX/dt = \mathcal{K} (X_c - X_e) \dots \dots \dots (5)$$

$$\mathcal{K} = -(dX/dt)_c / (X_c - X_e) \dots \dots \dots (6)$$

Sustituyendo (3) y (4) en (6)

$$\mathcal{K} = -(h_c * (T - T_w) / (\rho_s * z * h_{fg}' * (X_c - X_e))) \dots \dots \dots (7)$$

Entonces  $dX/dt$  en el periodo decreciente es:

$$dX/dt = -(h_c * (T - T_w) * (X_c - X_e) / (\rho_s * z * h_{fg}' * (X_c - X_e))) \dots \dots \dots (8)$$

Integrando esta última ecuación se obtiene una ecuación para el tiempo en el periodo de la velocidad decreciente, nótese que el tiempo es función del valor humedad que se quiere alcanzar, sabiendo que la  $X_e$  se alcanza con  $t = \infty$ .

$$t = (\rho_s * z * h_{fg}' * (X_c - X_e) / (h_c * (T - T_w))) * \ln((X_c - X_e) / (X - X_e)) \dots \dots \dots (9)$$



## 2.5 DESHIDRATADOR DE BANDEJAS.

Este secador es convectivo de aire caliente y puede ser a vacío o atmosférico, continuo o discontinuo, en este caso lo vamos a considerar el caso más simple atmosférico y discontinuo.

Tienen un costo operativo al ser discontinuos, se requiere mano de obra para estar cambiando y limpiando las bandejas, y la producción es pequeña comparada con otros deshidratadores; pero tiene la ventaja de secar casi cualquier fruto u hortaliza, además de ser óptimo como prototipo.

Las velocidades típicas de aire en estos secaderos es de 1 a 5 m/s, estos deshidratadores se utilizan para secar frutas y hortalizas con producciones típicas entre 1 y 20 ton al día.

Si el aire exhausto es recirculado para ahorrar energía térmica, este puede hacerse pasar a través de un lecho de gel de sílice o por serpentines fríos que eliminen la humedad por condensación. La entrada de aire nuevo debe estar lejos de la salida de aire agotado.



*Secador de bandejas que trabaja con energía solar en el CIE Temixco 2008. [El autor]*

## **2.5.1 EQUIPOS.**

### **2.5.1.1 Gabinete.**

Se conoce como la cámara de secado y debe construirse de materiales como acero, ladrillo, lamina de asbesto, aluminio, o madera.



*Gabinete o cámara de secado en el deshidratador de arroz del CIE Temixco 2008 [CIE]*

### **2.5.1.2 Bandejas:**

Se disponen en bastidores móviles para su fácil extracción y colocación, típicamente son 40 bandejas por lote. Se construyen regularmente de acero inoxidable, de aluminio, o de algún plástico reforzado; se deben limpiar con facilidad y se deben ser lavadas cada ciertos ciclos.



*Bandejas en el deshidratador de Los Azufres 2008 [El autor]*

### **2.5.1.3 Ventilador**

El ventilador es una turbo-máquina que provee un flujo de aire a relativas bajas presiones pero un caudal considerable; si la presión a la que se suministra el aire es mayor se llaman sopladores y cuando la presión ya es el parámetro más importante se conocen como compresores.

Los ventiladores usados en estos deshidratadores se pueden clasificar en axiales o centrífugos.

Los ventiladores axiales son aquellos en los cuales el flujo de aire sigue la dirección del eje de rotación. En general son aptos para mover grandes caudales a bajas presiones. Es un factor importante el ruido a velocidades medianamente altas.



*Ventilador axial* [www.howden.com]

En los ventiladores centrífugos el flujo de entrada de aire es paralelo al eje de giro pero se descarga en línea con la circunferencia del impulsor, estos ventiladores son más adecuados para vencer caídas de presiones más grandes.



*Ventilador centrífugo.* [www.mardelsur.cl]

Algunas leyes en la operación de ventiladores son las de afinidad con otras máquinas hidráulicas.

$$Q_1/Q_2=N_1/N_2$$

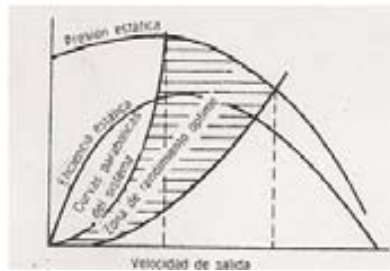
Es decir que los caudales Q son proporcionales a la velocidad angular (rpms) del ventilador

$$P_1/P_2=(N_1/N_2)^3$$

Es decir que la potencia necesaria es proporcional al cubo del cociente de la velocidad de giro.

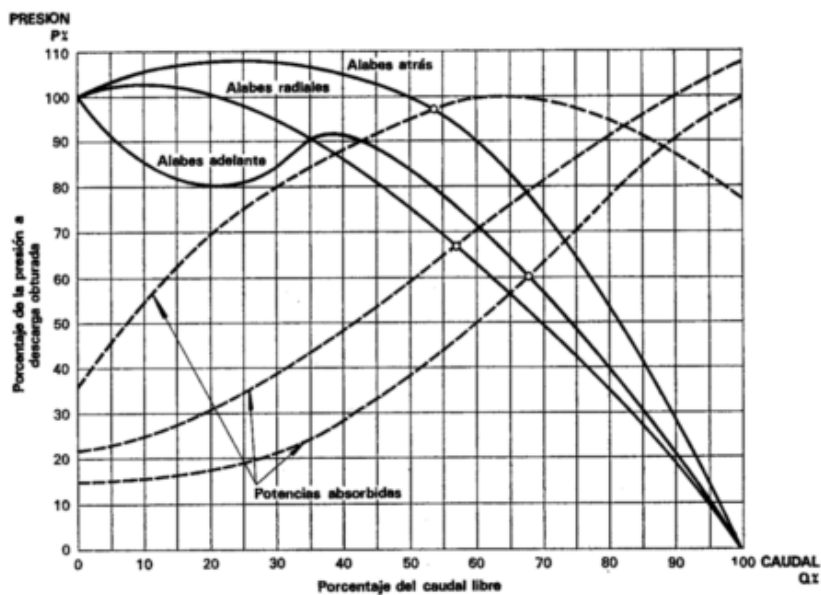
Los ventiladores están acoplados a un motor eléctrico, y se les puede regular su velocidad de giro y por tanto la velocidad del aire.

Las dos características principales para dimensionar un ventilador son la caída de presión y el caudal en volumen o en masa.

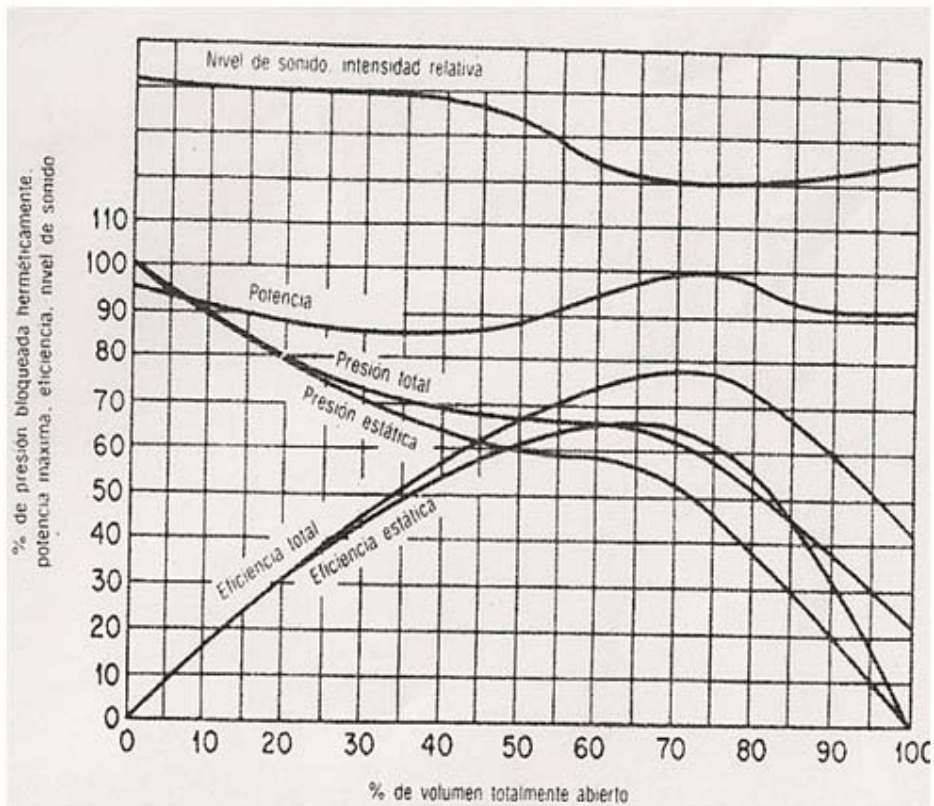


Curva que muestra el rendimiento óptimo en un ventilador [Marks Manual del ingeniero mecánico 1982]

Existen curvas de funcionamiento que precisan el punto óptimo de operación en los ventiladores.



Curvas características para un ventilador centrífugo [www.mf-ct.upc.es]



Curvas características para un ventilador axial [Marks, Manual del ingeniero mecánico 1982]

El ventilador representa un consumo significativo de energía en la instalación, por eso a veces se prefiere el diseño de una chimenea que proporcione la mayor circulación natural posible.

| Datos Técnicos  |              |                          |             |                |                      |          |              |
|---|--------------|--------------------------|-------------|----------------|----------------------|----------|--------------|
| Tipo  | Diámetro mm. | Caudal m <sup>3</sup> /s | Potencia kW | Intensidad (A) | Nivel Ruido (dB) (A) | Peso Kg. | No. Depósito |
| <b>Con motor monofásico, 110 V., 4 polos, 1800 RPM</b>    |              |                          |             |                |                      |          |              |
|   |              |                          |             | <b>110V</b>    |                      |          |              |
| 2CC2 254-5YC3   | 250          | 0.38                     | 0.050       | 0.8            | 62                   | 5.0      | 01181        |
| 2CC2 314-5YC3   | 316          | 0.70                     | 0.088       | 1.5            | 62                   | 6.0      | 01182        |
| 2CC2 354-5YC3   | 350          | 1.01                     | 0.110       | 1.9            | 68                   | 7.0      | 01183        |
| 2CC2 404-5YC3   | 400          | 1.45                     | 0.220       | 3.2            | 74                   | 8.0      | 01184        |
| 2CC2 504-5YA3   | 500          | 2.93                     | 0.700       | 8.3            | 78                   | 23.5     | 01185        |
| <b>Con motor trifásico, 220/440 V., 4 polos, 1800 RPM</b> |              |                          |             |                |                      |          |              |
|   |              |                          |             | <b>220V</b>    | <b>440V</b>          |          |              |
| 2CC2 404-5YP6   | 400          | 1.45                     | 0.20        | 1.14           | 0.57                 | 74       | 7.0          |
| 2CC2 504-5YB6   | 500          | 2.93                     | 0.66        | 3.00           | 1.50                 | 78       | 21.5         |
| 2CC2 634-5YB6   | 630          | 5.33                     | 1.60        | 6.40           | 3.20                 | 87       | 30.5         |
| 2CC1 714-5YB6   | 710          | 8.37                     | 3.58        | 14.00          | 7.00                 | 91       | 46.0         |
| <b>Con motor trifásico, 220/440 V., 6 polos, 1200 RPM</b> |              |                          |             |                |                      |          |              |
| 2CC2 506-5YB6   | 500          | 1.91                     | 0.19        | 1.22           | 0.61                 | 68       | 18.5         |
| 2CC2 636-5YB6   | 630          | 3.55                     | 0.51        | 3.10           | 1.55                 | 76       | 25.0         |
| 2CC2 716-5YB6   | 710          | 5.27                     | 1.20        | 6.70           | 3.35                 | 80       | 32.5         |

\* Con aspa de aluminio.

Datos técnicos de ventiladores [Siemens]



*Ventiladores en los deshidratadores del CIE y en Los Azufres 2008 [El autor]*

#### **2.5.1.4 Intercambiador de calor**

El intercambiador de calor es un dispositivo que permite el intercambio de calor entre dos fluidos, en el caso de estos secadores se requiere un intercambiador de calor aire-agua, aire-vapor o aire-gas de combustión; también es usual calentar el aire mediante resistencias eléctricas.

Debido al bajo coeficiente de transferencia de calor del aire, este tipo de intercambiadores de calor usualmente tienen tubería aletada que aumenta el área de transferencia de calor. El diseño de un intercambiador de calor es una teoría compleja, que no trataremos a detalle, usaremos el proceso más simple que consiste en realizar un balance de energía definiendo una delta de temperaturas en el agua caliente para calcular un área de transferencia de calor y seleccionar un intercambiador.



*Intercambiador de calor de tubería aletada. [www.thermengroup.com]*



*Detalle de la tubería aletada [www.namick.com]*

El flujo de agua caliente cederá una energía al aire y saldrá a menor temperatura, el aire por su cuenta incrementará su temperatura hasta un máximo limitado por la temperatura de entrada del agua caliente.

El coeficiente convectivo y la delta de temperaturas son parámetros necesarios para dimensionar el mismo.



*Vista de los gabinetes y los intercambiadores en los deshidratadores del CIE y de Los Azufres 2008 [el autor]*

### **2.5.1.5 Sistema de tuberías**

El agua caliente o vapor pasa través de tuberías hasta llegar al intercambiador de calor, este viaje representa pérdidas que son cubiertas con válvulas reguladoras de presión, la tubería debe de estar aislada para evitar la disminución de la temperatura por la transferencia de calor al ambiente.



*Vista de la tubería y válvula de regulación por donde circula la salmuera geotérmica 2008 [El autor]*

### **2.5.1.6 Chimenea**



*Vista de la chimenea en el deshidratador del CIE Temixco 2008 [El autor]*

### **2.5.1.7 Sistema de control**

El sistema de control incluye sensores para medir la velocidad del aire en el interior de la cámara y están conectados al motor del ventilador para poder regularlo, también incluyen sensores de temperatura en el interior de la cámara conectados al flujo de agua caliente o vapor.



*Sensores de temperatura en el deshidratador del CIE en Temixco 2008 [El autor]*



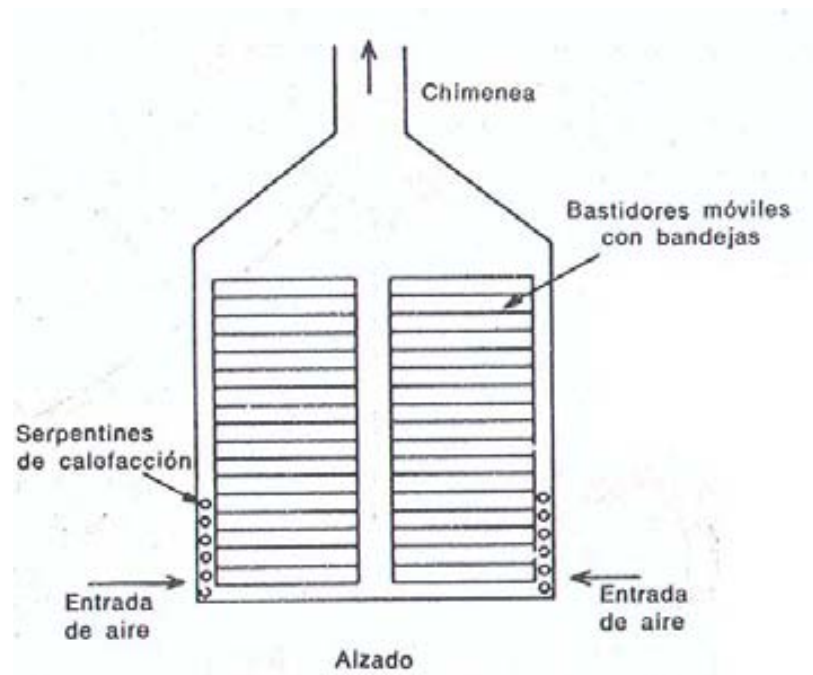
## 2.5.2 CLASIFICACION

La clasificación de estos deshidratadores se hace en base a la circulación del aire

- Circulación natural
- Circulación forzada de lado a lado de las bandejas
- Circulación forzada de atrás hacia delante sobre las bandejas
- Circulación forzada a través de bandejas perforadas

### 2.5.2.1 Circulación natural

Es la forma más elemental y la más antigua; es también la más barata pero la más ineficiente.

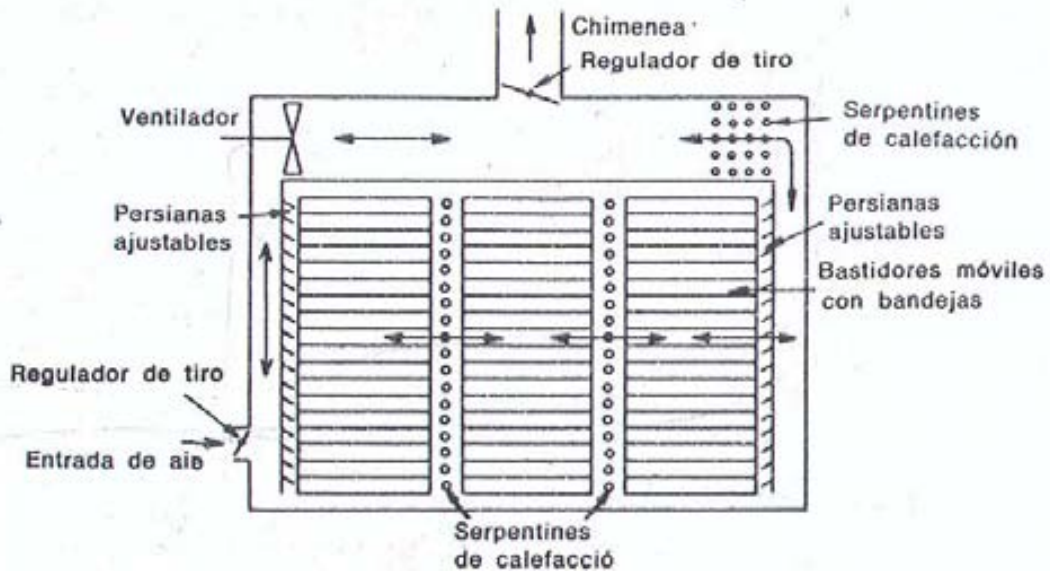


*Secador de bandejas con circulación natural y presión atmosférica [Nonhebel, El secado de sólidos en la industria química, 1979]*

### 2.5.2.2 Circulación forzada de lado a lado

El aire fluye a través de las bandejas forzado por un ventilador, se cuenta con persianas autoajustables que mantienen un flujo uniforme sobre las bandejas.

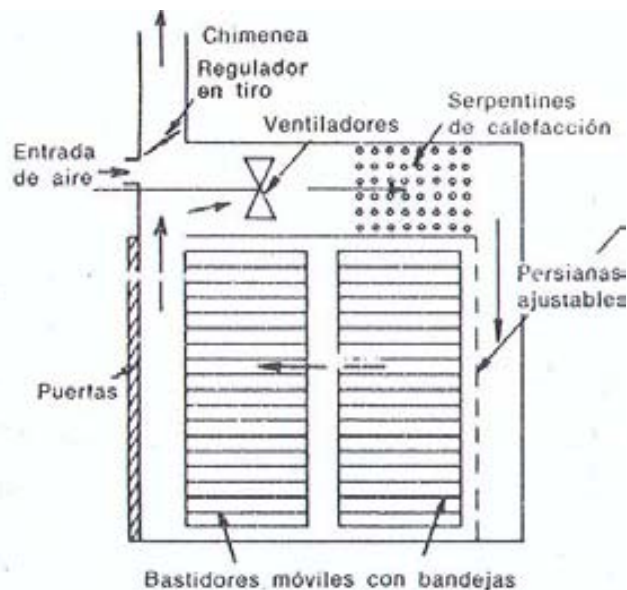
También la chimenea cuenta con un regulador de tiro, el cual controla la cantidad de aire que es recirculado a través del secador.



*Secador de bandejas con circulación lado a lado con tres bastidores [Nonhebel, El secado de sólidos en la industria química, 1979]*

### **2.5.2.3 Circulación forzada de atrás hacia delante.**

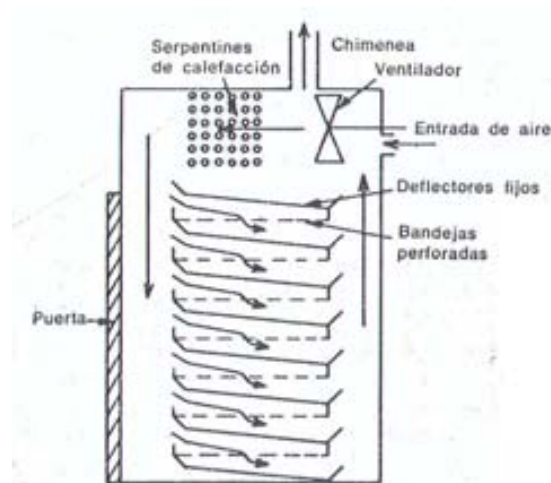
Este método es muy conveniente cuando se desea disponer de los serpentines de calefacción fuera de la vista del material a secar.



*Secador de bandejas con circulación de atrás hacia delante [Nonhebel, El secado de sólidos en la industria química, 1979]*

#### **2.5.2.4 Circulación forzada a través de bandejas perforadas**

La circulación de aire se hace a través de las bandejas perforadas, esta limitado a alimentos granulares .



*Secador de bandejas con circulación a través de bandejas perforadas [Nonhebel, El secado de sólidos en la industria química, 1979]*

## **2.6 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS DE DESHIDRATACION**

Debido a la complejidad de la teoría anterior, experimentalmente se han obtenido parámetros que apoyan la teoría con el fin de obtener un diseño más simple y más confiable.

- Se debe llevar a cabo la velocidad máxima del aire posible sin que vaya a levantar el producto.
- Se debe dejar un espesor optimo entre cada bandeja, para poder ingresar la mayor cantidad de material con la película la mas delgada posible y permitiendo el flujo de aire entre cada una de ellas.

# CAPITULO III

## EL TOMATE

El tomate rojo o también conocido en el sur y centro de México como jitomate es un producto agrícola de mucha importancia en la economía del país, y que está presente en el dieta de la cocina mexicana e internacional convirtiéndolo en un producto de exportación; el jitomate puede consumirse crudo o procesado en pastas o salsas; el jitomate deshidratado presenta últimamente un mercado potencial en sus diferentes variedades.

### 3.1 HISTORIA

El tomate es originario de América del Sur, en las laderas de Los Andes; en México ha tenido un gran desarrollo desde la época mesoamericana, estaba incluido en la dieta indígena según Bernardino de Sahagún hacia 1557 en su historia General de las Cosas de La Nueva España. Es posible que las primeras variedades de jitomates que llevaron los conquistadores de Mesoamérica fueran amarillas debido a que en Italia se le conoció como pormodoro (manzana de oro). En Francia en el siglo XVIII, el tomate rojo fue conocido como "pomme d'amour" o manzana de amor.



*Diversas variedades de tomates [wikipedia, tomatoe]*

La palabra jitomate viene del náhuatl, *xitomatl* o fruto con ombligo, y hace referencia al tomate rojo, en el centro y en el sur de México así se conoce, en el norte se le llama simplemente tomate, en algunos lugares al tomate verde se le conoce como tomatillo o simplemente tomate.

### 3.2 CARACTERISTICAS.

Su nombre científico es *Solanum lycopersicum*, es un fruto de la planta tomatera y pertenece a la familia de las Solanáceas; contiene en promedio 10 cal por cada 100 g y es rico en agua potable. Contiene también azúcares simples que le dan un sabor dulce y ácidos orgánicos que le dan un sabor ligeramente ácido; también contiene potasio, calcio, magnesio, fósforo y vitaminas A, B1, B2, B3 y C.

La propiedad más interesante es el Licopeno, un componente que le da el color rojo característico, y que además es un antioxidante y anti-cancerígeno, este previene a las células humanas del estrés oxidativo, producido por la acción de los radicales libres, que son uno de los principales responsables de las enfermedades cardiovasculares, del cáncer y del envejecimiento.

Existe una gran variedad de jitomates y la mayoría de ellos son perennes, es decir que se encuentran casi todo el año.

### 3.3 VARIEDADES DE TOMATES.

Existe una amplia variedad de tomates que van desde el pequeño cherry hasta el beefsteak de más de 10 cm de diámetro, existen en varios colores.



© Simon Feiertag

*Diferentes variedades de tomates* [www.ethno-botanik.org]

Entre los tomates comercializados están:

- *Tipo Beef*. Son frutos de gran tamaño y poca consistencia de una rápida producción.
- *Tipo Marmande*. Este fruto se caracteriza por su buen sabor, su forma achatada y acostillada.
- *Tipo Vemone*. Plantas que presentan un elevado grado de acidez y azúcar, inducido por el agricultor.
- *Tipo Moneymaker*. Son lisos, redondos y con buena formación en ramillete.
- *Tipo Cocktail*. Tienen un peso comprendido entre 30 y 50 gramos, redondos pero también aperados, su consumo se realiza generalmente en fresco.
- *Tipo Cereza (Cherry)*. Son frutos de pequeño tamaño y de piel fina, tienen un sabor dulce y agradable y es muy sensible a los cambios bruscos de temperatura.
- *Tipo bola*. Jitomate redondo de forma ligeramente achatada el más común en México
- *Tipo Roma*. Es una variedad italiana utilizada como conserva
- *Tipo Saladette*. Tomate mediano de forma alargada.



*Tomate tipo bola y tipo Saladette, de los más comunes comercializados en México [SAGARPA]*

## 3.4 EL TOMATE EN EL MUNDO

### 3.4.1 PRODUCTORES

| PAÍSES                     | 2001      | 2002      | 2003      | 2004      | 2005      |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| China                      | 24,116.21 | 27,153.12 | 28,842.74 | 30,143.93 | 31,644.04 |
| Estados Unidos             | 10,001.72 | 12,383.20 | 10,522.00 | 12,867.18 | 11,043.30 |
| Turquía                    | 8,425.00  | 9,450.00  | 9,820.00  | 9,440.00  | 9,700.00  |
| Egipto                     | 6,328.72  | 6,777.88  | 7,140.20  | 7,640.82  | 7,600.00  |
| India                      | 7,240.00  | 7,460.00  | 7,600.00  | 7,600.00  | 7,600.00  |
| Italia                     | 6,387.89  | 5,750.04  | 6,651.51  | 7,683.07  | 7,187.02  |
| España                     | 3,971.69  | 3,979.72  | 3,947.33  | 4,383.20  | 4,651.00  |
| República Islámica de Irán | 3,009.45  | 4,109.00  | 4,200.00  | 4,200.00  | 4,200.00  |
| Brasil                     | 3,103.29  | 3,652.92  | 3,708.60  | 3,515.57  | 3,396.77  |
| Federación de Rusia        | 1,950.60  | 1,979.53  | 2,021.07  | 2,017.86  | 2,295.90  |
| México                     | 2,182.93  | 1,989.99  | 2,148.13  | 2,968.88  | 2,800.12  |

*Producción anual en miles de toneladas [http://faostat.fao.org/]*

### 3.4.2 EXPORTADORES

| PAÍSES         | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Italia         | 4,331.52 | 4,598.17 | 4,097.79 | 4,926.24 | 4,120.42 |
| China          | 1,569.83 | 1,956.38 | 2,124.35 | 2,334.05 | 2,546.42 |
| España         | 1,459.80 | 1,627.84 | 1,859.20 | 1,872.99 | 1,670.46 |
| México         | 801.11   | 896.01   | 942.83   | 942.11   | 875.76   |
| Turquía        | 841.58   | 855.07   | 1,032.80 | 1,219.74 | 791.35   |
| Países Bajos   | 623.55   | 636.64   | 725.40   | 793.96   | 786.60   |
| Estados Unidos | 815.13   | 816.37   | 969.24   | 1,012.42 | 752.87   |
| Portugal       | 592.99   | 607.60   | 772.62   | 709.24   | 536.00   |
| Chile          | 683.20   | 505.79   | 389.89   | 379.91   | 393.44   |
| Grecia         | 625.93   | 557.23   | 445.45   | 369.22   | 360.68   |

*Exportaciones en miles de toneladas [http://faostat.fao.org/]*

### 3.4.3 IMPORTADORES

| PAÍSES              | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Alemania            | 1,629.83 | 1,762.71 | 1,735.46 | 1,751.12 | 1,647.86 |
| Federación de Rusia | 784.64   | 758.26   | 794.55   | 958.46   | 1,338.09 |
| Reino Unido         | 1,193.44 | 1,184.93 | 1,616.19 | 1,235.63 | 1,107.04 |
| Italia              | 605.34   | 876.36   | 1,050.43 | 1,868.08 | 1,081.97 |
| Francia             | 914.83   | 914.35   | 991.52   | 1,068.96 | 1,026.50 |
| Estados Unidos      | 959.12   | 1,010.62 | 1,024.26 | 1,026.65 | 956.84   |
| Japón               | 645.27   | 571.80   | 588.09   | 649.05   | 512.93   |
| Canadá              | 504.05   | 477.90   | 439.74   | 529.00   | 416.04   |
| Arabia Saudita      | 195.13   | 301.07   | 370.49   | 366.80   | 331.37   |
| Países Bajos        | 444.24   | 424.76   | 457.49   | 354.14   | 322.24   |

*Importaciones en miles de toneladas [http://faostat.fao.org/]*

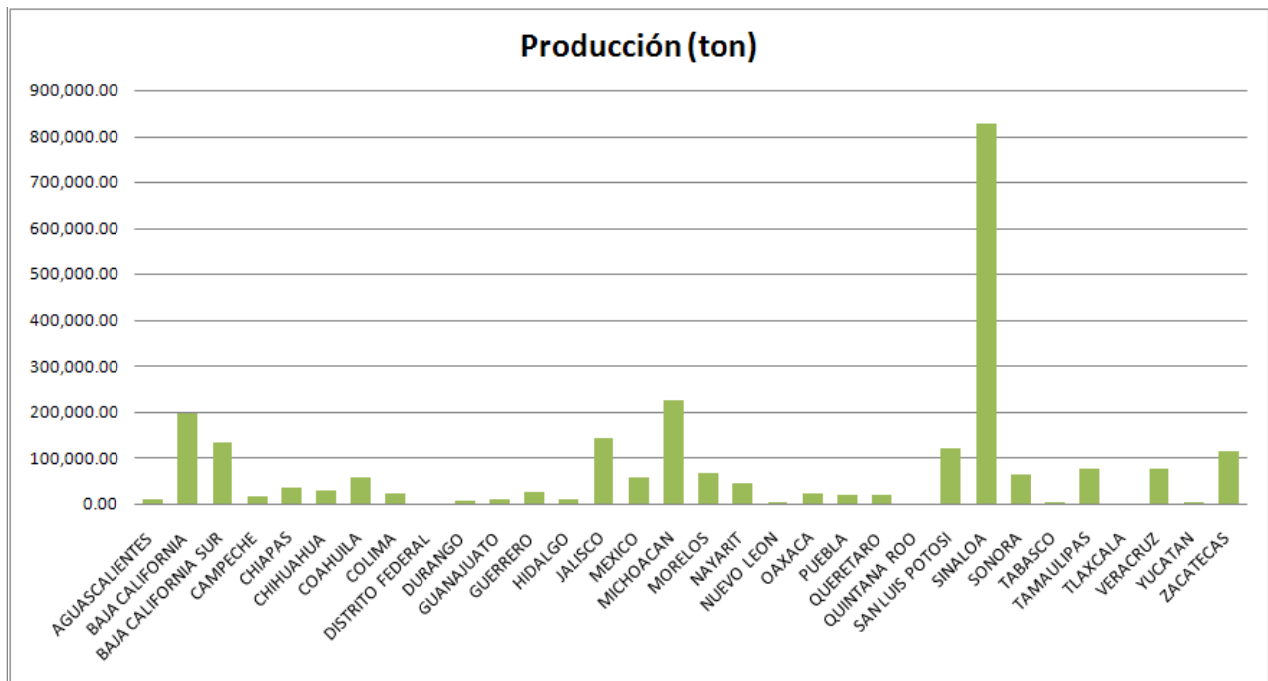
### 3.5 EL TOMATE EN MEXICO.

El tomate es el principal producto hortícola de exportación, ya que representa el 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas y el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias, sólo superada por el ganado vacuno.

El tomate forma parte importante de la dieta alimentaria mexicana con un consumo per capita de aproximadamente 13.5 kg.; esta hortaliza se comercializa en un 85 % en fresco existiendo épocas del año en las que se incrementa significativamente su oferta, ocasionando una saturación estacional en el mercado nacional lo cual trae como consecuencia una disminución en los precios y pérdidas económicas para el productor ya que frecuentemente no recupera sus costos de producción.

Una alternativa a ésta problemática es, por una parte, diversificar los mercados para este producto sobre todo con aquellos países con los que México tiene acuerdos comerciales y por otra, darle valor agregado al tomate como por ejemplo deshidratándolo; existen nichos de mercado que demandan un gran volumen de tomates secados debido a su cultura culinaria.

Sinaloa es el primer productor de tomates en México, Baja California ocupa el tercer lugar después de Michoacán, y ocupa el segundo lugar después de Querétaro en rendimiento, toneladas producidas por hectárea.



Producción de jitomates al 2007[SAGARPA]



| ESTADO              | Sup. Sembrada (Ha) | Sup. Cosechada (Ha) | Producción (ton)    | Rendimiento (ton/Ha) | Precio (\$/Ton) | Valor Producción (miles \$) |
|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| AGUASCALIENTES      | 343                | 325                 | 8,423.00            | 25.92                | 3,162.95        | 26,641.53                   |
| BAJA CALIFORNIA     | 3,370.80           | 3,317.80            | 196,388.03          | 59.19                | 5,834.75        | 1,145,874.36                |
| BAJA CALIFORNIA SUR | 3,457.50           | 3,261.25            | 132,873.29          | 40.74                | 6,382.16        | 848,018.51                  |
| CAMPECHE            | 524.45             | 482.2               | 15,957.05           | 33.09                | 4,580.88        | 73,097.34                   |
| CHIAPAS             | 1,042.00           | 961.5               | 34,215.50           | 35.59                | 7,421.60        | 253,933.84                  |
| CHIHUAHUA           | 673.38             | 651.38              | 29,624.12           | 45.48                | 5,652.09        | 167,438.15                  |
| COAHUILA            | 1,207.45           | 1,205.95            | 56,150.44           | 46.56                | 4,041.14        | 226,911.65                  |
| COLIMA              | 656                | 653                 | 22,181.50           | 33.97                | 4,065.58        | 90,180.62                   |
| DISTRITO FEDERAL    | 1.6                | 1.6                 | 19.9                | 12.44                | 12,356.78       | 245.9                       |
| DURANGO             | 229                | 229                 | 7,872.00            | 34.38                | 2,688.01        | 21,160.00                   |
| GUANAJUATO          | 472                | 468                 | 9,090.00            | 19.42                | 3,825.72        | 34,775.80                   |
| GUERRERO            | 1,342.80           | 1,328.80            | 23,802.75           | 17.91                | 5,006.17        | 119,160.68                  |
| HIDALGO             | 505.62             | 493.32              | 9,416.92            | 19.09                | 6,226.85        | 58,637.74                   |
| JALISCO             | 2,683.54           | 2,674.54            | 141,796.28          | 53.02                | 5,944.80        | 842,950.56                  |
| MEXICO              | 1,056.50           | 1,056.50            | 57,189.95           | 54.13                | 8,987.52        | 513,995.72                  |
| MICHOACAN           | 6,489.00           | 6,463.00            | 224,897.88          | 34.8                 | 3,092.63        | 695,526.08                  |
| MORELOS             | 2,591.73           | 2,588.73            | 66,656.60           | 25.75                | 6,569.87        | 437,925.04                  |
| NAYARIT             | 2,480.20           | 2,474.70            | 44,387.00           | 17.94                | 2,219.15        | 98,501.50                   |
| NUEVO LEON          | 586.6              | 486.6               | 4,557.00            | 9.36                 | 2,255.65        | 10,279.00                   |
| OAXACA              | 862.59             | 818.09              | 21,930.97           | 26.81                | 8,950.62        | 196,295.80                  |
| PUEBLA              | 933.53             | 927.43              | 17,523.38           | 18.9                 | 7,968.35        | 139,632.41                  |
| QUERETARO           | 257                | 255                 | 19,690.27           | 77.22                | 8,664.47        | 170,605.78                  |
| QUINTANA ROO        | 54.44              | 42.44               | 951.77              | 22.43                | 6,590.10        | 6,272.25                    |
| SAN LUIS POTOSI     | 3,725.00           | 3,593.50            | 120,289.40          | 33.47                | 4,703.87        | 565,825.84                  |
| SINALOA             | 19,548.25          | 18,820.25           | 827,010.94          | 43.94                | 3,782.10        | 3,127,840.80                |
| SONORA              | 2,269.00           | 2,253.00            | 63,608.52           | 28.23                | 5,562.58        | 353,827.44                  |
| TABASCO             | 112.25             | 105.75              | 1,740.50            | 16.46                | 5,000.29        | 8,703.01                    |
| TAMAULIPAS          | 2,751.10           | 2,614.10            | 75,433.00           | 28.86                | 5,634.65        | 425,038.50                  |
| TLAXCALA            | 3.5                | 3.5                 | 77                  | 22                   | 6,585.71        | 507.1                       |
| VERACRUZ            | 3,155.00           | 3,143.50            | 75,892.50           | 24.14                | 3,502.01        | 265,776.55                  |
| YUCATAN             | 245.48             | 217.98              | 2,775.81            | 12.73                | 5,767.63        | 16,009.84                   |
| ZACATECAS           | 3,005.00           | 2,862.00            | 112,979.50          | 39.48                | 5,187.58        | 586,090.70                  |
| <b>TOTAL</b>        | <b>66,635.31</b>   | <b>64,779.41</b>    | <b>2,425,402.77</b> |                      |                 | <b>11,527,680.04</b>        |

*Producción de jitomates al 2007 [SAGARPA]*

### 3.5.1 EL TOMATE EN BAJA CALIFORNIA

Dentro de Baja California el municipio más grande es el de Ensenada y por lo tanto es el que alcanza la mayor producción dentro del estado.

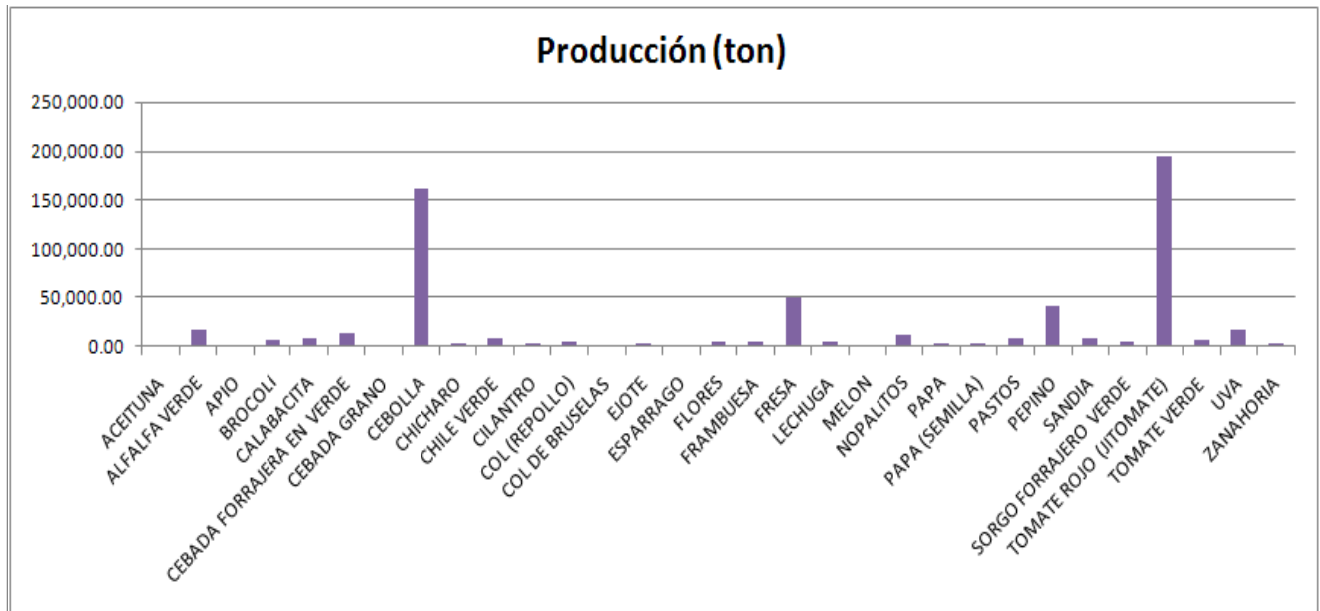
| MUNICIPIO          | Sup. Sembrada (Ha) | Sup. Cosechada (Ha) | Producción (ton)  | Rendimiento (ton/Ha) | Precio (\$/Ton) | Valor Producción (miles \$) |
|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| ENSENADA           | 3,331.80           | 3,278.80            | 194,653.03        | 59.37                | 5,795.50        | 1,128,110.76                |
| PLAYAS DE ROSARITO | 4                  | 4                   | 80                | 20                   | 6,500.00        | 520                         |
| TECATE             | 23                 | 23                  | 1,436.00          | 62.44                | 11,044.78       | 15,860.30                   |
| TIJUANA            | 2                  | 2                   | 36                | 18                   | 12,500.00       | 450                         |
| <b>TOTAL</b>       | <b>3,360.80</b>    | <b>3,307.80</b>     | <b>196,205.03</b> |                      | <b>5,835.43</b> | <b>1,144,941.06</b>         |

*Estadísticas de la producción del jitomate en Baja California [SAGARPA]*

En el municipio de Ensenada el jitomate es el producto que más se produce.

| Cultivo                   | Sup. Sembrada (Ha) | Sup. Cosechada (Ha) | Producción (ton)  | Rendimiento (ton/Ha) | Precio (\$/Ton) | Valor Producción (miles \$) |
|---------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| ACEITUNA                  | 2,487.00           | 951                 | 1,968.57          | 2.07                 | 4,745.86        | 9,342.56                    |
| ALFALFA VERDE             | 1,235.00           | 920.5               | 16,603.45         | 18.04                | 357.39          | 5,933.96                    |
| APIO                      | 50                 | 50                  | 1,766.40          | 35.33                | 3,145.68        | 5,556.54                    |
| BROCOLI                   | 387                | 386                 | 6,705.14          | 17.37                | 5,634.98        | 37,783.34                   |
| CALABACITA                | 605.5              | 548                 | 7,916.92          | 14.45                | 4,581.41        | 36,270.62                   |
| CEBADA FORRAJERA EN VERDE | 16,734.00          | 623                 | 13,175.10         | 21.15                | 286.43          | 3,773.68                    |
| CEBADA GRANO              | 1,055.00           | 380                 | 1,140.00          | 3                    | 1,600.00        | 1,824.00                    |
| CEBOLLA                   | 4,127.00           | 3,934.00            | 160,839.10        | 40.88                | 2,211.28        | 355,660.19                  |
| CHICHARO                  | 363                | 363                 | 2,779.47          | 7.66                 | 12,934.45       | 35,950.91                   |
| CHILE VERDE               | 383                | 355.5               | 7,740.75          | 21.77                | 4,266.74        | 33,027.73                   |
| CILANTRO                  | 451                | 407                 | 3,602.30          | 8.85                 | 4,896.22        | 17,637.66                   |
| COL (REPOLLO)             | 148.5              | 142.5               | 4,300.75          | 30.18                | 1,785.84        | 7,680.47                    |
| COL DE BRUSELAS           | 84                 | 83                  | 1,500.64          | 18.08                | 7,919.96        | 11,885.01                   |
| EJOTE                     | 296                | 294                 | 2,276.24          | 7.74                 | 10,667.44       | 24,281.65                   |
| ESPARRAGO                 | 463                | 318                 | 1,405.56          | 4.42                 | 21,235.70       | 29,848.05                   |
| FLORES                    | 528                | 501                 | 5,071.56          | 10.12                | 11,230.85       | 56,957.94                   |
| FRAMBUESA                 | 98                 | 98                  | 4,395.60          | 44.85                | 10,585.25       | 46,528.52                   |
| FRESA                     | 1,386.00           | 1,386.00            | 49,344.30         | 35.6                 | 10,433.18       | 514,817.96                  |
| LECHUGA                   | 168                | 162                 | 4,739.82          | 29.26                | 3,797.71        | 18,000.49                   |
| MELON                     | 52                 | 52                  | 1,318.20          | 25.35                | 6,390.02        | 8,423.32                    |
| NOPALITOS                 | 651.5              | 616                 | 10,850.24         | 17.61                | 4,776.72        | 51,828.60                   |
| PAPA                      | 95                 | 95                  | 3,749.65          | 39.47                | 3,260.00        | 12,223.86                   |
| PAPA (SEMILLA)            | 181                | 132                 | 2,783.88          | 21.09                | 4,817.98        | 13,412.68                   |
| PASTOS                    | 343                | 278                 | 8,535.65          | 30.7                 | 329.3           | 2,810.79                    |
| PEPINO                    | 949.6              | 946.6               | 40,358.86         | 42.64                | 5,857.23        | 236,391.27                  |
| SANDIA                    | 289                | 289                 | 8,494.24          | 29.39                | 1,661.42        | 14,112.47                   |
| SORGO FORRAJERO VERDE     | 180                | 180                 | 4,206.80          | 23.37                | 488.01          | 2,052.96                    |
| TOMATE ROJO (JITOMATE)    | 3,331.80           | 3,278.80            | 194,653.03        | 59.37                | 5,795.50        | 1,128,110.76                |
| TOMATE VERDE              | 384                | 368                 | 7,220.90          | 19.62                | 2,080.50        | 15,023.09                   |
| UVA                       | 2,299.50           | 2,179.00            | 16,264.46         | 7.46                 | 7,113.34        | 115,694.62                  |
| ZANAHORIA                 | 183.5              | 177.5               | 2,817.98          | 15.88                | 3,462.03        | 9,755.92                    |
| <b>TOTAL</b>              | <b>53,094.90</b>   | <b>21,462.40</b>    | <b>598,525.56</b> |                      |                 | <b>2,926,832.92</b>         |

*Producción agrícola en el municipio de Ensenada BC [SAGARPA]*



*Producción agrícola en el municipio de Ensenada BC 2007 [SAGARPA]*

### **3.6 TOMATES DESHIDRATADOS**

El tomate deshidratado es una forma de conservar el tomate durante más tiempo y así evitar el desecharlo cuando la oferta supera a la demanda; además de que deshidratado se convierte en un ingrediente especial en la cocina nacional e internacional, sobre todo la italiana.

No existen datos directos de la producción de tomate deshidratado, pero se puede dividir en el tomate deshidratado propiamente dicho que se produce en hornos y secadores de aire caliente, y el que es más común que es el tomate seco al sol, "sun-dried tomato".

Algunas variantes del tomate deshidratado son enteros, en escamas, en polvo.



*Tomates deshidratados [www.sciencedaily.com]*

### **3.6.1 EL PROCESO DE DESHIDRATACION**

#### *1.-Recepcion y Selección*

El jitomate crudo fresco debe ser transportado al lugar de la deshidratación, con el cuidado de no maltratar el producto así como tener un registro de la fecha de la cosecha; posteriormente se lavaran los jitomates con agua y se procederá a seleccionar los jitomates y a desechar los de mala calidad que podrán ser procesados como pasta. Los jitomates seleccionados se clasificaran por tamaños. De un 60 a un 70 % de los jitomates serán aptos para la deshidratación.

#### *2.-Corte y estibado*

Los jitomates son rebanados en mitades o en rodajas, manualmente o mediante una maquina cortadora y son acomodados por tamaño en las bandejas para su posterior proceso; se pueden o no eliminar las semillas.

#### *3.-Pretratamiento.*

Este proceso es opcional y consiste en primero en someter al jitomate ya cortado en una solución de meta-bisulfito de potasio que lo protegerá contra las enzimas degradantes después del corte y contra microorganismos, también se puede someter al producto a una atmosfera saturada de azufre. El tomate también puede perforarse para promover el flujo de humedad de su interior y vencer más fácilmente el obstáculo que presenta la piel.

#### *4.-Deshidratacion.*

Ya listos los jitomates se introducen dentro del deshidratador donde se les retirara la humedad; el producto debe de estar uniformemente distribuido con la parte libre de piel hacia arriba; las condiciones recomendadas son de una temperatura de aire de secado entre los 45 y los 60 C a una velocidad del aire de aproximadamente de 1 a 2 (m/s).

#### *5.-Descarga y transporte.*

El producto que es retirado debe permitir que se enfríe a la sombra durante un breve periodo de tiempo y después almacenarse en depósitos de madera seca para que se homogenice su humedad, este proceso puede durar de una a dos semanas.

#### *6.-Empaque*

El jitomate ya homogenizado pasa por un control de calidad y el producto seleccionado puede empaquetarse en bolsas o recipientes preferentemente de polipropileno o en frascos de cristal lo cual pueden llevar diversos condimentos, como el aceite de oliva.

# CAPÍTULO IV

## DISEÑO DEL DESHIDRATADOR.

En este capítulo se diseñara el deshidratador, estableciendo el tipo de éste, el tamaño, el patrón de flujo y su funcionamiento con energía geotérmica. Se van a definir los equipos necesarios y se van a dimensionar basándose en las condiciones de sitio, operación, y requerimientos del producto.

### 4.1 DESCRIPCION GENERAL DEL DESHIDRATADOR

El deshidratador presentado continuación es un deshidratador de bandejas convectivo y atmosférico, de flujo paralelo a las charolas. El aire se calentara haciendo uso de energía geotérmica representada en el agua caliente extraída del subsuelo. El agua caliente entrara a un intercambiador de agua-aire donde le cederá su energía al flujo de aire que viene impulsado por un ventilador. El aire ya caliente y en movimiento esta óptimo para el proceso de deshidratación y entra en contacto con las charolas llenas de alimento arrastrando el agua contenida en ella. Finalmente el aire húmedo y un poco más frío es expulsado por una chimenea al exterior. Debido a que la energía térmica es gratuita no existe recirculación de aire.

El diseño del deshidratador se basa en los siguientes conceptos:

- Tener un área de transferencia de calor grande de los intercambiadores para un flujo de agua de no muy alta temperatura.
- Tener una velocidad de aire moderadamente elevada para favorecer la transferencia de calor en el aire, utilizando un túnel moderadamente largo de calefacción
- Tener un diseño de intercambiador de calor con una caída de presión pequeña, que reduzca el costo de bombeo,
- Limitar el consumo eléctrico del ventilador, favoreciendo el escape natural del aire con la chimenea.
- Mantener un espacio óptimo de separación entre las charolas, que permita una velocidad optima en la superficie del alimento.
- Maximizar la producción sin alargar el tiempo de deshidratación, dimensionando correctamente el gabinete.

- Tener uniformidad en la materia prima y su espesor, además de la higiene del equipo y control de los parámetros que permita tener un producto de calidad.
- Accesibilidad de materiales.
- Facilidad de construcción, instalación y mantenimiento.

En base a los conceptos presentados anteriormente se hace el diseño del deshidratador.

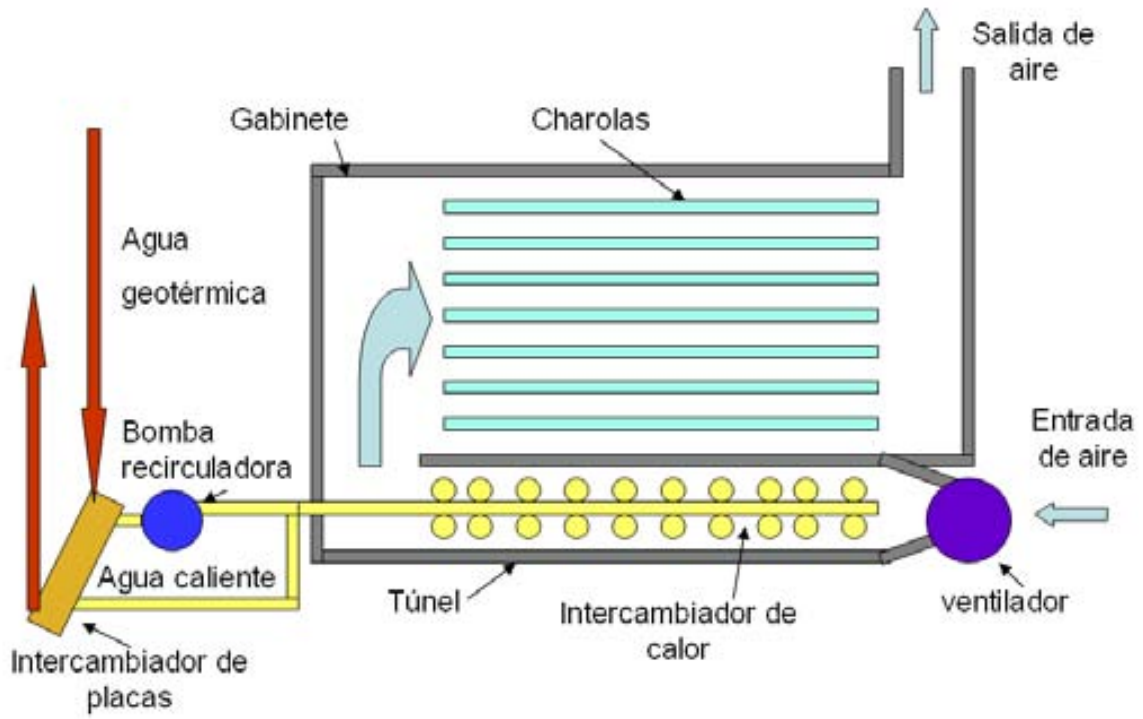
El gabinete del deshidratador consiste en una cámara con dos columnas de bastidores que soportan bandejas llenas de jitomate. El aire caliente ingresa por la parte inferior del deshidratador y es forzado hacia las bandejas, por un ventilador centrífugo; este tiene su filtro para evitar al máximo la contaminación del producto.

El aire fluye a través de un túnel donde se encuentran alojados los intercambiadores de calor de tubería aletada que llevan agua caliente; así se calienta el aire antes de difundirse dentro de la cámara e iniciar la deshidratación. El aire ingresa por un extremo en el piso del gabinete, y después se difunde en un flujo paralelo a las charolas del alimento.

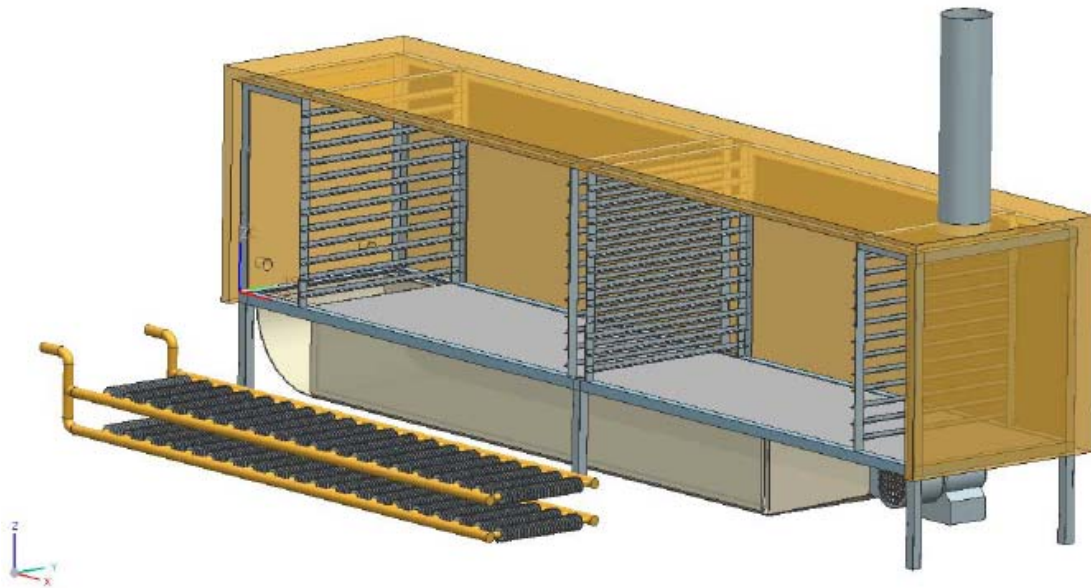
La salida de aire agotado, es decir que ya ha absorbido la humedad y está un poco más frío, se hace a través de una chimenea y esta lejos de la entrada de aire para asegurar que siempre se tenga aire fresco ingresando al secador. La chimenea favorece la corriente de aire dentro de la cámara, pero no se calculo sus dimensiones ni aislamiento optimo.

El intercambiador de calor consiste en un arreglo de tubería aletada, por donde circula el agua caliente previamente calentada en un intercambiador de placas por el agua geotérmica, el intercambiador es a contra corriente, a lo largo de todo el túnel, el agua mas caliente esta en contacto con el aire mas caliente a punto de ingresar a la cámara. El incluir el intercambiador de placas se debe a los problemas de corrosión que podría presentar en el intercambiador de agua-aire el fluido geotérmico. Para las pruebas se calentara el agua con un boiler casero, haciendo el papel del intercambiador de placas.

El circuito de agua caliente secundario está conectado a una bomba de que le suministra la energía necesaria para vencer la caída de presión en el intercambiador de tubería aletada y asegurar que fluya por todos los tubos aletados. El deshidratador contara con un sensor de temperatura dentro del gabinete que estará conectado a la válvula de control de alimentación de agua geotérmica, para abrirla más en caso de que la temperatura no sea la óptima o para cerrarla en caso de que se esté excediendo.



*Esquema del deshidratador.*



*Vista en CAD del deshidratador.*

## 4.2 DIMENSIONES DEL DESHIDRATADOR

El gabinete mide 2.56 m de largo por 55 cm de ancho y 57 cm de alto, los espesores de las paredes son de 19mm, el ingreso de aire al gabinete es de 45cm x 20cm y la salida es de 12.5cm de diámetro, los bastidores de las bandejas están separados 4cm entre cada uno, que es el valor optimo encontrado en la literatura. El túnel mide 2.30 m de largo, y tiene un área transversal de 22 x 40cm. El ingreso del aire corresponde a la salida del ventilador de 9 x 11cm, la toma de aire del ventilador tiene 10cm de diámetro. Los intercambiadores miden 1.70 de largo y tienen 35 cm de ancho, los tubos aletados están separados 8 cm cada uno. La tubería aletada tiene 5/8" de diámetro y la tubería principal es de 1". El intercambiador se encuentra a 7cm de la base del túnel y los tubos principales están separados 9 cm entre cada uno; cada tubo aletado tiene 250 aletas por metro lineal, las aletas miden 1.5" de diámetro máximo, 1 mm de espesor y están separadas 3 mm cada una. Las bandejas miden 98cm x 48cm.

|   |     |                |
|---|-----|----------------|
| Numero de bastidores por columna                      | 12  |                |
| Espacio entre las charolas                            | 4   | cm             |
| Área de cada charola $A$                              | .5  | m <sup>2</sup> |
| Área de salida del ventilador $A_0$                   | .01 | m <sup>2</sup> |
| Área transversal del túnel $A_1$                      | .1  | m <sup>2</sup> |
| Área transversal del gabinete lleno de bandejas $A_2$ | .2  | m <sup>2</sup> |
| Área de la chimenea $A_3$                             | .01 | m <sup>2</sup> |
| Altura de la chimenea                                 | 50  | cm             |
| Largo representativo del túnel                        | 2   | m              |
| Largo sección de gabinete con charolas                | 2   | m              |
| Diámetro de tubería principal                         | 1   | in             |
| Diámetro de tubería transversal aletada               | 5/8 | in             |
| Diámetro máximo de aleta                              | 1.5 | in             |
| Espesor de la aleta                                   | 1   | mm             |
| Espacio entre aletas                                  | 3   | mm             |
| Ancho de intercambiador                               | 35  | cm             |
| Espacio entre tubos transversales aletados            | 8   | cm             |
| Espacio vertical entre tubos principales              | 9   | cm             |
| Numero de filas de tubería aletada                    | 20  |                |
| Numero de columnas de tubería aletada                 | 2   |                |

*Resumen de medidas necesarias para el diseño.*



### 4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

El deshidratador se instalara dentro del terreno rentado al proyecto IMPULSA, en la playa de Punta Banda a unos kilómetros al sur de Ensenada. El lugar está muy cerca del valle del Maneadero, una zona altamente productora de jitomates. Se probara en la ciudad de México, para lo cual se definen las condiciones de sitio. En ambos casos la temperatura media es similar, pero en el primer caso la humedad relativa es más alta al tener cercanía con el océano, y por lo tanto el proceso de deshidratación será mas largo.



*Mapa de la zona del sur de Ensenada [earth.google.com]*

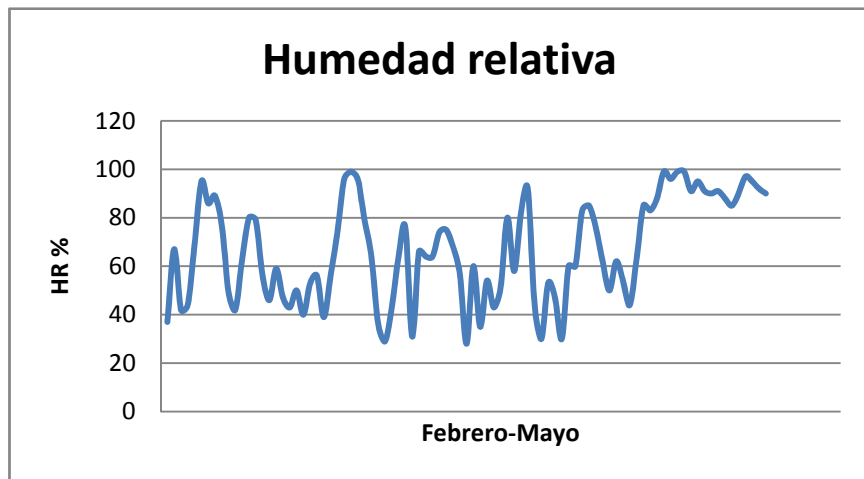
Las condiciones de operación de temperatura y velocidad del aire en las bandejas, fueron basadas en experimentos realizados anteriormente para encontrar las mejores condiciones de deshidratación.

El espesor del alimento se considerara lo mas pequeño posible, para una rápida deshidratación, pero no debe disminuir demasiado la masa de alimento en la bandeja, ya que esto llevara una menor producción.

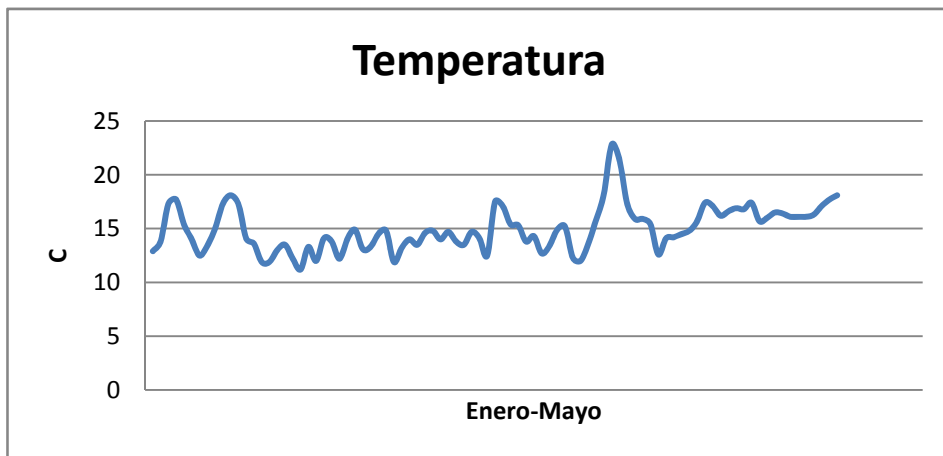
La materia prima a secar será tomate saladette, el cual tiene un promedio de 93 g de agua por cada 100g y se planea deshidratar hasta un contenido de humedad del 15%.

| PARAMETROS                     |                              | México DF | Ensenada |
|--------------------------------|------------------------------|-----------|----------|
| Temperatura del aire de secado | $T(C)$                       | 50        | 50       |
| Velocidad del aire             | $V(m/s)$                     | 1         | 1        |
| Humedad relativa               | $HR(\%)$                     | 50        | 80       |
| Temperatura ambiente           | $T_{amb}(C)$                 | 20        | 17       |
| Humedad inicial del tomate     | $X_o (kg_{agua}/kg_{total})$ | 93        | 93       |
| Espesor del alimento           | $z (cm)$                     | 1         | 1        |
| Humedad final esperada         | $X_f(\%)$                    | 15        | 15       |

*Condiciones de operación*



*Valores de humedad relativa del aire durante el 2009 en Ensenada BC [Sistema meteorológico nacional SMN]*



*Valores de temperatura ambiente en Ensenada BC [SMN]*

## 4.4 FLUJO DE AIRE.

Para dimensionar el ventilador centrífugo es necesario conocer la velocidad del aire y las pérdidas de carga, un correcto dimensionamiento del equipo evita tener un equipo sobrado que no trabajara a plena carga y su eficiencia disminuya.

La velocidad del aire a través de las charolas es la condición de operación. Conociendo el área transversal de esa sección del deshidratador se calcula el flujo de aire

$$m_a = \rho * V * A_2 \text{-----}(1)$$

$\rho$ : densidad del aire (se tomara como constante)

$V$ : velocidad del aire a través de las bandejas.

$$m_a = .256 \text{ kg/s} = 15.4 \text{ m}^3/\text{min} = 923 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con este dato ya es posible empezar a dimensionar el ventilador.

De la ecuación de la energía en estado permanente, sin considerar transferencia de calor ni incremento de temperatura, y manteniendo la densidad del aire constante se tiene:

$$E + \rho V_0^2/2 + P_0/(\rho * g) + \rho * g * z_0 = \rho V_s^2/2 + P_s/(\rho * g) + \rho * g * z_s + \text{Perdidas} \text{-----} (2)$$

$E$ : energía del ventilador (Pa)

$z_0, z_s$ : niveles de energía potencial (m)

$V_0$ : velocidad en la toma de aire (m/s)

$V_s$ : velocidad a la salida (m/s)

$P_0$ : presión de succión (Pa)

$P_s$ : presión de salida (Pa)

$g$ : gravedad (m/s<sup>2</sup>)

Si consideramos que la velocidad inicial del aire es cero, ya que se toma del aire quieto exterior; y considerando a todo el deshidratador como un volumen de control, la succión y la descarga se hacen a la misma presión; y además no existe variación considerable de la altura de energía potencial en el trayecto de flujo, queda de la ecuación (2) que la energía que tiene que proporcionar el ventilador es la cinética del aire mas las pérdidas dentro del trayecto.

$$E = V_s^2 / (2 * g) + \text{Perdidas} \text{-----} (3)$$



*Esquema representativo del balance de energía*

Para la energía cinética que tiene que proporcionar el ventilador, se tiene que conocer la velocidad de salida, del aire. Para conocer esta última se necesita el área transversal de flujo de la sección de escape.

$$V_s = m_a / A_s \text{-----} (4)$$

Las pérdidas se van a dividir en las pérdidas por fricción y las pérdidas locales.

Las pérdidas por fricción se van a calcular a través de la ecuación (5) y van a depender de la sección que este atravesando el aire.

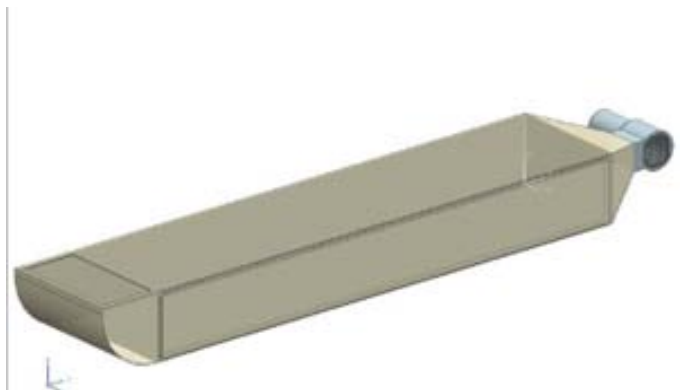
$$\Delta P_f = f * L * \rho * V_*^2 / 2 D_e \text{-----} (5)$$

*f*: factor de fricción

*L*: longitud equivalente (longitud que recorre)

*V\**: velocidad en la sección

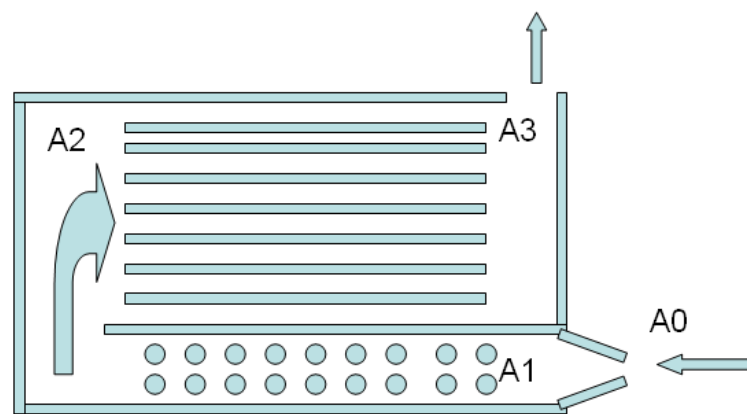
*D<sub>e</sub>*: diámetro equivalente de la sección.



*Vista en CAD del ventilador acoplado al túnel*

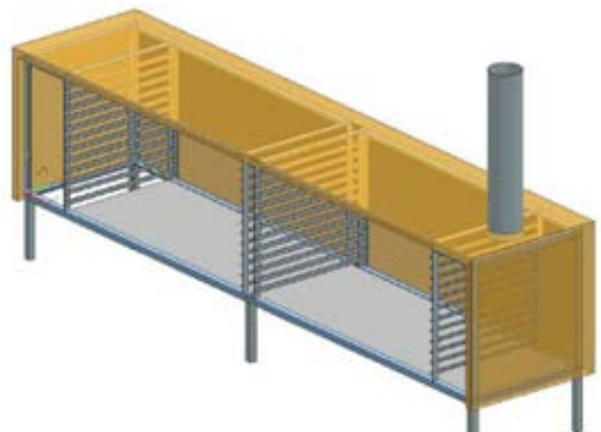
El factor de fricción de se va a calcular a partir del diagrama de Moody, se observa que para flujos turbulentos de números de Reynolds grandes (como seguramente se comportara el flujo de aire) se tiene una relación aproximada directa con el factor de fricción a partir de la rugosidad relativa que está en función del material y la longitud equivalente, es decir, no importa ya la viscosidad en flujo turbulento.

En las pérdidas locales se consideraran solo las perdidas por los cambios de sección y las perdidas en el intercambiador de calor, los cambios de dirección y los obstáculos no se consideraran.



*Áreas transversales de flujo*

- Del ventilador al túnel
- Del túnel a la cámara llena de charolas.
- De la cámara a la chimenea.



*Vista en CAD del gabinete*

Para las pérdidas locales se tiene entonces:

$$\Delta P_m = .5 * \rho * K * V_*^2 \text{-----} (6)$$

Donde  $K$  es un factor en función del tipo de pérdida y en este caso de la relación de las áreas involucradas.

$$K = (1 - (A_1/A_2))^2 \text{-----} (7)$$

Para las pérdidas por el intercambiador de calor se utilizarán las relaciones existentes para la configuración de tubos aletados correspondiente.

$$Re = \rho * D_e * V_* \text{-----} (8)$$

Para todos los casos las pérdidas se van a evaluar en función de una caída de presión.

Así se obtiene una caída de presión total en todo el trayecto del flujo, correspondiente a las pérdidas por fricción, locales y por el intercambiador, esta caída de presión debe ser vencida por el ventilador.

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \Delta P_f + \Delta P_i$$

$$\Delta P_t = 95.7 \text{ (Pa)} = 10 \text{ mmca}$$

Se tienen las pérdidas en pascuales, para evaluar las pérdidas en potencia, se multiplica la caída de presión por el flujo de aire entre la densidad  $m_a / \rho$ . De la misma manera para la energía cinética que esa expresada en términos de presión.

Entonces la potencia que tiene que suministrar el ventilador corresponde a la energía cinética que tiene el aire más las pérdidas dentro del trayecto.

$$E = P_{\text{velocidad}} + P_{\text{pérdidas}} \text{ (W)}$$

Considerando una eficiencia mecánica  $\eta_m = 50\%$  en el ventilador y una eficiencia eléctrica  $\eta_e = 65\%$  correspondiente al motor del mismo, la potencia eléctrica  $\Psi$  para la máquina es:

$$\Psi = E / (\eta_m * \eta_e) = 181 \text{ (W)}$$

## 4.5 TRANSFERENCIA DE CALOR.

Para dimensionar el intercambiador se requiere conocer la energía que se le tiene que suministrar al aire para alcanzar la temperatura de operación definida.

$$Q = m_a * C_{p_a} * (T - T_{amb}) \text{ (W)} \text{-----} (9)$$

$C_{p_a}$ : calor específico del aire que se considerara como constante

$$Q = 8.5 \text{ (kW)}$$

Esta es la energía que el agua debe suministrar,

$$Q = m_w * C_{p_w} * (T_{agua} - T_{sal}) \text{-----} (10)$$

$C_{p_w}$ : calor específico del agua que se considerara como constante

$T_{agua}$ : Temperatura de ingreso del agua caliente

$T_{sal}$ : Temperatura de salida del agua del intercambiador

$m_w$ : flujo de agua.

Igualar las ecuaciones 9 y 10 significa realizar un balance de energía en estado estacionario en el cual la energía que cederá el agua caliente es la que va a tomar el aire; considerando una eficiencia de transmisión del 90% se tienen dos incógnitas: el flujo de agua y la temperatura de salida del agua  $T_{sal}$ ; entonces se define el flujo de agua  $m_w$  que es una variable mas cómoda de controlar y así se obtiene la otra incógnita.

Ya con todas las temperaturas calculadas, se puede evaluar la temperatura media logarítmica, necesaria para dimensionar el intercambiador.

$$\Delta T_{ml} = (\Delta T_w - \Delta T_a) / (\ln(\Delta T_w / \Delta T_a)) \text{-----} (11)$$

Ahora se requiere evaluar el coeficiente global de transferencia de calor del aire que fluye a través del intercambiador. Para lo cual usaremos las correlaciones para tubería aletada y la geometría especificada por el tipo de intercambiador; se calcula el número de Reynolds del aire que fluye a través del intercambiador y con las correlaciones se obtiene el número de Nusselt correspondiente.

Ya con el Nusselt es posible evaluar, el coeficiente de transferencia de calor por convección, que es el que se ha considerado como global. No se ha considerado el

coeficiente de conveccion del agua en el interior de los tubos, ni el coeficiente de conducción a través de estos últimos, ni el coeficiente de radiación

$$Nu = h_c * D_{al} / k \text{-----} (12)$$

$D_{al}$  : diámetro de aleta.

$k$  : coeficiente de conduccion del aire.

Ya calculado  $h_c$  y  $\Delta T_{ml}$  se puede conocer el área de transferencia de calor necesaria.

$$Q = h_c * A_{tot} * \Delta T_{ml} \text{-----} (13)$$

De la ecuación 13 se despeja el área de transferencia de calor.

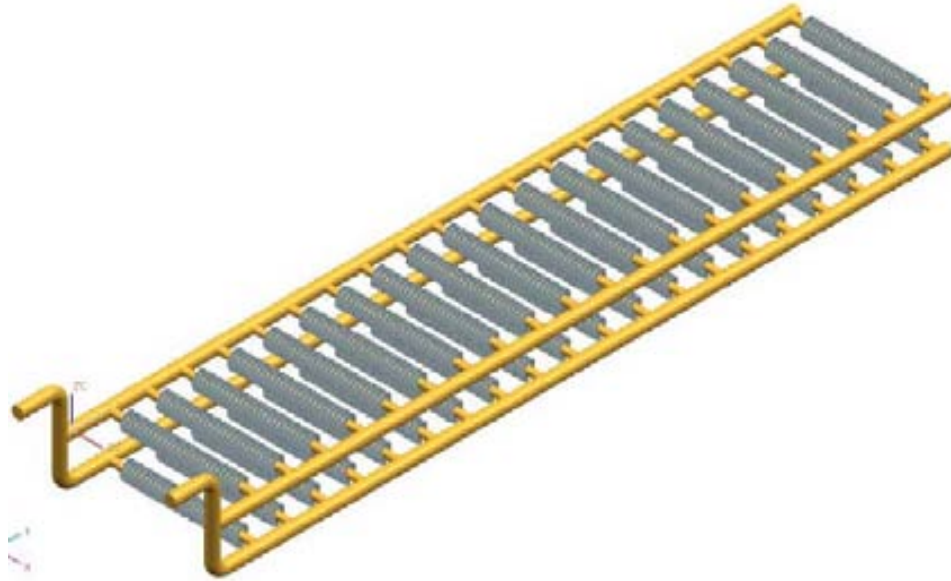
$$A_{tot} = 8.85 \text{ m}^2$$

De la geometría de la tubería aletada, se puede calcular el área de transferencia por metro lineal de aleta y así obtener la cantidad de tubería aletada necesaria. (16 m).

Las pérdidas de calor al exterior no son consideradas debido a los materiales aislantes de construcción que las minimizan.

El intercambiador de calor esta diseñado para tener una caída de presión pequeña, cuenta con dos cabezales principales, uno de entrada y otro de salida, y a su vez estos tienen dos ramales principales, de los que se desprenden transversalmente los tubos aletados, es decir estos corren de un cabezal a otro, y esto disminuye la caída de presión; pero aun así para evaluar la caída de presión se va a considerar el flujo a través de un tubo de las mismas características y la longitud correspondiente a la longitud total del arreglo, es decir como si no hubiera ramificaciones si no un tubo muy largo; esto proporcionara un valor sobrado, pero que asegurara que el agua fluya a través de todas las ramificaciones de los tubos.





*Diseño en CAD del intercambiador*

$$\Delta P = f \cdot L_{total} \cdot \rho_w \cdot V_w / 2D_i \text{-----(14)}$$

- D<sub>i</sub>: Diámetro interno del tubo*
- L<sub>total</sub>: Longitud total del tubo aletado.*
- V<sub>w</sub>: Velocidad del agua*
- f: Factor de fricción en el tubo*

Ya con la caída de presión se evalúa la potencia de bombeo necesaria, considerando una eficiencia de bombeo  $\eta_b$  global del 40 %.

$$W_b = (1 / \eta_b) \cdot m_w \Delta P_t / \rho_w \text{----- (15)}$$

$$W_b = 83.3 [W]$$

#### **4.6 FLUJO DE AGUA GEOTERMICA.**

Para la energía térmica requerida por el proceso se tiene una temperatura de agua caliente en pozos desde 90 hasta 70 C, que será aprovechada mediante un intercambiador de calor de placas. Considerando una eficiencia en la transmisión de calor del 80%, una delta de temperaturas en el agua geotérmica de 10 C, y considerando un calor específico de esta igual a 5 kJ/kgK, se dimensiona el flujo de agua requerido:

$$m_{geo} = .4 \text{ kg/s} = 1.5 \text{ ton/h}$$

Con lo cual ya se tiene el requerimiento de agua caliente geotérmica, y se puede suministrar directamente desde la salida del pozo o como agua de proceso secundario, por ejemplo después del separador de una planta de potencia o a la salida de un chiller de absorción. El deshidratador se puede integrar ya a los otros proyectos geotérmicos planeados para esa zona de Ensenada por el proyecto IMPULSA.

## 4.7 TIEMPO DE SECADO

El objetivo del deshidratador es que se instale en Ensenada BC donde las condiciones de sitio y operación son diferentes, si bien es cierto que la estimación del tiempo de secado es complicada y sujeta a demasiados parámetros, entre ellos los factores de transferencia de masa, aun así el siguiente calculo permite estimar de manera general el tiempo de secado, utilizando relaciones empíricas y experimentales encontradas en la literatura a partir de los datos operativos y de sitio.

De hecho el valor de humedad de equilibrio y de humedad critica, obtenidos de las curvas de sorcion en la literatura cambian conforme cambia la humedad relativa del lugar aunque la temperatura de operación de mantenga igual; aun así se espera obtener un buen valor representativo para efectos de un análisis preliminar.

Primero se va a obtener la humedad absoluta del aire ambiente que ingresa al deshidratador, a partir de la humedad relativa del sitio, la temperatura ambiente y la presión atmosférica. De estas últimas se obtiene la presión de vapor del aire que entra al ventilador:

$$P_v = P_{sat \ T_{amb}} * HR \ (Pa) \text{-----} (16)$$

*P<sub>v</sub>*: presión de vapor del aire

*P<sub>sat T<sub>amb</sub></sub>*: presión de saturación a la temperatura ambiente.

*HR*: humedad relativa del sitio.

Con la presión de vapor y la presión atmosférica se obtiene el contenido de humedad absoluto del aire.

$$w = .622 * P_v / (P_v - P_{atm}) \ (kg_{h2o} / kg_{aire}) \text{-----} (17)$$

En el proceso de calentamiento del aire va a existir una reducción en la humedad relativa, aunque la humedad absoluta se mantiene constante, es decir la humedad absoluta del aire ambiente que ingresa al ventilador es la misma que la humedad absoluta del aire que sale de los intercambiadores, aunque su humedad relativa habrá disminuido considerablemente.

Con los datos de humedad absoluta y de temperatura de bulbo seco de operación, se calcula la humedad relativa del aire que ingresara a la cámara.

$$HR = P_{atm} * w / ((.622+w) * P_{sat Tbs}) \text{-----}(18)$$

Entonces con los datos de temperatura de bulbo seco, humedad absoluta y relativa dentro del deshidratador, se hace uso de la carta psicrométrica y se obtiene la temperatura de bulbo húmedo del aire que esta deshidratando.

Por otra parte se necesita evaluar el coeficiente de transferencia de calor por conveccion del aire hacia el alimento, se usa una correlación obtenida en la literatura para el flujo paralelo a las charolas.

$$h_a = .0204(m_a * 3600 / A_2)^{.8} \text{ (W/kgK)} \text{-----} (19)$$

Ahora ya es posible estimar el tiempo de secado y se calcula por partes, la de periodo de velocidad constante, y la del periodo decreciente.

En el periodo de velocidad constante el tiempo está definido por la ecuación (sección 2.4.3.4 ecuación 4)

$$t = \rho_s * z * h_{fg}' * (X_o - X_c) / (h_a * (T - T_w))$$

En el periodo decreciente por la ecuación (sección 2.4.3.4 ecuación 9), llevando el valor de la humedad del alimento X hasta la condición final de diseño.

$$t = (\rho_s * z * h_{fg}' * (X_o - X_e)) / (h_a * (T - T_w)) * \ln((X_c - X_e) / (X_f - X_e)).$$

$\rho_s$  : densidad del jitomate (kg/m<sup>3</sup>)

z: espesor de la capa de jitomate (m)

$h_{fg}'$ : calor latente de evaporación a la temperatura de bulbo húmedo (kJ/kg)

T: temperatura de bulbo seco (C).

$T_w$ : temperatura de bulbo húmedo (C)

$X_0$ : humedad inicial ( $kg_{agua}/kg_{total}$ )

$X_c$ : humedad crítica ( $kg_{agua}/kg_{total}$ )

$X_f$ : humedad final deseada ( $kg_{agua}/kg_{total}$ )

$X_e$ : humedad de equilibrio ( $kg_{agua}/kg_{total}$ )

Los valores de  $X_e$  y  $X_c$  son tomados de la literatura y servirán para una estimación preliminar. El tiempo total será la suma de los tiempos.

| LUGAR     | Tiempo teórico (hrs) | Tiempo experimental (hrs) |
|-----------|----------------------|---------------------------|
| MEXICO DF | 17                   | 21                        |
| ENSENADA  | 20                   | pendiente                 |

El porcentaje de error es considerable debido a las múltiples suposiciones y variables involucradas, aun así es un buen indicador de una estimación gruesa de cuánto duraría el proceso de secado en otras condiciones.

## CAPITULO V

### CONSTRUCCION DEL DESHIDRATADOR.

En este capitulo tratara el detalle de la construcción del deshidratador, así como la justificación de las geometrías y los materiales utilizados para llegar al producto final.

#### 5.1 GABINETE y CHAROLAS.

El gabinete del deshidratador consiste en un cuarto de madera, con bastidores para soportar las bandejas, con dos puertas corredizas para ingresarlas y salidas e ingresos del aire de deshidratación.



*Vista del deshidratador terminado.*

El gabinete debe cumplir con una buena resistencia estructural, resistencia al ambiente, en su interior se debe tener un aislamiento térmico y mantenerse sin fugas, y además de cumplir con normas de higiene y limpieza dentro del mismo.

La madera se eligió por ser un material de bajo costo, de fácil maniobra y que además tiene un coeficiente de transferencia de calor bajo, es un sustituto óptimo para las paredes de acero con el cual están regularmente contruidos los deshidratadores de este tipo.

Tiene un recubrimiento de resina de poliuretano que le da la protección necesaria para todos los agentes ambientales, y que no reacciona ni se degrada a altas temperaturas, tampoco es toxico por lo cual fue usado para recubrir interna y externamente el deshidratador.

El gabinete esta montado en una estructura de hierro que le da el soporte necesario tanto al gabinete en si, al túnel de deshidratación y a los bastidores de las bandejas. El hierro tiene su recubrimiento que lo protege del ambiente corrosivo al que estará sujeto cerca del océano.

Dentro del deshidratador, se tienen los bastidores que consisten ángulos de ½" de aluminio unidos a la estructura principal, sobre estos descansaran las charolas.



*Vista interna del gabinete.*

Las puertas de ingreso de las bandejas son corredizas, de estructura de aluminio y hoja de policarbonato, el policarbonato es resistente a altas temperaturas, además que es de costo accesible, es aislante térmico y transparente, por lo cual se puede observar al interior del deshidratador y verificar que el flujo de aire no levante las rebanadas de alimento. Además de que este tipo de puertas ahorra espacio en la instalación y se tiene fácil acceso al mantenimiento del equipo.



*Vista de una puerta*

El deshidratador tiene una chimenea de lámina galvanizada en la parte superior del gabinete por donde el aire es expulsado. La chimenea es de fácil remoción y adaptación, para cuando se realice el estudio y se encuentren sus dimensiones óptimas.

El deshidratador tiene dos ingresos de agua caliente mediante manguera de hule reforzado, que soporta sin degradarse el agua caliente.

El piso está hecho de lámina galvanizada, para facilitar su limpieza, ya que estará siempre en contacto con el jugo del alimento que escurre; para aislarlo se tiene una capa de lana mineral en la base soportada con una capa de pvc espumado que está en contacto con el exterior, este material tiene buena resistencia al ambiente.



*Vista del piso del gabinete*

Todos los accesos y huecos en la madera e uniones están contruidos de tal forma que mantengan una hermeticidad dentro del gabinete, sin fugas ni ingresos de aire; en los contornos de las puertas y en diferentes lugares, se tiene hule para evitar las fugas de aire.

Las charolas están fabricadas de aluminio y malla criba de acero con recubrimiento epóxico de nueva generación. El aluminio es un material que por sus características es optimo para el uso en contacto directo con el alimento, de la misma manera la malla puede ser usada para el mismo fin. Las charolas tiene un marco de solera de  $\frac{1}{2}$  "y ángulo de 1" de aluminio, que le da estabilidad y al cual esta fija la malla criba.



*Vista de los bastidores y las charolas.*

El costo de fabricación de las charolas o bandejas de esta manera es mucho menor a utilizar rejilla de acero de acero inoxidable o lamina perforada de aluminio y de mucho mejor funcionamiento que charolas de plástico.

## **5.2 TUNEL DE CALEFACCION, VENTILADOR E INTERCAMBIADOR DE CALOR.**

El túnel de calefacción es el lugar por donde van a ir depositados los intercambiadores y por donde el flujo va a viajar, por lo tanto debe estar libre de polvo y estar protegido



estructuralmente, además de bien aislado térmicamente, ya que es donde se tiene la mayor temperatura y donde ocurre la transferencia de calor del agua al aire.



*Vista del túnel de calefacción.*

El túnel esta fabricado de lámina galvanizada y aislado con lana mineral, con una cubierta externa de papel aluminio que lo protege del exterior. El túnel esta soportado en la parte inferior de la estructura de hierro.

El túnel tiene en su salida un cuello de lona, que consiste en una extensión flexible de lona la cual permite unir el túnel de calefacción con el gabinete del deshidratador.



*Vista de las conexiones al deshidratador.*

En el inicio del túnel va acoplado el ventilador, un ventilador centrifugo de ¼ HP (187.5 W), que extrae el aire del exterior lo ingresa al túnel, a una razón de 1200 m<sup>3</sup>/h en descarga libre, lo cual que cumple con las necesidades del diseño ya en operacion; el ventilador tiene un filtro de malla fina para evitar que entren partículas grandes al túnel, además que el área donde esta la succión de aire, se mantenga limpia y libre de polvo, aun así es recomendable instalar un filtro auxiliar a la entrada del gabinete.



*Vista del filtro del ventilador y el difusor al túnel.*



*Vista del motor del ventilador.*

El intercambiador consiste en un arreglo de tubería aletada, que tiene cuatro cabezales secundarios y dos principales. El primer cabezal principal toma el agua del circuito de agua caliente y lo distribuye a través de dos cabezales secundarios, el segundo cabezal principal recibe el flujo de los otros dos cabezales secundarios y lo saca del deshidratador para su posterior calefacción; están fabricados de tubería de acero galvanizado con conexiones de CPCV de 1"; el acero galvanizado se utilizó por economía, y el CPCV para adaptar las dimensiones, pero lo ideal es que los cabezales principales cambien a tubería de cobre soldada. Estos se colocan a la entrada del aire a la cámara, para tener el sistema de transferencia a contra corriente.



*Vista de los tubos principales del intercambiador de calor.*

Los cabezales secundarios salen de los cabezales principales (2 por cada cabezal principal) y corren a lo largo de todo el túnel, son de tubería de cobre de 1" y tienen soldados transversalmente los tubos aletados, 20 tubos que salen de un cabezal y van a el otro, es decir se tienen dos cabezales de ida y dos de regreso. Transversalmente a los cabezales secundarios corren los tubos aletados, que es la parte medular del intercambiador de calor, son de 5/8 "de cobre con aleta de aluminio. Nótese que el arreglo transversal de las aletas evita un trabajo de bombeo excesivo a tener solo una entrada y una salida en el flujo de agua caliente. El cobre y el aluminio son excelentes conductores de calor y también resisten bien la corrosión del aire húmedo que estará circulando a través de ellos.

El detalle de la aleta es de 250 aletas por metro, con un espaciamiento de 3mm entre aleta y aleta y un espesor de aleta de 1 mm; el diámetro máximo de esta es de 1.5 ".

Para cubrir las necesidades del diseño se ocuparon 40 tubos aletados de 30 cm cada uno, distribuidos en los cabezales secundarios.



*Vista de la tubería aletada.*

### **5.3 BOMBA DE RECIRCULACION Y CIRCUITO DE AGUA CALIENTE.**

Para hacer fluir el agua a través de los tubos se requiere de un trabajo de bombeo, de acuerdo a las características calculadas en el capítulo IV, se selecciono una bomba de recirculación de 100W, que proporcione 0.7 l/s de flujo para la carga calculada.



*Vista de la bomba de recirculación.*

El circuito de circulación de agua es 1" de CPVC, PVC de alta densidad especial para agua caliente, el sistema cuenta con dos válvulas reguladoras, una para meter agua repuesto en caso de fugas o goteo, y para mantenimiento; y otra para llenar toda la tubería de la bomba de agua y arrancarla. El circuito de agua esta conectada al deshidratador mediante tubería flexible de hule reforzado.



*Vista de las conexiones y tuberías.*

El sistema fue conectado a un boiler casero alimentado por gas LP, para hacer la función en las pruebas del intercambiador de placas con fluido geotérmico.



*Vista del boiler de prueba*

## 5.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

La prueba en la ciudad de México se realizó para evaluar el funcionamiento general del deshidratador y así poder detectar fallas y cuestiones que serían más difíciles de mejorar o corregir en el sitio de instalación.



*Vista del deshidratador operando*

El experimento consistió en arrancar el circuito de agua con el boiler encendido, el termostato de este iba a mantener siempre una temperatura de 60 C en el agua de ingreso al circuito. Se verificó el peso inicial de la masa de alimento y se midió cercano al tiempo estimado en el cálculo. Estrictamente se debieron construir las curvas de secado midiendo periódicamente el valor del peso de las charolas, pero quedará para un análisis posterior más profundo, con equipo de medición y pre-tratamientos de tipo químico.



*Extracción de la charola para ser pesada.*

Con el peso y el contenido de humedad inicial se calculo la cantidad de solido seco del producto.

$$SS = m_0 * (1 - X_0)$$

*SS: solido seco.*

*m<sub>0</sub>: masa de alimento inicial*

*X<sub>0</sub>: humedad inicial*

Este valor de solido seco constante le fue restado a cada medición de masa, y así obtener el contenido de humedad para cada medición.

$$X = (m - SS) / m$$

*m: masa del alimento medido.*



*Producto deshidratado.*

## CAPITULO VI

### ANALISIS PRELIMINAR DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.

El producto obtenido hasta ahora con las condiciones especificadas, fue de buena calidad; en este capítulo se calculara su producción y en base a eso se realizara un análisis económico de primer nivel; se hará énfasis en el ahorro que produce el uso de energía geotermia en el proceso.

#### 6.1 PRODUCCION

Las charolas miden 1m x 50 cm y el espesor del alimento que manejaran es de 7 mm, entonces se tiene el volumen de jitomate que puede manejar la bandeja y con la densidad de este, la masa de jitomate por bandeja. Se tienen 24 bandejas que corresponden a un consumo de 92.4 kg por carga.

Del tiempo de deshidratación obtenido se tiene que en el año se pueden realizar 408 cargas trabajando continuamente, lo que requiere un consumo de 37.7 ton de materia prima y con la condición de reducción de humedad se obtiene una producción de 13.8 kg por carga correspondientes a 5.65 ton de producto deshidratado al año.

Aunque la reducción en masa es considerable de la materia prima al producto, el valor de este se incrementa sustancialmente pasando de los 9 \$/kg de la materia prima hasta los 150 \$/kg del producto deshidratado.

#### 6.2 AHORRO DE ENERGÍA AL USAR LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.

La energía térmica empleada en la deshidratación va a corresponder a la necesaria para calentar el flujo de aire durante el proceso, esta energía es suministrada gratuitamente por el agua geotérmica, ahorrando una enorme cantidad que seria suministrada por un combustible u otro medio, así entonces:

La potencia térmica requerida son 8.46 kW, que son los necesarios para calentar el flujo de aire desde la temperatura ambiente hasta la condición de operación, y esta energía tiene que ser suministrada a lo largo del proceso de deshidratación durante todo el año, lo que nos da un consumo de **263 GJ/ año**.

Si estos fueran suministrados por otros medios diferentes a la energía geotérmica se tendrían los siguientes costos que representan ahorros por energía geotérmica.

El peor de los casos seria suministrar esta energía térmica con una resistencia eléctrica la cual tiene una relación de conversión a lo más 1 a 1, en cuanto a los watts eléctricos



consumidos y los térmicos entregados al agua, considerando un precio de 1.2 \$/kWh, se tiene un costo de 92000 pesos al año.

Una opción alternativa sería utilizar una bomba de calor para suministrar la energía térmica, la bomba de calor puede tener una relación de 1:3 en cuanto a la energía térmica que entrega y la eléctrica que consume, pero aun así hay varios factores extras que limitan su uso. El costo de energía eléctrica consumida sería la tercera parte que con la resistencia eléctrica 31000 pesos al año.

En las pruebas en México DF, la energía fue suministrada por gas LP, y un boiler de 70 % de eficiencia; si se pensara en suministrar la energía mediante este medio durante todo el año, se tendría un costo de 76000 pesos al mes, considerando un precio del gas en 9 \$/kg, es decir con el poder calorífico del gas LP y su densidad se consumirían 8400 kg de gas al año.

El gas natural sería la forma convencional mas practica de suministrar esta energía, con sus 37500 kJ/m<sup>3</sup> de poder calorífico, una caldera de gas con un 80% de eficiencia consumiría 8770 m<sup>3</sup> de gas al año, y con un precio del gas de 3.3 \$/m<sup>3</sup> , se tendría un costo anual de **28938 pesos**, que representan el ahorro por energía geotérmica.

Además si se tiene la relación de que por cada kg de gas natural quemado se emiten 2.7 kg de CO<sub>2</sub>, con una densidad del gas natural en .7 kg/m<sup>3</sup>, se evita la emisión de casi **34 ton de CO<sub>2</sub>** a la atmosfera.

### 6.3 COSTO DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN.

El costo de inversión viene desglosado en dos grandes bloques, el deshidratador propiamente que incluye el gabinete y todos sus accesorios, y el túnel de calefacción con el intercambiador de calor.

El costo del intercambiador de placas y el control de temperatura se incluye al último también.

| <b>Deshidratador</b> | <b>\$</b> |
|----------------------|-----------|
| Cámara de secado     | 3500      |
| Estructura           | 4000      |
| Bandejas             | 2000      |
| Tubería aletada      | 3000      |
| Ventilador           | 1000      |

| Sistema de calefacción   | \$           |
|--------------------------|--------------|
| tunel                    | 3000         |
| Tuberías y válvulas      | 5000         |
| bomba                    | 1500         |
| <b>Subtotal</b>          | <b>23000</b> |
| control de temperatura   | 1000         |
| Intercambiador de placas | 4500         |
| otros gastos             | 10%          |
| <b>TOTAL</b>             | <b>28529</b> |

El costo de operación incluye en primer lugar, el costo por la electricidad de la bomba y el ventilador, después el costo de la materia prima, que es el más relevante de todos, ocupando más del 50% del costo total, y al último se toca de manera muy estimada el costo de mantenimiento y de manejo de producto.

| Equipo       | Potencia (kW) | t (horas/año) | kWh/año        | \$/kWh     | Costo anual    |
|--------------|---------------|---------------|----------------|------------|----------------|
| Bomba        | 0.08          | 8640          | 719.90         | 1.2        | 863.88         |
| Ventilador   | 0.18          | 8640          | 1565.07        | 1.2        | 1878.08        |
| <b>Total</b> | <b>0.26</b>   | <b>8640</b>   | <b>2284.97</b> | <b>1.2</b> | <b>2741.97</b> |

| Otros gastos anuales      | \$            |
|---------------------------|---------------|
| Consumo eléctrico         | 2742          |
| Operación y mantenimiento | 30000         |
| manejo de producto        | 120000        |
| Materia prima             | 303534        |
| Otros                     | 10000         |
| <b>Total</b>              | <b>466276</b> |

## 6.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE PRIMER NIVEL

Con estos costos podemos realizar un análisis de primer nivel acerca de la factibilidad del deshidratador.

|   |                |        |
|---|----------------|--------|
| Precio estimado del tomate deshidratado | 150            | \$/kg  |
| Producción anual                        | <b>4324.32</b> | kg/año |
| Ingresos                                | 648648         | \$/año |
| Costos de operación                     | 466276         | \$/año |
| VALOR NETO de INVERSION                 | 28,529         | \$     |
| BENEFICIO ANUAL NETO                    | <b>182,372</b> | \$     |
| TIEMPO DE RETORNO SIMPLE (PAY BACK)     | 1.88           | meses  |

Lo que nos muestra es un proceso altamente rentable, un proyecto pequeño de una inversión muy corta con grandes beneficios.

## CONCLUSIONES.

La energía geotérmica en México de baja entalpía presenta amplias oportunidades de desarrollo en diversas áreas, entre ellas el secado, pero también están las bombas de calor geotérmicas, los sistemas de generación eléctrica PWG, los sistemas “upgrading” de fluidos geotérmicos, etc. Existen diversos problemas asociados que se tienen que estudiar y solventar así como la necesidad que el sector industrial tenga la oportunidad de invertir en aprovechar en este recurso.

Se desarrollo un proyecto que muestra la factibilidad del uso de energía geotérmica para procesos industriales, y que puede llevar beneficios comunes en la región. Si bien el deshidratador elegido no es el más eficaz o el más moderno, si es un proyecto de aplicación real, en el que se pudo construir un prototipo para evaluar su funcionamiento y que traerá beneficios reales en caso de su puesta en operación y su construcción final.

El deshidratador prototipo produjo un tomate deshidratado de buena calidad, con una estimación de producción anual e ingresos que muestra la factibilidad técnica y económica de su fabricación.

La deshidratación incremento el valor del tomate lo que pudiera hacer atractivo un plan de negocios con los agricultores del Valle del Maneadero y demuestra que las energías renovables pueden ser un motor para el desarrollo del país en diversos aspectos.

El deshidratador es un anteproyecto que está sujeto a modificaciones antes de su instalación final, así como diversos estudios mas profundos con equipo que permita controlar los parámetros y encontrar las mejores condiciones de operación; realizar las curvas de secado del producto para aplicarlo en diversos lugares del país, así como analizar las tasas de producción con otros frutos cultivados en el lugar.

## ANEXO I

### SIMBOLOGIA

$\rho_a$ : densidad del aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_s$ : densidad del tomate [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_w$ : densidad del agua [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\eta$  : eficiencia

$\Delta T_w$ : delta de temperaturas en el agua [C]

$\Delta T_{ml}$ : temperatura media logarítmica [C]

$\Delta P_f$ : pérdidas por fricción [Pa]

$\Delta P_m$ : pérdidas locales [Pa]

$\Delta P_t$ : pérdidas totales [Pa]

$\Psi$ : Potencia eléctrica [W]

A: área de transferencia de calor [ $\text{m}^2$ ]

$C_{p_w}$ : calor específico del agua [ $\text{kJ}/\text{kgC}$ ]

$C_{p_a}$ : Calor específico del aire. [ $\text{kJ}/\text{kgC}$ ]

$D_e$ : diámetro equivalente. [m]

f: factor de fricción

g: gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

G: densidad de flujo de aire [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ ]

$h_{fg}'$ : calor latente del agua a  $T_w$  [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]

h: coeficiente de convección [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

HR: humedad relativa del aire [%]

L: longitud equivalente [m]

$m_w$ : flujo de agua [ $\text{kg}/\text{s}$ ]

$m_a$ : flujo de aire [ $\text{kg}/\text{s}$ ]

$m_{geo}$ : flujo de agua geotérmica

M: masa de alimento [kg]

$P_v$ : presión de vapor [kPa]

$P_{am}$ : presión atmosférica [kPa]

$P_g$ : presión de saturación a la temperatura del aire. [kPa]

$P_{vel}$ : potencia asociada a la velocidad [W]

$Q$ : calor transmitido por unidad de tiempo [W]

$t$ : tiempo [s]

$T_{geo}$ : Temperatura de agua geotérmica

$T_{sal\ geo}$ : Temperatura de salida del agua geotérmica

$T_{agua}$ : Temperatura del circuito de agua caliente

$T_{sal\ agua}$ : Temperatura de salida del agua caliente

$T$ : temperatura de bulbo seco [C].

$T_w$ : temperatura de bulbo húmedo [C].

$T_s$ : temperatura de la superficie del alimento [C].

$V_w$ : velocidad del agua [m/s]

$V$ : velocidad del aire [m/s]

$V_0$ : velocidad en la toma de aire [m/s]

$V_1$ : velocidad después del ventilador [m/s]

$V_2$ : velocidad en las bandejas [m/s]

$X$ : humedad del alimento [kg agua/kg alimento]

$X_o$ : humedad inicial [kg agua/kg alimento]

$X_e$ : humedad de equilibrio [kg agua/kg alimento]

$X_c$ : humedad crítica [kg agua/kg alimento]

$X_f$ : humedad final deseada [kg agua/kg alimento]

$\omega$ : humedad absoluta del aire [kg agua/kg aire seco]

$\omega'$ : humedad absoluta en estado de saturación [kg vapor/kg aire seco]

$W_b$ : potencia de bombeo [W]

$z$ : espesor del alimento en la bandeja [m]

## ANEXO 2

### MEMORIA DE CÁLCULO.

#### FLUJO DE AIRE.

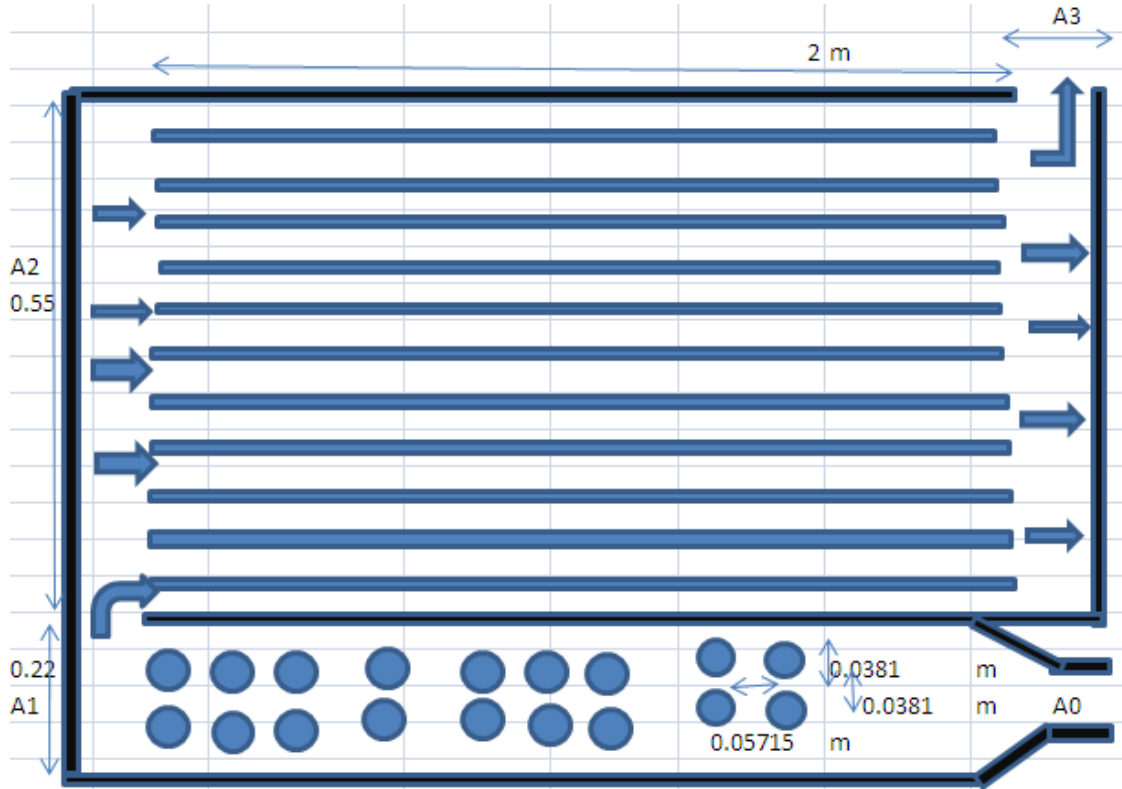
#### Condiciones de operación

|                                    |            |                   |                        |
|------------------------------------|------------|-------------------|------------------------|
| Temperatura ambiente               | 20         | C                 |                        |
| Humedad relativa del sitio         | 80         | %                 |                        |
| Temperatura del aire de secado     | 50         | C                 |                        |
| Temperatura del agua caliente      | 60         | C                 |                        |
| Velocidad del aire en las bandejas | 1          | m/s               |                        |
| densidad del aire                  | 1          | kg/m <sup>3</sup> | <i>valor constante</i> |
| viscosidad                         | 0.00002008 | kg/(ms)           | <i>valor constante</i> |
| Presión atmosférica                | 101        | kPa               |                        |

#### Esquema

|                                 |        |                |   |
|---------------------------------|--------|----------------|---|
| espesor de rebanada tomate      | 0.007  | m              |   |
| espacio entre bandejas          | 0.04   | m              |   |
| No. bandejas                    | 24     |                |   |
| No. columnas de bandejas        | 2      |                |   |
| ancho del túnel                 | 0.4    | m              |   |
| ancho de la cámara              | 0.55   | m              |   |
| alto de cámara                  | 0.55   | m              |   |
| alto de túnel                   | 0.22   | m              |   |
| área de flujo en la cámara      | 0.2563 | m <sup>2</sup> | <i>Considerando área obstruida por bandejas</i> |
| área del túnel                  | 0.088  | m <sup>2</sup> |   |
| diámetro chimenea               | 0.127  | m              | 5"  |
| diámetro de tubo intercambiador | 0.0159 | m              | 5/8"  |
| diámetro de tubo principal      | 0.0254 | m              | 1"  |
| diámetro máximo de la aleta     | 0.0381 | m              | 1.5"  |
| No. filas tubos                 | 20     |                |   |
| No. columnas de tubos           | 2      |                |   |
| Largo de cámara con bandejas    | 2      | m              |   |
| Largo de túnel                  | 2      | m              |   |
| ancho de salida de ventilador   | 0.09   | m              |   |
| alto de salida de ventilador    | 0.11   | m              |   |
| A0 salida del ventilador        | 0.0198 | m <sup>2</sup> |   |
| A1 área túnel                   | 0.088  | m <sup>2</sup> |   |
| A2 área de flujo de cámara      | 0.2563 | m <sup>2</sup> |   |

|                                 |      |                |                         |
|---------------------------------|------|----------------|-------------------------|
| A3 área de escape o de chimenea | 0.01 | m <sup>2</sup> |                         |
| espacio entre tubo aletado      | 0.76 | m              | 1 tubo de separación    |
| espacio entre tubos principales | 0.90 | m              | 1.5 tubos de separación |



|              |                    |                                 |                               |
|--------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| <b>Flujo</b> | <b>0.2563 kg/s</b> | <b>15.378 m<sup>3</sup>/min</b> | <b>922.68 m<sup>3</sup>/h</b> |
|              |                    | equipo                          | 1200 m <sup>3</sup> /h        |
|              |                    |                                 | con descarga libre            |

### Perdidas por fricción

|                        |         |     |
|------------------------|---------|-----|
| Rugosidad lamina túnel | 0.00005 | m   |
| Rugosidad bandejas     | 0.0005  | m   |
| Diámetro túnel         | 0.22    | m   |
| espacio entre bandejas | 0.03    | m   |
| e/D túnel              | 0.0400  |     |
| e/D bandejas           | 0.0167  |     |
| fricción túnel         | 0.01    |     |
| fricción cámara        | 0.015   |     |
| Longitud túnel         | 2       | m   |
| Longitud bandejas      | 2       | m   |
| Velocidad túnel        | 2.91    | m/s |



|                                |      |     |
|--------------------------------|------|-----|
| Velocidad en las bandejas      | 1    | m/s |
| Velocidad a la salida          | 6.95 | m/s |
| Perdidas fricción en el túnel  | 0.39 | Pa  |
| Perdidas fricción en la cámara | 6    | Pa  |
| Perdidas totales por fricción  | 6.39 | Pa  |

#### Perdidas locales

|                                |       |     |
|--------------------------------|-------|-----|
| k cambio de sección 0-1        | 0.90  |     |
| k cambio de sección 1-2        | 0.78  |     |
| k cambio de sección 2-3        | 1.00  |     |
| perdidas cambio sección 0-1    | 75.51 | Pa  |
| perdidas cambio sección 1-2    | 3.30  | Pa  |
| perdidas cambio sección 2-3    | 0.50  | Pa  |
| vel a la salida del ventilador | 12.94 | m/s |
| Perdidas locales               | 79.31 | Pa  |

#### Perdidas por intercambiador

|                       |          |     |                          |
|-----------------------|----------|-----|--------------------------|
| Velocidad en el túnel | 2.91     | m/s |                          |
| Re                    | 31909.86 |     |                          |
| perdidas              | 10.00    | Pa  | <i>De las relaciones</i> |

#### Caída de presión total

95.69 Pa      **10 mmca**

#### Perdidas totales

24.53 W

#### Energía cinética

52.46 W

#### Potencia del ventilador

|                      |        |   |
|----------------------|--------|---|
| Energía necesaria    | 76.99  | W |
| eficiencia mecánica  | 50.00  | % |
| Energía mecánica     | 153.97 | W |
| eficiencia eléctrica | 85.00  | % |

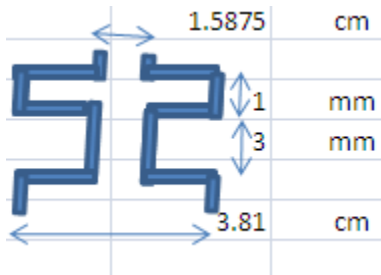
**energía eléctrica      181.14      W**

equipo      1/4 HP      187.5

## TRANSFERENCIA DE CALOR

|                                    |               |                      |
|------------------------------------|---------------|----------------------|
| Temperatura de agua                | 60            | C                    |
| Temperatura de aire                | 50            | C                    |
| Temp ambiente                      | 17            | C                    |
| Temp salida de agua                | 57.11         | C                    |
| flujo de aire                      | 0.2563        | kg/s                 |
| Cp aire                            | 1             | kJ/kg K              |
| Cp agua                            | 4.186         | kJ/kg K              |
| delta T agua                       | 2.89          | C                    |
| delta T aire                       | 33            | C                    |
| <b>Energía térmica requerida Q</b> | <b>8.4579</b> | <b>kW</b>            |
| eficiencia de transferencia        | 90            | %                    |
| <b>flujo de agua</b> bomba         | <b>0.70</b>   | <b>kg/s</b>          |
| Temp media log                     | 21.68         | C                    |
| Re                                 | 31910         |                      |
| De la grafica el Nusselt           | 60            |                      |
| k                                  | 0.028         | W/mK                 |
| h                                  | 44.09         | W/m <sup>2</sup> K   |
| Área de transferencia              | <b>8.85</b>   | <b>m<sup>2</sup></b> |

Corte de la aleta



|                                 |              |                   |
|---------------------------------|--------------|-------------------|
| No. aletas                      | 250          | aletas/m          |
| Área por aleta                  | 0.0022       | m <sup>2</sup>    |
| area por metro de aleta         | 0.54         | m <sup>2</sup> /m |
| <b>longitud de tubo aletado</b> | <b>16.43</b> | <b>m</b>          |

## Potencia de bombeo

*Perdidas en el intercambiador*

|     |          |   |
|-----|----------|---|
| e   | 0.000002 |   |
| D   | 0.015875 | m |
| e/D | 0.000126 |   |
| f   | 0.01     |   |
| L   | 16.43    | m |

|    |          |     |
|----|----------|-----|
| V  | 3.54     | m/s |
| dP | 64738.43 | Pa  |

*Perdidas en el circuito de agua*

|                |           |     |
|----------------|-----------|-----|
| e              | 0.0000050 |     |
| D              | 0.02540   | m   |
| e/D            | 0.00020   |     |
| f              | 0.00100   |     |
| L              | 5.00000   | m   |
| V              | 1.38146   | m/s |
| dP             | 187.84    | Pa  |
| otras perdidas | 10        | %   |

|                          |              |          |
|--------------------------|--------------|----------|
| caída de presión total   | 71418.89     | Pa       |
| Potencia de bombeo       | 49.99        | W        |
| eficiencia               | 60.00        | %        |
| <b>energía eléctrica</b> | <b>83.32</b> | <b>W</b> |

**Geotermia**

|                                 |             |             |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| T <sub>geo</sub>                | 80          | C           |
| T <sub>sal geo</sub>            | 75          | C           |
| eficiencia intercambiador       |             |             |
| placas                          | 80          | %           |
| Cp <sub>geo</sub>               | 5           | kJ/kgK      |
| <b>Flujo de agua geotérmica</b> | <b>0.42</b> | <b>kg/s</b> |
|                                 | 1.522422    | ton/h       |



## TIEMPO DE DESHIDRATACION

|                        |                 |                                     |              |                    |
|------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------|--------------------|
| Presión atmosférica    | 101             | kpa                                 |              |                    |
| $T_{amb}$              | 17              | C                                   |              |                    |
| $P_g$                  | 1.938           | kpa                                 |              |                    |
| densidad jitomate      | 1100            | kg/m <sup>3</sup>                   |              |                    |
| T bulbo seco           | 50              | C                                   |              |                    |
| HR ambiente            | 0.8             |                                     |              |                    |
| Presión de vapor       | 1.5504          | kPa                                 |              |                    |
| humedad absoluta       | 0.0097          | kg <sub>h2o</sub> /kg <sub>as</sub> |              |                    |
| $P_{sat}$ a $T_{bs}$   | 12.35           | kpa                                 |              |                    |
| HR de deshidratación   | 0.126           |                                     |              |                    |
| $T_w$                  | 27              | C                                   |              |                    |
| espesor de jitomate z  | 0.007           | m                                   |              |                    |
| $h_{fg}$ a $T_w$       | 2442.3          | kJ/kg                               |              |                    |
| %SS                    | 0.07            |                                     |              |                    |
| $X_o$                  | 0.93            |                                     |              |                    |
| $X_c$                  | 0.56            |                                     |              |                    |
| h                      | 0.01            | kW/m <sup>2</sup> K                 | 14.28        | W/m <sup>2</sup> K |
| $X_f$                  | 0.15            |                                     |              |                    |
| $X_e$                  | 0.08            |                                     |              |                    |
| $t_c$                  | 21188.07        | s                                   | 5.89         | h                  |
| $t_d$                  | 40793.20        | s                                   | 11.33        | h                  |
| <b>t</b>               | <b>61981.28</b> | <b>s</b>                            | <b>17.22</b> | <b>h</b>           |
| FS factor de seguridad |                 |                                     | 0.2          |                    |
|                        |                 |                                     | <b>20.66</b> | <b>h</b>           |

## PRODUCCION

|                                 |         |                   |
|---------------------------------|---------|-------------------|
| densidad del jitomate           | 1100    | kg/m <sup>3</sup> |
| área de la bandeja              | 0.5     | m <sup>2</sup>    |
| espesor del jitomate            | 0.007   | m                 |
| volumen en la bandeja           | 0.0035  | m <sup>3</sup>    |
| masa en la bandeja              | 3.85    | kg                |
| numero de bandejas              | 24      |                   |
| materia prima por carga         | 92.4    | kg                |
| cargas al mes                   | 34.85   |                   |
|                                 | 34      |                   |
| cargas al año                   | 408     |                   |
| materia prima al año            | 37699.2 | kg                |
| porcentaje de reducción en masa | 85      | %                 |

## producción

**13.86 kg/carga**

|         |        |
|---------|--------|
| 471.24  | kg/mes |
| 5654.88 | kg/año |

|  |     |       |
|--|-----|-------|
| precio del kg de jitomate crudo        | 9   | \$/kg |
| precio del kg de jitomate deshidratado | 150 | \$/kg |

### Ahorro por geotermia

|                          |            |        |
|--------------------------|------------|--------|
| <b>Energía requerida</b> | 8.46       | kW     |
|                          | 21922876.8 | kJ/mes |
|                          | 263.07     | GJ/año |

### Resistencia eléctrica

|                      |          |         |
|----------------------|----------|---------|
| Perdidas al ambiente | 5        | %       |
| Consumo              | 8.90     | kW      |
|                      | 76922.37 | kWh/año |
|                      | 1.2      | \$/kWh  |
|                      | 92306.85 | \$/año  |

### BOMBA DE CALOR

|                             |          |         |
|-----------------------------|----------|---------|
| COP                         | 3.00     |         |
| Energía eléctrica consumida | 25640.79 | kWh/año |
|                             | 1.2      | \$/kWh  |
|                             | 30768.95 | \$/año  |

### Gas lp

|                       |          |        |
|-----------------------|----------|--------|
| eficiencia calentador | 70       | %      |
| PC gas LP             | 92200    | btu/m3 |
|                       | 87810    | kJ/m3  |
|                       | 44627.37 | kJ/kg  |
| densidad gas lp       | 0.5376   | kg/lt  |
|                       | 3.66     | lt/m3  |
| gas al año            | 8421.31  | kg     |
| precio gas            | 9        | \$/kg  |
|                       | 75791.76 | \$/año |

### Gas natural

|                    |       |       |
|--------------------|-------|-------|
| eficiencia caldera | 80    | %     |
| PC gas             | 37500 | kJ/m3 |

|                     |                 |               |
|---------------------|-----------------|---------------|
| Volumen de gas      | 8769.15072      | m3            |
| precio gas          | 3.3             | \$/m3         |
| costo anual por gas | <b>28938.20</b> | <b>\$/año</b> |

|                    |                 |           |
|--------------------|-----------------|-----------|
| co2 a la atmosfera | <b>33823.87</b> | <b>kg</b> |
|--------------------|-----------------|-----------|

### **COSTO DE INVERSION**

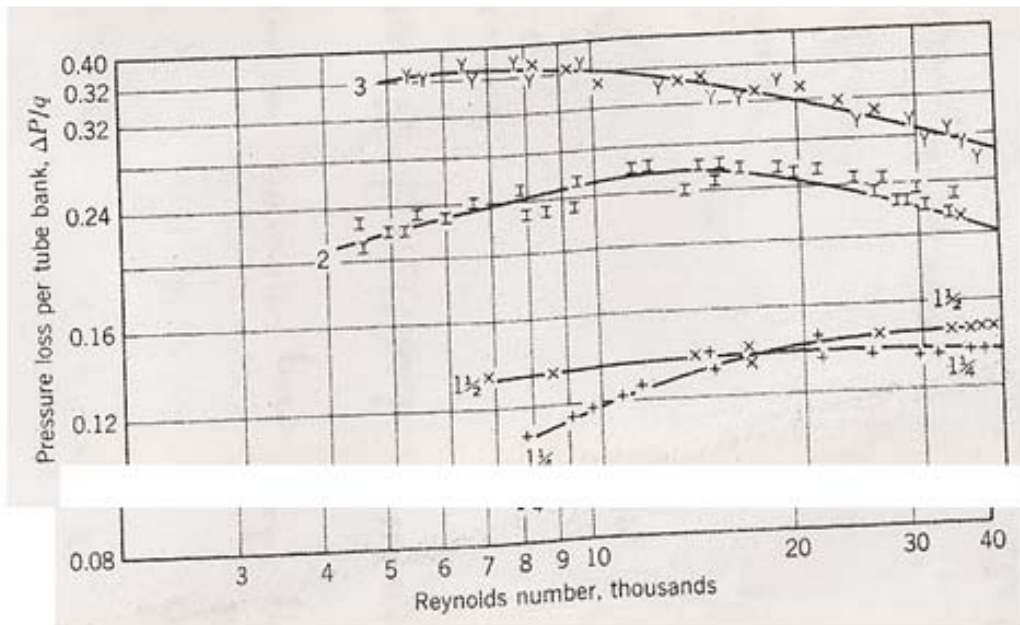
| <b>Deshidratador</b>          | <b>\$</b>    |
|-------------------------------|--------------|
| Camara de secado              | 3500         |
| Estructura                    | 4000         |
| Bandejas                      | 2000         |
| Tuberia aletada               | 3000         |
| Ventilador                    | 1000         |
| <b>Sistema de calefaccion</b> | <b>\$</b>    |
| tunel                         | 3000         |
| Tuberias y valvulas           | 5000         |
| bomba                         | 1500         |
| <b>Subtotal</b>               | <b>23000</b> |
| control de temperatura        | 1000         |
| Intercambiador de placas      | 4500         |
| otros gastos                  | 10%          |
| <b>TOTAL</b>                  | <b>28529</b> |

### **COSTO DE OPERACION**

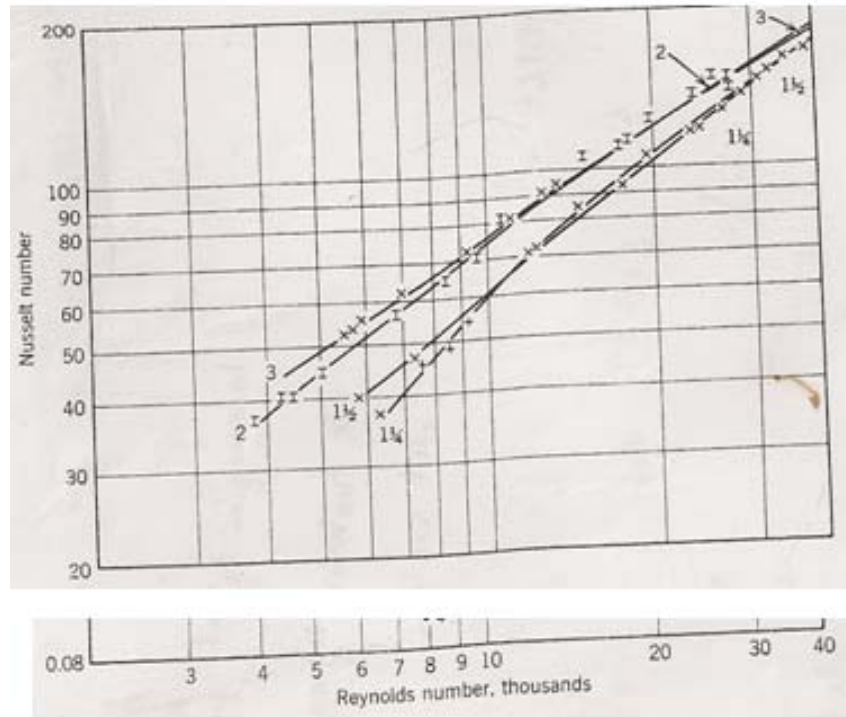
| <b>Equipo</b>               | <b>Potencia (kW)</b> | <b>t (horas/año)</b> | <b>kWh/año</b> | <b>\$/kWh</b> | <b>Costo anual</b> |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------|---------------|--------------------|
| Bomba                       | 0.08                 | 8640                 | 719.90         | 1.2           | 863.88             |
| Ventilador                  | 0.18                 | 8640                 | 1565.07        | 1.2           | 1878.08            |
| <b>Total</b>                | <b>0.26</b>          | <b>8640</b>          | <b>2284.97</b> | <b>1.2</b>    | <b>2741.97</b>     |
| <b>Otros gastos anuales</b> |                      |                      |                |               | <b>\$</b>          |
| Consumo electrico           |                      |                      |                |               | 2742               |
| Operación y mantenimiento   |                      |                      |                |               | 30000              |
| manejo de producto          |                      |                      |                |               | 120000             |
| Materia prima               |                      |                      |                |               | 303534             |
| Otros                       |                      |                      |                |               | 10000              |
| <b>Total</b>                |                      |                      |                |               | <b>466276</b>      |

## ANALISIS ECONOMICO

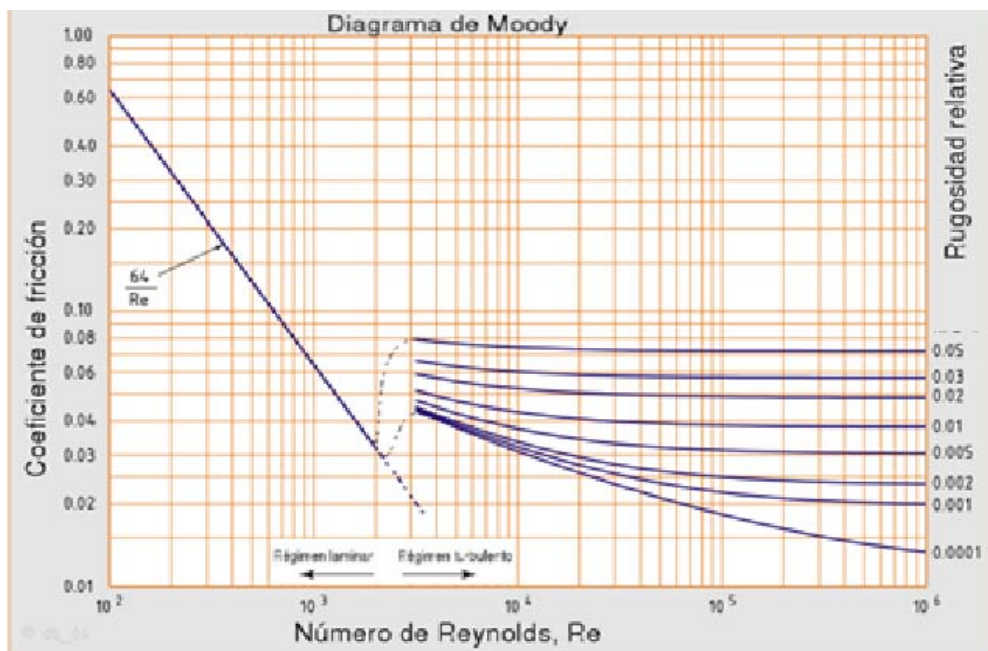
|   |           |             |
|---|-----------|-------------|
|   |           | <b>0.12</b> |
| Precio estimado del tomate deshidratado | 150       | \$/kg       |
| Produccion anual                        | 5654.88   | kg/año      |
| Ingresos                                | 848232    | \$/año      |
| Costos de operación                     | 466276    | \$/año      |
| VIDA UTIL                               | 20        | años        |
| TASA DE DESCUENTO                       | 12        | %           |
| FACTOR DE VALOR PRESENTE                | 7.469     |             |
| VALOR NETO de INVERSION                 | 28,529    | \$          |
| BENEFICIO ANUAL NETO                    | 381,956   | \$          |
| TIEMPO DE RETORNO SIMPLE (PAY BACK)     | 0.90      | meses       |
| VALOR ACTUALIZADO de los BENEFICIOS     | 2,852,999 | \$          |
| BENEFICIO NETO VPN                      | 2,824,471 | \$          |
| RELACION BENEFICIO COSTO                | 100.0     |             |



Relación entre la caída de presión y el número de Reynolds para tubería aletada y su espaciamento. [Fraas Arthur, Heat Exchanger Design, Wiley 1989]



Relación entre el número de Reynolds y el número de Nusselt para tubería aletada [Fraas Arthur, Heat Exchanger Design, Wiley 1989]







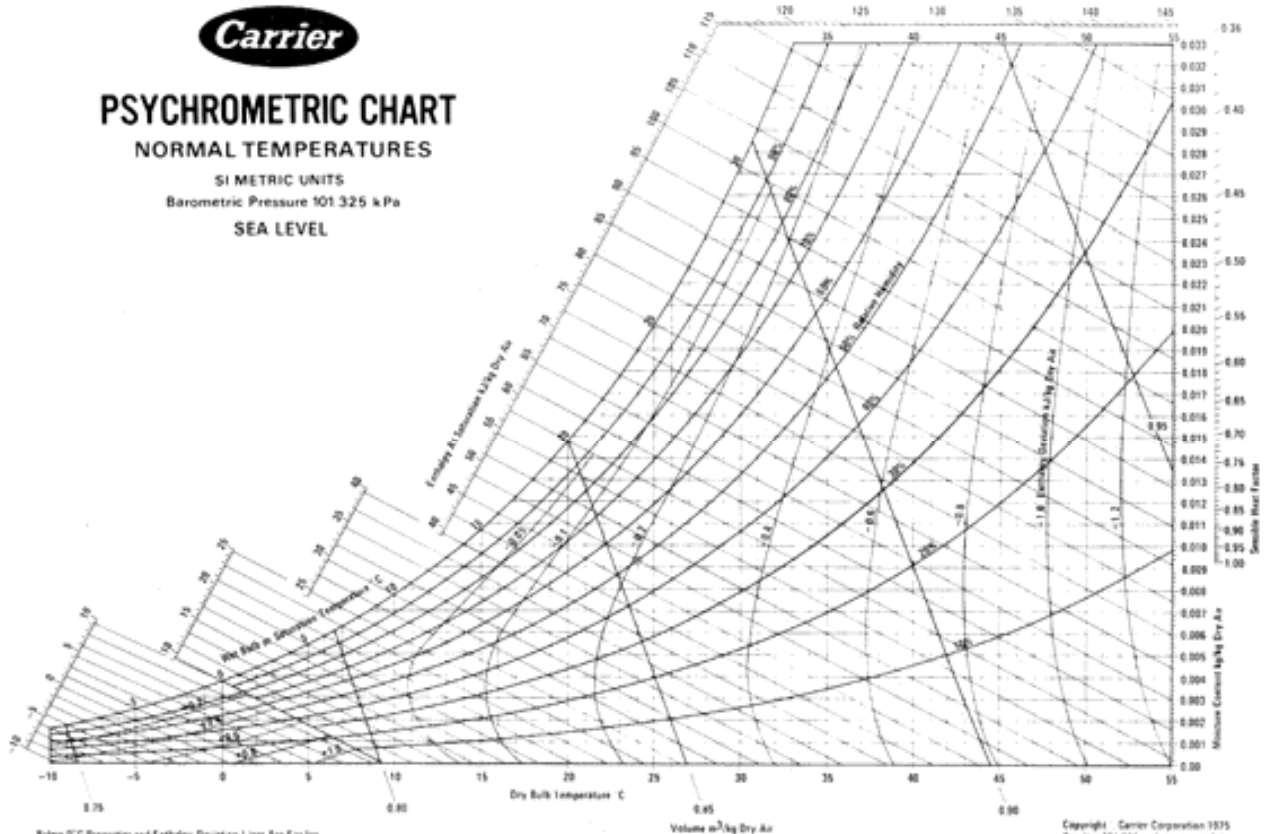
# PSYCHROMETRIC CHART

NORMAL TEMPERATURES

SI METRIC UNITS

Barometric Pressure 101.325 kPa

SEA LEVEL



Below 0°C Properties and Enthalpy Deviation Lines Are For Ice

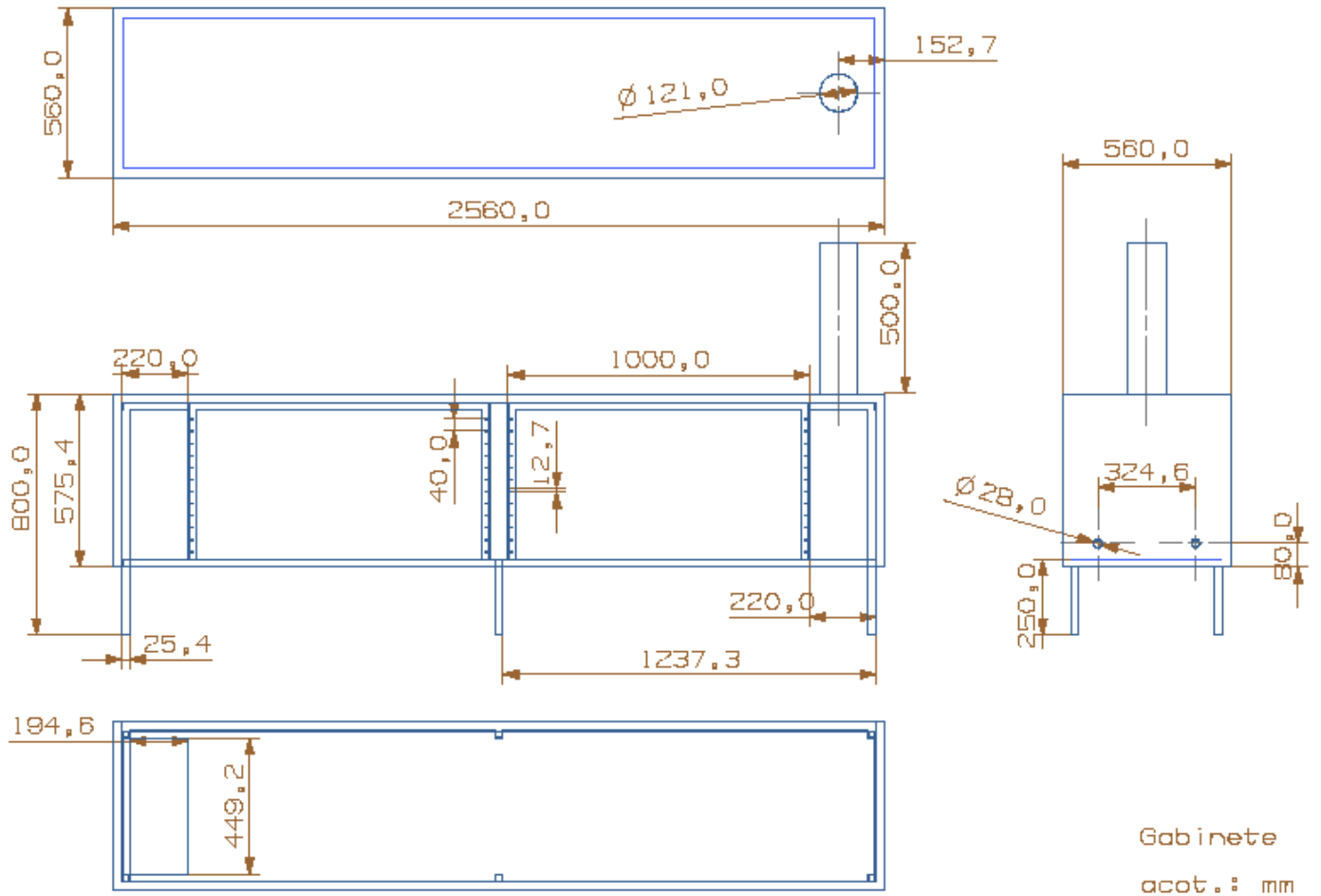
Volume in  $\frac{1}{3}$  kg Dry Air

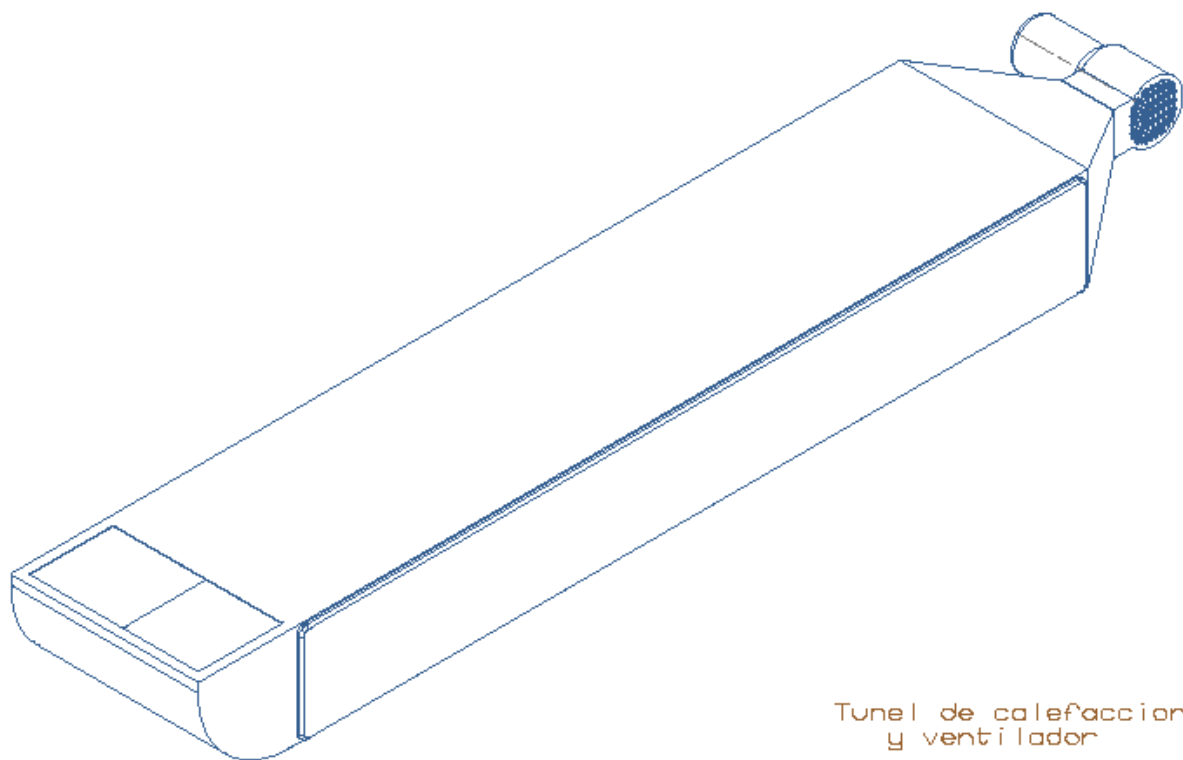
Copyright Carrier Corporation 1975  
Cat. No. 194-002 Printed in U.S.A.

Reproduced courtesy of Carrier Corporation

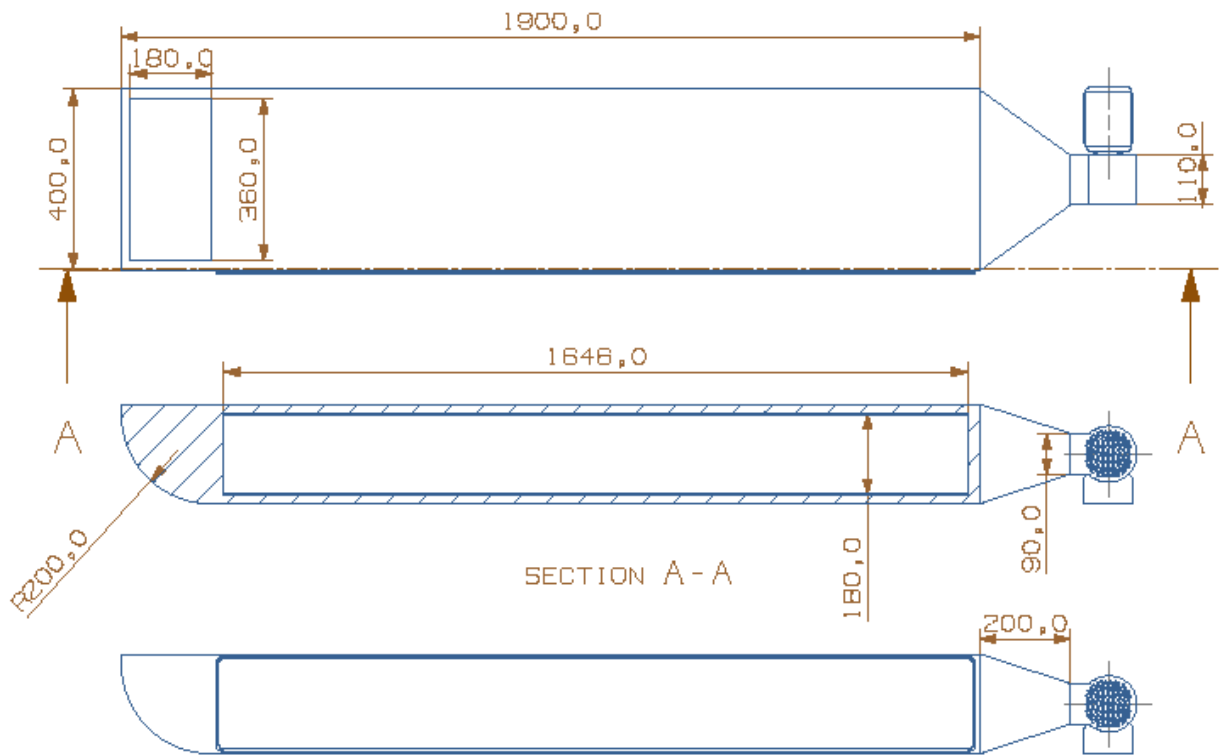
# ANEXO 3

## PLANOS DEL DEHIDRATADOR

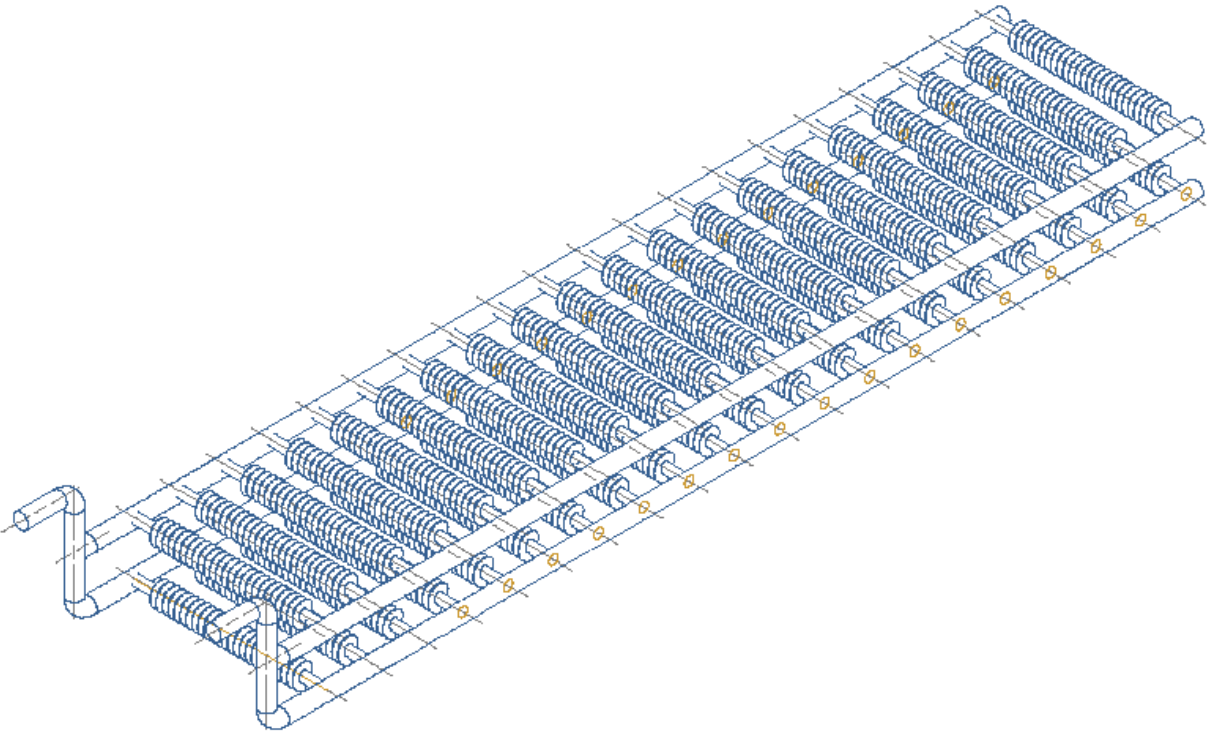


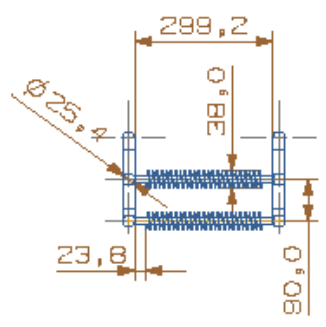
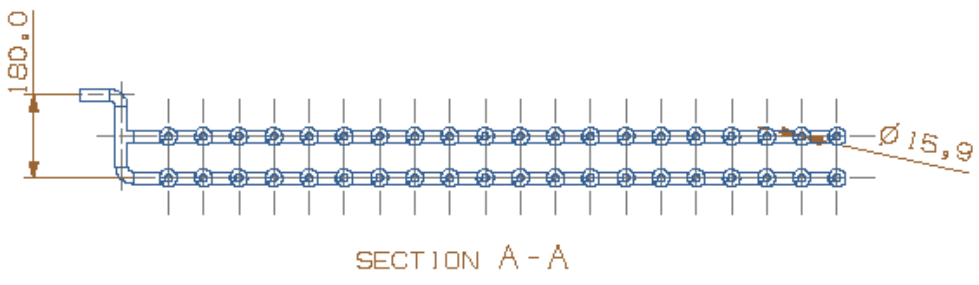
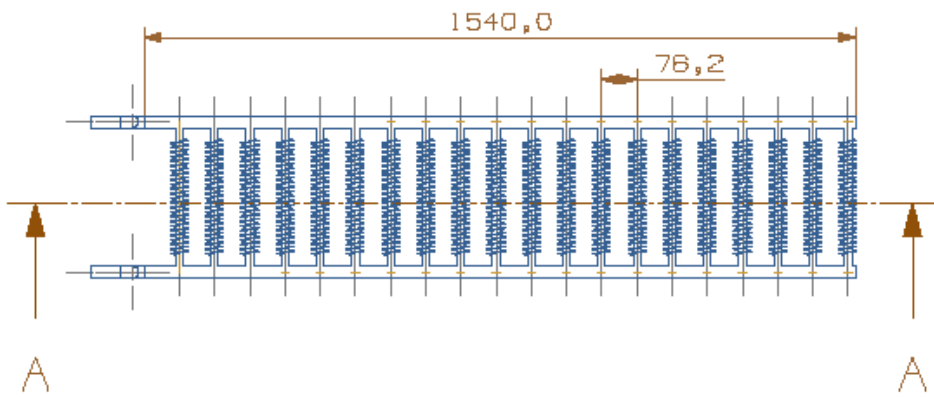


Tunel de calefaccion  
y ventilador

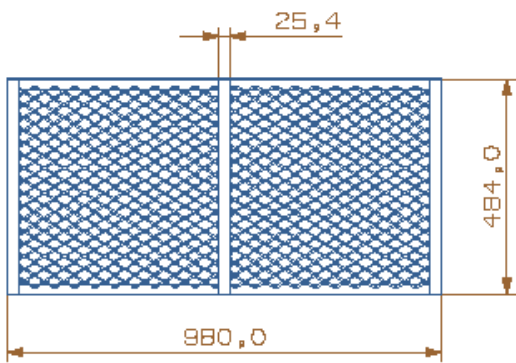
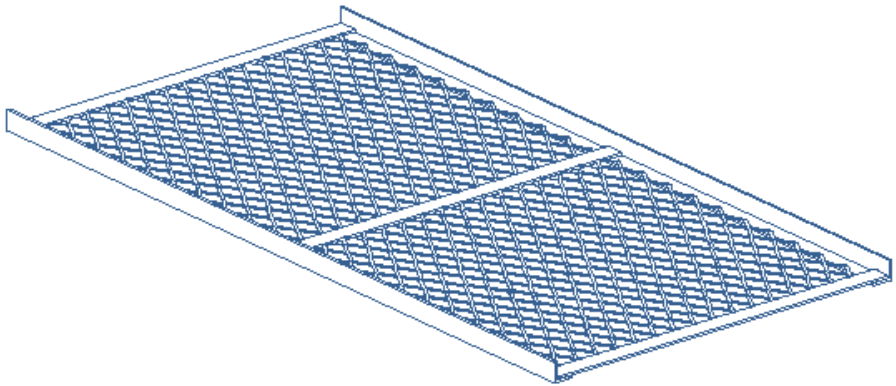


tunel de calefaccion  
acot.: mm





Intercambiador de calor  
acot.: mm



charola  
acot.: mm

## REFERENCIAS.

- Alyssa Kagel, The State of Geothermal Technology Part II: Surface Technology, Geothermal Energy Association 2008.
- Caballu Albiac, El Tomate Seco, Cuadernos de Aragón # 33.
- Cengel Yunus, Termodinámica, Mc Graw Hill 2006.
- Cengel Yunus, Transferencia de calor y masa, Mc Graw Hill 2007.
- Dickson y Fabelli, Geothermal energy, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia, 2003.
- Geo-Heat Center quarterly bulletin vol 28, Oregon Institute of Technology 2007.
- Geothermal Direct use engineering and design guidebook, Geo- Heat Center, Oregon Institute of Technology, 1991.
- Ibarz y Barbosa, Unit Operations in food engineering, CRC Press 2003.
- Ibrahim Doymaz, Air-drying characteristics of tomatoes, Yildiz Technical University, 2005.
- Saravacos y Kostaropoulos, Handbook of food processing equipment, KLUWER 2002.
- Potter Norman, Food science, Harla 1978.
- Vega-Mercado y Barbosa, Dehydration of foods, Chapman and Hall 1996.
- Nonhebel, El secado de sólidos en la industria química, Reverte 1979.
- Marks, Manual del Ingeniero mecánico, Mc Graw Hill 1982.
- Leslie Blodgett and Kara Slack, Basics of Geothermal Energy Production and Use, Geothermal Energy Association 2009.
- Llopis Trillo y Rodrigo Angulo, Guía de la energía geotérmica, Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, 2007.
- Mosalve Jorge y Machado Marly, Evaluación de dos métodos de deshidratación para el tomate variedad manzano, Universidad de Zulia, 2007.
- Monografía del tomate, Gobierno del estado de Veracruz 2006.



Mujica R María Fernanda, Elaboración de tomate seco en la provincia de San Juan Argentina.

Noriega Giral, Apuntes del curso de uso eficiente y ahorro de energía, Facultad de ingeniería UNAM, 2008.

Santoyo, Torres, Verma, Energía Geotérmica - Estado actual y perspectivas nacionales y mundiales, Centro de Investigación en Energía, 2005.

Santoyo-Gutierrez, Energía geotérmica. Situación actual y perspectivas, CIE 2007.

Untung Sumotarto, Design of a geothermal energy dryer for beans and grains drying in kamojang geothermal field, Indonesia 2000.

Enciclopedia libre Wikipedia:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Tomatoe>

Secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación:

<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>

Food and Agriculture Organization

<http://www.fao.org/Wairdocs/>

Comisión Federal de Electricidad

[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)

Proyecto IMPULSA IV. Desalación de agua con energías renovables

[www.impulsa4.unam.mx](http://www.impulsa4.unam.mx)