

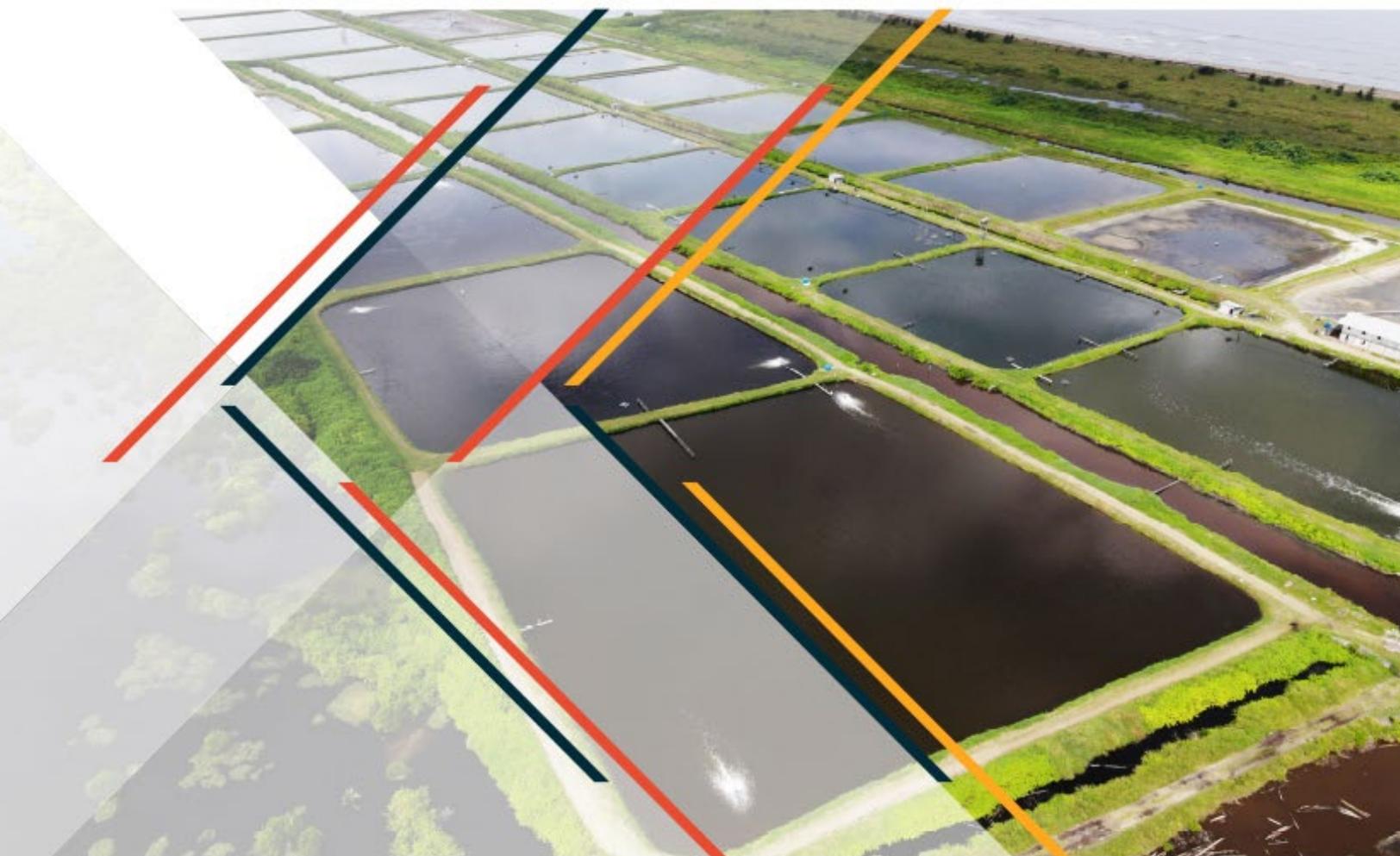
# Descripción de tecnologías de uso directo de la geotermia para agroindustria alimentaria

Proyecto Utilización del Calor Geotérmico en Procesos industriales (Geo II)

Agreement Number: 81272378

Project Processing number: 19.2268.1-002.00

Agosto 2022



**Publicado por:**

Deutsche Gesellschaft für  
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Bulevar Orden de Malta, Casa de la Cooperación Alemana,  
Urbanización Santa Elena,  
Antiguo Cuscatlán, El Salvador, Central America.  
T +503 2121-5145 F +503 2121-5101

E [info@giz.de](mailto:info@giz.de)  
I [www.giz.de](http://www.giz.de)

**Denominación del programa:**

Proyecto Utilización del Calor Geotérmico en Procesos Industriales  
en los Países Miembros del SICA (GEO II)

**Autor:**

Dr. Héctor M. Aviña J., México  
Propuesta COSOFT 83362146

**Revisión técnica / formato / edición:**

CECACIER, San José, Costa Rica

**Diseño gráfico / diagramación.:**

CECACIER, San José, Costa Rica

**Fotografías / fuentes:**

Dr. Héctor M. Aviña J., México  
CECACIER, San José, Costa Rica

**Referencias a URL:**

Los contenidos de las páginas externas a las que se remite en la presente publicación  
son responsabilidad exclusiva del respectivo proveedor. La GIZ se distancia expresamente de estos contenidos.

**Por encargo de:**

Comitente: Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania  
Países: Costa Rica, El Salvador, Honduras, Belice, Guatemala, Nicaragua, Panamá, República Dominicana  
Entidad responsable a nivel político: Sistema de la Integración Centroamericana (SG-SICA)  
Duración total: de 2020 a 2023  
Persona de contacto del comitente: Ana Lucía Alfaro Murillo, email: [ana.alfaro@giz.de](mailto:ana.alfaro@giz.de)

La GIZ es responsable del contenido de la presente publicación.

San José, Costa Rica. Agosto 2022.

## Introducción

El presente documento consiste en una guía ilustrativa de carácter general, la cual está orientada a recomendar una metodología básica a desarrolladores de proyectos, comunidades y autoridades nacionales de los países miembros del SICA, ya que todos estos cuentan con recurso geotérmicos clasificados como baja y media entalpia. Se hace la recomendación de asesoría por expertos/as para poder garantizar una mayor probabilidad de éxito en el desarrollo de los proyectos.

El programa Utilización del Calor Geotérmico en Procesos Industriales (GEO II), tiene como objetivo que los países miembros del SICA mejoren las condiciones para la aplicación de la energía geotérmica para aplicaciones industriales. Dicho programa tiene 4 áreas de intervención directa que son las siguientes: Apoyo a la adecuación de los marcos regulatorios; demostración de proyectos demostrativos productivos; desarrollo de herramientas metodológicas para la gestión de proyectos geotérmicos de uso directo y el intercambio de experiencias en los diferentes estados miembros del SICA.

## Definiciones

Acuicultura: Conjunto de actividades encaminadas al cultivo de especies acuáticas (animales y vegetales). La producción, crecimiento y comercialización de organismos de aguas dulces, salobres o saladas, útiles para el hombre y/o animales, constituyen los fines de este tipo de proceso. (Subsecretaría de Actividades Pesqueras y Desarrollo, 2007)<sup>1</sup>

Entalpía: Entalpía es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, definida como la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno. Para efectos de la geotermia la entalpía se refiere a la cantidad total de energía que se encuentra en un yacimiento o reservorio, o de forma más específica, la energía que contiene y que puede intercambiar con su entorno. Normalmente se asocia a la temperatura disponible.

Recurso Geotérmico: es la cantidad del calor medida en grados Celsius o Fahrenheit que se encuentra almacenado en el interior del suelo, puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económicas.

Uso directo del calor geotérmico: Manifestaciones de calor no aptas para la generación de energía eléctrica, sino para proyectos industriales. (Programa Energías Renovables-Eficiencia Energética, 2018)<sup>2</sup>

Organolépticas: Que produce una impresión sensorial o que se percibe con los sentidos (untuosidad, aspereza, sabor, brillo, etc.), a diferencia de las propiedades químicas, microscópicas, etc.

Isoterma: Que tiene la misma temperatura que otra cosa de la misma naturaleza.

---

<sup>1</sup> Subsecretaría de Actividades Pesqueras y Desarrollo. (2007). *Acuicultura*. Alabama, USA: Center for Aquaculture, Auburn University.

<sup>2</sup>Programa Energías Renovables-Eficiencia Energética. (1 de agosto de 2018). *La geotermia de usos directos podría dirigir el cambio económico y la inclusión social en América Latina*.

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Contenido</b>  |           |
| Introducción.....   | 3         |
| Definiciones .....  | 4         |
| <b>Aplicaciones del Uso Directo de la Geotermia en la Industria Alimentaria .....</b>     | <b>7</b>  |
| Deshidratación de Alimentos .....   | 8         |
| Ventajas de la deshidratación de alimentos.....   | 11        |
| Aspectos térmicos.....  | 11        |
| Factores que afectan el proceso de deshidratación.....                                    | 14        |
| Aspectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento.....                          | 14        |
| Impacto socioambiental .....  | 19        |
| <b>Secado de Productos Agrícolas .....</b>  | <b>21</b> |
| Secadores utilizados en la industria alimentaria.....                                     | 21        |
| Aspectos térmicos.....  | 27        |
| Aspectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento.....                          | 30        |
| Construcción de un secador geotérmico.....  | 32        |
| Impactos socioambientales.....  | 33        |
| Secado de madera .....  | 34        |
| <b>Acuicultura.....</b>   | <b>36</b> |
| Aspectos térmicos.....  | 37        |
| Proyectos de acuicultura con geotermia, sistemas, diseños, construcción y operación ..... | 38        |
| Tipos de sistemas.....  | 41        |
| Determinación de la energía térmica requerida .....                                       | 44        |
| Construcción de sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia .....                | 45        |
| Operación de sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia.....                    | 46        |
| Mantenimiento de sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia.....                | 48        |
| Impactos socioambientales.....  | 49        |
| <b>Invernaderos.....</b>  | <b>51</b> |
| Aspectos térmicos.....  | 53        |
| Aspectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento.....                          | 54        |
| Sistemas de transmisión de agua caliente.....   | 55        |
| Instalaciones de calefacción en invernaderos geotérmicos.....                             | 57        |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>Factores que influyen en la elección de la instalación de calefacción.....</b> | <b>62</b> |
| <b>Impactos socioambientales.....</b>   | <b>67</b> |
| <b>Referencias.....</b>   | <b>69</b> |

## **Aplicaciones del Uso Directo de la Geotermia en la Industria Alimentaria**

El empleo de recursos térmicos tiene una fuerte incidencia en el sector agroindustrial, tradicionalmente a través del aprovechamiento de la energía solar y los combustibles fósiles para procesar una amplísima gama de productos. Como ejemplo, el desarrollo tecnológico para la deshidratación de alimentos ha tenido una gran trayectoria a lo largo de los años, iniciando con el aprovechamiento de la energía solar, sistemas económicos y rudimentarios para el secado de los alimentos. Los sistemas solares (camas de secado, deshidratadores solares, etc.) tienen la particularidad de poseer bajos factores de utilización y un control térmico del proceso limitado debido a la variabilidad del recurso y una exposición limitada. Por su parte, los avances en el desarrollo de sistemas operados con combustibles fósiles para este tipo de aplicación han permitido mejorar las condiciones del proceso, pero, a costa de grandes emisiones de gases de efecto invernadero.

Los recursos geotérmicos de baja temperatura aprovechados en este sector crean un panorama alentador para migrar hacia una industria sostenible y altamente eficiente, que contribuya a lograr los objetivos ambientales de la descarbonización de un sector cuyos impactos ambientales son considerados de los más relevantes. Al mismo tiempo, que ofrece una

ventana para tecnificar y optimizar procesos como ser el secado y deshidratación de alimentos y productos como madera, fibras naturales, etc. Así mismo, el cultivo de plantas y vegetales en ambientes controlados, que permiten incrementos en la productividad con altas tasas de rendimiento, y la crianza de especies acuáticas, las cuales demandan condiciones térmicas específicas para un desarrollo óptimo, permitiendo mejoras importantes en su productividad; por ejemplo, camarones, langostas, entre otras.

A lo largo de este documento, se expondrán las características tecnológicas y económicas inherentes a las aplicaciones de secado y deshidratación de alimentos y otros productos; a la aplicación de cultivo de plantas y vegetales por medio de invernaderos; y a la crianza de especies acuáticas con sistemas de acuicultura, empleando como fuente de calor la geotermia de baja temperatura.

A manera de introducción, la Figura # 1 presenta un diagrama con los rangos de temperatura del fluido geotérmico para diferentes aplicaciones propias del sector agrícola.

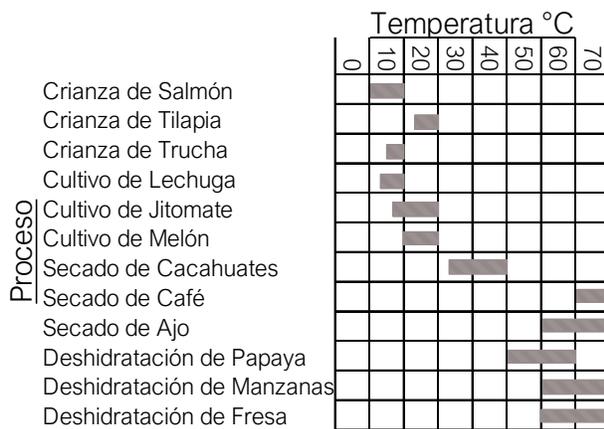


Figura # 1 - Rangos de temperatura del fluido geotérmico para usos específicos

Se aprecia que cada uno de los procesos requiere de su propia condición climatológica según la especie o alimento.

### Deshidratación de Alimentos

Con el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja temperatura puede llevarse a cabo la calefacción de aire para ser utilizado en la deshidratación de alimentos. Los sistemas deshidratadores convencionales funcionan con agua calentada a partir de gas; sin embargo, se ha comprobado que es posible utilizar el fluido geotérmico, no solo para el deshidratado de alimentos, sino también para el secado de madera, papel, cerámica, entre otros (Pérez González, 2014)<sup>3</sup>.

El agua contenida en los alimentos permite la proliferación de microorganismos o el desarrollo de reacciones químicas que los deterioran. Para poder conservarlos por durante mayor cantidad

de tiempo es necesario la implementación de alternativas, como el secado o deshidratado; es decir, remover el agua contenida en su interior. Los fluidos geotérmicos de baja temperatura pueden ser aprovechados para calentar un flujo de aire que entra en contacto con los alimentos a condiciones controladas de temperatura, humedad y velocidad, logrando la remoción del agua de los tejidos alimenticios, teniendo así un alimento duradero, 100% libre de conservadores y con altas propiedades nutritivas (Pérez González, 2014).

### Descripción del proceso

La deshidratación de alimentos es un proceso en el que se invierte una gran cantidad energética, pues requiere de 1,000 a 2,000 kJ por cada kilogramo de agua eliminado, implicando una transferencia simultánea de calor y masa. Este proceso no solo implica la evaporación paulatina del líquido contenido en los sólidos, sino que también potencializa los aportes nutritivos que se obtienen de estos al ingerir productos sometidos a ese proceso. Es por lo que resulta importante monitorear todos los parámetros de operación dependiendo del tipo de alimento (pues es muy diferente el secado del coco, comparado con el del plátano/banano, por ejemplo). Si el monitoreo no se lleva a cabo, existe la probabilidad de generar daño en el alimento, disminuyéndole el aporte vitamínico y

<sup>3</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un sistema Deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía*. Ciudad de México: Tesis de Grado. UNAM.

dando como resultado una simple masa orgánica, con buen color, probablemente buena textura, pero nada nutritiva (Pérez González, 2014).

Si bien, la madurez de esta tecnología se sustenta con el aprovechamiento de la energía solar y en algunos casos mediante la quema de combustibles, como el gas natural, se ha determinado que mediante el aprovechamiento de la energía geotérmica se logra un control superior de los parámetros térmicos dentro del proceso, dando como resultado productos de mejor calidad y con la ventaja de un mínimo de impacto ambiental. De esta manera, se presenta a continuación, una descripción de los equipos principales que actualmente están disponibles en el sector agroindustrial. Dentro de la industria agroalimentaria, los secadores utilizados se clasifican en (Pérez González, 2014)<sup>4</sup>:

- ✓ Directos o por convección
- ✓ Indirectos
- ✓ Mixtos
- ✓ Híbridos

#### ***Deshidratadores directos o por convección natural***

Los equipos deshidratan alimentos mediante la energía solar, calentando el aire en la misma cámara de secado. Esto es posible ya que las caras contenedoras del producto que son

transparentes permiten el paso de luz solar, pero impiden la salida de la luz ultravioleta, generando un efecto invernadero, aumentando así la temperatura del aire que rodea al producto. En dicho contenedor se dispone una serie de orificios, tanto en su base como en la parte superior de las caras; esto con la intención de generar un efecto convectivo obteniendo una circulación natural del aire, calentando y secando el aire de manera simultánea.

#### ***Deshidratadores indirectos***

Estos secadores se componen de dos partes, el túnel de calefacción y la cámara de secado. El túnel de calefacción está diseñado para calentar el aire con los rayos solares, utilizando el mismo fenómeno que el dispositivo anterior (efecto invernadero) y, con el uso de un soplador, se induce una corriente convectiva hacia la cámara de secado.

#### ***Deshidratadores mixtos***

Los dos conceptos anteriores se integran en un tercer tipo de equipo, llamado mixto o radiactivo-convectivo. Las bandejas con el producto a deshidratar se disponen en una serie de pilas en una cámara transparente, elaborada con hule PVC especial para invernaderos o cualquier otro material que permita el paso de la luz solar. Calienta el aire y el alimento, mientras

---

<sup>4</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un sistema Deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía*. Ciudad De México: Tesis de Grado. UNAM.

tanto en otra cámara se ingresa aire para ser secado y a su vez, unos sopladores dispuestos en la pared dividen las dos cámaras a las cuales ingresa el aire seco hacia la cámara de deshidratado.

### ***Deshidratadores híbridos***

Con los equipos descritos anteriormente, sólo se puede deshidratar mientras se dispongan horas de sol; lo cual representa un problema para aquellos alimentos que requieren un tiempo mayor de procesamiento que las horas promedio de sol por día. Como ejemplo, el tomate, pues el tomate es uno de los alimentos con mayor actividad de agua y su tiempo de deshidratado es alrededor de 24 horas para 100 kg de producto fresco. Para resolver este problema se le agregó a un equipo de deshidratado solar directo o indirecto, calentadores solares de agua y un termotanque, con este sistema se puede continuar la deshidratación por la noche.

### ***Deshidratadores a gas***

Estos sistemas deshidratan alimentos al hacer pasar corrientes de gases o aire calentado con gases producto de la combustión de gas, a través de bandejas dispuestas ordenadamente por la cámara de secado. Emplean ventiladores de tiro y recirculación para conducir el aire por todo el recinto. Los requerimientos térmicos para estos

sistemas oscilan entre 6.2 y 7.6 MW para procesar alrededor de 4.5 Ton/h de producto húmedo y obtener de 600 a 800 kg/h de producto seco (Dickson & Fanelli, 2003).<sup>5</sup> Como ejemplo de una cámara de deshidratación de alimentos está la de tipo túnel operada con gas natural. Cuenta con una instalación de un sistema de tiro inducido que transporta aire caliente al interior de la cámara con un patrón de recirculación para aprovechar el calor del aire de mejor manera.

A continuación, se enumeran productos alimenticios que pueden procesarse comercialmente en este tipo de deshidratadores.

- ✓ Frijoles
- ✓ Cebolla
- ✓ Pimiento
- ✓ Manzana
- ✓ Coco
- ✓ Zanahoria
- ✓ Cereales
- ✓ Carne Seca
- ✓ Perejil
- ✓ Apio
- ✓ Espinacas

### ***Deshidratadores Geotérmicos***

Los deshidratadores geotérmicos se han desarrollado en base a la tecnología previamente disponible, con adaptaciones especiales para el

<sup>5</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore,

India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

manejo del recurso geotérmico y el ingreso de aire caliente hacia el interior de los recintos por medio de ventiladores de tiro forzado o tiro inducido. La gran ventaja de los equipos geotérmicos es su alto factor de planta, con lo que se pueden obtener alimentos de gran calidad y con altos niveles nutrimentales. Para lograr los estándares nutrimentales necesarios, es importante mantener la temperatura de secado por encima de los 45 °C en todo momento, dado que esta es la temperatura para la inhibición del crecimiento de bacterias. Para la calidad del producto, es necesario mantener homogéneo el proceso, buscando en todo momento mantener constante el flujo de calor a la cámara de secado. Esto permitirá tener un producto con excelentes propiedades organolépticas (Grupo iiDEA-Ingenera, 2020).<sup>6</sup>

#### **Ventajas de la deshidratación de alimentos**

- ✓ Cuando se deshidratan forrajes como alfalfa, se contribuye a la mejora de la biodiversidad de especies que los consumen o los emplean para refugio y reproducción, garantizando productos de muy buena calidad y con buena disponibilidad durante todo el año.
- ✓ Se puede reducir la erosión del suelo cultivando productos con menor periodo de laboreo.

- ✓ Permite una mejor trazabilidad del producto desde el campo hasta el consumidor.
- ✓ Permite un control más sencillo de los aspectos relacionados con la seguridad alimentaria.

#### **Aspectos térmicos**

El consumo energético en un deshidratador geotérmico variará conforme a las diferentes etapas de secado. Para fines prácticos, dicho consumo energético, denominado “consumo específico energético”, se expresa como cantidad de kJ consumidos por kg de agua evaporada; este parámetro resulta importante puesto que permite la comparación entre diferentes deshidratadores. Por ejemplo, un secador bien construido y con mantenimiento adecuado tendrá un consumo energético aproximado de 4,186 kJ/kg de agua evaporada; esta energía comprende el calor necesario para la evaporación del agua en el producto y las pérdidas térmicas. En la Tabla 1 se presenta el desglose energético del proceso de la deshidratación (Pérez González, 2014).

<sup>6</sup> Grupo iiDEA-Ingenera. (2020). *Usos Directos de la Geotermia en el proyecto geotérmico Celaya*.

| Desglose Energético                                     | kJ                   |
|---|----------------------|
| Energía para evaporar 1kg de agua                       | 2,511                |
| Pérdida por calor sensible absorbido por el aire        | 1,250 - 1,340        |
| Pérdida de calor por convección, radiación y conducción | 124                  |
| Pérdida por el calor transportado por el alimento       | 334                  |
| <b>TOTAL</b>  | <b>4,219 - 4,309</b> |

Tabla 1. Consumo energético promedio en un deshidratador vertical (Pérez González, 2014)

El valor de 2,511 kJ/kg de agua es el calor mínimo que se requiere para evaporar el agua, en general las pérdidas térmicas pueden disminuir si se mejora el rendimiento térmico del secador. Con fines prácticos, para un cálculo estimativo, se pueden tomar los datos de la tabla como referencia. Las pérdidas referidas pueden tomarse como un referente para enfocarse en implementar un mejor diseño y lograr que el proceso sea de mayor eficiencia (Pérez González, 2014).<sup>7</sup>

Es indispensable contemplar las características de los alimentos que se someterán al proceso de secado, como ser humedad de equilibrio, sensibilidad de material a la temperatura y los límites de temperatura alcanzable con la fuente de calor en particular. El comportamiento de secado de los sólidos puede ser caracterizado por la medición de la pérdida de contenido de humedad como una función de tiempo. Los

<sup>7</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un sistema Deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía*. Ciudad De México: Tesis de Grado. UNAM.

métodos utilizados son por diferencia de humedad, pesado continuo y pesado intermitente. Con esta información es posible obtener una gráfica que describe la relación entre el tiempo de secado y la humedad perdida en el proceso (Pérez González, 2014).<sup>8</sup>

Lo anterior se denomina cinética de secado donde las cantidades de agua evaporada en el tiempo dependerán de la transferencia de calor y de masa entre la superficie del cuerpo y el medio ambiente del entorno. Si la curva se normaliza con la tasa inicial de secado y el contenido medio de humedad, todas las curvas pueden ser aproximadas a menudo a una sola curva característica de una sustancia en particular, esta es la “curva característica de secado” (Pérez González, 2014).

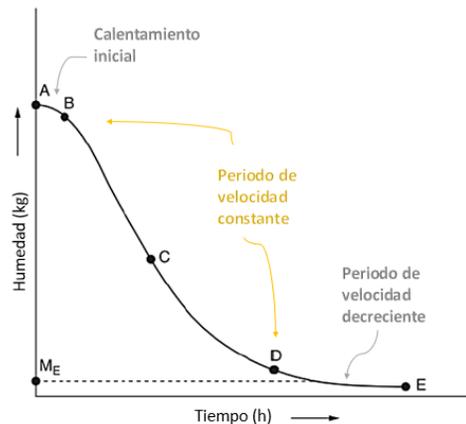


Figura #. 2 - El segmento AB representa el periodo de estado no estacionario o calentamiento inicial, el segmento BD representa el periodo de velocidad constante, el

<sup>8</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un sistema Deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía*. Ciudad De México: Tesis de Grado. UNAM.

segmento DE representa el periodo de velocidad decreciente (Vidaña, 2013)<sup>9</sup>

La eficacia de dicho proceso (pérdida de humedad en el mayor tiempo posible) está relacionado con los parámetros más importantes a estudiar: temperatura, velocidad del aire, humedad relativa del aire de secado, presión del sistema, etc. Los procesos convectivos, pueden dividirse en dos etapas:

- ✓ La primera etapa se denomina velocidad constante, ya que la pérdida de humedad respecto al tiempo es casi inversamente proporcional a la del tiempo de secado.
- ✓ En la segunda etapa, la tasa de variación de la humedad respecto al tiempo disminuye, esto quiere decir que la rapidez con la que pierde humedad el sólido se ha retardado debido a que la estructura colapsa, dificultando el paso del agua a través de los tejidos celulares.

El análisis térmico requiere conocer la relación de la velocidad de secado respecto a la humedad del alimento, con lo que se puede obtener una curva como la mostrada a continuación. La segunda etapa, con velocidad decreciente, se puede dividir en dos subetapas: sección CD, se observa que la rapidez con la que se humecta la superficie con la humedad del interior del alimento es mucho menor a la rapidez con la que se evapora

la humedad superficial del sólido. En la sección DE, la humedad unida por sorción se elimina, a medida que la concentración de humedad se reduce por el secado, la tasa de movimiento interno de la humedad disminuye. La presión de vapor del alimento será igual a la presión parcial de vapor del aire de secado, y no se llevará a cabo un secado adicional (Pérez González, 2014).

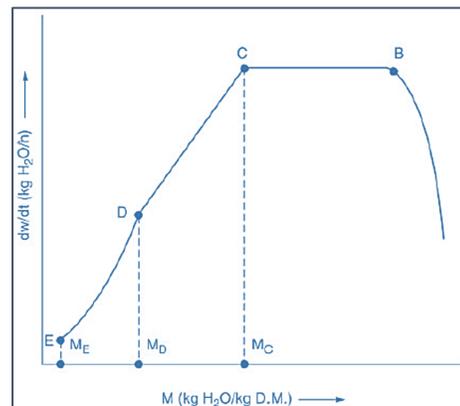


Figura # 3 - Velocidad de secado en función de la humedad del alimento; MC es el contenido de humedad crítica; ME es el contenido de humedad de equilibrio (Vidaña, 2013)<sup>10</sup>

El mecanismo de eliminación de agua en tejidos animales y vegetales, es un fenómeno complejo en la que influyen fuerzas capilares, difusión del líquido debido a gradientes de concentración. La naturaleza del material puede cambiar en sus propiedades físicas y químicas durante el secado. Cuando el alimento está fresco, el diámetro de los poros superficiales y de los capilares disminuye por influencia de la tensión superficial

<sup>9</sup> Vidaña, M. (2013). *Notas de Cinética de Secado. Curso Taller de Secado Solar*. Morelos, México.

<sup>10</sup> Vidaña, M. (2013). *Notas de Cinética de Secado. Curso Taller de Secado Solar*. Morelos, México.

y los elementos sufren deformación y encogimiento (Pérez González, 2014)<sup>11</sup>.

Otro aspecto fundamental en el estudio térmico del proceso de deshidratación de alimentos es la velocidad de secado, referente a la rapidez con la que se extrae al agua del alimento por el aire seco, es decir, por la razón a la cual disminuye la humedad del alimento, que como se ha referido, este proceso típicamente se divide en dos periodos, el secado a velocidad constante y el secado a velocidad decreciente (Pérez González, 2014).

### **Factores que afectan el proceso de deshidratación**

El factor más importante que determina dicha velocidad es la transferencia de calor por convección, entre el aire y el producto que se está secando. Adicionalmente, existen otros factores que impactan notablemente la velocidad de deshidratación, algunos directamente relacionados con el producto y otros relacionados con el aire de secado, entre los que se destacan:

- ✓ Isotermas de sorción del producto
- ✓ Dimensiones del producto
- ✓ Velocidad superficial relativa del aire respecto al sólido
- ✓ Temperatura del aire

- ✓ Humedad relativa del aire
- ✓ Densidad de carga
- ✓ Porcentaje de llenado de las cámaras
- ✓ Tiempo
- ✓ Propiedades de los alimentos

### **Aspectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento**

#### **Etapas de diseño de un deshidratador de alimentos**

El diseño de un deshidratador de alimentos es un proceso innovador y altamente iterativo, en el cual se deben tomar decisiones con muy poca información, en otras con apenas la cantidad adecuada y en ocasiones con un exceso de información parcialmente contradictoria. Algunas veces las decisiones se toman de manera tentativa, por lo cual es conveniente reservarse el derecho de hacer ajustes a medida que se obtengan más datos (Pérez González, 2014)<sup>12</sup>.

A continuación, se presenta un ejemplo de metodología para el diseño de un deshidratador de alimentos operado con energía geotérmica:

<sup>11</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un sistema Deshidratador de alimentos geotérmico de baja entalpía*. Ciudad De México: Tesis de Grado. UNAM.

<sup>12</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un*

*Sistema deshidratador de alimentos Geotérmico de baja entalpía*. Ciudad de México: Tesis De Grado. UNAM.

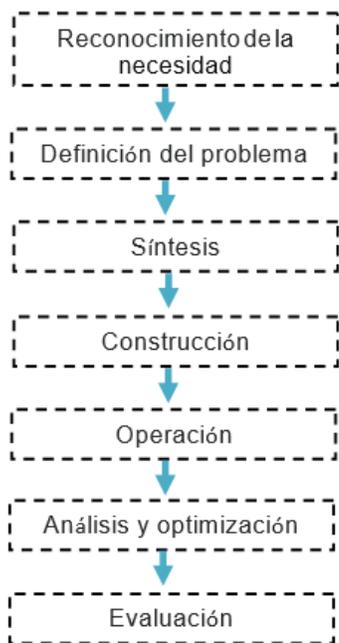


Figura # 4 - Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones. Tomado de (Budynas R., 2008)<sup>13</sup>

### Reconocimiento de la necesidad

Como su nombre refiere, se trata de estudiar la biodiversidad de la región, identificando potenciales geotérmicos, así como los productos a deshidratarse que se dispongan en la región.

### Definición del problema

Consiste en identificar alguna problemática que se pueda resolver mediante esta tecnología. Alimentos altamente perecederos que afectan a productores agrícolas que se ven en la necesidad de conservar sus productos por medios costosos como la refrigeración; por ejemplo, o atender problemas de seguridad alimentaria, etc.

### Síntesis

Etapa en donde se vinculan los recursos y oportunidades disponibles con la necesidad o la problemática identificada para plantear la solución más eficiente posible. Se genera el diseño del equipo prototipo y se efectúan las primeras pruebas de operación.

El diseño de un deshidratador geotérmico se compone de un circuito de fluido caliente (geotérmico) y un circuito de agua (generalmente desmineralizada) para calentar el aire que ingresará a las cámaras de secado. A continuación, se presenta un esquema típico de un deshidratador geotérmico y su diagrama de funcionamiento.

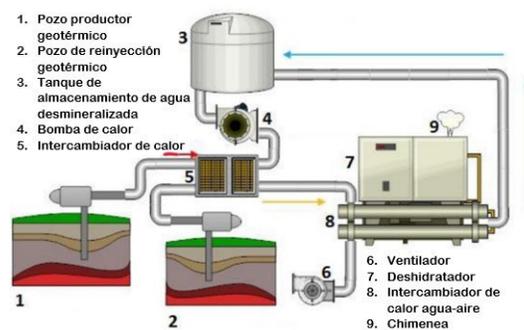


Figura # 5 - Ejemplo de un deshidratador geotérmico típico y diagrama de funcionamiento (Pérez González, 2014)<sup>14</sup>

Para el diseño de estos sistemas se analizan las condiciones climáticas de la región (fluido

<sup>13</sup> Budynas R., N. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (9a ed.). McGraw-Hill.

<sup>14</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un Sistema deshidratador de alimentos Geotérmico de baja entalpía*. Ciudad de México: Tesis De Grado. UNAM.

geotérmico, temperatura ambiente, humedad del aire, etc.), las propiedades de los productos a deshidratar, se dimensionan los equipos requeridos (como los sistemas de bombeo, ventiladores o sopladores, intercambiadores de calor, las cámaras de secado), se seleccionan los materiales con base, tanto en las propiedades de los flujos involucrados (aire, fluido geotérmico, agua desmineralizada, etc.) como en las normas sanitarias de manejo de alimentos. Se considera, a su vez, la carga de producto a procesarse y se establecen las condiciones operativas de todo el proceso.

La construcción de equipos de deshidratación que operan con energía geotérmica involucra la fabricación e instalación de las cámaras de procesado de alimentos, las cámaras de secado, la obra de toma del fluido geotérmico y su correspondiente reinyección al reservorio mediante un pozo de inyección. La instalación de las líneas de conducción del agua caliente y agua desmineralizada junto con los equipos de bombeo, drenes de muestreo de la calidad del agua, el sistema de ventiladores, sopladores y sistema de ductos para conducir el aire caliente al interior de las cámaras, incluyendo sistemas de filtrado del aire. Contempla también, el área de recepción de los productos y área de empacado

final, junto con una sección de monitoreo y análisis de la fruta o verdura obtenida.

Es importante tener en cuenta la instalación de instrumentos de medición, sistemas de monitoreo y control de los parámetros más importantes a supervisar durante el proceso.



Figura # 6 - Ejemplo de un prototipo inicial de un deshidratador geotérmico; 1) Túnel de secado, 2) Bandejas con producto (tomate y manzana), 3) Soplador, 4) Serpentin calefactor, 5) Calentador de agua para simular el flujo geotérmico (Grupo iiDEA, UNAM<sup>15</sup>)

### **Operación de un deshidratador geotérmico**

Las diferentes etapas operativas concernientes a un deshidratador geotérmico son:

#### ***Etapas de recepción del producto***

Al recibir el cargamento de producto, se selecciona el que cumpla con los estándares de calidad y se almacena de forma que se proteja de las condiciones ambientales mientras será procesado.

#### ***Etapas de lavado y pelado***

En esta etapa se lavan y pelan las frutas o verduras a deshidratar, por lo que es necesario

<sup>15</sup> Grupo iiDEA-Ingenera. (2020). *Usos Directos de la Geotermia en el proyecto geotérmico Celaya*. Ciudad de México. México.

contemplar la instalación de líneas de agua potable y zonas de manejo de residuos. Las cáscaras y la merma pueden destinarse para consumo de ganado o para compostas y /o biodigestores. Es posible, si así lo demanda el tipo de producto, instalar un precalentador con aire caliente para facilitar la remoción de las cáscaras de los productos.

### ***Etapa de corte***

Aquí, las frutas o verduras se reciben limpias y sin cáscara. Se lleva a cabo el proceso de corte, identificando defectos en el producto y removiéndolos, para garantizar una buena calidad del producto. Se selecciona la fruta o verdura por tamaños y se procesan en rebanadas de espesor uniforme. El producto recortado y dimensionado correctamente se transporta luego a las cámaras de llenado, donde se disponen en bandejas aptas para llevar a cabo el proceso de deshidratación.

### ***Etapa de deshidratación***

Una vez que el producto se acomoda en las bandejas correspondientes se pasa a la cámara de secado, en donde se hará circular aire caliente al interior de la cámara, previamente filtrado para evitar contaminar el producto, y lograr eliminar el contenido de humedad de la fruta o la verdura seleccionada. Este proceso es el más tardado y requiere de un monitoreo exhaustivo con supervisiones periódicas a lo largo del

proceso. En esta etapa se regula la admisión de aire, se registran temperaturas al interior de la cámara y se controla el flujo de agua caliente mediante la operación de los sistemas de bombeo.

### ***Etapa de muestreo***

En esta etapa, se llevan a cabo procedimientos de control de calidad, a fin de seleccionar el producto que satisfaga los estándares de calidad.

### ***Etapa de empaçado***

Finalmente, el producto aceptado se conduce a la zona de empaque donde se deberá almacenar correctamente para garantizar su preservación a largo tiempo.

### ***Análisis y optimización***

Una vez construido el equipo, y verificado su correcto funcionamiento, comienzan las pruebas de análisis y optimización para determinar las curvas de secado de los productos seleccionados, las cargas térmicas, analizar la calidad de la fruta deshidratada y se puede determinar características de operación del sistema.





Figura #7 - Caracterización de muestras de jitomate en un deshidratador geotérmico (Pérez González, 2014)<sup>16</sup>

Se llevan a cabo procedimientos de control de calidad, seleccionado el producto que satisfaga los estándares de calidad, se realizan valoraciones de las propiedades organolépticas (color, olor, sabor) del producto final y se mandan a analizar químicamente para determinar los nutrientes obtenidos.

Entre los diferentes aspectos que se analizan para una optimización del proceso, se encuentran:

- ✓ Temperatura del agua de entrada y salida
- ✓ Control y distribución del flujo de aire (dirección, temperatura y velocidad)
- ✓ Tiempo de permanencia del producto en las cámaras de secado
- ✓ Materiales aislantes
- ✓ Materiales de tuberías y configuraciones (tubos aletados, sistemas en serie o paralelo)

<sup>16</sup> Pérez González, E. (2014). *Diseño de un sistema deshidratador de alimentos geotérmico de Baja entalpía*. Ciudad De México: Tesis De Grado.UNAM.

- ✓ Procesamiento del producto

### **Evaluación**

Finalmente, cuando se han implementado las acciones de mejora del sistema, se evalúa operativamente el prototipo para asegurar una buena operación de todos los sistemas involucrados; se asegura la calidad del producto y se establecen las curvas de operación del sistema para diferentes productos a deshidratar.

### **Mantenimiento de un deshidratador geotérmico**

Los mantenimientos de estos sistemas se enfocan, por un lado, a los sistemas de intercambio de calor (ya sean de placas o intercambiadores de tubos y coraza), llevando a cabo servicios de mantenimiento químico o mecánico para resolver problemas de corrosión e incrustamiento que puedan derivarse en obstrucción de tuberías y válvulas, afectando la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo (aire para el secado de alimentos). Otro punto que requiere atención son los equipos de bombeo, donde deberá evitarse que fallen por incrustaciones, tengan fugas a través de los sellos o atascamiento por partículas sólidas.

Por otro lado, en el área de producción, se debe tener un control estricto de la higiene para reducir agentes contaminantes que puedan

alterar la calidad del producto procesado. Los mantenimientos se enfocan a la higiene continua de las instalaciones, reemplazando instrumentos y equipo (como las charolas/bandejas, los carros o bandas transportadoras de alimentos, filtros de aire, etc.) cuando sea necesario.

### **Inversión requerida para un deshidratador geotérmico**

Para sistemas de deshidratación con energía geotérmica de capacidad industrial (que implican una producción mayor a los 500 kg diarios) se requieren inversiones del orden de 900,000 dólares de los Estados Unidos (USD). Lo anterior, que incluye costos de los equipos y su operación, permite generar un retorno sobre la inversión del 48% y un valor presente neto de \$2,230,000 USD, recuperando la inversión en un periodo de 25 meses (Grupo iiDEA-Ingenera, 2020)<sup>17</sup>

A continuación, se presenta un ejemplo de costos y requerimientos para un deshidratador geotérmico de alfalfa:

- ✓ Dimensión de equipo deshidratador de alfalfa: 1000 m<sup>2</sup> contemplando las áreas de recepción, secado, procesamiento y entrega de la alfalfa seca.
- ✓ Capacidad: 100 toneladas de producto seco al día, procesando 700 toneladas de

producto fresco al día con un rendimiento del 14%.

- ✓ Inversión aproximada de 1.5 millones de dólares. Contemplando la compra de la alfalfa fresca en \$45 USD/Ton y la venta de la alfalfa seca en \$223 USD/Ton, estimando un periodo de recuperación de la inversión en 3 años y una relación costo/beneficio de 1.9.
- ✓ Para la operación de este sistema se generarían 30 empleos directos y 40 indirectos.

### **Impacto socioambiental**

#### **Sociales**

Las problemáticas ambientales como sequías e inundaciones en diversas regiones del planeta, como efecto del cambio climático inducido por el ser humano, tienen una incidencia notable en las actividades agrícolas que, sumado a los problemas de desperdicio de alimentos y la constante fluctuación en los precios y temporalidad de los principales productos de este sector, lo dejan en condiciones muy vulnerables, afectando a la población año con año. La deshidratación de productos representa una alternativa para la producción y almacenamiento eficiente de alimentos, permitiendo mitigar problemas de desperdicio y mejorando las alternativas para garantizar el derecho humano a la seguridad alimentaria.

<sup>17</sup> Grupo iiDEA-Ingenera. (2020). *Usos Directos de la Geotermia en el proyecto geotérmico Celaya*. Ciudad de México. México.

La importancia de considerar el factor social en el desarrollo de proyectos de deshidratación de alimentos a partir de la energía geotérmica de baja temperatura cobra gran relevancia debido a que la influencia que generará en la población será muy significativa.

En la planeación de estos proyectos deberá estudiarse a fondo, las costumbres y tradiciones en la región, además del consumo local de productos alimenticios y trazar estrategias que permitan la aceptación general del proyecto para adoptarla como una actividad benéfica para la región. Los proyectos para la deshidratación de alimentos con energía geotérmica tienen un impacto considerable en los diferentes sectores productivos involucrados en la cadena de valor, tales como agricultores, productores, transportadores, comercializadores y exportadores, además de una incidencia directa en la población en casi la totalidad de las etapas de desarrollo: construcción de la obra, operación, suministros, servicios, viviendas, medios de transporte, comunicaciones, entre otros (Guzmán, 2020<sup>18</sup>). La aprobación y aceptación de los proyectos por parte de la población es fundamental.

Algunas cuestiones sociales para tomarse en consideración en proyectos son (BEAZ PALEO, 2007<sup>19</sup>):

- ✓ Verificar que no se interfiera con intereses agrícolas de la región.
- ✓ No impedir otros desarrollos industriales que puedan ser prioritarios para la región.
- ✓ No alterar costumbres o tradiciones regionales.
- ✓ Involucrar a la población y que su participación sea considerada como un aporte valioso, al mismo nivel que los factores económicos o ambientales.
- ✓ Las comunidades locales deben ser involucradas en todo el proceso de diálogo en torno al desarrollo del proyecto.

Como expuesto anteriormente, el proceso de deshidratado incluye procesos de lavado, pelado, cortado, desinfección, secado, enfriamiento, inspección, envasado, pesado, sellado y embalaje de la fruta/verdura; por lo que se abre una amplia gama de empleos de los que pueden verse beneficiados los pobladores locales.

Los aspectos de sostenibilidad social (marco jurídico y normativo, derechos humanos, diálogo social, participación social, comunicación y gestión, responsabilidad social y evaluación de impacto social) son asuntos transversales que forman parte de los proyectos geotérmicos en operación y que necesariamente, tienen que estar presentes en los proyectos futuros, ya que

<sup>18</sup> Guzmán, G. A. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de calefacción geotérmica de baja entalpía para el cultivo de Cherax Quadricarinatus* (Trabajo de Grado ed.). Ciudad de México: UNAM.

<sup>19</sup> BEAZ PALEO, J. (2007). *Ingeniería de la Acuicultura Marina. Instalaciones en tierra*. Madrid: Publicaciones Científicas y Tecnológicas del Observatorio Español de Acuicultura.

son elementos clave que sirven como puntos de referencia de acción (González Troncoso, 2016<sup>20</sup>).

### **Ambientales**

La apuesta hacia una sustentabilidad productiva en el sector agroindustrial generará resultados satisfactorios para alcanzar los objetivos de reducción del impacto ambiental en los próximos 20 años.

La deshidratación de alimentos mediante el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de baja temperatura provoca impactos significativos a los ecosistemas, contribuyendo positivamente con el medio ambiente en la reducción de los cambios climáticos y el mantenimiento de la sostenibilidad mundial, ya que este reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. La sustitución de la dependencia del gas, reemplazo de las ineficiencias solares y la obtención de temperaturas constantes son unos cuantos beneficios adicionales del uso directo de la geotermia para el deshidratado de alimentos.

### **Secado de Productos Agrícolas**

#### **Generalidades**

El secado de productos agrícolas es similar al deshidratado de frutas y verduras, con la diferencia de que los productos a deshidratar se

orientan más hacia los granos, semillas y cereales, por ejemplo, café, cacao, nueces, alfalfa, entre otros.

El proceso de deshidratación de cereales y granos resulta una alternativa interesante, ya que se puede aportar un gran valor agregado a un grupo de cereales muy común como la alfalfa, al ser una opción más para utilizar como suplemento proteico (Grupo iiDEA Ingeniería<sup>21</sup>) o se puede mejorar el proceso de secado del café y otros granos donde tradicionalmente se aprovecha la energía solar o se queman combustibles para conseguir el porcentaje de humedad requerido para su comercialización.

### **Secadores utilizados en la industria alimentaria**

La clasificación de los equipos de secado es la siguiente:

- a) **Características y propiedades físicas del producto húmedo:** Consiste en el procedimiento apropiado para la selección de un grupo de secadores para su estudio preliminar en un problema dado.
- b) **Procedimiento para transmitir el calor al sólido húmedo:** Esta más enfocado en la parte industrial y revela diferencias en el diseño y funcionamiento de los secadores.

<sup>20</sup> González Troncoso, 2016

<sup>21</sup> Grupo iiDEA-Ingeniera. (2020). *Usos Directos de la*

*Geotermia en el proyecto geotérmico Celaya.* Ciudad de México. México.

De acuerdo con este segundo criterio se distinguen los secadores directos, que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar el calor y así arrastrar el líquido vaporizado; los secadores indirectos, en los que el calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente de medio calefactor; secadores dieléctricos y secadores por radiación (Maupoey, 2001)<sup>22</sup>.

### **Secadores solares**

Se usan para el proceso de secado de productos en diferentes formas convencionales. La operación y eficiencias de estos secadores están íntimamente relacionados en las condiciones climatológicas, por lo que sus tiempos de secado pueden llegar a ser prolongados. Cabe mencionar que en la mayoría de estos equipos necesitan grandes extensiones de tierra debido a su lento proceso de secado. Algunos modelos de secadores solares se presentan en configuración de patio, tipo carro, por elbas y de tipo parabólico (Pacheco Mendoza, 2019)<sup>23</sup>.



Figura # 8 - Secador solar de café en carros, figura tomada de [cenicafe.org](http://cenicafe.org).

<sup>22</sup> Maupoey, P. F. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

### **Secadores directos o convectivos**

Este tipo de secadores se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección, y que arrastran fuera del secador los vapores producidos. Los gases calientes pueden ser varias opciones; como por ejemplo, aire calentado por vapor de agua, productos de la combustión, gases inertes, vapor recalentado y aire calentado por radiación solar (Maupoey, 2001).

Este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción y para el tratamiento de productos que exigen algún tipo de manipulación especial (Maupoey, 2001). Este tipo de sistemas se clasifican de la siguiente manera:

#### **a) Secadores de horno o estufa**

Este es el tipo de secador más simple y consta de un pequeño recinto rectangular, generalmente de dos pisos. El aire de secado se calienta en un quemador de piso inferior y atraviesa por convección natural o forzada el segundo piso perforado, en el que se asienta el techo de producto a secar. Se emplea para el secado de manzanas, de lúpulo y forrajes verdes (Pacheco Mendoza, 2019).

<sup>23</sup> Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. Ciudad de México, México: Tesis de grado. UNAM.

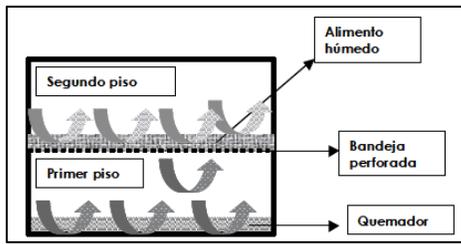


Figura # 9 - Esquema de un secador de horno o estufa (Maupoey, 2001)

### b) Secadores de bandejas o de armario

Está formado por una cámara metálica rectangular que contiene soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas, montadas unas sobre otras con una separación conveniente que se cargan con el material a secar. Se hace circular aire caliente entre las bandejas por medio del ventilador acoplado al motor, haciéndole pasar previamente por un calentador construido por un haz de tubos, cuyo interior circula normalmente vapor de agua.

Los rendimientos térmicos de este tipo de secador suelen estar comprendidos entre el 20% y el 50%, pudiendo ser valores más bajos. Estos secadores son útiles para secar pequeñas cargas de productos valiosos, esto generalmente no excede de 25 a 50 kg/h de producto seco. Se utilizan principalmente para productos como la carlota, que es una torta de origen francés que posee una base de galletas, espinacas, ajo,

perejil, guisantes, judías verdes, champiñones, cebollas, etc. (Pacheco Mendoza, 2019).<sup>24</sup>

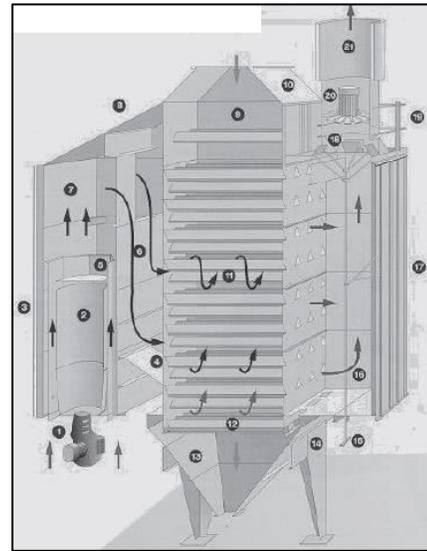


Figura # 10 - Configuración de secador de bandejas o armario (Maupoey, 2001)<sup>25</sup>

### c) Secadores de túnel

Similares a los secadores de bandejas, pero de funcionamiento semicontinuo, para lo cual las bandejas que contienen el producto a secar se cargan sobre carretillas que se trasladan a lo largo del túnel de secado. Cuando se introduce una nueva carretilla, la primera es evacuada conteniendo el producto seco, mientras las restantes adelantan una posición en su trayectoria. Cabe mencionar que este tipo de secadores no tienen un secado uniforme en diferentes puntos del túnel.

<sup>24</sup> Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. Ciudad de México, México: Tesis de grado. UNAM.

<sup>25</sup> Maupoey, P. F. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

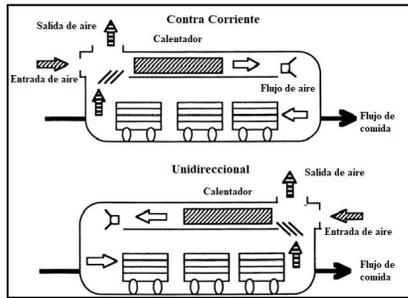


Figura # 11 - Diagrama de secador de túnel (Barbosa, 1996)<sup>26</sup>

#### d) Secadores con cinta transportadora

El principio de los secadores de cinta transportadora es similar al de los secadores de túnel, con excepción que el producto es transportado mediante una cinta. La configuración más comúnmente usada es la configuración de flujo axial, la cual consiste en proporcionar el aire caliente directamente a través de la cinta. El ventilador permite la circulación de aire a través de las bandejas y que regrese al calentador para la recirculación. El escape proporciona características apropiadas al aire. El sistema de calentamiento puede ser neumático o eléctrico, usando gas, calor, electricidad o calor perdido como medio de calentamiento (Barbosa, 1996).

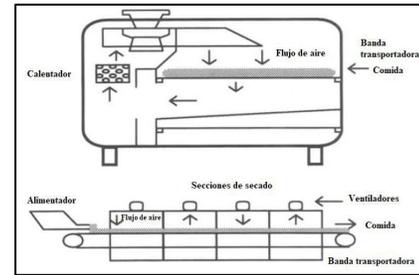


Figura # 12 - Diagrama de secador de cinta transportadora (Barbosa, 1996)

#### e) Secadores rotativos

El principio de funcionamiento es prácticamente similar a los anteriores casos, en los cuales pasa a través de una cámara de secado con aire caliente a una cierta temperatura y velocidad que permite disminuir la humedad a los alimentos con el paso del tiempo. La diferencia de este secador radica en la cámara de secado, la cual gira mediante un motor que tiene como función producir secado de mejor calidad mediante el movimiento de los alimentos debido a las aletas que contiene en su interior el secador (Pacheco Mendoza, 2019)<sup>27</sup>.

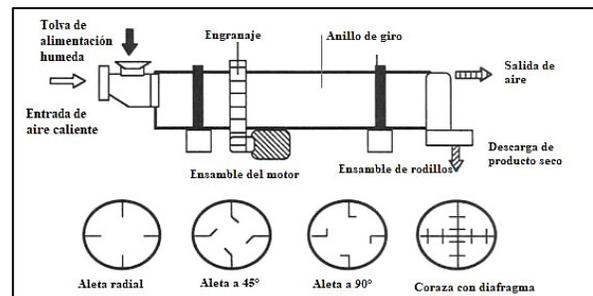


Figura # 13 - Diagrama de secador rotatorio y tipos de aletas (Barbosa, 1996)

<sup>26</sup> Barbosa, G. (1996). *Dehydration of foods* (Science+Business Media, B.V. ed.). Springer.

<sup>27</sup> Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. Ciudad de México, México: Tesis de grado. UNAM

### f) Secadores de alimento fluidizado

Funciona introduciendo aire caliente por la parte inferior del equipo y manteniendo suspendido el alimento fluidizado; es decir, suspendido en el aire. Para que este fenómeno suceda es necesario que el alimento se encuentre en forma de partículas. 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. Debido a que el alimento se encuentra en partículas su secado se reduce drásticamente (Garduño, 2018)<sup>28</sup>.

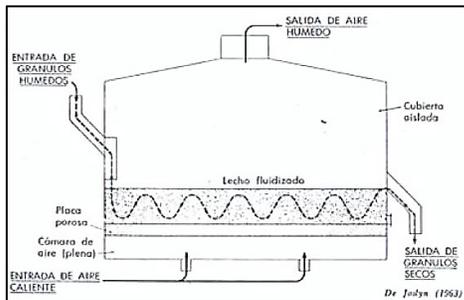


Figura # 14 - Diagrama de secador de lecho fluidizado (Garduño, 2018)

### g) Secadores por aspersion

En los secadores por aspersion el alimento, que debe de estar en estado sólido triturado o líquido con una baja viscosidad para que pueda fluir sin problemas y no se quede atorado en el aspersor, es rociado a la cámara de secado en forma de gotas, las cuales al entrar en contacto con el aire

caliente de la cámara empiezan a secarse a mediada que descienden, de tal forma al momento de caer, el producto final sea en forma de polvo.

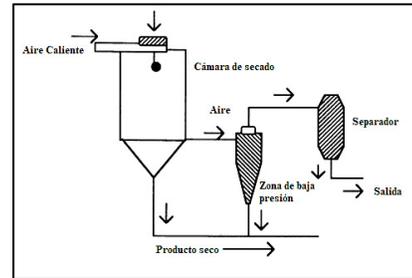


Figura # 15 - Diagrama de secador por aspersion (Garduño, 2018)

### h) Secadores indirectos o por conduccion

Se caracterizan por la transmisión de calor hasta el material húmedo tiene lugar por conduccion a través de una pared, generalmente es metálica. La fuente de calor puede ser: vapor que condensa, agua caliente, aceites térmicos, gases de combustión, resistencia eléctrica. Estos sistemas permiten la recuperación del disolvente y son apropiados para el secado a presiones reducidas y en atmósferas inertes, lo que les hace recomendables para poder deshidratar productos termolábiles (sustancia sujeta a destrucción) o fácilmente oxidables, pudiendo utilizar métodos de agitación para asegurar una mejor transmisión de calor y eliminar los gradientes de humedad en el producto (Maupoey, 2001)<sup>29</sup>. Algunos de los tipos más

<sup>28</sup> Garduño, A. M. (2018). *Diseño mecánico de un deshidratador geotérmico de alimentos de flujo vertical*. Ciudad de México, México.: Tesis de grado. UNAM.

<sup>29</sup> Maupoey, P. F. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

comunes de estos sistemas se presentan a continuación.

#### **i) Secadores de bandejas a vacío**

El funcionamiento de este tipo de secadores es mediante la conducción; se trata básicamente de un cajón cerrado con bandejas o anaqueles que opera al vacío. El calor se conduce por paredes metálicas y mediante radiación en las bandejas. Los secadores al vacío permiten secar alimentos a muy bajas temperaturas incluso en ausencia de oxígeno. Son adecuados para el sector alimenticio debido a que los alimentos no entran en contacto con el oxígeno lo que los protege de bacterias y agentes que puedan producir deterioro. Debido a los dispositivos que requiere para su funcionamiento y los materiales con los que se construyen, el proceso de secado a vacío es el proceso más costoso (Pacheco Mendoza, 2019)<sup>30</sup>.

#### **j) Secadores por sublimación (liofilizadores)**

La sublimación o liofilización es una técnica de secado que consiste en la rápida congelación de los alimentos con el objetivo de conservarlos. En este proceso se produce una rápida congelación del agua contenida en los alimentos por lo que después de realizar el secado se debe de retirar

el hielo de los alimentos para reducir su peso, debido a su rápida congelación, los alimentos mantienen sus propiedades organolépticas. Este método se realiza al vacío, con temperaturas de hasta una temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$ , debido a que a estas temperaturas el producto pasa de un estado sólido a un estado gaseoso sin pasar por el estado líquido (Pacheco Mendoza, 2019).

#### **k) Secadores por tornillo sin fin**

En los secadores de tornillo sin fin, el funcionamiento se resume en aire caliente que fluye a través de la cámara de secado, la cual a su vez contiene un tornillo sin fin el cual gira con el propósito que el alimento, el cual es vertido en la parte superior, pueda ser triturado y secado. Mediante el tornillo se produce una cierta presión para eliminar agua de los alimentos y, mediante el aire caliente que fluye en la cámara se elimina la humedad restante que el tornillo sin fin no elimina.

#### **l) Secadores por radiación**

Se basan en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. Esta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios que solo son calentados con gas. El costo de la energía necesaria para este método es de dos a cuatro veces mayor que el costo del combustible en los

<sup>30</sup> Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. Ciudad de México, México: Tesis de grado. UNAM.

secadores descritos anteriormente (Pacheco Mendoza, 2019).

#### **m) Secadores dieléctricos**

Se caracterizan por generar calor en el interior del propio sólido, en virtud de un campo eléctrico de alta frecuencia que genera gran agitación de las moléculas polares, cuya fricción genera el calor necesario para la evaporación. Puesto que el campo eléctrico es uniforme en todo el espesor del dieléctrico, el calentamiento es prácticamente uniforme para la deshidratación de piezas de gran tamaño, sin peligro de recalentamiento en la superficie. Su campo de aplicación es todavía muy reducido debido a su alto costo de operación que puede ser diez veces superior al del combustible necesario en los secadores directos (Maupoey, 2001)<sup>31</sup>.

#### **n) Secador geotérmico**

Este secador, debido a sus características, puede entrar en la clasificación de secadores directos o de convección, ya que el aire calentado mediante energía geotérmica se hace circular por el interior del equipo, incidiendo directamente sobre el producto húmedo. De esta manera, los equipos de secado convectivos, descritos anteriormente, pueden ser fácilmente modificados para reemplazar la fuente energética (solar o quema de combustible) por

fluido geotérmico, contemplando el caso de los deshidratadores geotérmicos, un sistema de intercambio de calor para calentar el aire a condiciones óptimas para los diferentes productos a secar.

#### **Aspectos térmicos**

##### ***Secado de Granos con energía geotérmica.***

Anualmente se consumen cantidades importantes de energía para el secado de granos. Estos procesos pueden adaptarse fácilmente a la energía geotérmica en el rango de temperaturas de 38 a 82 °C. La mayoría de los cultivos agrícolas deben secarse y mantenerse a un contenido de humedad del 12% al 13% en base húmeda, según el cultivo específico, almacenamiento, temperatura y duración del almacenamiento (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>32</sup>.

Un aspecto de gran importancia que debe cuidarse en el secado de granos es el crecimiento de moho, el cual está relacionado con el tiempo de almacenamiento, la temperatura y el contenido de humedad. El precio del grano que se vende a través de los mercados comerciales se fija en función del contenido de humedad especificado (Dickson & Fanelli, 2003), con penalizaciones para niveles de humedad elevados, por lo que resulta crítico controlar este parámetro.

<sup>31</sup> Maupoey, P. F. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

<sup>32</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

El secador de granos suele ser un secador de lecho profundo, como podemos observar en la Figura # 16 . La mayoría de los equipos de secado de cosechas constan de los siguientes elementos:

- a) Un ventilador para mover el aire a través del producto
- b) Un calentador controlado para aumentar la temperatura del aire ambiente al nivel deseado
- c) Un recipiente en el cual se pueda distribuir el aire de secado uniformemente a través del producto.

El aire de escape se ventila a la atmósfera. Cuando el clima y otros factores son favorables, se usa aire sin calentar para secar y se puede omitir el calentador.

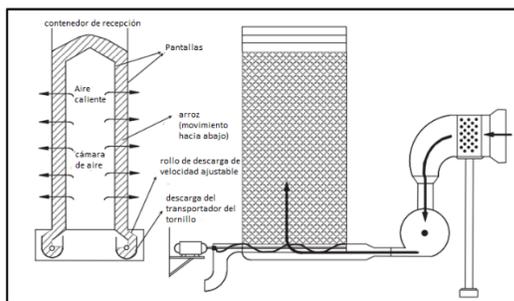


Figura # 16 - Diagrama de un secador de granos de lecho profundo (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>33</sup>

Se pueden utilizar varios métodos operativos para secar el grano en contenedores de almacenamiento.

Pueden clasificarse como secado en contenedor completo, secado por capas y secado por lotes.

El secador de lecho profundo se puede instalar en cualquier estructura que procese algún grano. La mayoría de las estructuras de almacenamiento de granos pueden diseñarse o adaptarse para el proceso de secado proporcionando un medio para distribuir el aire de secado uniformemente a través del grano. Esto se hace más comúnmente mediante un piso falso perforado o sistemas de conductos colocados en el piso del contenedor. El secado en contenedor completo generalmente se realiza con aire sin calentar o aire calentado de 6 a 12°C por encima de la temperatura ambiente. Con frecuencia se usa un sensor de humedad para detectar el contenido de ésta en el aire de secado y apagar el calentador si las condiciones climáticas son tales que el aire caliente causaría un secado excesivo (Dickson & Fanelli, 2003).

La distancia que recorrerá el grano está limitada únicamente por el costo del ventilador, motor, sistema de distribución de aire y la energía requerida. La distancia o profundidad práctica máxima parece ser de 6 m para maíz y frijoles y de 4 m para trigo. Los dispositivos de agitación de granos se utilizan con sistemas de depósito lleno. Estos dispositivos suelen constar de una o más barrenas de paso estándar abiertas, de 5 cm de diámetro, suspendidas del techo del depósito y de la pared lateral y extendiéndose hasta cerca del piso del contenedor. La conversión del

<sup>33</sup> Dickson , M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

secador de lecho profundo a energía geotérmica se logra simplemente instalando un serpentín de agua caliente en el conducto de entrada utilizando fluido geotérmico en el rango de temperatura de 38 a 49°C (Dickson & Fanelli, 2003).

De todos los cereales, el arroz es probablemente el más difícil de procesar debido a que se generan pérdidas en su calidad, ya que si contiene más del 13.5% de humedad no se podrá almacenar de forma segura durante períodos prolongados. Cuando el arroz se cosecha con un contenido de humedad del 20% al 26% , se debe comenzar a secar rápidamente para evitar que se amargue. Se pueden utilizar secadores de columna o de lecho profundo, en donde el grano se transfiere de los contenedores de almacenamiento a la parte superior del secador de columna mediante transportadores de cangilones. La columna debe estar completamente llena antes de que comiencen las operaciones de secado. El grano fluye de arriba hacia abajo por gravedad, y la cantidad de flujo se controla mediante la velocidad de un transportador de tipo tornillo, ubicado en la parte inferior de la columna. Las dos variables importantes en la operación de secado son el caudal másico de aire y la temperatura en la entrada del secador. Se sopla aire caliente desde la parte inferior y se mantiene una presión estática entre las columnas. La

temperatura del aire se controla regulando la salida del quemador de varios termopares instalados dentro de la columna para monitorear la temperatura del aire y del grano. El arroz se carga en la secadora con un contenido de humedad de aproximadamente del 21% al 22% y el ciclo de secado normalmente se completa después de tres o cuatro pasadas (Dickson & Fanelli, 2003).<sup>34</sup>

El contenido de humedad final debe ser inferior al 15% antes de que pueda almacenarse de forma segura en el almacén. Después de cada pasada, el arroz parcialmente seco se almacena en recipientes de templado durante al menos doce horas antes de que se realice otra pasada. El arroz se temple para igualar el contenido de humedad interna, minimizando así las tensiones térmicas y evitando la rotura de los granos. La temperatura del grano se mantiene normalmente a 38° C cuando el contenido de humedad es aproximadamente del 21%, y con un contenido de humedad más bajo, 17%, la temperatura se limita a 35°C. A una temperatura constante del grano de 38°C, el aire se calienta a 82 a 93° C durante el clima frío y aproximadamente a 60 a 82°C durante la estación cálida (Dickson & Fanelli, 2003).

La conversión del secador vertical a fluidos geotérmicos implica la instalación de un serpentín de agua caliente aguas arriba del

---

<sup>34</sup> Dickson , M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

ventilador para obtener una temperatura uniforme dentro de la cámara impelente. En este tipo de equipos no se tiene recirculación de aire debido a la presencia de polvo en el lado de aguas abajo. El flujo de aire se puede mantener a un ritmo constante; entonces la única variable sería el caudal del grano (Dickson & Fanelli, 2003).

Para aplicaciones de secado de forrajes como la alfalfa, se tienen los siguientes datos de proceso (Grupo iiDEA-Ingenera, 2020)<sup>35</sup>:

- Datos de pozo geotérmico: 150°C de temperatura y con un flujo de agua caliente estimado de 60 Ton/h.
- Producción: 100 Ton/día de alfalfa deshidratada.

En cuanto a la producción de pellets de forrajes como la alfalfa, algunos datos de referencia son (Grupo iiDEA-Ingenera, 2020):

- Datos de pozo geotérmico: 150°C de temperatura y con un flujo de agua caliente estimado de 60 t/h.
- Producción: 85 Ton/día de alfalfa deshidratada.

Un pozo geotérmico podría proporcionar el flujo requerido para una planta que produzca de 22,700 a 27,200 toneladas de pellets de alfalfa / año (con un 8 a 15% de humedad).

<sup>35</sup> Grupo iiDEA-Ingenera. (2020). *Usos Directos de la Geotermia en el proyecto geotérmico Celaya*. Ciudad de México. México.

## Aspectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento

### *Diseño de un secador de alimentos geotérmico*

Es relevante que para poder diseñar un secador de alimentos geotérmicos, debemos de tomar en cuenta los siguientes criterios para poder tener un funcionamiento eficiente. Los criterios que considerar son los siguientes (Pacheco Mendoza, 2019<sup>36</sup>):

- Temperatura húmeda del aire
- La temperatura de bulbo seco
- Humedad relativa del aire
- Punto de rocío
- Contenido de humedad en base húmeda
- Contenido de humedad en base seca
- Humedad del producto
- Caudal específico de aire
- Área específica de secado
- Pérdida de masa por el proceso de secado
- Trabajo de bombeo: Caudal de agua caliente

Las cámaras de secado pueden diseñarse en las siguientes configuraciones:

#### **a) Tipo Guardiola**

Presenta una buena uniformidad en la humedad final, con muy buena calidad de producto, ya que todos los granos reciben casi el mismo tratamiento térmico por el hecho de que se

<sup>36</sup> Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. Ciudad de México, México: Tesis de grado. UNAM.

mueven continuamente durante todo el proceso de secado, en una cámara rotativa. Algunas desventajas de este equipo es la tendencia a romper el grano, por lo que se recomienda para granos o productos cuya calidad no se base en la calidad física como el caso del café.



Figura # 17 - Tomada de (Cafeli, 2013)<sup>37</sup>

#### b) Tipo Estática de una sola capa en horizontal

Presentan altos gradientes de humedad, con diferencias hasta de 13% para una misma capa de granos. Para poder eliminar este defecto, se invierte la dirección del flujo del aire, con el objetivo de poder hacer informe la humedad del grano.

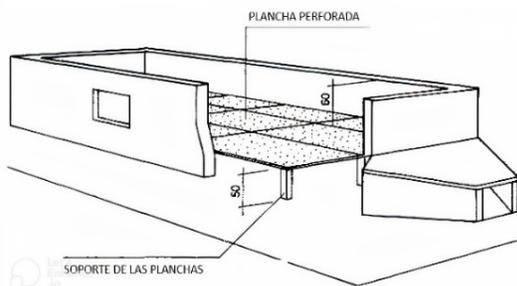


Figura # 18 - Tomada de (FAO, 1991)<sup>38</sup>

#### c) Tipo Estática de dos capas horizontales

En la primera cámara el aire pasa por sobre la capa que se desea secar más rápido, mientras que, en la otra cámara, el aire absorbido pasa a la segunda capa del grano, con lo que se produce un pre secado, que ayuda a disminuir los tiempos de secados totales. En el aspecto de las deficiencias de este modelo podemos mencionar que al no ser una cámara tan homogénea el aire que pasa a través de ella busca una salida de manera más vertical generando un mayor tiempo de secado si se compara con otras cámaras de secado.

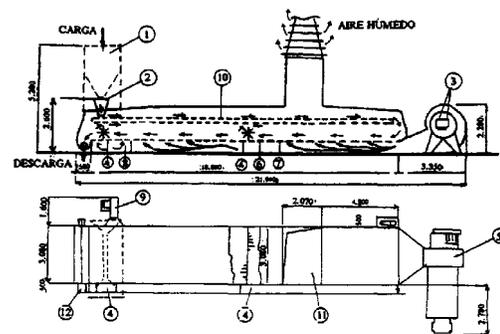


Figura # 19 - Tomada de (FAO & INPhO, 1998)<sup>39</sup>

#### d) Tipo Estática de dos y tres capas verticales

Tiene la ventaja de ser más económico que los anteriores secadores, debido a una reducción del área de secado del número de compuertas para invertir el flujo de aire para que fluya de abajo hacia arriba para las cámaras de pre secado y en las dos direcciones en la cámara de secado. Esta

<sup>37</sup> Cafeli. (2013). *Cafeli*. Obtenido de <http://cafeli.com.mx/index.php/es/inicio-2/71-cafeli/beneficio/beneficio-humedo/257-secadora-tipo-guardiola>.

<sup>38</sup> FAO, V. D. (1991). *fao.org*. Obtenido de [s://www.fao.org/3/x5059s/x5059s03.htm#Secador%20de%20lechero%20fijo%20de%20capa%20estacionaria](https://www.fao.org/3/x5059s/x5059s03.htm#Secador%20de%20lechero%20fijo%20de%20capa%20estacionaria)

<sup>39</sup> FAO & INPhO, C. A. (1998). *FAO.ORG*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x5028s/x5028s02.htm>

idea hace mucho más eficiente a los secadores debido a que utiliza el principio básico de dispersión, en el cual se busca que el aire pueda lo más pronto posible incorporarse nuevamente a la atmósfera.

### **Construcción de un secador geotérmico**

La construcción de equipos de secado que operan con energía geotérmica involucra la fabricación e instalación de las cámaras de procesamiento de alimentos, las cámaras de secado, la obra de toma del agua y su correspondiente reinyección al reservorio mediante un pozo de reinyección; instalación de las líneas de conducción del agua caliente y agua desmineralizada junto con los equipos de bombeo, controles de muestreo de la calidad del agua, el sistema de ventiladores, sopladores y sistema de ductos para conducir el aire caliente al interior de las cámaras, incluyendo sistemas de filtrado del aire. Contempla también, el área de recepción de los productos y área de empaquetado final, junto con una sección de monitoreo y análisis de los productos procesados.

Es importante tener en cuenta que la instalación de instrumentos de medición, sistemas de monitoreo y control de los parámetros es de extrema importancia a la hora de realizar una supervisión general del proceso.

### **Operación de un secador de alfalfa y producción de Pellets**

El proceso comienza cortando y picando la alfalfa en el campo con aproximadamente un 70 % de humedad inicial. Luego se deja que el material picado se seque al sol durante un periodo de 24 a 48 horas hasta alcanzar un contenido de humedad del 15 al 25 %. Esto se puede lograr fácilmente en áreas con alta disponibilidad de sol y con escasas precipitaciones durante la temporada de cosecha (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>40</sup>.

El material secado en el campo se transporta en camión a la planta y se almacena durante no más de dos días. Luego, el material picado se alimenta a un secador geotérmico con aire precalentado a 93°C a partir de agua geotérmica a 104°C aproximadamente. La alfalfa se seca a una temperatura inferior a 120°C. Cualquier temperatura superior a 200°C secará demasiado el producto, por lo tanto la temperatura de secado real depende de las condiciones ambientales y el contenido de humedad de la alfalfa. Las temperaturas de secado pueden bajar hasta 80°C. El material se mueve a través de la secadora mediante un ventilador de succión. El tiempo de retención es de aproximadamente quince a veinte minutos (Dickson & Fanelli, 2003).

---

<sup>40</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Posteriormente, la alfalfa seca se conduce a un molino de martillos y al depósito de harina de pellets. Aquí, el material se acondiciona con vapor y luego se alimenta a la extrusora de presión del molino de pellets. El vapor ayuda a proporcionar un producto uniforme y facilita la extrusión a través de los orificios de las placas circulares de acero. A continuación, el material se enfría y las partículas finas se eliminan en un escalpador. Finalmente, el producto se pesa en balanzas por lotes, se envasa y se almacena (Dickson & Fanelli, 2003). Las características técnicas y de inversión del secador son las siguientes:

- Dimensión de equipo deshidratador y peletizador de alfalfa: 1000 m<sup>2</sup> contemplando las áreas de recepción, secado, procesamiento y entrega de la alfalfa seca procesada en pellets.
- Capacidad de producción: 85 toneladas de producto seco al día, procesando 700 toneladas de producto fresco al día con un rendimiento del 14%.
- Inversión aproximada de 1.83 millones de dólares. Contemplando la compra de la alfalfa fresca en \$45 USD/Ton y la venta de la alfalfa seca de \$400 USD/Ton a \$670 USD/Ton, estimando un periodo de recuperación de la inversión en 2.3 años y una relación costo/beneficio de 2.3.

- Para la operación de este sistema se generarían 30 empleos directos y 40 indirectos.

## **Impactos socioambientales**

### **Sociales**

Para el caso de la agroindustria es muy importante resaltar la variabilidad de impactos positivos que la implementación de proyectos de aprovechamiento puede tener en una comunidad. En el secado de la madera es donde las aplicaciones de la energía geotérmica han alcanzado una importancia apreciable. El secado de las maderas por medios naturales implica tiempos que no son aceptables para la industria moderna. Los secaderos artificiales de madera requieren tiempos largos, que implica un alto costo de suministro de aire caliente empleando medios convencionales. El calor geotérmico puede producir un abaratamiento de estos, pues la fuente es continua una vez puesta en marcha. Si puede compartirse con otra aplicación, su rentabilidad puede ser muy alta y por ello, se relaciona su uso con las aplicaciones en cascada en donde también se puede aprovechar el secado de alimentos.

El proyecto también contribuye a posicionar a las comunidades vinculadas como actores principales para la mitigación del cambio climático, generando así nuevas formas de concientización sobre el uso eficiente y sustentable de la energía y su tecnología.

Implementar este tipo de puede impactar en los jóvenes que se ven en la necesidad de migrar de sus lugares de origen en busca de nuevas oportunidades de empleo y bienestar económico. Este tipo de proyectos representa nuevas formas de vincular los saberes tradicionales con la innovación tecnológica.

### **Ambientales**

Las ventajas asociadas al empleo de recursos geotérmicos para el secado de productos agrícolas, como sustitución de combustibles tradicionales como el carbón, el petróleo, el gas natural o los residuos de madera incluyen:

1. Suministro seguro y a largo plazo a partir de una fuente de energía básica
2. Alta disponibilidad del recurso, que ofrece coherencia en la entrega
3. Ahorro de costos para el usuario en comparación con otras fuentes de combustible
4. Rendimiento mejorado y mayor confiabilidad
5. Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Reemplazar el carbón o el petróleo con geotermia podría reducir las emisiones hasta en un 75%, mientras que las reducciones por reemplazar el gas natural podrían ser de hasta un 45%.

### **Secado de madera**

El secado de madera es el proceso mediante el cual se elimina el exceso de agua en la madera. Se aplica con el propósito de estabilizar la madera para un óptimo procesamiento y trabajabilidad.

### **Secado Natural**

En el secado natural, la madera, adecuadamente apilada, se expone a la acción de factores climáticos (temperatura, humedad relativa, velocidad del aire) del lugar donde esta apilada. Para una mayor eficiencia del secado natural es necesario tomar en cuenta las siguientes condiciones:

- \*Un patio de secado adecuadamente condicionado.
- \*Uso de separadores adecuados.
- \*Apilado correcto de la madera.

### **Condiciones para el secado natural**

**Patio de secado.** Un patio de secado adecuadamente acondicionado requiere de cumplir 3 condiciones básicas:

1. Localización del patio secado.
2. Preparación del terreno
3. Mantenimiento del patio secado

Vemos cada una de las condiciones señaladas.

1. Localización: El patio de secado debe estar ubicado:

- En una zona que garantice la circulación de aire alrededor de cada tabla para lograr un secado uniforme. De preferencia en un lugar libre de edificaciones y arboles altos.
- En una zona libre de malezas, desperdicios y charcos de agua para evitar la obstrucción en la circulación del aire y fuentes de humedad.

2. Preparación del terreno. Antes de secar la madera debe prepararse el terreno de tal manera que se garantice una mayor eficiencia del proceso de secado. La preparación del terreno incluye:

- Piso afirmado y con pendiente para facilitar el drenaje del agua ante posibles lluvias.
- \*El canal de drenaje debe estar en la parte delantera del patio y directamente conectado a las tuberías de desagüe.

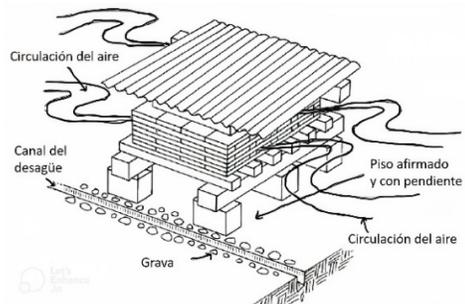


Figura # 20 - Patio de secado, tomada de (CITEmadera, 2009)<sup>41</sup>

3. Mantenimiento del patio secado:

- Realizar periódicamente, campañas fitosanitarias para combatir la presencia de hongos e insectos que pueden dañar la madera.
- Limpieza periódica del patio secado para garantizar el buen funcionamiento del sistema de drenaje y circulación del aire entre las pilas.

**Separadores.** Los separadores o listones son elementos valiosos para garantizar un proceso de secado eficiente, deben reunir las siguientes características:

- \*Preparados con madera de grano recto y dimensionalmente estable.
- \*Tener alta resistencia mecánica.
- \*Estar secos y libres de torceduras y rajaduras.
- \*No se debe emplear maderas que exuden resinas o taninos para evitar defectos de manchas por contacto con las tablas a secar,

**Apilado de madera.** El éxito del proceso de secado depende de un adecuado emparrillado o apilamiento de la madera.

Existen tres formas de apilar madera en el secado natural:

- \*Horizontal
- \*Triangulo
- \*Caballete

<sup>41</sup> CITEmadera, C. d. (2009). *Técnicas de secado de la madera*. Lima.

El apilado horizontal consiste en formar pilas horizontales con las tablas que se van a secar; colocadas una al lado de la otra y separadas verticalmente con listones o separadores. Adicionalmente, debe considerarse la preparación de tucos o tacos de madera de 4 x 4" sobre los cuales se coloca el emparrillado, para evitar el contacto de la madera con el suelo.

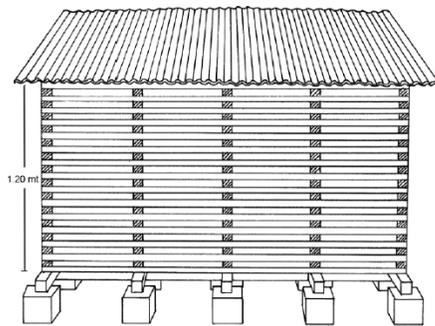
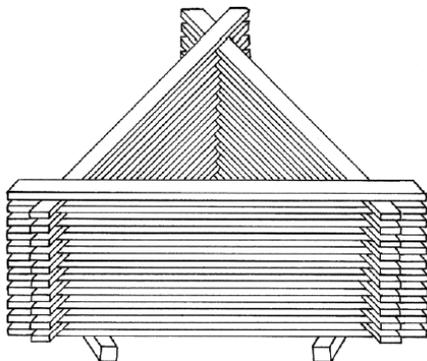


Figura # 21 - Apilado horizontal de la madera, tomada de (CITEmadera, 2009)<sup>42</sup>

El apilado en triángulo consiste en la formación de pilas mediante el entrecruzamiento de los extremos de las piezas, en este tipo de apilado no se usan separadores.



<sup>42</sup> CITEmadera, C. d. (2009). *Técnicas de secado de la madera*. Lima.

<sup>43</sup> CITEmadera, C. d. (2009). *Técnicas de secado de la madera*. Lima.

Figura # 22 - Apilado de la madera en triángulo, figura tomada de (CITEmadera, 2009)

El apilado en caballete o "X" consiste en la colocación de las tablas reclinadas o cargadas de canto, sobre una viga transversal o soporte. En el extremo inferior se colocan sobre una guía separada del suelo.

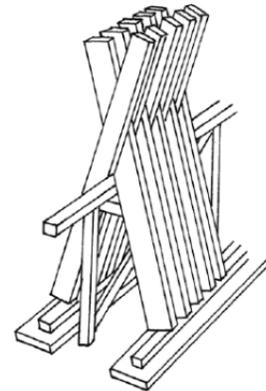


Figura # 23 - Apilado de la madera en caballete, tomada de CITEmadera<sup>43</sup>

### Acuicultura

La acuicultura implica la cría de organismos marinos o de agua dulce en un ambiente controlado para mejorar las tasas de producción. Las principales especies criadas de esta manera son carpa, bagre, lubina, tilapia, ranas, salmonetes, anguilas, salmones, esturiones, camarones, langostas, cangrejos de río, cangrejos, ostras, almejas, vieiras, mejillones, abulones, peces tropicales (cíclidos), caimanes y cocodrilos.

Se ha demostrado que es posible una tasa de reproducción mayor en menor tiempo si se utiliza el fluido geotérmico para calentar el agua. Caso contrario si el agua depende únicamente del sol para calentarse. Cuando la temperatura del agua cae por debajo de los valores óptimos, los especímenes pierden su capacidad de alimentarse porque su metabolismo corporal básico se ve afectado. Esto representa una ventaja al uso de fluidos geotérmicos puesto que cuenta con una temperatura constante. El uso de calor geotérmico permite un mejor control de la temperatura del estanque, optimizando el crecimiento, ya que el rango de temperatura óptima es muy estrecho para determinadas especies (CANGEA, 2014).<sup>44</sup>

### Aspectos térmicos

Generalmente, la temperatura ambiente es más importante para las especies acuáticas que para los animales terrestres, lo que sugiere que el potencial de la energía geotérmica en la acuicultura puede ser mayor que en la cría de animales, como la cría de cerdos y pollos (BARBIER & FANELLI, 1977)<sup>45</sup>. Los animales terrestres muestran mejor crecimiento en un amplio rango de temperaturas, desde poco menos de 10°C hasta aproximadamente 20°C. Por otro lado, las especies acuáticas, como el

camarón y el bagre, tienen un rango más estrecho de producción óptima a una temperatura más alta, cercana a los 30°C. Trucha y salmón, sin embargo, tienen una temperatura óptima más baja, alrededor de 15°C.

Un total de dieciséis países informaron sobre instalaciones de acuicultura geotérmica en el Congreso Mundial de Geotermia 2000. Los países líderes son China, Estados Unidos, Turquía, Israel, Islandia, Japón y Georgia. Desafortunadamente, en los informes de actualización de los países se presentó muy poca información sobre el tamaño de los estanques, el uso de conductos de agua o los kg de pescado producido. Por lo tanto, con base en el trabajo en los Estados Unidos, se calculó que se requiere 0.242 TJ/año / tonelada de pescado (lubina y tilapia) utilizando agua geotérmica en estanques y 0.675 TJ/año / tonelada de pescado en canales. Usando estos números aproximados, los 11,733 TJ/año de energía reportados para la acuicultura deberían ser equivalentes a producir entre 17,100 y 47,800 toneladas de pescado por año. Los 600 MW de capacidad instalada reportados dan un factor de capacidad para la industria acuícola internacional de 0.62.

<sup>44</sup> CANGEA. (2014). *Direct Utilization of Geothermal Energy: Suitable Applications and Opportunities for Canada*. Alberta, Canada: Canadian Geothermal Energy Association (CanGEA).

<sup>45</sup> BARBIER, E., & FANELLI, M. (1977). Non-electrical uses of geothermal energy. *Progr. Energy Combustion Sci.*, 73-103.

### Proyectos de acuicultura con geotermia, sistemas, diseños, construcción y operación

La cría de peces es un negocio exitoso en Japón, donde la carpa y la anguila son las especies más populares criadas. Las anguilas tienen mayor rentabilidad y se crían en tubos de barro de 25 cm de diámetro y 0.9 m de largo. El agua de las tuberías se mantiene a 23°C mezclando el fluido geotérmico con agua de río. Las anguilas adultas pesan de 100 a 150 gramos, con una producción anual total de 3.800 kg. En Islandia, se crían anualmente 610,000 alevines de salmón y trucha en agua geotérmica en diez criaderos de peces, en una industria nueva con una tasa alta de crecimiento (GEORGSSON & FRIDLEIFSSON, 1996)<sup>46</sup>. Los caimanes y cocodrilos también son criados en fluidos geotérmicos, tradicionalmente para el turismo. En combinación con los invernaderos que exhiben flora tropical, las granjas de caimanes se están volviendo aún más populares, lo que hace una contribución significativa al crecimiento de la industria turística nacional (J.G.E.A., 1974)<sup>47</sup>. Los caimanes ahora se crían en los Estados Unidos junto con las operaciones de acuicultura en Idaho y Colorado. La compañía Fish Breeders de Idaho, ubicada cerca de Buhl, ha criado bagres de canal en conductos de concreto de alta densidad durante casi treinta años, producción anual de 227

toneladas, donde el agua es suministrada por pozos geotérmicos a un gasto de 380 l/s a 32°C. El agua fría de manantiales y arroyos se utiliza para enfriar el agua caliente para obtener la temperatura óptima de producción. La densidad de población normal es de 80 a 160 kg de pescado por metro cúbico. El inventario máximo recomendado para la producción comercial es de aproximadamente 1,6 a 2,4 105 kg por metro cúbico por segundo de agua. La producción anual será normalmente de tres a cuatro veces la capacidad de carga. El oxígeno y el amoníaco son los principales factores que limitan la producción. La tilapia es de igual forma criada en Fish Breeders, con una producción anual de 45 toneladas. cultivada en agua fría en una propiedad adyacente. Se producen más de 90 toneladas de desechos anuales a partir del procesamiento del pescado para el mercado, por lo cual la cría de caimanes como solución al problema se dio en 1994. Los caimanes son alimentados con los desechos de pescado y, a su vez, son aprovechados por su carne y pieles (CLUTTER, 2001)<sup>48</sup>. Desde 1995, la operación ha procesado 3,500 caimanes con una longitud promedio de más de dos metros.

Por otro lado, el Instituto de Tecnología de Oregón (OIT) implementó un programa de crianza de langostinos gigantes de agua dulce, de

<sup>46</sup> GEORGSSON, L. S., & FRIDLEIFSSON, O. (1996). High technology in geothermal fish farming at Silfurstjarnan Ltd. N.E. Iceland. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 17(4), 23-8.

<sup>47</sup> J.G.E.A. (1974). *Geothermal energy utilization in Japan*. Tokyo, Japan: Japan Geothermal Energy Association.

<sup>48</sup> CLUTTER, T. (2001). Gators in the sage. *Geothermal Bulletin*. *Geothermal Resources Council*, 30(6), 246-9.

1975 a 1988. Investigaciones adicionales en el cultivo de truchas y peces mosquito (*Gambusia affinis*) en este sitio demostraron que estos y los crustáceos tropicales se pueden cultivar en un clima frío tan bajo como 7°C si la temperatura del agua se mantiene a la temperatura óptima de crecimiento. Inicialmente, se utilizaron dos estanques exteriores más pequeños (1.2 m de profundidad), antes de que se construyeran otros dos de 0.2 ha cada uno.

Se mantuvo una población reproductora seleccionada de camarones en un pequeño edificio de desove donde las larvas se incubaron en agua salada artificial y se criaron hasta la etapa postlarva, lo que hizo que la instalación fuese autosuficiente. Se mantuvieron tasas de crecimiento de 2 cm por mes (el doble que las obtenidas en climas tropicales) con una densidad máxima de 900 cm<sup>2</sup> de superficie por animal. El sistema de plomería de los estanques consistió en tubos difusores perforados, válvulas de control y termostatos para mantener una temperatura óptima en los estanques, 27 a 30°C, lo que proporcionó una distribución uniforme del fluido geotérmico en todos los estanques (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>49</sup>.

La comunidad indígena americana en Fort Bidwell (noreste de California) lanzó una operación muy exitosa de cría de bagres. El agua de pozo geotérmico a 40 ° C se mezcla con agua

fría para producir agua a 27°C, que luego se canaliza a los conductos 7.6 m de largo con 2.4 m de ancho y 1.2 m de profundidad. Dos conjuntos de canales paralelos utilizan de 57 a 63 l/s. con caída de 0.3 m entre canales para oxigenar el agua. La población inicial de 28 g de pescado a 3.000 por canal produjo 2.000 peces supervivientes a 0.9 kg cada uno en cinco meses. El costo de construcción de las canalizaciones y el pozo fue de US \$ 100,000. El pez se vende vivo en origen a un precio de entre US \$6.60 y US \$8.80 el kilo. Con un costo de producción en Fort Bidwell de aproximadamente US \$1.32 / kg (Dickson & Fanelli, 2003).

En una operación de cría de peces tropicales cerca de Klamath Falls, Oregón, el agua efluente de una operación de invernadero se usa para calentar 37 estanques de poco profundos revestidos con tierra de diatomeas. Estos estanques tienen 30 m de largo y 4 m de ancho, y varían de 1.0 a 1.4 m de profundidad. Se mantienen a una temperatura constante de 23°C, utilizando 7.0 TJ por año de calor geotérmico. En la actualidad, el propietario cría 85 variedades de peces cíclidos para tiendas de mascotas en la costa oeste de Estados Unidos. Aproximadamente 250,000 peces de 7.5 a 10 cm de longitud se envían anualmente desde el aeropuerto local o por carretera. El calor geotérmico es una ventaja real, ya que la mayor

<sup>49</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

demanda de pescado es durante los meses de invierno, donde el propietario estima que la operación ahorra US \$100,000 anuales utilizando el fluido geotérmico. En 1987, se estableció una de las granjas de camarón de agua dulce más grandes y exitosas en la Isla Norte, Nueva Zelanda, para aprovechar el calor residual geotérmico del campo de generación de energía de Wairakei. En la actualidad, la finca cuenta con 19 estanques que varían en tamaño de 0.2 a 0.35 ha con 1.0 a 1.2 m de profundidad. Los estanques se mantienen a una temperatura de 24°C con una variación de 1°C de un extremo del estanque al otro. Actualmente, la granja es capaz de producir hasta 30 toneladas de langostinos al año, donde los adultos se cosechan aproximadamente a los nueve meses, con un promedio de 30 a 40 kg, y se venden a US \$37/kg al por mayor y US \$60/kg al por menor. Un restaurante de la propiedad que atiende a unos 25,000 turistas cada año compra el 90% de las gambas recolectadas. En un futuro cercano, se agregarán otras 40 ha al otro lado de la planta de energía de Wairakei, utilizando agua de refrigeración residual de un generador de energía binario propuesto. La operación de cultivo podría convertirse entonces en el tercer productor de camarón de agua dulce más grande del mundo, con 400 toneladas por año, lo que significaría un ingreso de más de 6.7

millones de dólares anuales (LUND & KLEIN, 1995)<sup>50</sup>.

En 1992, una granja de anguilas inició operaciones en Eslovaquia cerca de Turcianske Teplice utilizando fluidos geotérmicos. El agua de pozo a 42°C se mezcla con agua fría y se suministra a 25°C a 60 tanques circulares de 4 m de diámetro. Cada tanque puede contener de 5,000 a 30,000 anguilas, con un peso total de unos 500 a 1,500 kg. Las anguilas se entregan inicialmente a la granja con un peso de aproximadamente 0.3 gramos, donde luego se crían durante 18 a 20 meses hasta que alcanzan un peso de unos 150 gramos. Las anguilas se recolectan en primavera y otoño, principalmente para exportación (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>51</sup>.

Según la experiencia del Instituto de Tecnología de Oregón, los estanques para la cría de camarones, gambusia y truchas se construyen mejor con 0.1 ha de superficie. Una operación comercial de tamaño mínimo debe tener de 3 a 4 ha en desarrollo (área de superficie de agua), o alrededor de 30 a 40 estanques. La superficie máxima que debe considerarse para un solo estanque es de 0,2 ha. Para los peces tropicales, se utilizan tamaños más pequeños en el rango de 5 por 30 m. La Figura # 24 ilustra el diseño del estanque geotérmico del Instituto de Tecnología de Oregón.

<sup>50</sup> LUND, J. W., & KLEIN, R. (1995). Prawn park: Taupo, New Zealand. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 16(4), 27-9.

<sup>51</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

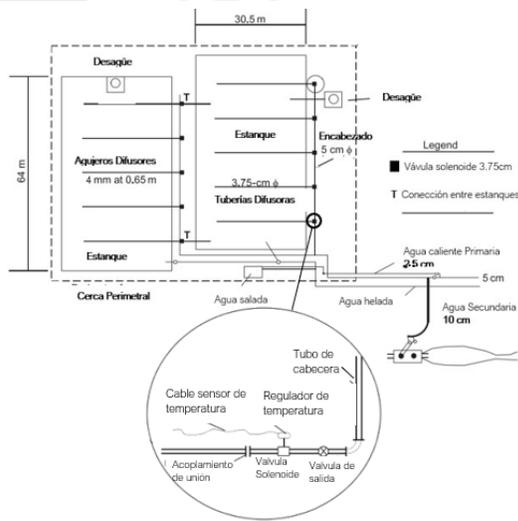


Figura # 24 - Proyecto de investigación de acuicultura geotérmica en el Instituto de Tecnología de Oregón (SMITH, 1981)<sup>52</sup>.

Las tendencias recientes son el uso de tanques de almacenamiento circulares, construidos de metal o fibra de vidrio, de 6 a 10 m de diámetro. Un ejemplo de este tipo de instalación geotérmica para tilapia se encuentra en Imperial Valley, California (RAFFERTY, 1999)<sup>53</sup>.

El tamaño y la forma óptimos dependen de la especie, así como el mecanismo y operación de los estanques.

## Tipos de sistemas

### Sistema de flujo

Un conjunto de estanques naturales o artificiales por los que fluye constantemente agua dulce está diseñado para especies provenientes de un hábitat natural con corriente o que requieren

altos niveles de oxígeno disuelto. Generan mayores producciones y permiten altas densidades de cultivo gracias al constante cambio de agua. El agua se obtiene de un cuerpo natural y se trata antes de ingresar al sistema de bombeo para mantener la integridad de los equipos. Es utilizado para el cultivo de trucha, tilapia y lubina entre otros (Guzmán, 2020)<sup>54</sup>.

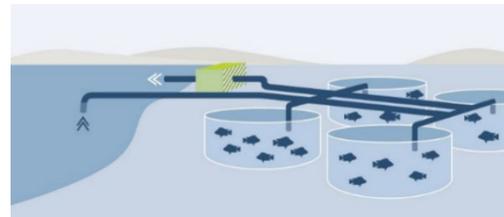


Figura # 25 - Esquema de sistema de flujo (Guzmán, 2020)

### Sistemas cercados de mallas

Esta técnica se implementa en cualquier cuerpo natural de agua; los especímenes están en contacto directo con el ecosistema lo que facilita su alimentación y las condiciones son las mismas que las del estanque por lo que no se ejerce un alto nivel de control sobre ellas, sin embargo, esto da lugar a afectaciones directas sobre el ecosistema local.

Su uso está extendido a lo largo del mundo, pero, las técnicas de cercado varían drásticamente entre diferentes regiones y especies, ya que es utilizado para el cultivo de bacalao, dorada, salmón, tilapia y lubina entre otros.

<sup>52</sup> SMITH, K. C. (1981). *A Layman's Guide to Geothermal Aquaculture*. Klamath Falls, Ore.

<sup>53</sup> RAFFERTY, K. (1999). *Aquaculture in the Imperial Valley: A geothermal success story*. *Geo-Heat Center Quarterly*, 20(1), 1-4.

<sup>54</sup> Guzmán, G. A. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de calefacción geotérmica de baja entalpía para el cultivo de Cherax Quadricarinatus* (Trabajo de Grado ed.). Ciudad de México: UNAM.

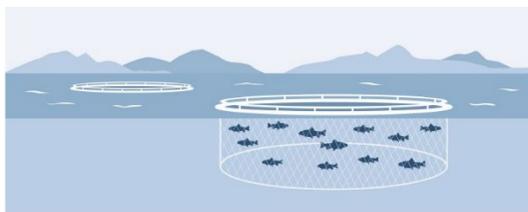
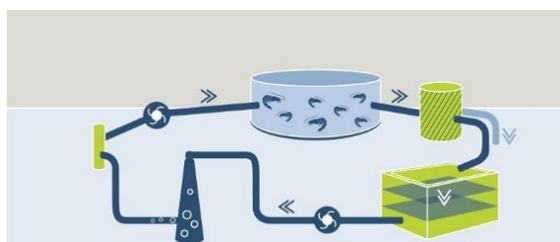


Figura # 26 - Esquema de sistema cercado de mallas  
(Guzmán, 2020)

### Sistemas cerrados de recirculación

Estos sistemas se componen de tanques y filtros a través de los cuales el agua es reutilizada en el mismo cultivo, manteniendo una calidad establecida. Debido a la recirculación del agua resultan sistemas independientes de factores climáticos y de fuentes naturales de agua. Esta leve interacción con el entorno permite que su impacto ambiental sea mínimo, pero con costos altos en comparación al resto debido a la necesidad de filtros mecánicos, biológicos, espumaderas, la adición de oxígeno durante el bombeo y el control de otros parámetros del estanque. A su vez, da a lugar a mayores rendimientos, elevadas densidades de cultivo y alta tasa de sobrevivencia. Algunas de las especies cultivadas bajo este sistema son la tilapia, lubina, esturión y camarón entre otros.



<sup>55</sup> Dickson , M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Figura # 27 - Esquema de sistema cerrado de circulación  
(Guzmán, 2020)

Los elementos más importantes por considerarse son la calidad del agua y las enfermedades. Si se va a utilizar directamente fluido geotérmico, se debe realizar una evaluación de metales pesados como fluoruros, cloruros y arsénico para determinar si cuenta con las condiciones óptimas de sobrevivencia para los peces o los camarones. Un estanque de aireación que preceda a los estanques almacenados a menudo resolverá los problemas químicos. Si es necesario, se puede utilizar un intercambiador de calor para aislar el fluido geotérmico del agua benigna del estanque en un circuito secundario (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>55</sup>.

Las especies candidatas para este tipo de acuicultura se enumeran en la siguiente tabla.

| Especies         | Periodo de Crecimiento (meses) | Temperatura del agua (°C) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Peces tropicales | 2 – 3                          | 23 – 27                   |
| Bagre            | 4 – 6                          | 27 – 29                   |
| Trucha           | 4 – 6                          | 13 – 18                   |
| Langostinos      | 6 – 9                          | 27 – 30                   |
| Tilapia          | 6 – 9                          | 22 – 30                   |

Tabla 2. Especies aptas para la acuicultura. (Dickson & Fanelli, 2003)

Los peces tropicales (cíclidos) generalmente cuentan con mayores beneficios, puesto que

requieren de una baja inversión y se obtiene un alto rendimiento. Los langostinos de agua dulce generalmente tienen un alto valor de mercado, con tamaños comercializables de 35 a 44 colas por kilogramo. El bagre de canal es especialmente popular como filete. La tilapia es uno de los productos pesqueros con mayor crecimiento en los Estados Unidos y es popular entre las operaciones geotérmicas. Los estanques requieren de fluido geotérmico de 38 a 66°C y un caudal máximo de 10 a 25 l/s para 0.2 ha de superficie descubierta, dependiendo del clima. El eje largo del estanque debe construirse perpendicular a los vientos predominantes para minimizar la acción de las olas y la pérdida de temperatura. Los estanques se construyen normalmente con tierra excavada y se recubren con arcilla o plástico donde sea necesario para evitar pérdidas por filtración. Se puede reducir la pérdida de temperatura, reduciendo así el fluido geotérmico requerido, cubriendo el estanque con una burbuja de plástico. El costo de construcción, excluidos los pozos geotérmicos y las tuberías, será de entre US \$75,000 y \$125,000 por hectárea (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>56</sup>.

### **Características de diseño**

El diseño de una piscifactoría comienza con la elección de las especies de peces puesto que esto determina en gran medida el rendimiento en

crecimiento, las técnicas de crianza y manejo, la calidad de agua exigida y la cantidad de residuos generados.

Las características de diseño sugeridas para proyectos de acuicultura son las siguientes (CANGEA, 2014)<sup>57</sup>:

- Utiliza agua a baja temperatura (se necesita un fluido geotérmico de baja temperatura)).
- Rango de temperatura del estanque de 15° C para truchas y salmón a 30° C para camarones y langostinos.
- Tasa de crecimiento de 30 a 50% más rápido con temperatura óptima constante del agua.
- El período de crecimiento varía de 2 a 3 meses para los peces tropicales a 6 a 9 meses para las gambas.
- Tamaños de estanque ideales de 0,1 a 0,2 ha (1000 a 2000 m<sup>2</sup>) con hasta 0,4 ha (4000 m<sup>2</sup>):
  - ✓ 15 m por 60 m por 1.0 a 1.5 m de profundidad es ideal para facilitar la recolección.
  - ✓ El volumen requerido para los tanques de peces dependerá de la densidad máxima de población que puedan soportar las especies en cuestión (es decir, de las estrategias de manejo) y su forma obedecerá a sus características funcionales.

<sup>56</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

<sup>57</sup> CANGEA. (2014). *Direct Utilization of Geothermal Energy: Suitable Applications and Opportunities for Canada*. Alberta, Canada: Canadian Geothermal Energy Association (CanGEA).

- Varias operaciones cuentan con tanques circulares de 10 a 40 m de diámetro (plástico o metal).
- Operación comercial mínima de 3 a 4 ha (20 a 30 estanques o tanques).
- Requerimientos típicos de agua: 40 a 65°C a 5 l/s por estanques de 0.1 ha en clima frío, sin cubrir.
- Construcción de estanques:
  - ✓ Eje largo perpendicular al viento para minimizar la acción de las olas y la pérdida de temperatura.
  - ✓ Construcción de tierra con revestimiento de arcilla o plástico.
  - ✓ Algunos cubiertos con burbuja de plástico o invernadero para minimizar la pérdida de calor.
- Costo de construcción: US \$ 75,000 a US \$ 125,000/a más los costos del sistema geotérmico.
- La consideración más importante es la calidad del agua y el control (prevención) de enfermedades que generalmente requieren el uso de intercambiadores de calor para aislar el fluido geotérmico del estanque.

### **Determinación de la energía térmica requerida**

Se busca aprovechar las propiedades de almacenamiento térmico provenientes de contener grandes masas de agua a cierta temperatura, ayudando a mitigar las variaciones drásticas de temperatura reponiendo ese calor mediante la adición de agua a mayor temperatura, compensando el calor perdido durante un periodo de condiciones ambientales adversas. Es un método económico de bajo mantenimiento que evita llegar a una temperatura mínima que pueda afectar gravemente la mortalidad. La variación de temperatura dependerá completamente de las condiciones ambientales por lo que no puede mantener una temperatura dada de manera constante (Guzmán, 2020)<sup>58</sup>.

### **Serpentín**

En este método se transfiere calor al agua de cría mediante un serpentín por el cual pasa una corriente de agua a una temperatura superior proveniente de un calentador actuando como un intercambiador de calor. Los calentadores suelen usar gas natural que se encienden y apagan mediante un sistema de monitoreo y control que actúa en un determinado rango de temperaturas. Estos sistemas permiten un control del nivel de recambio de agua que no depende totalmente de otros parámetros como

<sup>58</sup> Guzmán, G. A. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de calefacción geotérmica de baja entalpía para el cultivo de Cherax Quadricarinatus* (Trabajo de Grado ed.). Ciudad de México: UNAM.

el oxígeno y las partículas suspendidas en el estanque. Tiene la capacidad de mantener un rango de temperatura constante, sin embargo el uso de combustible aumenta el costo y las emisiones de gases invernadero (Guzmán, 2020).

### **Intercambio de agua**

En este sistema se incorpora agua con condiciones de cultivo a una temperatura mayor a la del estanque, compensando las pérdidas de calor y manteniendo una temperatura estable. Este flujo complementa o sustituye el flujo de recambio de agua necesario en la cría y puede complementarse de manera intermitente con el método de masa de agua para la recuperación del calor perdido (Guzmán, 2020)<sup>59</sup>.

### **Calentadores eléctricos**

Consiste en calentadores de inmersión, los cuales son directamente sumergidos en los tanques de cría. Al igual que los serpentines, actúan mediante un sistema de monitoreo y control para mantener un rango de temperaturas constante. El uso de los calentadores eléctricos eleva los costos debido a su alto consumo de energía eléctrica (Guzmán, 2020).

### **Calefacción del aire**

En instalaciones cerradas y con la infraestructura adecuada una opción es climatizar las

edificaciones donde se encuentran los estanques a la temperatura requerida por las especies de tal manera que los estanques lleguen al equilibrio térmico y mantengan una temperatura constante. Estos sistemas permiten un control muy preciso, sin embargo, requieren una infraestructura avanzada y una unidad de calentamiento dedicada debido a las condiciones de temperatura y humedad (Guzmán, 2020).

### **Construcción de sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia**

La construcción de los sistemas de acuicultura dependerá del sistema propuesto, ya sean tanques de almacenamiento circulares, sistemas de flujo, sistemas de cercados de mallas o sistemas cerrados de recirculación; cada uno con particularidades que requiere el proceso. Al hacer referencia a sistemas de acuicultura climatizados con flujo geotérmico, se pretende el confinamiento de las especies en tanques artificiales donde el control de la temperatura y demás parámetros sea mucho más eficiente, por lo que los sistemas cercados con malla se excluyen de esta aplicación.

La construcción de los estanques para la acuicultura climatizada con geotermia comienza por la delimitación de estos. A partir del diseño

<sup>59</sup> Guzmán, G. A. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de calefacción geotérmica de baja entalpía para el cultivo de Cherax quadricarinatus* (Trabajo de Grado ed.). Ciudad de México: UNAM.

de los estanques se establecen las dimensiones y características geométricas que pueden ser de forma circular, rectangular o de polígono. A su vez, se definen los materiales a utilizar para la construcción, así como los componentes auxiliares del sistema.

Una vez definida la forma, el tamaño y los materiales de los estanques, comienzan las obras civiles de acondicionamiento del terreno (nivelación, accesos, soportes de tuberías, etc.), la construcción de canales o zanjas para el traslado del agua de los cuerpos naturales hacia los estanques de crianza y el retorno hacia el lugar de origen. Se implementa la construcción de los estanques, considerando la cimentación, mampostería, estructuras de cubierta (para sistemas cerrados), zonas de accesos y muestreo, desniveles para oxigenación (de ser requeridos). En algunos sistemas se contempla la construcción de estanques de aireación que precedan a los estanques almacenamiento con la finalidad de resolver problemas químicos del agua. En esta etapa se incluye la construcción de depósitos de materia orgánica de desecho como lodos y sistemas de tratamiento.

Se desarrollan la toma del recurso geotérmico, mismas que involucran la instalación de la tubería y los sistemas de bombeo para la conducción del fluido geotérmico hacia los equipos de intercambio de calor que se instalarán dentro de los estanques y la correspondiente disposición final del recurso.

Además, se instalan los sistemas de tratamiento de agua y sistemas de filtrado en los puntos requeridos (antes de ingresar al sistema de bombeo de agua de los estanques). En el caso de los sistemas cerrados de recirculación, la instalación de los tanques y filtros a través de los cuales el agua se tratará para ser reutilizada en el mismo cultivo. Los filtros por instalarse dependerán del nivel de filtrado requerido pudiendo considerarse filtros mecánicos, biológicos, espumaderas, trampas de lodos, así como sistemas de adición de oxígeno durante el bombeo. Se instalan los instrumentos de medición de parámetros como el PH, temperatura, contenido de metales pesados como fluoruros y cloruros.

Finalmente, se construye la casa de máquinas, oficinas, y el resto de la infraestructura requerida donde se llevarán a cabo las operaciones del sistema eléctrico, hidráulico y sanitario.

### **Operación de sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia**

La operación de los sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia incluye el arranque de los sistemas de bombeo para el suministro de agua a los sistemas de acondicionamiento y tratamiento de agua. De igual forma se conduce el recurso geotérmico a los sistemas de intercambio de calor para calentar un flujo de agua acondicionada a un

valor de temperatura establecido. La alimentación del agua terminará cuando los tanques tengan el nivel deseado de agua, se recomienda dejar por lo menos un bordo libre de 10 cm.

Durante estas actividades se realiza la supervisión del funcionamiento correcto de la bomba elevadora de aire donde se determina la relación adecuada del caudal del aire y del agua. La aireación y la recirculación del agua se hacen mediante bombas elevadoras de aires (airlifts) que desempeñan dos funciones, bombear y airear.

Se deja operar el sistema durante un periodo establecido para estabilizar el sistema. Una vez que se cuenta con las condiciones químicas y ambientales ideales del agua se introducen los alevines y se monitorea continuamente parámetros como la oxigenación, la cantidad de CO<sub>2</sub>, sólidos en suspensión, nitrificación, temperatura, etc.

En un sistema de recirculación (SAR) el agua de los tanques de producción de peces se depura y se reutiliza, los sólidos se eliminan por sedimentación o tamizado, el oxígeno se añade por aireación u oxigenación, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se elimina mediante desgasificación y el amoníaco es convertido en su mayoría a nitrato (NO<sub>3</sub>) por nitrificación en filtros biológicos aerobios.

En los estanques de peces, el flujo debe ser lo suficientemente grande como para eliminar la

cantidad de residuos producidos y mantener la calidad del agua. Para controlar los requerimientos de agua de renovación se regula el sistema de bombeo correspondiente para garantizar la eliminación de dichos residuos.

Posteriormente, se acciona el sistema de bombeo de lodos y canales de sedimentación. Se toman, además muestreos periódicos que proporcionen información valiosa y herramientas relacionadas con:

- Calidad del agua, tanto a la entrada y salida de los filtros, observando:
  - ✓ Color
  - ✓ Turbiedad
  - ✓ Sólidos suspendidos totales
  - ✓ Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>)
  - ✓ Dureza total (DT), referente a la elevada concentración de sales
  - ✓ Alcalinidad
- En los estanques:
  - ✓ Temperatura
  - ✓ PH
  - ✓ Oxígeno disuelto
- Producción de alevines (Crecimiento adicional de alevines de peces en los estanques de crianza)
- Niveles de oxígeno y producción de algas
- Reducción de nutrientes y pérdida de materia orgánica

El análisis de estos datos facilitará la consolidación del plan de producción, donde se regulará el ciclo de producción, incremento

progresivo de alimentación diaria y de desechos biológicos. Se generan las curvas de crecimiento de los peces, caracterizadas por el tiempo necesario para llegar al peso de mercado.

### **Mantenimiento de sistemas de acuicultura acondicionados con geotermia**

Los mantenimientos se enfocan, por un lado, en los sistemas de intercambio de calor, llevando a cabo servicios de mantenimiento químico o mecánico para resolver problemas de corrosión e incrustamiento, que puedan derivarse en obstrucción de tuberías y válvulas afectando la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo. Otro punto por revisar son los equipos de bombeo, buscando evitar fallos por incrustaciones, tengan fugas a través de los sellos o atascamiento por partículas sólidas.

Por otro lado, en el área de producción, se debe tener un control estricto de la higiene para reducir agentes contaminantes que puedan alterar la calidad del agua, afectando la producción y calidad de los especímenes.

En caso de requerir detener la operación de un tanque para brindarle mantenimiento mediante el vaciado de este, es necesario primero cerrar la válvula de entrada del agua, seguido de cerrar la válvula correspondiente de salida. Una vez aislado el tanque, se procede a retirar los peces para desalojar el agua, el desalojo de agua puede emplearse mediante dos procedimientos; el primero, y más sencillo, es recurrir a una bomba

sumergible y el segundo, realizar un sifón de agua con una manguera. Una vez vacío el contenedor, se procede a realizar las acciones de mantenimiento que incluyen limpieza mecánica de materia biológica y remoción de lodos.

### **Mantenimiento de filtros**

Cuando la calidad del agua filtrada está por debajo de lo requerido y/o la tasa de filtración disminuye, es necesario limpiar el lecho filtrante debido a que los pequeños sólidos que han sido retenidos se acumulan en los intersticios de éste, obstruyendo los canales por donde circula el agua. En ciertas ocasiones se estrechan a tal grado que la presión del agua rompe los canales y provoca un arrastre de sólidos hacia la superficie. En algunos casos se presenta la acumulación de sólidos en la superficie del lecho. Algunas de las actividades de limpieza de filtros involucran:

- Retiro de sólidos acumulados en la superficie del lecho con ayuda de un sifón.
- Desechar el agua en la tubería de desagüe.
- Lavar el material filtrante con abundante agua.
- Retrolavado de filtros y del material restante.
- Colocar el material filtrante que se lavó nuevamente en el filtro.
- Reponer el agua que se empleó para el retrolavado.

Mantenimiento de tanques generalmente la materia fecal de los peces se deposita en el fondo de los estanques. Al llegar a un tamaño considerablemente grande como para ser arrastrada por el cabezal de succión, éstas se acumulan, por lo que es necesario retirarlas mediante el empleo de un sifón y el agua de desecho eliminada. La periodicidad de esta actividad dependerá de la cantidad y tamaño de los peces que se tengan en los estanques.

### **Mantenimiento de bombas**

Debido a que los equipos de bombeo son de operación continua se recomienda siempre contar con equipos de reserva. Esto con la finalidad de poder darle un mantenimiento preventivo, que se recomienda se realice por lo menos cada seis meses, y en el cual se debe revisar lo siguiente:

- Impulsor
- Rodamientos (Baleros)Capacitor
- Empaques
- Lubricación

Mantenimiento de instalación hidráulica: Este mantenimiento se basa en la revisión del estado de las tuberías. Para las tuberías de PVC, conectadas con pegamento y susceptibles a sufrir algún golpe, se fracturen, rompan o se despeguen las uniones realizadas con el paso del tiempo, deberán supervisarse rutinariamente para detectar fugas y repararlas. El no detectar a

tiempo los daños se puede ocasionar una pérdida importante de agua en el sistema. Se recomienda que esta inspección se realice por lo menos una vez por semana.

Es importante llevar a cabo servicios de mantenimiento químico o mecánico para las tuberías metálicas, resolviendo problemas de corrosión e incrustamiento que puedan derivarse en obstrucción de las tuberías y válvulas, afectando el caudal de agua requerido para el proceso.

### **Impactos socioambientales**

#### ***Sociales***

Un factor crítico para tomar en cuenta es el impacto social, uno de los aspectos que genera más riesgo ante cualquier desarrollo de proyectos de usos directos de la geotermia. La importancia de considerar el factor social en el desarrollo de proyectos de acuicultura, climatizados con geotermia de baja temperatura, cobra gran relevancia debido al impacto generado a la población.

A partir de la planeación de estos proyectos se deben estudiar las costumbres, tradiciones y creencias religiosas en la región, además del consumo local de productos marinos y trazar estrategias que permitan la aceptación general del proyecto para adoptarla como una actividad benéfica para la comunidad. Estos proyectos, generalmente tienen una incidencia directa en la

población en casi la totalidad de las etapas de desarrollo: construcción de la obra, operación, suministros, servicios, viviendas, medios de transporte, comunicaciones, entre otros (Guzmán, 2020)<sup>60</sup>; por lo que la aprobación y aceptación de los proyectos por parte de la comunidad es fundamental.

Algunos aspectos sociales para tomar en consideración en proyectos de acuicultura son (BEAZ PALEO, 2007)<sup>61</sup>:

- Verificar que no se interfiera con intereses pesqueros o marisqueros.
- No invadir áreas del sector turístico.
- No impedir otros desarrollos industriales que puedan ser prioritarios para la región.
- No alterar costumbres o tradiciones ancestrales.
- No afectar a la vida normal y habitual de la comunidad.

Los precios que alcancen en el mercado las especies identificadas pueden constituir incentivos importantes en la población, ayudando además a evitar incertidumbres en la fase de comercialización.

### **Ambientales**

El uso de la acuicultura como método de producción tiene el potencial de relevar algunas

de las presiones abrumadoras en especies naturales de peces. No obstante, si las técnicas no son utilizadas adecuadamente pueden ser dañinas al ambiente, especialmente en los casos donde la demanda del mercado causa la alta competición entre los proyectos de la acuicultura. Problemas como la destrucción de manglares y la salinización del agua subterránea debido a la explotación de la acuicultura (cultivo intensivo) deberán contar con un análisis detallado.

Análisis de problemas como fuga y transfaunación de especies, particularmente en los estanques alimentados en cuerpos de agua. La implementación de estanques aislados reduce la fuga de organismos de cuerpos de agua, ya que se no se precisa la captación y descarga del agua de los estanques a éstos. (CALDERON, 2006)<sup>62</sup>

Estudios detallados para evitar no solo los vertidos industriales y fecales, imposibles de paliar, sino también los caudales excesivos de aguas dulces que pueden arruinar la producción de la granja de acuicultura. La toma de agua debe realizarse a cierta profundidad (más de tres metros en marea viva baja) en zonas de aguas lo más saladas posibles y la descarga no debe interferir con la aspiración y debe ser en una zona de alta dispersión (BEAZ PALEO, 2007)<sup>63</sup>.

<sup>60</sup> Guzmán, G. A. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de calefacción geotérmica de baja entalpía para el cultivo de Cherax Quadricarinatus* (Trabajo de Grado ed.). Ciudad de México: UNAM.

<sup>61</sup> BEAZ PALEO, J. (2007). *Ingeniería de la Acuicultura Marina. Instalaciones en tierra*. Madrid: Publicaciones Científicas y Tecnológicas del Observatorio Español de Acuicultura.

<sup>62</sup> CALDERON, B. A. (2006). *Desarrollo de Acuicultura en estanquería rústica en el Rancho Los Ángeles, Puerto Rico, Carmen, Camp. MANIFESTACION DE INPACTO AMBIENTAL MODALIDAD PARTICULAR*. Ciudad del Carmen, Campeche.

<sup>63</sup> BEAZ PALEO, J. (2007). *Ingeniería de la Acuicultura Marina. Instalaciones en tierra*. Madrid: Publicaciones Científicas y Tecnológicas del Observatorio Español de Acuicultura.

## Invernaderos

### Generalidades

Una de las aplicaciones agrícolas que aprovecha, de manera directa, la energía geotérmica es la agricultura a cielo abierto mediante la calefacción de invernaderos. Algunas de las razones por las se utiliza esta energía en el sector agrícola son (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>64</sup>:

1. Buena correlación entre sitios de producción agrícola y zonas con recurso de baja entalpía.
2. El hecho de que los invernaderos sean uno de los mayores consumidores de energía de baja entalpía en la agricultura.
3. La energía geotérmica requiere instalaciones de calefacción relativamente simples, con la posibilidad de poder agregar, en etapas posteriores, instalaciones computarizadas avanzadas para el acondicionamiento total del clima interior en los invernaderos.
4. La competitividad económica de la energía geotérmica para calefacción de invernadero en muchas situaciones.
5. La importancia estratégica de las fuentes de energía disponibles, localmente, para la producción de alimentos.

A pesar de las ventajas del empleo de esta energía para cultivos agrícolas, estos sistemas presentan algunos inconvenientes como las

grandes cantidades de agua requeridas para tener una variación de temperatura significativa, sin que afecte a los cultivos tanto por las altas temperaturas como por el exceso de agua en el suelo que puede llegar a inundar los campos de cultivo. Otro factor importante es la composición química del agua, ya que, deberá ser monitoreada constantemente, con el fin de evitar daños a los cultivos. Una solución para estos casos es el uso combinado de riego localizado; como riego por goteo, y de un sistema de calefacción mediante el uso de tuberías de calefacción enterradas o al ras del piso. El uso del riego localizado se debe a un mejor aprovechamiento del agua que requieren las plantas, bajo mantenimiento, menor probabilidad de ahogar las plantas; además, al tener humedad en el suelo, aumenta la conductividad térmica de éste y beneficiando al desarrollo de los cultivos (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>65</sup>.

Si bien el aprovechamiento de la geotermia para el cultivo a cielo abierto otorga interesantes beneficios, suele ser más común su empleo para la calefacción de invernaderos. Los invernaderos pueden ser construcciones simples, como el uso de postes de madera y una cubierta o domo de película plástica; u obras más complejas mediante el uso de estructuras de aluminio, cubierta de plástico rígido, fibra de vidrio o

---

<sup>64</sup> Dickson , M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

<sup>65</sup> Dickson , M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

cristal, de una capa o de doble capa separadas por un espacio que contiene aire. Éste último sistema reduce las pérdidas de calor en las paredes de un 30 a 40%, mejorado la eficiencia del invernadero. Otra de las principales ventajas de los invernaderos es el control de los diferentes parámetros que afectan al desarrollo de los cultivos, éstos son (Dickson & Fanelli, 2003):

- Intensidad de la luz: Es el parámetro más importante, siendo éste el que afecta de manera directa a los demás parámetros. La radiación que afecta al desarrollo de las plantas, son las ondas de 400 a 700 nm. Ésta se controla por medio de las paredes y techos del invernadero.
- Temperatura: afecta a la transferencia de energía dentro del invernadero. Se ve influenciado por la temperatura del aire y del suelo, además de los materiales de construcción y equipos que cuente. Las plantas tienen rangos de temperatura óptimos para su desarrollo, este depende de la intensidad de la luz que reciba el invernadero; esto es a mayor intensidad luminosa, mayor la temperatura de la planta.
- Concentración de CO<sub>2</sub>: el CO<sub>2</sub> en el ambiente sirve como componente orgánico para el crecimiento de las plantas. Por medio de la luz y la fotosíntesis, transforman al CO<sub>2</sub> en azúcares y oxígeno. Como regla general,

a mayor intensidad luminosa y temperatura, mayor la concentración de CO<sub>2</sub> que se requiere.

- Cambios de aire: estos cambios se deben a la renovación de aire para brindar CO<sub>2</sub> a las plantas, afectando también la transferencia de calor entre las plantas y el aire, y al intercambio de agua entre éstos.
- Agua: elemento de igual importancia para el desarrollo de las plantas. La obtiene del aire y del suelo por medio de las raíces. La cantidad de humedad que se requiere en el ambiente dependerá del tipo de cultivo y la etapa de desarrollo en la que se encuentre.
- Instalaciones de calefacción y refrigeración: afecta a la temperatura tanto del aire como del suelo y a la velocidad y tipo de cambios de aire. Toma un papel activo en el balance de energía de las plantas.

Al proteger los cultivos de las condiciones ambientales de la región, es posible cultivar diferentes productos, incluso aquellos que no sean típicos de ésta y cosecharlos durante todo el año o en épocas de alta demanda; ya sea para consumo o venta. Dependiendo de la región de cultivo, las necesidades energéticas varían y en ocasiones será necesario el uso de equipos

auxiliares para el control del clima dentro del invernadero.

Para el caso del control de la temperatura y humedad se pueden utilizar equipos de calefacción, ya sea a lo largo del año o en temporadas específicas de bajas temperaturas. Se puede utilizar el recurso geotérmico de manera directa; mediante la circulación del agua directa por tuberías, o de manera indirecta con la transferencia de calor por medio de equipos adicionales como los intercambiadores de calor. Esto dependerá de la composición química del agua, la temperatura y la capacidad de inversión con la que se cuente.

### Aspectos térmicos

El clima óptimo de invernadero, es decir, el clima que permitirá un crecimiento óptimo de las plantas, en función de la intensidad y calidad de la luz disponible, es el resultado de un compromiso entre los valores óptimos de cada uno de los parámetros o elementos anteriores. Estos valores son interdependientes y en ocasiones pueden ser contradictorios (Popovski, 1991)<sup>66</sup>.

Un invernadero es una construcción destinada a crear un espacio protegido para el cultivo de plantas en un ambiente controlado, incluso durante períodos climáticamente desfavorables. La importancia de la luz en los procesos de vida

de las plantas implica el uso de materiales transparentes como vidrio, películas y láminas plásticas, fibra de vidrio, etc., que también aprovechan la energía solar para elevar las condiciones de temperatura interior. Sin embargo, esto no es suficiente para mantener las condiciones óptimas de crecimiento durante los períodos en que la radiación solar no es lo suficientemente fuerte y durante la noche.

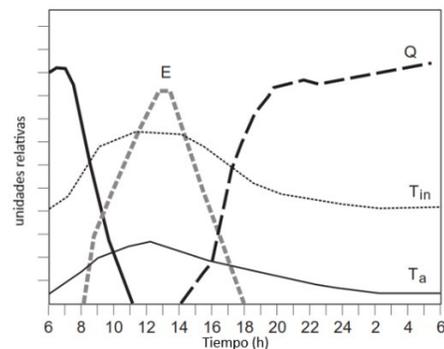


Figura # 28 - Fluctuaciones de los requisitos de calor en un invernadero; condiciones medias en enero en un invernadero en Gevgelia, República de Macedonia. E = flujo de energía de radiación solar ( $Wh/m^2$ );  $T_a$  = temperatura del aire exterior ( $^{\circ}C$ );  $T_{in}$  = temperatura óptima del aire interior ( $^{\circ}C$ ); Q = requisitos de calor del invernadero (W) (POPOVSKI K. , 1991).

Se requiere una fuente de calor adicional que se pueda regular. La cantidad de calor adicional necesaria depende del clima local, los requisitos de la planta y el tipo de construcción del invernadero. Durante un período de doce meses, depende principalmente de los cambios en la

<sup>66</sup> POPOVSKI, K. (1991). Engineering aspects of geothermal energy use in agriculture, guideline and textbook. Skopje, Macedonia.: International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy.

temperatura del aire exterior y en la intensidad de la radiación solar. (POPOVSKI K. , 1991).

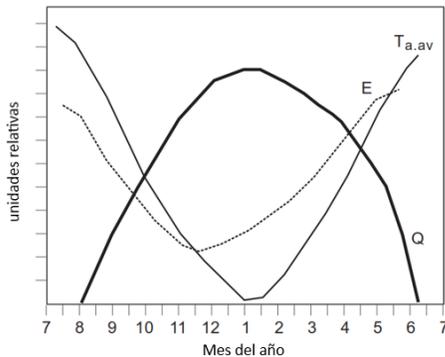


Figura # 29 - Fluctuaciones de los requisitos de calor en un invernadero durante un año típico en Gevgelija, República de Macedonia. E= flujo de energía de radiación solar ( $Wh/m^2$ ); T temperatura media mensual del aire exterior ( $^{\circ}C$ ); Q requisitos de calor del invernadero ( $W$ )

La Figura # 29 muestra los requisitos de calor de un invernadero en los Países Bajos; se puede observar que las demandas de energía máximas son de muy corta duración. Incluso en las condiciones Incluso en las condiciones que se dan en el norte de Europa, solo el 50% de la capacidad calorífica máxima se requiere para cubrir el 95% de la demanda de calor anual total. De manera similar, el 40 por ciento de la capacidad máxima de calor puede cubrir el 90 por ciento de la demanda de calor anual, el 25 por ciento cubre el 77 por ciento, y así sucesivamente (POPOVSKI K. , 1991)<sup>67</sup>.

Por lo tanto, se puede concluir que el consumo de calor varía diaria y anualmente, con períodos

bastante cortos de máxima demanda de calor. No está justificado invertir en costosas instalaciones para cubrir las necesidades totales de calor de los invernaderos. La carga máxima debe evitarse mediante una producción selectiva o se debe satisfacer mediante fuentes de calor que requieran inversiones reducidas.

### Aspectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento.

#### Factores que influyen en la elección de la solución tecnológica.

La solución tecnológica adoptada para los invernaderos depende de (Dickson & Fanelli, 2003):

1. El tipo de producción en invernadero, es decir, si las plantas requieren un clima controlado durante todo el año o solo durante algunos meses de la estación fría.
2. El papel de la instalación de calefacción, es decir, mejorar o controlar totalmente las condiciones de temperatura interior.
3. El tipo de pozo: es decir, artesanal o de producción mediante bombas eléctricas.
4. Características químicas de los fluidos geotérmicos.
5. Limitaciones provocadas por otros usos eventuales del agua geotérmica.

<sup>67</sup> POPOVSKI, K. (1991). Engineering aspects of geothermal energy use in agriculture, guideline and textbook. Skopje, Macedonia.: International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy.

### Sistemas de transmisión de agua caliente

El tipo de sistema adoptado para transmitir el agua geotérmica, desde su fuente a la planta de utilización, depende del tipo de pozo, las características químicas del agua y los costos de inversión y operación.

### Conexiones Directas

El agua a baja temperatura, con un bajo contenido de minerales, permite adoptar soluciones técnicas simples Figura # 30 . El agua se recoge en un tanque de-aereador abierto instalado sobre el nivel del suelo para que pueda fluir por gravedad a través de la tubería de transmisión y la instalación de calefacción. El calor se regula mediante una o más válvulas manuales (Íbidem:95).

Este tipo de solución es muy popular en los países mediterráneos, donde se utilizan invernaderos sencillos cubiertos de plástico para una cosecha de primavera más temprana. También es una opción viable cuando el agua es muy corrosiva, siempre y cuando se utilicen materiales plásticos para las tuberías de transmisión, los intercambiadores de calor y otras piezas de construcción que entren en contacto con el agua.

### Conexiones Indirectas

Si el contenido mineral del agua es muy bajo y las plantas en cultivo permiten mayores inversiones, se puede conectar una simple transmisión del pozo a un sistema de calefacción más sofisticado Figura # 31 que incluye una bomba de calor (4, 5 y 6 en la figura), de esta manera, el sistema de transmisión estará conectado indirectamente al sistema de calefacción.

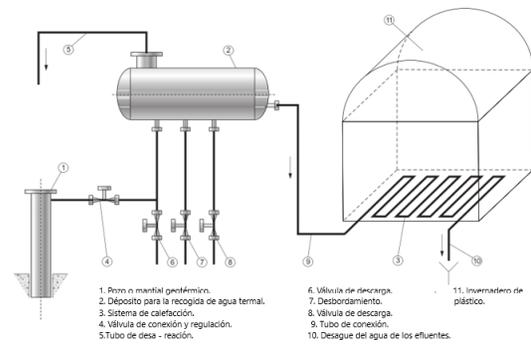


Figura # 30 - Conexión directa simple al pozo geotérmico (Dickson & Fanelli, 2003)

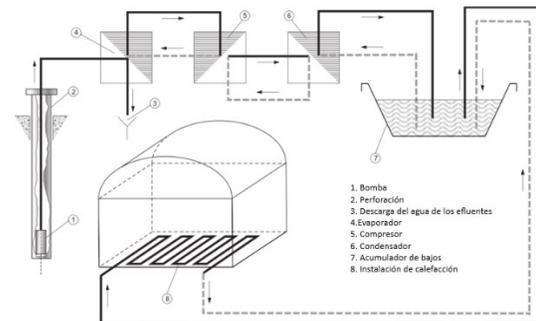


Figura # 31 - Instalación de bomba de calor con conexión simple al pozo (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>68</sup>

Las limitaciones ambientales y las aguas con alto contenido de minerales implican sistemas de transmisión más complicados, que incluyen

<sup>68</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

equipos como de-aereadores, reguladores de CO y pH, e inhibidores de la corrosión.

Los problemas que surgen con las conexiones indirectas (circuitos primario y secundario) están relacionados principalmente con el tipo de intercambiador de calor utilizado. Los intercambiadores de calor de placas han demostrado ser la mejor solución para aguas geotérmicas con alto contenido de sal (Dickson & Fanelli, 2003).

Algunas ventajas de este modelo son:

- Grandes superficies de intercambio de calor contenidas en un espacio reducido.
- Se pueden combinar diferentes regímenes de temperatura en un solo sistema de intercambiador de calor.
- Los flujos de fluido cruzado entre las secciones de la placa proporcionan altos coeficientes de transferencia de calor, y se pueden montar y desmontar fácilmente.
- Esto último es particularmente importante cuando se trata de fluidos geotérmicos con un alto contenido de minerales, ya que el equipo debe desmontarse y limpiarse con frecuencia para eliminar los depósitos de incrustaciones.

### ***Usos combinados***

Una de las principales desventajas del uso de energía geotérmica en invernaderos es el costo de inversión bastante alto para el pozo y los

sistemas de transmisión y regulación, que pueden usarse solo una parte del año. En consecuencia, el precio del calor utilizado será elevado.

Este problema puede resolverse encontrando otros usuarios potenciales del calor. Idealmente, las necesidades de calor anuales y diarias de estos usuarios potenciales deberían ser diferentes; es decir, cuando un usuario necesita el máximo calor, el otro debería necesitar un mínimo. A continuación, se presenta un ejemplo de cómo se podría compartir el recurso en diferentes aplicaciones.

En situaciones particulares, puede ser más conveniente agregar al sistema equipos de calefacción auxiliares baratos para satisfacer las cargas de calor pico de corta duración Figura # 33.

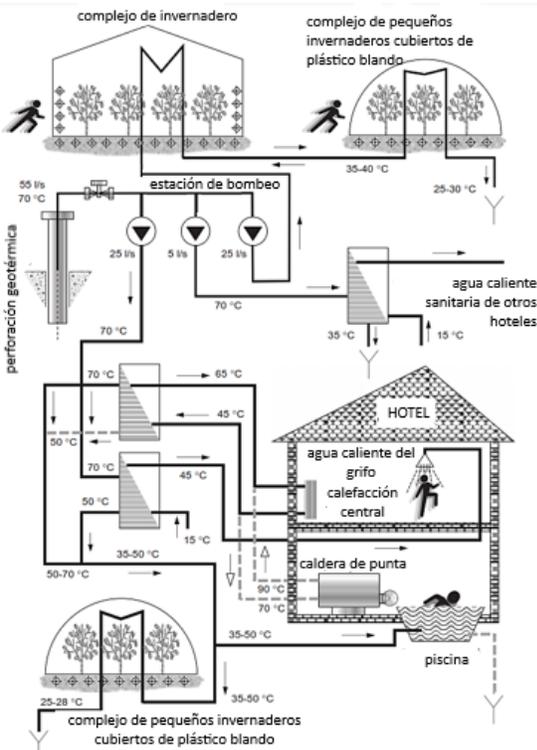


Figura # 32 - Diagrama de flujo simplificado del sistema geotérmico integrado de Bansko (República de Macedonia), que consta de calefacción de invernadero y diferentes usuarios de calor de un complejo de hotel-spa (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>69</sup>

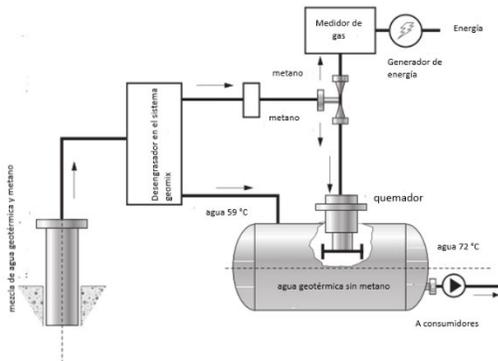


Figura # 33 - Instalación geotérmica técnicamente mejorada en Srbobran (Yugoslavia), con extracción del CH<sub>4</sub> del agua geotérmica para la generación de electricidad y uso directo de calor para la demanda máxima en el invernadero (Dickson & Fanelli, 2003)

## Instalaciones de calefacción en invernaderos geotérmicos

La instalación de calefacción es el término comúnmente utilizado para el intercambiador de calor que proporciona calor adicional en los invernaderos. La temperatura del recurso caliente, es decir, el agua geotérmica, y los requisitos particulares de las plantas en el invernadero, dictan su diseño, ubicación, material, medios de regulación, etc. El nivel de sofisticación depende del nivel tecnológico de producción, la construcción de invernaderos, el clima y los factores técnicos y económicos (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>70</sup>.

Hay dos soluciones tecnológicas extremas que abarcan un amplio espectro de esquemas intermedios. Los dos extremos se describen a continuación:

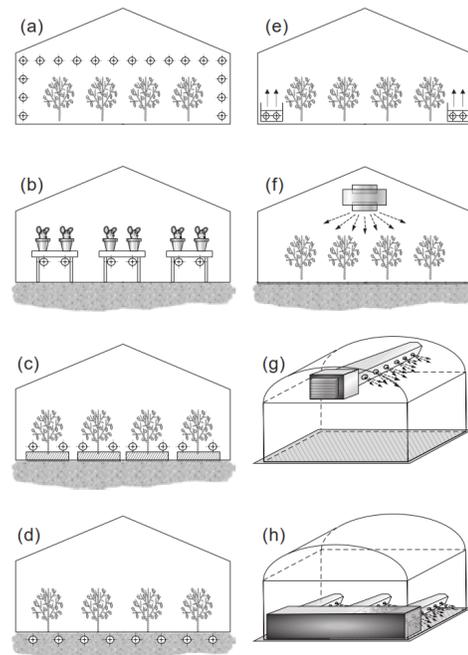
1. Instalación de calefacción sencilla, fabricada con materiales plásticos que conecta la fuente de calor directamente con el invernadero y regulación manual del suministro de calor.
2. Instalación de calefacción sofisticada para climatización total, con regulación automática del suministro de calor. Los factores que influyen en los requisitos de calor son las condiciones interiores y exteriores, el crecimiento de las plantas y los

<sup>69</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

<sup>70</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

programas de producción. Estas instalaciones están económicamente justificadas en costosos invernaderos o construcciones de plástico rígido, equipadas con la tecnología para producción intensiva. Si las características químicas del agua termal son desfavorables, el pozo puede conectarse indirectamente a las instalaciones del invernadero.

Estas dos soluciones tecnológicas utilizan diferentes tipos de intercambiadores de calor, dependiendo del requerimiento de energía, las características químicas del agua geotérmica, la construcción del invernadero y los factores económicos. Los intercambiadores de calor aéreos pueden clasificarse según el tipo de transferencia de calor y la ubicación de los elementos calefactores Figura # 34. Desde el punto de vista técnico, este enfoque es incompleto, ya que no incluye algunas instalaciones típicas de baja temperatura que no se limitan a calentar solo el aire.



*Figura # 34 - Clasificación de sistemas de calefacción de baja temperatura. Instalaciones de calefacción con movimiento de aire natural (convección natural): a) calefacción de tuberías aéreas; b) calentamiento de banco; (c) tubos de calefacción de posición baja para calefacción aérea; (d) calentamiento del suelo. Instalaciones de calefacción con movimiento de aire forzado (convección forzada); (e) posición lateral; (f) ventilador aéreo; (g) conductos de alta posición; (h) conductos de baja posición (Dickson & Fanelli, 2003)*

Hoy en día, las combinaciones más utilizadas son las desarrolladas entre 1986 y 1988 por Bailey, von Elsner y Popovski, porque estos arreglos se han acomodado a las necesidades particulares de los cultivadores y, por lo tanto, son mucho más prácticas y fáciles de entender (Dickson & Fanelli, 2003) A continuación se mencionan algunos:

- Sistemas de calefacción con intercambiadores de calor dentro del suelo o base de cultivo.
- Sistemas de calefacción con los intercambiadores colocados en el suelo
- Superficie o en bancos.
- Sistemas de calefacción de tuberías aéreas.
- Convector asistido por ventilador sistemas de calefacción de aire sistemas de calefacción no estándar sistemas de calefacción combinados.

### Instalaciones de calefacción de suelo

El objetivo de las instalaciones de suelo radiante es calentar el sistema radicular de la planta (Fig. 31). Pueden cubrir solo una parte de la demanda total de calor y pueden usarse sin otros sistemas de calefacción solo en condiciones climáticas muy suaves. Son económicamente viables solo para cultivos que requieren una regulación precisa de la temperatura del sistema radicular, o en combinación con otros tipos de instalaciones de calefacción para el control de la temperatura del ambiente del invernadero (Dickson & Fanelli, 2003).

### Instalaciones de calefacción de suelo-aire

Estas instalaciones constan de un sistema de elementos calefactores colocados en la superficie del suelo Figura # 36. Con este diseño

se calienta la capa superior del suelo y el aire, lo cual es muy conveniente para ciertas regiones. Existen diferentes tipos de elementos calefactores disponibles comercialmente para este propósito:

- Tubos delgados para calentar el suelo, ya sean metálicos o de plástico tanto lisos como corrugados.
- Fundas de plástico transparente (tubos de gran diámetro).
- Placas de politubo de plástico, blando y rígido.
- Placas de plástico.

La colocación adecuada de los elementos calefactores permite una transferencia óptima de calor a las plantas y una pérdida mínima de calor al medio ambiente. Es una excelente solución para cubrir la demanda total de calor en climas más suaves, o la demanda base en climas moderados y rígidos (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>71</sup>.

<sup>71</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

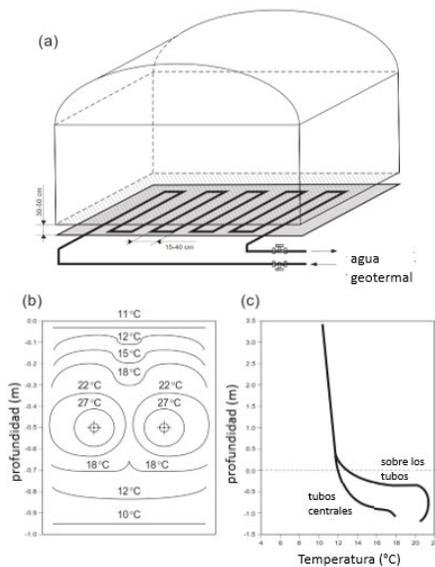


Figura # 35 - Instalación para calentar el suelo en invernaderos: (a) posición de las tuberías de calefacción; (b) perfil de temperatura del suelo calentado; (c) perfil de temperatura vertical en el invernadero (Dickson & Fanelli, 2003)

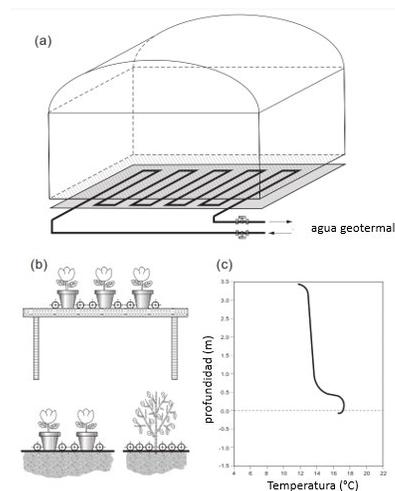


Figura # 36 - Instalación para calentar el aire y el suelo en invernaderos (tubos de calefacción colocados en la superficie del suelo). (a) Posición de las tuberías de calefacción; (b) diferentes soluciones para la colocación de tuberías de calefacción (cultivo en bancos, en macetas en la superficie del suelo y en el suelo); (c) perfil de temperatura vertical en invernadero (Dickson & Fanelli, 2003)

### Instalaciones de calefacción de tuberías aéreas y convectores

Este grupo de instalaciones de calefacción consta de tubos metálicos, lisos o con aletas, colocados sobre la superficie del suelo Figura # 37. La ventaja de estas instalaciones es que permiten una regulación rápida y precisa de la temperatura, pudiendo utilizarse solas incluso en climas moderados y rígidos. El inconveniente es que el coeficiente de transferencia de calor para los fluidos de calefacción de baja temperatura es muy bajo, lo que significa que las superficies de calefacción deben ser muy grandes y, por lo tanto, pueden reducir la difusión de la luz en el invernadero y comprometer las condiciones de trabajo. Los perfiles de temperatura verticales son bastante desiguales para los elementos calefactores de las tuberías, pero no para los convectores. Sin embargo, los convectores no son adecuados para aguas termales de baja temperatura (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>72</sup>.

### Conectores con ventilador

Se pueden lograr mejoras significativas en el coeficiente de transferencia de calor mediante la introducción de asistencia de ventilador, incluso para fluidos de calefacción de baja temperatura. Las unidades compactas de calentamiento de aire asistidas por ventilador se pueden utilizar como elemento calefactor, soplando aire

<sup>72</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

caliente directamente en el ambiente protegido; alternatively, estos pueden combinarse con uno o más tubos de distribución de aire de plástico blando colocados sobre o entre las filas de plantas (Fig. 94). Una buena solución técnica es colocar los convectores longitudinalmente. La calidad de calentamiento conseguida depende en gran medida de la solución técnica adoptada. Los perfiles de temperatura verticales son bastante uniformes cuando las tuberías de distribución de aire se colocan en el medio de las plantas, pero muy desiguales cuando se ubican sobre ellas (Dickson & Fanelli, 2003).

Este tipo de instalación es muy popular en los países mediterráneos y en Estados Unidos por ser sencilla, económica, apta para la regulación automática mediante equipos económicos y garantiza una rápida respuesta a los cambios de temperatura exterior (Dickson & Fanelli, 2003).

### Otros tipos de instalación de calefacción

Algunas ingeniosas instalaciones de calefacción se han diseñado para condiciones locales particulares. Por ejemplo, en Grecia se ha desarrollado un intercambiador de calor aire-agua Figura # 39 para superar los problemas de formación de incrustaciones causados por el agua geotérmica. La tubería que lleva el agua se coloca dentro del tubo de distribución de aire. Este último está hecho de material de polietileno

barato, que se puede reemplazar después de una o dos temporadas productivas. También se adoptan unidades de calefacción evaporativa en algunos casos (Dickson & Fanelli, 2003).

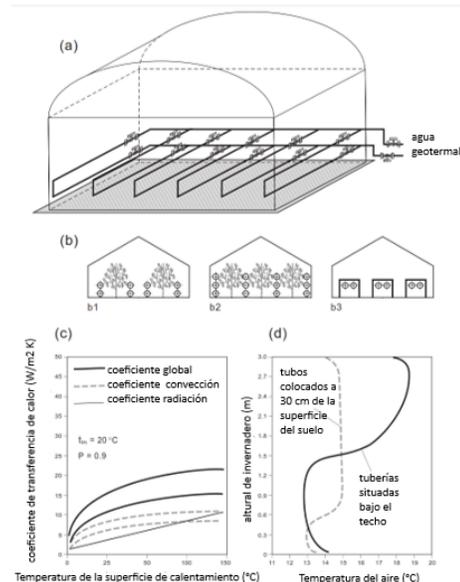


Figura # 37 - Instalaciones de calefacción aérea de tubos de acero lisos o con aletas. (a) y (b) Posición de los intercambiadores de calor de tubos aéreos para fluidos de calefacción de baja temperatura: (b1) a lo largo de las filas de plantas; (b2) en el dosel de la planta; (b3) debajo de los bancos; (c) coeficiente de transferencia de calor para el interior del invernadero basado en el diámetro de la tubería y la temperatura del fluido calefactor; (d) perfil vertical de temperatura del aire en un invernadero calentado por instalaciones de calefacción de tuberías aéreas (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>73</sup>

<sup>73</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

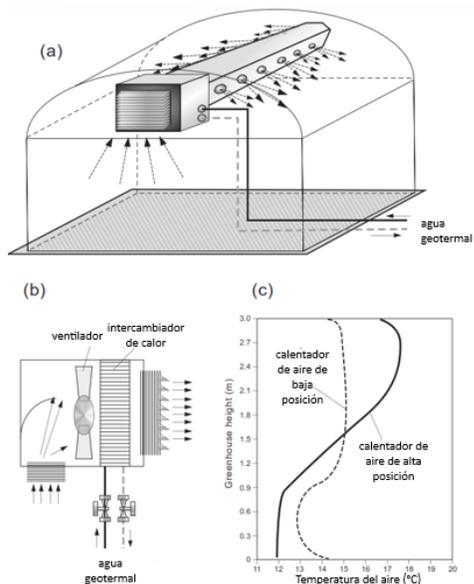


Figura # 38 - Ubicación del sistema de calefacción de "flujo de ventilador" en un invernadero; (b) diseño de una unidad convectiva asistida por ventilador; (c) perfiles de temperatura verticales en un invernadero calentado con unidades de convección de ventilador a diferentes alturas (Dickson & Fanelli, 2003)

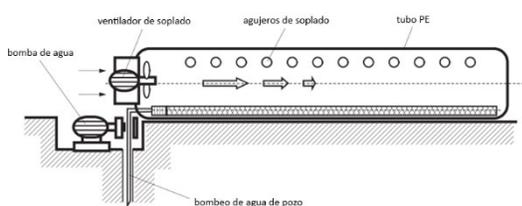


Figura # 39 - Intercambiador de calor agua / aire en tubo de distribución de aire (Dickson & Fanelli, 2003)

### Factores que influyen en la elección de la instalación de calefacción

Uno de los problemas de diseño más difíciles en un proyecto de invernadero geotérmico es la elección de una instalación de calefacción

técnica, tecnológica y comercialmente viable. Cada caso debe ser evaluado por sus diferentes prestaciones, teniendo en cuenta todos los factores que influyen para llegar a la solución óptima (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>74</sup>.

#### a) Perfiles de temperatura en invernadero.

El objetivo principal de la instalación de calefacción de invernadero es mantener la temperatura del ambiente en valores cercanos a los óptimos. Sin embargo, ninguna de las instalaciones que acabamos de describir garantizará un perfil de temperatura vertical Figura # 40 u horizontal Figura # 41 totalmente uniforme dentro del invernadero. Para una temperatura del aire de referencia de 1,5 m por encima del nivel del suelo, la diferencia a nivel del suelo y por debajo del techo del invernadero podría ser de hasta 5 a 6 ° C Figura # 42. Es obvio que tales diferencias pueden ser de crucial importancia para la elección de la instalación de calefacción (Dickson & Fanelli, 2003).

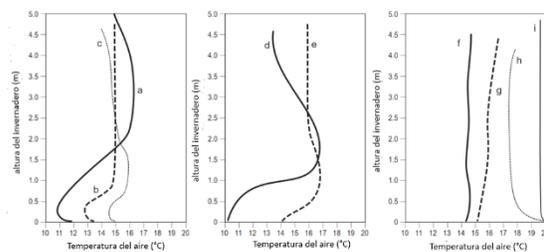


Figura # 40 - Perfiles verticales de temperatura en invernadero, en función del tipo y ubicación de la instalación de calefacción. (a) Tuberías aéreas altas; (b) tubos altos; (c) tuberías bajas; (d) calentadores de aire en

<sup>74</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

posiciones altas; e) sistema de "flujo de aire" a 2 m por encima del cultivo; (f) calentamiento de aire a alta velocidad; (g) convectores; h) "chorro de aire" entre las plantas; (i) 'fan-jet' debajo de los bancos (Dickson & Fanelli, 2003)

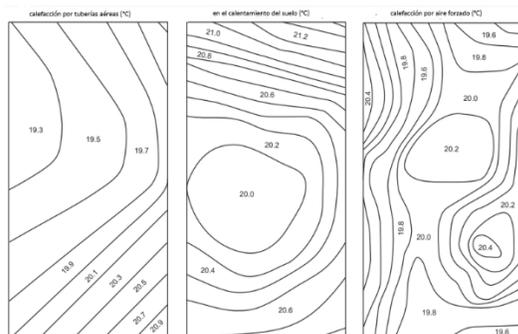


Figura # 41 - Distribución horizontal de temperatura (°C) en un invernadero calentado por diferentes tipos de instalación de calefacción, bajo las mismas condiciones climáticas exteriores (Dickson & Fanelli, 2003)

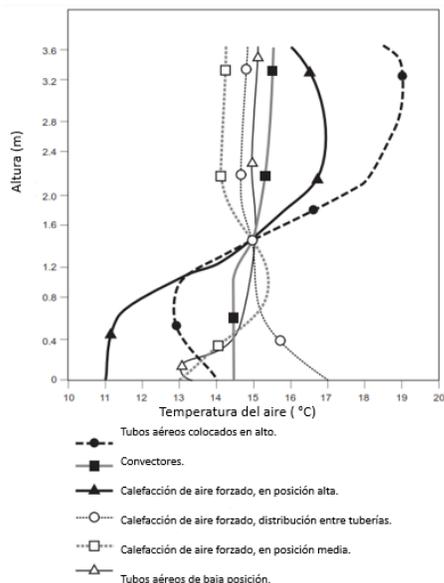


Figura # 42 - Temperaturas verticales del aire en un invernadero, calentado por diferentes tipos de instalación de calefacción (Dickson & Fanelli, 2003)

### Aspectos Económicos

La viabilidad comercial de la calefacción geotérmica de invernadero depende de una serie de factores, como los costos de inversión de capital, los costos operativos, el costo de la energía con respecto al valor del producto y el mercado disponible para el producto. Si dejamos fuera todos los factores que son comunes a cualquier fuente de energía, es obvio que el factor crucial para estimar la viabilidad comercial y competitividad de la energía geotérmica es el precio del calor utilizado. El precio final del calor depende de factores como la inversión de capital requerida, las condiciones crediticias, los costos de mantenimiento y utilización, los seguros y los impuestos, los costos laborales, los precios del combustible, la eficiencia de la planta y el coeficiente de utilización (Dickson & Fanelli, 2003).<sup>75</sup>

Dependiendo del tipo de energía utilizada y las condiciones locales, se pueden trazar curvas características (Fig. 39) para mostrar la dependencia del precio del calor usado del factor de carga térmica anual (horas de utilización de la capacidad calorífica instalada) (POPOVSKI K. , 1988)<sup>76</sup>.

<sup>75</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

<sup>76</sup> POPOVSKI, K. (1988). Simple heating methods for mild Mediterranean climate conditions. Djerba-Tozeur.: ISHS Symp. on Simple Methods for Heating and Ventilating Greenhouses in Mild Climate Conditions.

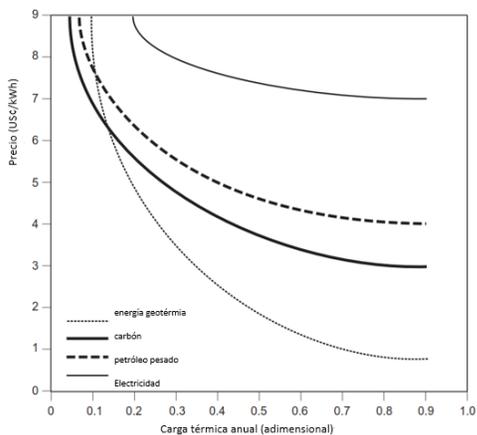


Figura # 43 - Carga de calor anual (adimensional) (Dickson & Fanelli, 2003)

Estas curvas diferirán de un caso a otro, pero generalmente se muestra que la energía geotérmica no es económica para períodos cortos de utilización. Se pueden obtener beneficios reales si la energía térmica disponible se utiliza durante largos períodos del año; es decir, es muy conveniente para cubrir las demandas de calor base. Es más económico satisfacer las demandas máximas con alguna otra energía que no requiera grandes inversiones de capital. Como ejemplo, en la Figura # 43 se presenta un análisis de datos económicos para invernaderos geotérmicos ubicados en Macedonia (POPOVSKI K., 1991)<sup>77</sup>. Los invernaderos cubren 3 ha, con 6 MW de capacidad instalada; el pozo geotérmico produce 50 l/s y el régimen de temperatura de las instalaciones de calefacción es de 70/40° C. El

<sup>77</sup> POPOVSKI, K. (1991). Engineering aspects of geothermal energy use in agriculture, guideline and textbook. Skopje, Macedonia.: International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy.

precio del crudo pesado es de 200 US \$/t, de 12,000 J/kg, de carbón es de US \$ 75 y la electricidad US \$ 0.065/kWh. Las condiciones de crédito son: ocho años de reembolso, dos años de período de gracia, una tasa de interés del 10 por ciento. El análisis se realizó determinando el precio de los kWh de energía térmica utilizados para diferentes cargas durante el año, para cada uno de los combustibles listados y energía geotérmica (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>78</sup>.

La proporción óptima de las diferentes fuentes de energía que cubren el consumo total de calor puede definirse mediante un análisis adicional, que nuevamente tiene en cuenta los factores locales. En el caso descrito anteriormente, si el consumo total de calor se cubre con energía geotérmica, el precio del calor utilizado sería de aproximadamente US \$ 0.07 / kWh. Si el 50 por ciento de la capacidad térmica está diseñada para ser suministrada por energía geotérmica y el 50 por ciento por una planta de calderas de petróleo pesado, entonces el precio bajaría a alrededor de US \$ 0,04 / kWh, que es más económico que usar una sola forma de energía. Idealmente, el proyecto debería contemplar una combinación de diferentes usuarios de calor, con diferentes factores de utilización. Por ejemplo, si 6 MW de la capacidad total se utilizan para calefacción de invernadero, 6 MWt para calefacción de espacios y agua caliente sanitaria

<sup>78</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

y 0.6 MWt para secado de cultivos (de julio a octubre), todos conectados al mismo pozo mencionado anteriormente y a una planta de caldera de petróleo pesado de 6 MWt, sería posible alcanzar un factor de utilización del 59 por ciento para el pozo (carga térmica  $L = 0.59$ ). El precio por kWh bajaría entonces a sólo US \$ 0,023 / kWh, que es mucho más competitivo que otras fuentes de energía (Dickson & Fanelli, 2003).

### **Problemas Operativos**

Los problemas operativos están relacionados principalmente con la naturaleza de los recursos geotérmicos. Los problemas comienzan en el manantial o en la boca del pozo. Si es un manantial artesiano natural, se encontrarán pocas dificultades, pero si es un pozo donde es necesario bombear, pueden surgir dos problemas importantes: la sobreexplotación podría agotar el depósito y la arena podría dañar las bombas. Para evitar el primer problema, las características del reservorio deben investigarse a fondo antes de iniciar el uso comercial, para definir el manejo óptimo de los recursos. El problema de la arena sólo puede resolverse filtrando el agua antes de que llegue a las bombas y evitando un arranque brusco de los equipos de bombeo. Otro problema es la corrosión, causada principalmente por el oxígeno

(O<sub>2</sub>), el dióxido de carbono (CO), el cloro (Cl) y el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en el agua geotérmica. Actualmente se están adoptando tres soluciones: materiales no corrosivos, modificación de la composición química mediante deaeración y separación o neutralización de componentes químicos agresivos, y conexión indirecta de las instalaciones de calefacción al pozo. Aún queda por alcanzar un buen compromiso entre los requisitos técnicos y los resultados económicos. Las soluciones simples darán lugar a un mantenimiento frecuente, mientras que las soluciones sofisticadas son demasiado caras y rara vez se justifican económicamente. Se produce un problema similar con la escala (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>79</sup>.

Se han desarrollado varios métodos para combatir las incrustaciones, como los inhibidores químicos y el tratamiento del agua con un campo magnético y ondas ultrasónicas. Nuevamente, cada situación debe evaluarse por separado. Los problemas con respecto al intercambiador de calor provienen de las propiedades físicas de los materiales utilizados y la regulación del suministro. Los intercambiadores de plástico blando pueden sufrir perforaciones, por ejemplo. Además de afectar el suministro de calor, esto también puede causar daños a las plantas circundantes. Todavía no existe una solución real

---

<sup>79</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

a estos problemas, excepto a corto plazo. Los problemas de regulación del calor están relacionados principalmente con las voluminosas instalaciones de intercambiadores de calor y su gran inercia. Por el momento, la mejor solución parece ser evitar situaciones en las que se requiera una regulación precisa (solo instalaciones simples, destinadas a mejorar las características de temperatura interior) y utilizar una combinación de tipos de instalación, algunas de las cuales son fáciles de controlar (Dickson & Fanelli, 2003).

#### ***Adaptación de soluciones tecnológicas a las condiciones locales***

Las condiciones y requisitos cambiantes del mercado tienen una influencia negativa en la elección de la energía geotérmica para la calefacción de invernadero. La energía geotérmica requiere mayores inversiones de capital que otros tipos de energía y, por lo tanto, implica períodos de recuperación más largos. Teniendo en cuenta que cada producción necesita un tipo específico de instalación de calefacción, se necesitan inversiones adicionales muy caras si cambiamos el tipo de cultivo. Es por esta razón que la energía geotérmica se ha utilizado hasta ahora para cultivos de "venta garantizada", como tomates, pepinos y claveles, y para construcciones de invernaderos simples y

baratas. Hoy en día, con una cantidad tan grande de instalaciones disponibles comercialmente, esto no es una limitación importante, pero aún no es posible realizar cambios drásticos; es decir, sólo se pueden conseguir buenos resultados con la misma instalación de calefacción si nos atenemos a cultivos similares (Dickson & Fanelli, 2003).

Las instalaciones de calefacción de baja posición que proporcionan un movimiento natural del aire en el invernadero ofrecen, en principio, mejores perfiles de temperatura vertical y menor consumo de calor (temperaturas del aire más bajas por debajo de las superficies frías del techo). Sin embargo, esta característica de estas instalaciones es también una de sus limitaciones, ya que no protegen a las plantas de la radiación fría del exterior, muy importante en regiones más frías y para algunas plantas de alto crecimiento. Por lo tanto, su uso está limitado a climas más suaves, cuando son la única instalación de calefacción en uso. Se debe utilizar una instalación auxiliar en climas más fríos para cubrir las demandas máximas de calefacción y proteger de la radiación fría (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>80</sup>.

Otro factor importante es la sombra de la planta por los elementos de la instalación de calefacción. Idealmente, debería haber la menor

---

<sup>80</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

sombra posible de la radiación solar entrante. Para plantas de bajo crecimiento, deben evitarse los elementos calefactores de posición media y alta; las plantas de alto crecimiento, por otro lado, deben recibir calor directamente en el dosel de la planta de los elementos en posiciones altas. La construcción de invernaderos puede limitar nuestra elección de instalación de calefacción. Los elementos calefactores pesados no pueden colgarse de construcciones de plástico livianas y baratas, y de manera similar, de equipos costosos altamente sofisticados. El clima local puede influir en nuestra elección en una u otra dirección. Por ejemplo, aunque la instalación óptima para el invernadero y para las plantas puede ser el movimiento natural del aire caliente, es posible que tengamos que recurrir al movimiento de aire forzado debido a los fuertes vientos locales, para reducir sus efectos negativos sobre la distribución horizontal de la temperatura (Dickson & Fanelli, 2003).

Un buen suministro de materiales es importante al elegir el tipo de instalación. Las piezas de repuesto, los materiales y el equipo deben ser fáciles de adquirir para garantizar el buen funcionamiento de las operaciones. La inercia térmica extremadamente pequeña de la construcción del invernadero no permitirá largas pausas para el mantenimiento (Dickson & Fanelli, 2003).

## **Impactos socioambientales**

### ***Ambientales***

Aunque se consideró una forma de energía "limpia" durante mucho tiempo, la energía geotérmica, de hecho, no lo es. Se pueden identificar al menos dos efectos negativos sobre el medio ambiente: la contaminación térmica y química, que son especialmente importantes cuando se trata de grandes caudales de agua termal, como en el caso de la calefacción de invernadero (Dickson & Fanelli, 2003).

La contaminación térmica es el resultado de un diseño técnico deficiente de las instalaciones de calefacción geotérmica, modificaciones irregulares del diseño para reducir los costos de inversión y uso irregular durante las operaciones de rutina. Como consecuencia, solo se utiliza la parte superior del intervalo de temperatura disponible, de modo que las aguas residuales se vierten a altas temperaturas, lo que representa un posible riesgo para el medio ambiente circundante (Dickson & Fanelli, 2003).

La contaminación química es el resultado de la composición química de las aguas termales, que a menudo contienen elementos agresivos y tóxicos; el desequilibrio químico también provocará descamación. Ambos fenómenos

tienen efectos negativos sobre el medio ambiente (Dickson & Fanelli, 2003)<sup>81</sup>.

Cualquier medida que se adopte para proteger el medio ambiente tendrá una influencia directa en la economía del uso de la energía geotérmica y los resultados positivos solo se pueden lograr mediante la legislación. Se deben hacer cumplir las regulaciones, prescribiendo la temperatura máxima de los efluentes térmicos y las concentraciones máximas de componentes químicos nocivos (Dickson & Fanelli, 2003).

Una forma de combatir la contaminación térmica es utilizar instalaciones de calefacción de baja temperatura o una combinación de instalaciones que garantice el uso de todo el intervalo de temperatura disponible. La única solución real a la contaminación química es reinyectar el agua usada, pero desafortunadamente esta también es la más cara. Solo unos pocos países tienen regulaciones para la protección del medio ambiente durante la explotación geotérmica. En los demás, y particularmente en los países en desarrollo, este problema se ha descuidado. Esto es lamentable, ya que las consecuencias negativas tarde o temprano se harán evidentes (Dickson & Fanelli, 2003).

### **Sociales**

Las costumbres locales tampoco deben descuidarse. Cabe recordar que pocos

operadores de invernaderos han tenido una formación técnica y son incapaces de apreciar de inmediato todas las ventajas de un nuevo tipo de instalación de calefacción. Es mejor evitar cambios drásticos y adoptar un enfoque paso a paso de pequeñas mejoras graduales.

---

<sup>81</sup> Dickson, M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

## Referencias

- Alfa Laval Co. (2004). *The theory behind heat transfer*. Recuperado el 10 de 03 de 2020, de [https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/heating-and-cooling-hub/alfa\\_laval\\_heating\\_and\\_cooling\\_hub\\_the\\_theory\\_behind\\_heat\\_transfer.pdf](https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/heating-and-cooling-hub/alfa_laval_heating_and_cooling_hub_the_theory_behind_heat_transfer.pdf)
- BARBIER, E., & FANELLI, M. (1977). Non-electrical uses of geothermal energy. *Progr. Energy Combustion Sci.*, 73-103.
- Barbosa, G. (1996). *Dehydration of foods* (Science+Business Media, B.V. ed.). Springer .
- BEAZ PALEO, J. (2007). *Ingeniería de la Acuicultura Marina. Instalaciones en tierra*. Madrid: Publicaciones Científicas y Tecnológicas del Observatorio Español de Acuicultura.
- Boyd, T. L., & Lineau, P. J. (1995-2006). Geothermal Heat Pump Performance. *Geo-Heat Center Bulletin*(64), 5.
- Budynas R., N. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (9a ed.). McGraw-Hill.
- Cafeli. (2013). *Cafeli*. Obtenido de <http://cafeli.com.mx/index.php/es/inicio-2/71-cafeli/beneficio/beneficio-humedo/257-secadora-tipo-guardiola>
- CALDERON, B. A. (2006). *Desarrollo de Acuicultura en estanquería rústica en el Rancho Los Ángeles, Puerto Rico, Carmen, Camp. MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL MODALIDAD PARTICULAR*. Ciudad del Carmen, Campeche.
- CANGEA. (2014). *Direct Utilization of Geothermal Energy: Suitable Applications and Opportunities for Canada*. Alberta, Canada: Canadian Geothermal Energy Association (CanGEA).
- Cárcel, F., & Martínez, D. (2015). *La Energía Geotérmica de Baja Entalpía*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- CITEmadera, C. d. (2009). *Técnicas de secado de la madera*. Lima.
- CLUTTER, T. (2001). Gators in the sage. *Geothermal Bulletin. Geothermal Resources Council*, 30(6), 246–9.
- Conor, N. (30 de 09 de 2019). *¿Qué es la entalpía?* Obtenido de Thermal Engineering: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-entalpia-definicion/>
- Dickson , M., & Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy: utilization and technology*. Bangalore, India: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Falcon, F. (2022). *Geotermia*. Obtenido de Asociación de Empresas de Energía Renovables: <https://www.appa.es/appa-geotermica-de-alta-entalpia/>
- FAO & INPhO, C. A. (1998). *FAO.ORG*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x5028s/x5028s02.htm>
- FAO, V. D. (1991). *FAO.ORG*. Obtenido de <s://www.fao.org/3/x5059s/x5059S03.htm#Secador%20de%20lecho%20fijo%20o%20de%20capa%20estacionaria>
- Garduño, A. M. (2018). *Diseño mecánico de un deshidratador geotérmico de alimentos de flujo vertical*. Ciudad de México, México.: Tesis de grado. UNAM.

- GEORSSON, L. S., & FRIDLEIFSSON, O. (1996). High technology in geothermal fish farming at Silfurstjarnan Ltd. N.E. Iceland. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 17(4), 23-8.
- Grupo iiDEA-Ingenera. (2020). *Usos Directos de la Geotermia en el proyecto geotérmico Celaya*. Ciudad de México. México.
- Guzmán, G. A. (2020). *Propuesta de diseño del sistema de calefacción geotérmica de baja entalpía para el cultivo de Cherax Quadricarinatus* (Trabajo de Grado ed.). Ciudad de México: UNAM.
- Holdman, G., & Erickson, D. (2006). Absortion chiller for the Chena hot springs Aurora Ice Museum. *Geo-Heat Center Bulletin*, 2.
- J.G.E.A. (1974). *Geothermal energy utilization in Japan*. Tokyo, Japan: Japan Geothermal Energy Association.
- Kavanaugh, S., & Gilbreath, C. (1995). *Cost containment for Ground-Sources Heat Pumps*. Tuscaloosa: The University of Alabama.
- Lienau, P. J. (1996). OIT Geothermal System Improvements. *Geo-Heat Center Bulletin*, 17(3), 5.
- Liu, X., Hughes, P., & Anderson, A. (2016). An Overview of Geothermal Heat Pump Applications and a Preliminary Assessment of Its Technical Potential in the United States. *GRC Transactions*, 40, 10.
- Lund, J. (2018). Geothermal (Ground-Source)Heat Pumps. México: Geo-Heat Center.
- Lund, J. W. (1988). Geothermal Heat Pump Utilization in the United States. *Geo-Heat Center Bulletin*, 11(1), 4.
- Lund, J. W. (1995). Geothermal Heat Pumps. *Geo-Heat Center*, 10.
- LUND, J. W., & KLEIN, R. (1995). Prawn park: Taupo, New Zealand. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 16(4), 27-9.
- Lund, J. W., & Toth, A. N. (2020). *Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review*. Reykjavik: Proceedings World Geothermal Congress 2020.
- Lund, J., Sanner, B., Rybach, R., Curtis, F., & Hellstrom, G. (2004). Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps a world overview. *Geo-Heat Center Bulletin*, 25(3), 10.
- Ma, W.-b., Luo, C., & Gong, Y.-l. (2010). An absortion Refrigeration System Used for Exploiting Mid-Low Temperature Geothermal Resource. Bali: Proceedings World Geothermal Congress 2010.
- Maupoey, P. F. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Oficina de Eficiencia Energética y Energía. (2020). *Ahorrador de energía*. Recuperado el 2 de octubre de 2020, de <https://www.energy.gov/energysaver/heat-and-cool/heat-pump-systems/geothermal-heat-pumps>
- Pacheco Mendoza, E. R. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. Ciudad de México, México: Tesis de grado. UNAM.
- Pérez González, E. (2014). *DISEÑO DE UN SISTEMA DESHIDRATADOR DE ALIMENTOS GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA*. Ciudad de México: Tesis de Grado. UNAM.
- POPOVSKI, K. (1988). Simple heating methods for mild Mediterranean climate conditions. Djerba-Tozeur.: ISHS Symp. on Simple

- Methods for Heating and Ventilating Greenhouses in Mild Climate Conditions.
- POPOVSKI, K. (1991). Engineering aspects of geothermal energy use in agriculture, guideline and textbook. Skopje, Macedonia.: International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy.
- Programa Energías Renovables-Eficiencia Energética. (1 de agosto de 2018). *La geotermia de usos directos podría dirigir el cambio económico y la inclusión social en América Latina*. Obtenido de SICA: <https://www.sica.int/consulta/Noticia.aspx?Idn=114492&idm=1>
- Rafferty, k. (1983). Absorption refrigeration: Cooling with hot water. *Geo-Heat Center Bulletin*, 8(1), 5.
- Rafferty, K. (1997). *An Information Survival Kit for the Prospective Geothermal Heat Pump Owner*. Klamath Falls: Geo-Heat Center.
- Rafferty, K. (1998). Absorption Refrigeration. *Geo-Heat Center Bulletin*, 4.
- RAFFERTY, K. (1999). Aquaculture in the Imperial Valley: A geothermal success story. . *Geo-Heat Center Quarterly*, 20(1), 1-4.
- Rafferty, K. (2000). Design issues in the commercial application of GSHP systems in the U.S. *Geo-Heat Center bulletin*, 21(1), 5.
- Sieber, M. (2010). *Bibliographic review on GHP's technology and suitability of its use for air conditioning purpose at Mexicali city*. Cuernavaca: Instituto de Investigaciones Electricas .
- SMITH, K. C. (1981). *A Layman's Guide to Geothermal Aquaculture*. Klamath Falls, Ore.
- Subsecretaría de Actividades Pesqueras y Desarroll. (2007). *Acuicultura*. Alabama, USA: Center for Aquaculture, Auburn University.
- Thain, I., Reyes, A., & Hunt, T. (2006). *A Practical Guide to Exploiting Low Temperature Geothermal Resources*. GNS Science Report 2006/09.
- Vidaña, M. (2013). *Notas de Cinética de Secado. Curso Taller de Secado Solar*. Morelos, México.